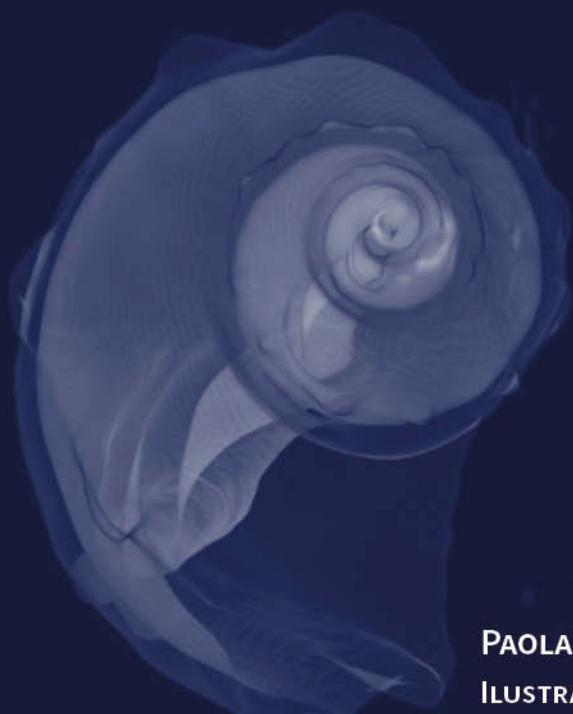


LA FÍSICA DE HACER VISIBLE LO INVISIBLE EN MEDICINA; TOMOGRAFÍAS

ARTURO AVENDAÑO ESTRADA

VÍCTOR MANUEL LARA CAMACHO



PAOLA MORENO IZAGUIRRE
ILUSTRADORA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

SEMINARIO SOBRE MEDICINA Y SALUD

Mtra. María del Rosario Gutiérrez Razo

Responsable del Seminario sobre Medicina y Salud

Dr. Luis Armando Martínez Gil

Responsable de la obra

DICTAMINADORES:

Dra. Belén Rivera Bravo

Jefa de la Unidad de Medicina Nuclear de Salud Digna

Dr. Enrique Estrada Lobato

Sección de Medicina Nuclear e Imágenes Diagnósticas del Organismo
Internacional de Energía Atómica (OIEA) perteneciente a la Organización de las
Naciones Unidas (ONU)



Facultad de Medicina



LA FÍSICA DE HACER VISIBLE LO INVISIBLE EN MEDICINA; TOMOGRAFÍAS

**ARTURO AVENDAÑO ESTRADA
VÍCTOR MANUEL LARA CAMACHO**

PAOLA MORENO IZAGUIRRE
Ilustradora



**Universidad Nacional Autónoma de México
México, 2024**

Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales de Información

Nombres: Avendaño-Estrada, Arturo, autor. | Lara Camacho, Víctor Manuel, autor. | Moreno Izaguirre, Paola, ilustrador.

Título: La física de hacer visible lo invisible en medicina; tomografías / Arturo Avendaño Estrada, Víctor Manuel Lara Camacho, autores ; Paola Moreno Izaguirre, ilustradora.

Descripción: Primera edición | México : Universidad Nacional Autónoma de México, 2024. | “Secretaría de Desarrollo Institucional, Facultad de Medicina, MyS UNAM”--Contraportada.

Identificadores: LIBRUNAM 2252105 (impreso) | LIBRUNAM 2252116 (libro electrónico) | ISBN 9786073097642 (impreso) | ISBN 9786073097635 (libro electrónico) (PDF).

Temas: Tomografía. | Rayos X. | Imágenes por resonancia magnética. | Medicina nuclear. | Radiografía médica -- Calidad de imagen.

Clasificación: LCC RC78.7.T6.A84 2024 (impreso) | LCC RC78.7.T6 (libro electrónico) | DDC 616.07572--dc23

Los contenidos de la obra fueron analizados con software de similitudes por lo que cumplen plenamente con los estándares científicos de integridad académica, de igual manera fue sometido a un riguroso proceso de dictaminación doble ciego con un resultado positivo, el cual garantiza la calidad académica de la obra, que fue aprobada por el Comité Editorial de la Secretaría de Desarrollo Institucional.

La edición y publicación de este libro fue financiada con recursos del Seminario sobre Medicina y Salud.

AVISO LEGAL

La obra *La física de hacer visible lo invisible en medicina; tomografías* fue publicada en versión impresa por la Secretaría de Desarrollo Institucional en diciembre de 2024, el cuidado de la edición fue realizada por la Mtra. María del Rosario Gutiérrez Razo y el Dr. Luis Armando Martínez Gil.

Esta edición de un ejemplar (12.1 MB) fue preparada por la Secretaría de Desarrollo Institucional de la UNAM, la producción y formación fueron realizados por Imelda Inclán Martínez.

Primera edición electrónica: 6 de diciembre de 2024.

D. R. © 2024 Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México

Secretaría de Desarrollo Institucional
Ciudad Universitaria, 8° piso de la Torre de Rectoría,
Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México

ISBN: 978-607-30-9763-5

Imagen de portada: Proyección tomográfica de un fósil, cortesía de la Unidad PET/CT, Facultad de Medicina, UNAM

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores.

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México/Made in Mexico

Contenido

Prólogo	11
Introducción	17
Capítulo 1	27
Principios básicos de materia y energía	28
Ondas, longitud de onda y frecuencia	29
Átomo	32
Radiactividad	38
Decaimientos radiactivos	40
Espectro electromagnético	46
Principales efectos de interacción fotones - materia	49
Detección de la radiación ionizante	59
Protección radiológica	60
Capítulo 2	67
Radiografías	67
Proyecciones	68
Tomografías	70
Tomografía computarizada	71
Breve historia de la tomografía computada	76
Resonancia magnética	83
Magnetismo	83
Espín giromagnético	86
Imagen por resonancia magnética	87
Codificación de frecuencia y Transformada de Fourier	93
Resonancia magnética funcional	96
Imágenes por difusión	98
Espectroscopia	101

Medicina nuclear e imagen molecular	103
Radioisótopos en PET	110
Producción de radionúclidos para uso médico	111
Detectores	122
PEM	125
Aplicaciones teranósticas	128
Capítulo 3	130
Aplicaciones de imágenes tomográficas	130
Aplicaciones clínicas	131
Otras aplicaciones	152
Tendencias, futuro y ejemplos de la imagenología	153
Radiómica	154
Inteligencia artificial en imagen	158
Ejemplos	162
Tomografía computada	163
MRI	165
Resonancia magnética en animales	166
PET	168
SPECT	170
Fusión de tomografías	171
Epílogo	173
Glosario	177
Referencias	179

La vida es breve,
el arte es largo,
la oportunidad fugaz,
la experiencia engañosa
y el juicio difícil
Hipócrates

Prólogo

Miguel Ángel Olarte Casas

Encargado de la Unidad PET/CT, Facultad de Medicina, UNAM

No podemos negar que todos los avances en la ciencia y en especial en la medicina, en el área de la imagen diagnóstica, tienen como fin postergar la muerte, atenuar el dolor y reestablecer el estado de bienestar, sin embargo, al ser de carne y hueso, "y sujetos supremos del estudio de toda filosofía", como lo refiere Unamuno (1970, pp. 1-3), estamos sometidos a un proceso de desgaste. Nacemos con la garantía de extinguirnos en algún momento. El pasar del tiempo se ve reflejado en el fallo de nuestras células, tejidos y órganos. El camino a recorrer puede ser corto, largo, ligero o abrupto según las circunstancias endógenas y externas que nos toque vivir. Para Unamuno "lo que determina a un hombre, lo que le hace un hombre, uno y no otro, el que es y no el que no es, es un principio de unidad y un principio de continuidad", pero ¿qué sucede cuando se rompe esa unidad y la continuidad se ve obstaculizada por la pérdida de la homeostasis? La forma en cómo recibimos y procesamos la enfermedad y muerte es determinante para darle un sentido a la vida. Frente a la falencia se pierde el sentimiento de sentirse uno mismo, es decir, ajeno al propio ser y con el deseo de ser otro. La actitud fatalista frente a estas condiciones nos victimiza hasta el punto de evitar la completa comprensión de estos procesos que muy bien pueden ser entendidos o identificados mediante estudios de imagen. La evasión de la enfermedad y muerte

nos condiciona a la no existencia que, aunque sea dolorosa o desafortunada, se tiene la conciencia de ser y estar, ya que en la enfermedad no solo se piensa con el cerebro, sino se reacciona con las vísceras, con la sangre, la linfa, la flema y la bilis, con el alma, con la vida misma; por ello se debe tener una postura de resignación o resignificación de estos conceptos para replantear los significados ya aprendidos y ganar de nuevo "el derecho a la vida".

¿Por qué huimos de la enfermedad y la muerte? Quizá porque no las entendemos. La enfermedad al ser una disociación orgánica, como la describe Unamuno, nos permite el conocimiento o reconocimiento de quienes somos y de nuestras capacidades y limitaciones, pero, sobre todo, de la vulnerabilidad de nuestra existencia. Claude Bernard postuló que "no hay enfermedades sino enfermos" con el fin de explicar que el estado patológico se vive de forma diferente en cada individuo, inclusive si la causa es el mismo patógeno o factor condicionante. La enfermedad además de afectar lo orgánico, también merma la psique de quien la padece, hasta el punto de incapacitarlo por el pobre entendimiento de lo que está ocurriendo en su ser. El estado patógeno se vive de manera diferente según la economía de quien la padece, el tipo de enfermedad que se adquiere y el acceso a una atención médica adecuada y oportuna. Bajo esta condición se modifica el sentir y actuar frente a uno mismo y los otros, lo que obliga a preguntarnos ¿para qué todo esto? y ¿con qué fin?

Sin duda, todos preferimos estar sanos, pero para Unamuno "un hombre perfectamente sano no sería ya un hombre, sino un animal irracional". ¿Es entonces la falla o la falencia lo que nos da la racionalidad? o ¿es en este estado de vulnerabilidad cuando sentimos la necesidad de buscar y encontrar dicha racionalidad?

Si no existiera una carencia o deseo podríamos mantenernos en una postura pasiva que, aunque no agradable, se convierte en zona de confort. Incluso existen aquellos que encuentran en la enfermedad un sentido para vivir; el motivo de su ser es la búsqueda de algo por alguna carencia. Mario A. Rigoni menciona que, “con la enfermedad se adquiere un rostro y se construye un escenario a los ojos propios y ajenos: un llamado del destino” (Rigoni, 2017, pp. 45-50). La enfermedad en la sociedad también se concibe como una fantasía punitiva o sentimental y no como una pérdida del equilibrio biopsicosocial de una persona, pero ¿quién vive en este supuesto equilibrio? Para Schopenhauer, “solo en un cuerpo sano y organizado puede estar presente la voluntad” (Schopenhauer, 2020, pp. 56-80), por lo tanto, una persona enferma tiene la voluntad enferma también, y esto en parte porque posee un mal entendimiento de su enfermedad.

Para poder generar un cambio de los significados de enfermedad y muerte podemos ayudarnos de diferentes disciplinas: una de ellas es la medicina, ya que utiliza la semiología y la propedéutica para reconocer las patologías a través del reconocimiento de signos y síntomas, para así poder interpretar a los pacientes. Otras disciplinas como la semiótica en conjunto con la filosofía y literatura ayudarían a la medicina para la resignación o resignificación de la enfermedad y muerte, sin llegar a romantizarlas.

Si tomamos como premisa el precepto de Unamuno al plantear que “las ciencias, importándonos tanto y siendo indispensables para nuestra vida y nuestro pensamiento, nos son, en cierto sentido, más extrañas que la filosofía”, entonces podemos afirmar que la filosofía, la literatura y la medicina son artes que comparten muchos aspectos entre sí, de hecho, no se podría entender una sin las otras; de tal manera que han ido creciendo a la par en una evolución constante,

con cierta complicidad. Cada una cuenta lo que sucede en torno a la otra. La literatura, la filosofía y la medicina nos dan una clara visión de la situación económica, política y social del momento referido, así como de las dolencias o males que aquejan a los hombres en un momento histórico, con su remedio o tratamiento vigente en una determinada época. Para el doctor Fieding H. Garrison (Garrison, 1929, p. 18), la historia de la medicina es la historia de la humanidad misma con sus altas y bajas, sus grandes aspiraciones hacia un fin y una verdad y, sus fracasos patéticos. El tema puede tratarse en diversas formas, ya como un desfile de acontecimientos, una procesión de personajes, una revisión de libros, una sucesión de teorías, una exposición de ineptitudes humanas o como la médula misma de toda nuestra historia cultural. La literatura y la filosofía a modo de cronistas, nos han revelado los avances y retrocesos que la medicina ha tenido desde sus inicios, ya sea de forma cruda o romántica, y de igual forma han permitido la difusión de estos conocimientos médicos a otras latitudes.

Debemos reconocer que la medicina es un arte natural creada a partir del dolor, la compasión y la necesidad: sentimientos y síntomas que bien pueden ser plasmados a través de las letras para poder ser leídos por otros. La conjunción de todas estas áreas permite deslindar a la enfermedad y la muerte de preceptos negativos como la conmisericordia, la pena y el menosprecio y, lo transforma entonces como en motor y empuje para la búsqueda de un bien mayor a través de la voluntad. Si en el andar no es posible restablecer la homeostasis, entonces existe también la posibilidad de no aceptar la enfermedad y acelerar la culminación para evitar el dolor sin sentimientos de culpa o desaprobación.

La medicina recurre a la semiología y la propedéutica para reconocer las patologías que afligen a otros, a través

del reconocimiento de signos y síntomas que integren algún síndrome, para así poder interpretar a los pacientes; es decir, en la práctica clínica se decodifican las manifestaciones clínicas como si fueran códigos emitidos por el enfermo que es el emisor y el médico como receptor en un contexto hospitalario: un acto del habla en el diálogo médico-paciente que permite el entendimiento y saneamiento de estos. Desde el surgimiento de los métodos diagnósticos, la semiología cobró más fuerza, ya que es a través de estos métodos que se confirma o descarta el diagnóstico sospechado. Los estudios de imagen se han convertido en una herramienta de los médicos para poder actuar de forma oportuna y precisa frente a cada paciente que acude con ellos.

Por más avanzados y tecnológicos que nos creamos, el actuar del médico no difiere a la del chaman, ya que tanto en la magia como en la relación médico-paciente se necesitan tres factores importantes para lograr la curación: “la creencia del hechicero en la eficacia de sus técnicas, luego, la del enfermo que aquél cuida o de la víctima que persigue, en el poder del hechicero mismo; finalmente, la confianza y exigencias de la opinión colectiva”. Así, en torno de estos elementos, se definen y sitúan las relaciones entre el brujo o médico y aquellos a quienes se pretende tratar o curar (Lévi-Strauss, 1978, p. 1). El médico, como autoridad en su área, es quien posee el poder o voluntad de verdad dentro de su disciplina la cual “se define por un ámbito de objetos, un conjunto de métodos, un corpus de proposiciones consideradas verdaderas, un juego de reglas y de definiciones, de técnicas y de instrumentos” como lo menciona Foucault (2013). La enunciación o proposición del médico debe utilizar instrumentos conceptuales o técnicos bien definidos (como los son los estudios de imagen diagnóstica), sin embargo, esta información puede no ser decodificada de forma adecuada por el paciente, ya

sea por el desconocimiento de los tecnicismos médicos o un malentendido de los conceptos. Foucault, en *El orden del discurso* (Foucault, 2013, pp. 33-34), menciona que “una proposición debe cumplir complejas y graves exigencias para poder pertenecer al conjunto de una disciplina antes de poder ser llamada verdadera o falsa”, o correcta o no.

En el ámbito médico es prescindible reconocer las representaciones mentales que el paciente o enfermo posee de la enfermedad con el fin de explicar la subjetividad que se tiene con respecto a la enfermedad, ya que como menciona Escandell: “nuestro comportamiento está condicionado no por la realidad tal como es, sino por la manera (correcta o no) en que la percibimos (Escandell, 1993, p. 5).

Introducción

Creo que la verdad está bien en las
matemáticas, en la química, en la filosofía.
No en la vida. En la vida es más importante la
ilusión, la imaginación, el deseo, la esperanza.
Además, ¿sabemos acaso lo que es la verdad?"

Ernesto Sábato

Las tomografías no solamente nos permiten visualizar anatómicamente cómo estamos constituidos por dentro, también nos ayudan a ver qué funciones realizan los diversos órganos y tejidos que nos componen, incluso, permiten inferir procesos fisiológicos a nivel celular y molecular. La curiosidad por estudiar esas estructuras y sus funciones no es nueva, ya desde los orígenes de la humanidad, todas las civilizaciones intentaron explicar las diversas funciones y como estaban constituidos los órganos de nuestro cuerpo, así, los antiguos egipcios priorizaban la conservación de órganos que creían más importantes como el hígado, intestinos, pulmones el estómago y el corazón, delegando la función de cerebro a un órgano secundario (Asimov, 1998, pp. 19-20). Otras civilizaciones como los mexicas concibieron al corazón (*yollotl*) como el centro de la conciencia y la vida dando importancia a la sangre y al sistema circulatorio como fuente de vida (León-Portilla, 1961, pp. 45-50). La interpretación de la función de los órganos estaba muchas veces ligada a cuestiones divinas o a la muerte y el renacimiento. Para poder realizar esas interpretaciones místicas, tuvieron que conocer la anatomía humana, lo cual lo hacían por medio de disecciones, ya sea con fines funerarios, de sacrificio o curativas. Otras culturas como la china, griega, mesopotámica, hindú, maya e inca desarrollaron distintos niveles de conocimiento en medicina, sabiendo,

entre otras cosas, el efecto herbolario en el cuerpo humano (Campbell, 2017, pp. 241-303).

Aunque el conocimiento de la estructura y función se desarrolló en mayor o menor medida en esas culturas, no fue hasta el Renacimiento que se comenzó a estudiar el cuerpo humano de forma sistemática por medio de disecciones, ilustradas magistralmente en obras como *De humani corporis fabrica* de Vesalius (Vesalius, 1543) y los estudios anatómicos de Leonardo Da Vinci (Clayton, 2012), obras realizadas de la experiencia de examinar cuerpos humanos post mortem que permitían ver cómo estamos constituidos anatómicamente por dentro e inferir las distintas funciones. En nuestros días, es posible realizar esas tareas en seres vivos sin necesidad si quiera de hacer un corte en la piel, gracias a los distintos métodos de imagen como se ilustra en la figura 1.

Tiempo después, restituida la importancia del cerebro, filósofos como Rene Descartes se planteaban problemas como el sitio del alma en el cerebro, pensando erróneamente que se encontraba en la pituitaria (Descartes, 2010, pp. 153-158). En la actualidad sabemos que no hay una única estructura en el cerebro que se encarga de las cuestiones del alma, o del “ser”, como los filósofos llaman, sino que más bien es un conjunto de conexiones químicas, físicas y sinápticas lo que nos hacen percibir el ser. Esta y otras cuestiones están siendo resueltas gracias a las imágenes médicas y la inteligencia artificial, entre otras técnicas. Aunque ahora sabemos más que nuestros antepasados, ¿o no?, aún queda mucho por descubrir, como lo describe literariamente el escritor franco-checo Milan Kundera:

... el hombre oía extrañado el sonido de un golpeteo regular dentro de su pecho y no tenía ni idea de su origen. No podía identificarse con algo tan extraño y desconocido como era el cuerpo. El cuerpo era una jaula y dentro de

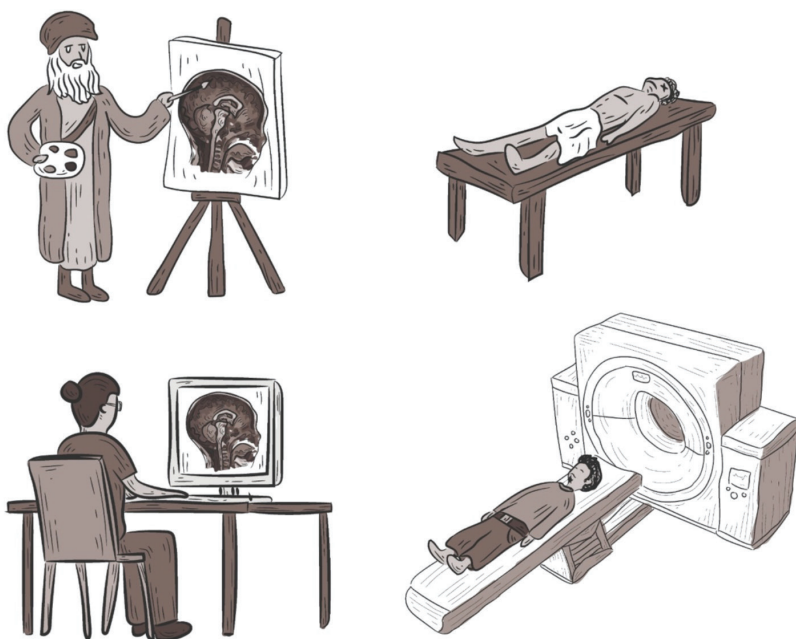


Figura 1. Ilustración de Leonardo Da Vinci dibujando el cráneo de un cadáver y el cráneo de un humano vivo, visto por medio de una tomografía. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

ella había algo que miraba, escuchaba, temía, pensaba y se extrañaba; ese algo, ese resto que quedaba al sustraerle el cuerpo, eso era el alma. Hoy, por supuesto, el cuerpo no es desconocido...la cara no es más que una especie de tablero de instrumentos en el que desembocan todos los mecanismos del cuerpo: la digestión, la vista, la audición, la respiración, el pensamiento. Ahora también sabemos que el alma no es más que la actividad de la materia gris del cerebro. La dualidad entre el cuerpo y el alma ha quedado velada por los términos científicos y podemos reírnos alegremente de ella como de un prejuicio pasado de moda. Pero basta que el hombre se enamore como un loco y tenga que oír al mismo tiempo el sonido de sus tripas, la unidad del cuerpo

y el alma, esa ilusión lírica de la era científica se disipa repentinamente. (Kundera, 1985, pp. 24-25).

En la actualidad, gracias a las imágenes médicas, muchos procesos fisiológicos y anatómicos están entendiéndose, aparte de la gran utilidad que tienen en la medicina. Una de las razones de su importancia clínica (existen dos especialidades médicas enfocadas a estudiar imágenes, radiología y medicina nuclear e imagen molecular) es porque ayudan a diagnosticar de manera eficaz un amplio espectro de enfermedades. Los seres vivos siempre nos hemos enfermado (y lo seguiremos haciendo) pues como decía el biólogo evolutivo, Richard Dawkins, estamos constituidos de genes egoístas que tienen como objetivo perpetuar la especie y una vez que lo logran, la naturaleza busca la forma de eliminarnos (Dawkins, 1990, pp. 76-78). Por lo anterior, no es raro que en el ser humano las enfermedades graves comienzan en la edad adulta, una vez que nos reproducimos y tenemos descendencia capaz de valerse por sí misma. Sin embargo, las enfermedades pueden llegar en cualquier momento, habiendo niños con enfermedades oncológicas o personas con trastornos psiquiátricos que les impiden tener una buena calidad de vida.

Para ejemplificar lo anterior, en la figura 2 se ilustra la incidencia de estudios realizados en un centro de imagen para diagnosticar enfermedades oncológicas en función de la edad de los pacientes, se puede observar que a edades tempranas de la vida, cuando somos niños, adolescentes y adultos jóvenes la incidencia es más o menos constante, una vez que cumplimos 40 años la incidencia comienza a aumentar (edad en que un ser humano ya tuvo tiempo de reproducirse y tener hijos adultos independientes). A partir de esa edad muchas enfermedades comienzan con mayor frecuencia, llegando a un

máximo alrededor de los 60 años, edad en la cual la esperanza de vida comienza a disminuir considerablemente.

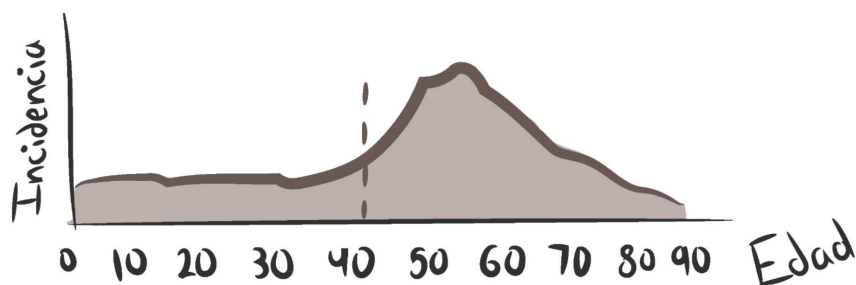


Figura 2. Estudios realizados en un centro de imagen para diagnóstico de enfermedades oncológicas en función de la edad. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Cuando existe sospecha de una enfermedad no siempre es fácil detectarla y conseguir un diagnóstico preciso. Los médicos no siempre pueden diagnosticar simplemente examinándonos con sus sentidos (vista, olfato, tacto) y su experiencia (el ojo clínico), en muchas ocasiones es necesario realizar análisis de la sangre de un paciente o extraer una pequeña parte de un tejido y analizarla en un laboratorio. Con lo anterior, los médicos tienen información útil sobre el tipo de enfermedad y qué tan avanzada se encuentra, aun así, no siempre es posible proporcionar información suficiente para determinar en qué sitio se encuentra el origen de alguna enfermedad o los sitios que están afectados. Para lo anterior, se han desarrollado métodos de imágenes médicas, los cuales utilizan diferentes principios físicos para observar el interior de las personas sin necesidad de causarles daño. Las imágenes médicas ayudan a diagnosticar una enfermedad, determinar su ubicación en el cuerpo y averiguar qué tan grave es. Hoy en día, también permiten observar lo que no podemos ver dentro del cuerpo

humano, las tomografías son ejemplo del esplendor al que puede llegar el intelecto humano; una tomografía es el resultado del cúmulo de conocimientos y técnicas adquiridas por la civilización durante siglos de desarrollo científico. Los conocimientos para crear una imagen médica han requerido no solo del dominio de las ciencias médicas sino también del desarrollo en otras áreas, en especial la física, química, matemática, cómputo, ingeniería y biología.

Las tomografías son de los avances tecnológicos más destacados en la historia de la humanidad. Durante el siglo XX se logró, como nunca, una comprensión científica en todas las áreas del conocimiento, creando tecnologías jamás realizadas en los años precedentes. En ese siglo se desarrollaron sofisticados equipos que permitieron estudiar desde lo más pequeño (escalas microscópicas) hasta lo de mayor tamaño (escalas macroscópicas), desarrollando potentes microscopios y telescopios, que sirvieron para entender la materia a nivel subatómico, atómico, molecular, celular, tisular hasta escalas gigantescas como hoyos negros, que nos dieron un mejor entendimiento del universo, así como de nosotros mismos. Ese entendimiento impulsó el desarrollo de todos los métodos de imagen, así como otros grandes logros como aceleradores de partículas, computadoras, la clonación, los aviones interoceánicos (que tanto acortan distancias), magnas obras arquitectónicas, teléfonos celulares, naves espaciales y el desarrollo de internet. El aporte de la ciencia en medicina de ese siglo es asombroso pues no solo se descubrió el ADN, sino que se codificó todo el genoma humano, se crearon vacunas como nunca antes, prótesis, marcapasos, equipos médicos de tecnología avanzada, como los equipos de radioterapia, útiles en el tratamiento oncológico, etc. y se entendieron diversos procesos en la salud y enfermedad permitiendo el desarrollo de medicinas para enfermedades

antes incurables y equipos de terapia que nos ayudan a respirar artificialmente o sirven para generar radiación que ayuda a eliminar un tumor.

Las imágenes médicas han tenido un gran impacto en la medicina, beneficiando a mucha gente en todo el mundo, aunque lamentablemente, no por igual. Se podría decir que es uno de los mejores inventos de la historia que llegó a facilitar el diagnóstico clínico y ha tenido un impacto en la humanidad comparable a la invención de la rueda o la escritura. No es exagerado decir que los métodos de imagen médica, junto con los análisis de laboratorio, son hoy en día los ojos de la medicina, sin los cuales el diagnóstico clínico no sería tan diferente de lo que fue hace 500 años.

Aunque proteger al vulnerable no es exclusivo de la medicina, cierto es que, desde el punto de vista humano, esta lo ha llevado a su nivel más alto. Ahora bien, desde el punto de vista antropológico y quizás antropocentrista, se puede decir que se ven muestras de civilización en las culturas cuando el más débil sana o se recupera de una enfermedad debido a la ayuda de su propia especie; si este hecho señala el inicio de una civilización, las imágenes médicas marcan su cúspide, pues no solo ayudan a proteger al más débil, dándole un mejor diagnóstico, y así mayor probabilidad de sobrevivir, sino que se requiere de la aplicación de un amplio conocimiento científico para realizar este noble fin. El grado de civilización de cualquier ser vivo en el universo, podría evaluarse no por su capacidad de tener naves interestaciales o grandes telescopios, sino por su capacidad de crear tecnología para sanar al más débil.

Hoy en día, el uso de imágenes médicas es tan común que quizás no nos detenemos a pensar en todo el conocimiento que se requiere para obtenerlas. Una tomografía es

una imagen en tercera dimensión que nos permite ver lo invisible dentro de un cuerpo humano o de casi cualquier material, como se ilustra en la figura 3, donde se pueden observar distintos cortes que se obtienen de una imagen tomográfica de cerebro en tercera dimensión (3D).

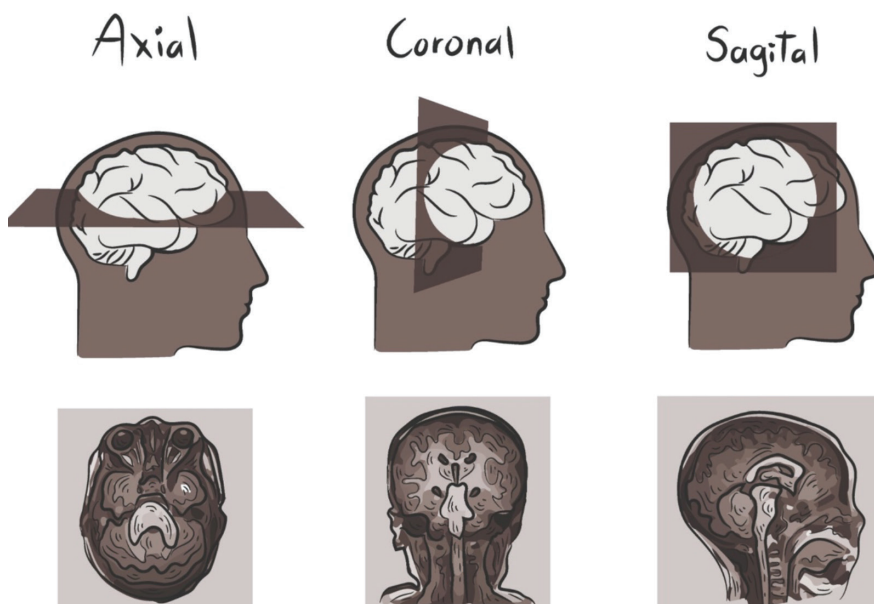


Figura 3. Proyecciones del cerebro en cortes axial, coronal y sagital. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

El conocimiento para realizar una imagen de este tipo, ha requerido el entendimiento de los procesos físicos de la naturaleza adquiridos y aplicados en forma de tecnología a lo largo de la historia de la humanidad. Esta modalidad de imagen se desarrolló durante el siglo XX al lograrse entender, al menos en parte, diversos procesos de la naturaleza; también se consiguió concebir de mejor manera el átomo y su estructura

desarrollando la física cuántica y se comenzaron a deducir diversos procesos bioquímicos y genéticos, aunado a eso, la matemática aplicada permitió el desarrollo de inteligencia artificial y diversos métodos que son usados actualmente en imágenes médicas. Todo esto benefició enormemente a la medicina, al poder observar minuciosamente dentro de un cuerpo, mejorando con ello los diagnósticos de un sin número de enfermedades, haciendo realidad el sueño de la medicina personalizada, la cual tiene como objetivo tratar al paciente (el que padece) y no a la enfermedad.

Somos afortunados de contar con estos métodos de imagen que hacen que la medicina sea diferente a como lo fue durante siglos, en gran parte al entendimiento genético, fisiológico y molecular. Las tomografías tienen un enorme impacto práctico a la hora de hacer un diagnóstico pues están ampliamente disponibles en los hospitales y se adquieren e interpretan en tiempos relativamente cortos. Estos métodos de imagen ayudan no solo a mejorar el diagnóstico médico, sino que favorecen para entender el origen de enfermedades, predecir el desenlace de una enfermedad y también a entender cómo funciona nuestro propio organismo.

Cuando tengas una imagen médica en tus manos, o en una pantalla, piensa que tienes, quizás, el invento más complejo que ha sido desarrollado por los humanos. Pero no nos dejemos engañar, aunque el proceso de preparación, adquisición y procesamiento de una imagen es complejo, los principios físicos necesarios para obtenerlas son relativamente sencillos, todas las técnicas de imágenes están basadas en transformar un tipo de energía en otra y tratar de detectar esos cambios. Este libro no pretende ser un compendio de las ideas que fueron necesarias para el desarrollo de la imagenología, simplemente tiene la intención de alentar al lector a conocer un pequeño esbozo del conocimiento científico

que hace posible adquirirlas, animándolo a entrar en el hermoso mundo de la física y la medicina.

Las tomografías no solo han sido un gran aporte en el área médica, sino que han beneficiado al avance del conocimiento en áreas como la arqueología, antropología, veterinaria, medicina forense, ingeniería, paleontología, geología, neurociencias, el arte, entre otras, como veremos brevemente en este texto. El cual está dividido en tres secciones, describiendo primero las bases de física necesarias para entender las transformaciones de energía involucradas en la formación de una imagen médica, posteriormente se exploran los principios básicos de las distintas modalidades de tomografía que existen en la actualidad (tomografía computada, resonancia magnética, tomografía por emisión de positrones y tomografía por emisión de fotón único), y por último, se describe el estado del arte y el futuro de la imagenología, para concluir con algunas aplicaciones usadas en la actualidad.

Capítulo 1

Si he logrado ver más lejos
ha sido porque he subido
a hombros de gigantes

Sir Isaac Newton

La curiosidad humana ha sido el motor de innumerables hallazgos y desarrollos científicos que han revolucionado la forma en que percibimos el mundo. Uno de los grandes logros de la humanidad ha sido la comprensión de la luz, su estudio y más aún sus aplicaciones. Un ejemplo simple de lo anterior es el uso de la luz para generar imágenes que nos ayudan a capturar un momento o un recuerdo por medio de una fotografía. Otro ejemplo del uso de la luz, son aquellas imágenes con fines médicos, que representan una estructura, un órgano o todo nuestro cuerpo y transmiten información útil para un diagnóstico o ayudar a tomar una mejor decisión para nuestro bien.

Mi primera experiencia con este tipo de imágenes, fue cuando tenía ocho años. Mis padres me llevaron al dentista, recuerdo que en las paredes de la sala había diferentes imágenes, en todas se mostraban dientes y muelas, pero mi sorpresa fue mayúscula cuando me mostraron la imagen que tenía mis propios dientes con la cual el médico le explicaba a mis padres cómo esa imagen le ayudaba a ver la posición de los dientes. Con esa placa en blanco y negro no comprendí nada, pero la existencia de ese tipo de imágenes me dejó impresionado. En los años posteriores, durante mis estudios preuniversitarios, vi una imagen en un libro de psicología de las áreas que estaban activas en el cerebro de las personas cuando realizaban alguna tarea como hablar o escuchar

música. Esa imagen se me hizo fantástica pues me parecía increíble que existieran aparatos que pudieran “ver” lo que pensamos. Para ese momento ya había decidido estudiar la carrera de física y pensé ¡qué lástima que nunca podré estudiar ese tipo de imágenes! Qué equivocado estaba.

Esas “fotografías” del interior del cuerpo humano se pueden realizar gracias a la tecnología desarrollada por el entendimiento de la radiación, átomos e interacciones, en otras palabras, a la FÍSICA: energía, materia y sus interacciones. En este capítulo se describen los conceptos elementales de física que permiten sentar las bases para crear una imagen médica.

Principios básicos de materia y energía

La energía y la materia son conceptos que están íntimamente relacionados. Antes de entrar a detalle, vamos a considerar una definición apropiada para cada término, la energía es la capacidad de un cuerpo para realizar un trabajo, mientras que la materia es todo aquello que ocupa un lugar en el espacio (Tippens, 2007). Tomando en cuenta lo escrito, nos hacemos la pregunta siguiente: ¿cómo estas definiciones están relacionadas? En la mecánica clásica o mecánica newtoniana entender la relación es un tanto más difícil, pues desde nuestras primeras clases de física hemos aprendido que todo cuerpo en el espacio está constituido por materia, y que, para moverse, este requiere un estímulo externo, una fuerza que actúe sobre él (Halliday & Resnick, 1986). Una vez con esta interacción, el móvil se desplaza a una determinada distancia, a lo que en física se le llama trabajo mecánico y, es este trabajo que entendemos como energía, en particular es energía cinética gastada para realizar la actividad.

Por el contrario, analizar estos conceptos desde la lupa de la mecánica cuántica hace la tarea más fácil, la relación masa-energía puede entenderse como sinónimos, explicando esta aseveración con la célebre ecuación de Einstein, que dice: la energía (E) es igual al producto de la masa (m) por la velocidad de la luz (c) al cuadrado ($E = mc^2$). Por consiguiente, es válido pensar que la masa es energía con relación a las partículas atómicas y fotones (Beiser, 2003).

También, el hablar de energía, no debe omitirse que la radiación electromagnética, es decir, los fotones son una forma de energía, que se caracteriza por su comportamiento dual, tanto onda como partícula ($E=h\nu$, hipótesis de De Broglie). Es gracias a estas propiedades de la naturaleza y la detección de esta que se pueden obtener imágenes tomográficas, como veremos más adelante.

Ondas, longitud de onda y frecuencia

Seguramente, todos hemos escuchado en algún momento la palabra onda u ondas, una manera de comprender este concepto es imaginar que tomamos una cuerda para saltar. Tomando la cuerda por un extremo y aplicando fuerza en forma circular con la muñeca de nuestra mano, de inmediato se observa que la cuerda se mueve en una forma particular, describiendo una curva, también suelen aparecer ciertas fluctuaciones en el movimiento que se denominan oscilaciones, las cuales se modelan a través de curvas sinusoidales (es decir, que pueden describirse mediante la función trigonométrica de seno). Estas oscilaciones son llamadas ondas, las cuales se caracterizan por tener las siguientes componentes: una cresta, un valle, una amplitud de onda, nodos, la longitud de onda y una frecuencia (figura 4).

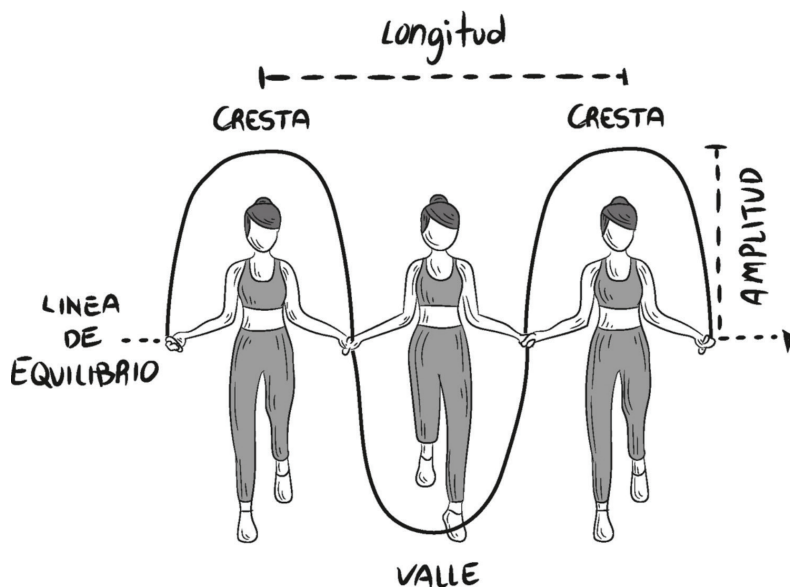


Figura 4. Representación de las componentes de una onda mediante el movimiento de una cuerda al brincar sobre ella en el popular juego. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Puntualizando las características de la onda y ayudándonos de la imagen anterior, podemos notar que la onda presenta: **cresta**, es la máxima amplitud de una onda, las crestas pueden ser constantes en la onda; **valle**, se le conoce así al punto más bajo de una onda; **amplitud** (a), es la elongación que alcanza la onda desde el punto de equilibrio al punto más alejado en la misma; **nodo**, es el punto de equilibrio en una onda, es decir, es el punto donde la amplitud es cero (mínimo); **longitud de onda** (λ), es la distancia que existe entre dos ciclos repetitivos en una onda, es decir, la distancia entre cresta y cresta o entre valle y valle; **frecuencia** (ω), son las oscilaciones que presenta la onda, también se define como el inverso del periodo (Halliday & Resnick, 1986; Resnick et al., 2002a).

Cabe señalar que, la frecuencia de una onda está estrechamente relacionada con su longitud de onda, de tal manera que el producto de estas determina su velocidad. Por lo tanto, puede notarse que entre mayor sea la frecuencia de oscilación, menor será la longitud de onda y viceversa.

La clasificación de las ondas se realiza en función a la dimensión en la que se mueven, por ejemplo: ondas unidimensionales (son ondas lineales), bidimensionales (ondas planas) y tridimensionales (ondas esféricas). También, las ondas pueden ser de índole mecánico (como las ondas de presión, por ejemplo, el sonido) u ondas electromagnéticas como la luz.

Una de las principales diferencias entre las ondas mecánicas y las no mecánicas, es que las primeras requieren un medio para propagarse mientras que las segundas pueden viajar tanto en un medio como en el vacío. Adicionalmente, una onda electromagnética presenta dos componentes, un campo eléctrico (**E**) y un campo magnético (**B**), así como una dirección de propagación, que se denomina vector de propagación (**k**), las tres cantidades son perpendiculares una respecto a los otros (Hecht, 2017; Resnick *et al.*, 2002b; Tippens, 2007), tal como se muestra en la figura 5.

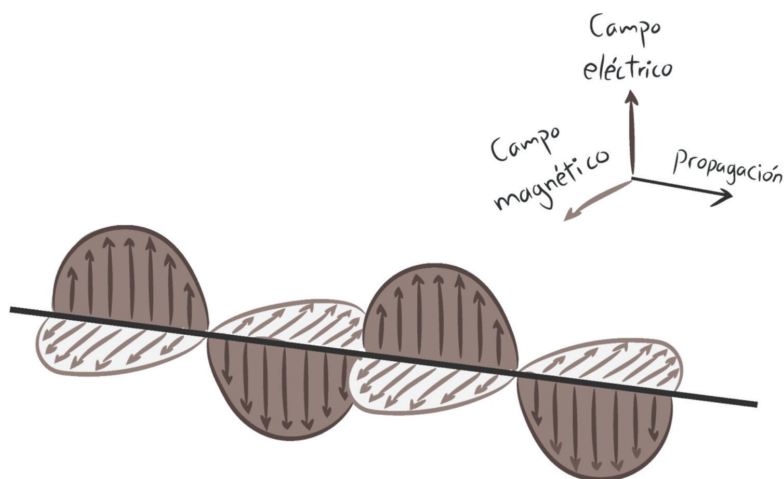


Figura 5. Onda electromagnética en movimiento, se ilustran los campos, eléctrico y magnético perpendiculares al vector de propagación (línea negra). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

En el caso particular, cuando la onda electromagnética presente un solo componente, es decir, solo un campo y el vector de propagación, se le conoce como una onda polarizada (Hecht, 2017) y es ampliamente usada para estudiar la dirección y estructura de diversos materiales (como polímeros, películas e incluso proteínas).

Átomo

La palabra átomo comparte etimología con la tomografía, siendo el prefijo “tomo” que significa parte o división de algo, en contraste, el prefijo “a” tiene la función de negación, por consiguiente, átomo, palabra acuñada por Demócrito de Abdera (400 a.C.), significa sin divisiones o simplemente,

indivisible. Actualmente, sabemos que el átomo está conformado por partículas más pequeñas como protones, neutrones y electrones, que a su vez las dos primeras partículas también denominadas nucleones están formadas por quarks (explícitamente con tres cada nucleón).

Hasta la fecha, de acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, (IUPAC, por sus siglas en inglés) existen 118 elementos químicos, los cuales pueden clasificarse como naturales y sintéticos (<https://Council.Science/Es/Member/International-Union-of-Pure-and-Applied-Chemistry-Iupac/>), los primeros son aquellos que se encuentran en la naturaleza, incluso elementos con abundancia pequeña en comparación con otros elementos. Por otra parte, los elementos sintéticos, como el nombre lo indica, son aquellos fabricados por el ser humano a partir de aceleradores a través del bombardeo de partículas que transmutarán al núcleo atómico (ver capítulo 3), siendo la radiactividad una característica de muchos de estos. Cada elemento, desde el hidrógeno (elemento más ligero, compuesto de un solo protón) hasta el más pesado, están formado por diferentes números de protones con carga eléctrica positiva, neutrones sin carga y electrones cargados negativamente orbitando al núcleo.

La nomenclatura para referirse a cualquier elemento e identificarlos unos respecto a otros, se ha definido de la siguiente manera: símbolo químico del elemento, que denotaremos con la letra **X**, en la parte izquierda inferior se escribe el número de protones que tiene el elemento, se conoce como número atómico **Z**. En la parte izquierda superior tenemos al número de masa, denotado con **A**, que representa la suma de protones y neutrones y finalmente, suele colocarse el número de neutrones (**N**) en la parte inferior derecha (Khan, 1994; Turner, 2007). La identificación del núclido se puede simplificar si tomamos los dos identificadores esenciales: nombre del elemento o

número atómico y el número de masa, en una analogía, esto es igual a considerar el nombre de la persona y el apellido, tal como se muestra en la figura 6, donde también se tiene el ejemplo de un núcleo de cobalto, en este caso al saber que el elemento es cobalto, queda determinado el número de protones ($Z = 27$) y conociendo el número de masa, sabemos a qué isótopo se hace referencia.



Figura 6. Nomenclatura internacional para identificar a un núcleo atómico. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

En el párrafo anterior, hablamos de isótopo, este término se refiere a un grupo de núcleos que comparten el mismo número de protones (Z) pero diferente número de neutrones (N), por ejemplo, los más conocidos son los isótopos del hidrógeno: protio (^1H), deuterio (^2H) y tritio (^3H). En general esta clase de elementos, aunque tienen distintos componentes, conservan sus propiedades químicas. Otro ejemplo es el carbono 12 (^{12}C), el cual es isótopo del ^{11}C , que a su vez son isótopos del ^{14}C . Algunos isótopos emiten radiación, a estos los llamaremos radioisótopos, por ejemplo, los radioisótopos del itrio: ^{86}Y , ^{90}Y o del Yodo: ^{123}I , ^{124}I , ^{125}I y ^{131}I , por ejemplificar algunos (<https://Atom.Kaeri.Re.Kr/Old/Ton/>).

Por otra parte, un átomo es eléctricamente neutro cuando el número de protones es igual al número de electrones

(cargas negativas) (figura 7), esta definición es independiente del número de los neutrones pues no contribuyen a la carga eléctrica. Si un átomo neutro pierde uno o más electrones entonces se han formado un par de iones: el electrón es el ion negativo mientras que el átomo remanente es el ion positivo.

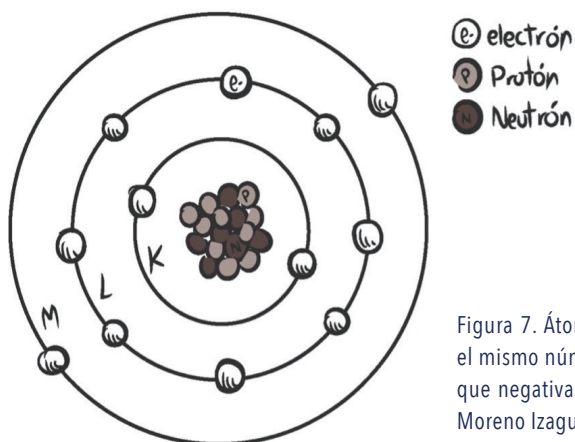


Figura 7. Átomo neutro, es aquel que presenta el mismo número de cargas positivas (protones) que negativas (electrones). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Un átomo neutro posee la misma cantidad de cargas eléctricas positivas que negativas, estas últimas corresponden a los electrones. Los electrones en un átomo se encuentran en los orbitales o capas electrónicas, designadas con las letras K, L, M, etc. (de acuerdo con la historia se escogieron estas consonantes considerando que se podían descubrir orbitales inferiores y se podrían necesitar las primeras letras del alfabeto, pero no fue así).

Cada capa puede tener solamente un determinado número de electrones, de acuerdo con el modelo matemático que satisface la siguiente ecuación: $2n^2$ donde "n" representa el nivel de capa u orbital. Para comprender mejor el llenado de electrones, consideremos la primera capa, K o nivel 1, que

siguiendo la fórmula podemos notar que solo puede obtener 2 electrones $((2)(1)^2)$ a diferencia de la capa L que puede albergar hasta 8 $((2)(2)^2)$ o la capa M puede contener hasta 18 electrones $((2)(3)^2)$.

En la actualidad, concebir un átomo puede ser relativamente sencillo, pensando en un modelo atómico similar a un pequeño sistema planetario, donde el núcleo atómico sería similar al sol y los electrones a los planetas (esta idealización, aunque no se ajusta a la realidad, sirve para describir los fenómenos que se quieren explicar en este libro). El modelo atómico ha ido evolucionando a través de la historia. Pasaron varios años desde que Demócrito definiera el átomo en la antigua Grecia hasta que, en 1803 John Dalton, postuló que los átomos son diminutas esferas indivisibles y que átomos de un mismo elemento, son idénticos entre sí uniéndose con otros para formar compuestos. Dalton representó con este modelo elementos como el hidrógeno, el azufre, el oro y el mercurio, por mencionar algunos. Sin embargo, esta teoría estaba incompleta y fue hasta 1904 que Joseph John Thomson descubrió que los átomos también pueden tener cargas, encontrando a los electrones, que llamó "corpúsculos", los cuales están distribuidos en el átomo como si fuera un pastel con chispas de chocolates. Pocos años después, Ernest Rutherford, en 1911, descubrió que en los átomos tienen grandes espacios vacíos entre el núcleo y las órbitas, dedujo que el núcleo atómico posee carga eléctrica positiva y existen partículas negativas alrededor de este (demostró lo anterior mediante un experimento en el que bombardeó con partículas alfa (helio) una lámina de oro, detectando la transmisión y reflexión). Poco después, en 1913 Niels Bohr postuló la modificación del modelo de Rutherford, al considerar que los electrones se mueven alrededor del núcleo en orbitales de tamaños y energías determinadas, es decir, que solo

ciertos niveles de energía están permitidos, lo cual tiene sentido bajo la perspectiva de la mecánica cuántica (niveles de energía cuantizados). En 1926 Erwin Schrödinger postuló que los electrones no se mueven exactamente en órbitas definidas sino más bien que tienen un comportamiento de ondas, siendo imposible determinar la posición del electrón correctamente, por lo tanto, solamente puede hablarse de nubes de probabilidad llamados orbitales en los cuales es más probable encontrar un electrón (Kauss, 2006). La figura 8, muestra la evolución del modelo atómico, considerando los más conocidos.

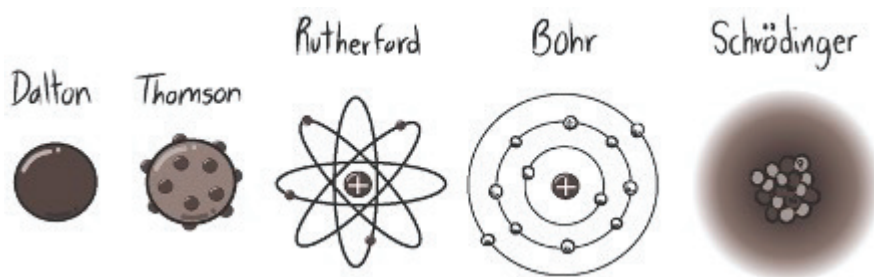


Figura 8. Evolución del modelo atómico, desde ser considerado como una esfera hasta el modelo aceptado actualmente. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Como puede notarse en la figura anterior se percibe la evolución del modelo atómico, cada uno de ellos, en algún punto de la historia, se usaron para describir la estructura y composición de las cosas. Sin embargo, la concepción relativamente más fácil del átomo es considerarlo como un pequeño sistema planetario, donde puede entenderse diferentes fenómenos físicos y la interacción con otros elementos a través de los electrones en los orbitales electrónicos.

Radiactividad

La palabra radiactividad o también llamada radioactividad, se empleó para describir una nueva propiedad presente en algunos materiales denominados elementos radiactivos, que se caracterizan por emanar energía, ya sea en forma de partículas cargadas u onda electromagnética capaces de ionizar la materia (generar un par de iones).

La radiactividad fue descubierta por Henri Becquerel en 1896 (Friedlander *et al.*, 1981), un año después del descubrimiento de los rayos X (que se menciona más a fondo en el apartado siguiente). Henri, amante y estudioso de la fluorescencia, notó que ciertos objetos brillaban o tenían color verde amarillo después de ser expuestos a la luz, como por ejemplo en ciertas copas de cristal, usadas en la época (hechas de óxido de uranio). En ese momento, se consideraba que el fenómeno ocurría cuando los objetos eran expuestos al sol. El fenómeno lo cautivó y decidió trabajar con sales de uranio, que eran usadas en la fabricación de diferentes objetos. Becquerel tomó un puñado de sales de uranio y las colocó sobre una placa fotográfica, dejando todo bajo los rayos del sol, como resultado notó que la placa se velaba, lo cual se atribuyó a que la luz solar cargaba de alguna manera las piedras de uranio. Sin embargo, un día al querer repetir el experimento, sucedió que el día estaba nublado, por lo que colocó el mineral (cristales de uranio) en un cajón del escritorio en el que también guardaba placas fotográficas. Después, encontró una imagen borrosa de la piedra, a pesar de que la placa estaba envuelta y no podía velarse con la luz, con ese evento se dio cuenta de que los cristales no se ‘activaban’ con el sol, sino que de alguna manera los cristales liberaban energía espontáneamente.

Posteriormente, Marie Salomea Skodowska-Curie, quien estudiaba un doctorado en la universidad de la Sorbone, en París, bajo la tutela de Henri Becquerel, estudió a fondo esta nueva forma de energía y fue ella a quien se le atribuye el término de radiactividad. Junto con su esposo Pierre Curie, decidieron trabajar a detalle con este tipo de materiales, hasta aislar unos de los elementos químicos, que era incluso más radiactivo que el mismo uranio, se trataba del radio-226 (^{226}Ra). También, fue Marie Curie quien, continuando con sus investigaciones, aisló un segundo elemento, el polonio-210 (^{210}Po), nombrado así en honor a su país natal. Madame Curie recibió el Premio Nobel de Física en 1903 por el descubrimiento y estudio de la radiactividad, compartiendo el galardón con su tutor Bequerel y con Pierre Curie (su esposo). En 1911, Marie recibe un segundo Premio Nobel, en esta ocasión el Premio Nobel de Química por los dos elementos descubiertos y añadidos a la tabla periódica.

Por estas aportaciones, para cuantificar actividad de cualquier elemento radiactivo, en la actualidad se usa la unidad llamada Becquerel (Bq) en el Sistema Internacional, o el Curie (Ci). Ambos términos hacen referencia a las desintegraciones nucleares por unidad de tiempo. Por ejemplo, un Curie, fue definido para referirse a las transformaciones de los núcleos radiactivos que ocurren en el tiempo para 1g de ^{226}Ra , mientras que 1Bq es una transformación que ocurre en un segundo (Attix, 2004; Turner, 2007). Hoy en día se sabe que, elementos radiactivos con vida media larga (del orden de millones de años) son los responsables de la formación de diversos núcleos radiactivos o no radiactivos debido a su desintegración atómica.

El uso de las aplicaciones con radionúclidos es diverso, por ejemplo, se usan núcleos radiactivos en aplicaciones médicas, en la industria, y hasta en la agricultura. Un ejemplo bien conocido es el Carbono-14 (^{14}C), radionúclido emisor

beta que tiene una vida media de 5 700 años, característica ideal para ser usado en procesos de datación. Este isótopo es ideal para medir la antigüedad de diferentes fósiles, como las momias egipcias. Otro ejemplo, es el uso de Iridio-192 (^{192}Ir) que tiene varios usos, uno de ellos es el oncológico en el cual es útil para irradiar tejido canceroso, otro es en la industria, empleado para obtener radiografías industriales, las cuales se usan para evaluar fisuras estructurales en el ámbito de la construcción.

Decaimientos radiactivos

El decaimiento radiactivo es un proceso nuclear espontáneo en el cual un núcleo con exceso de energía, denominado núcleo inestable, se desprende de la misma a través de la emisión de partículas radiactivas (hasta convertirse en un núcleo estable), puede emitir partículas cargadas o radiación electromagnética. No existen factores físicos ni químicos que modifiquen el proceso para que un elemento decaiga más o menos rápido y un proceso meramente probabilístico. Sin embargo, una propiedad medible de los elementos radiactivos es la vida media, la cual hace referencia al periodo que le toma a una muestra de N núcleos radiactivos decaer a la mitad de su valor, es decir, $N/2$ (Turner, 2007).

Como se ha mencionado brevemente, hoy en día sabemos que los elementos químicos pueden ser naturales o artificiales, los primeros son los que se han formado en la tierra o vienen del espacio (por ejemplo, de la explosión de una super nova), mientras que los segundos son aquellos creados por el ser humano con fines de alguna aplicación científica o tecnológica. Los elementos pueden clasificarse también como estables o inestables, estos últimos son los radiactivos, que buscan la estabilidad mediante un decaimiento

radiactivo, entre estos tenemos los que decaen de las siguientes maneras:

DECAIMIENTO ALFA: es el mecanismo de estabilidad mediante el cual, un núcleo atómico con número de masa grande, es decir, con una gran cantidad nucleones (protones y neutrones) emite una partícula conformada por dos protones y dos neutrones, lo que se conoce como partícula alfa (núcleo de helio) (figura 9). Como ejemplos de isótopos que decaen por este medio se encuentran los siguientes núcleos: ^{235}U , ^{241}Am , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{225}Ac .

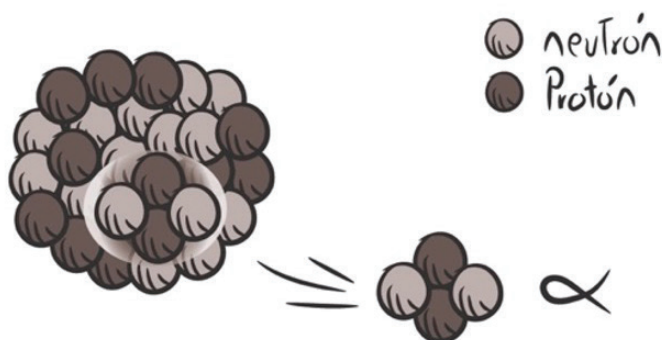


Figura 9. Ejemplo de un átomo emisor alfa, esta partícula está compuesta por dos protones y dos neutrones. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

DECAIMIENTO BETA: En este proceso el núcleo transforma un nucleón en otro (un neutrón o un protón). En este decaimiento el número de masa permanece constante y se clasifica en decaimiento beta menos (electrones) y beta más (positrones) dependiendo el nucleón transformado. El decaimiento beta menos (β^-) ocurre cuando el núcleo transmuta uno de sus neutrones en un protón, generando una partícula cargada negativamente y otra partícula muy pequeña en masa que se

llama antineutrino. Cabe señalar que la partícula negativa es lo que llamamos partícula beta menos o beta negativa, véase figura 10. Entre los emisores de esta forma de decaimiento tenemos: ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{90}Y .

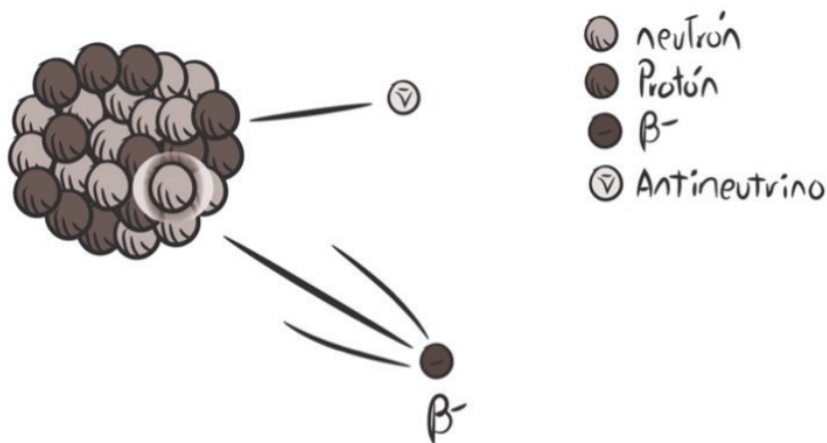


Figura 10. El decaimiento beta menos muestra la partícula negativa que sale expulsada del núcleo atómico cuando sucede la transformación nuclear. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

El decaimiento beta más (β^+), es el proceso de estabilización donde el núcleo atómico transforma un protón espontáneamente en un neutrón, una partícula con carga positiva y un neutrino. La partícula cargada positivamente, se conoce como partícula beta más o también llamada positrón (figura 11). Esta última partícula se caracteriza por ser una antipartícula, la cual al encontrarse con un electrón del medio dan lugar al fenómeno de aniquilación, donde se puede notar que la masa de ambas partículas se transforma en energía, es decir, se formarán dos fotones, los cuales viajan en direcciones opuestas uno respecto al otro, característica que veremos a detalle más adelante. Algunos núclidos emisores de positrones son: ^{11}C , ^{15}O , ^{13}N , ^{18}F .

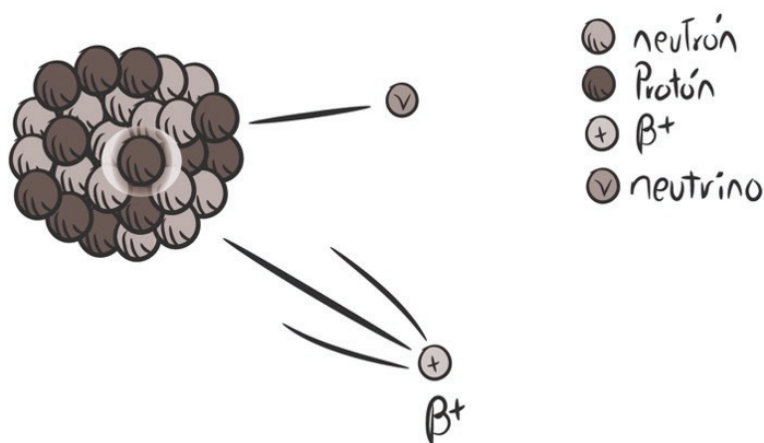


Figura 11. Proceso de decaimiento beta positivo, en esta transmutación de elemento se genera el positrón, partícula que es la antipartícula del electrón por sus propiedades similares, pero carga eléctrica opuesta. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Cabe señalar que la predicción del positrón fue hecha por Paul Dirac en 1931. Teóricamente, mencionó la existencia de esta partícula, sus argumentos fueron hechos basados en la conservación de la energía y la carga, estados de "energía negativa" correspondía a una partícula de carga positiva ($+e$) y con la misma masa que la del electrón, acuñando así el término antielectrón. Pocos meses después, Carl Anderson, al estudiar los rayos cósmicos logró registrar, en 1932, la trayectoria de la partícula predicha en las ecuaciones de Dirac, para ello Anderson trabajaba con una cámara de niebla un filtro de plomo e imanes, notó que había una trayectoria idéntica a la de los electrones, pero con curvatura en el sentido opuesto, implicando que la carga debería ser positiva, por lo que se le llamó positrón (figura 12).

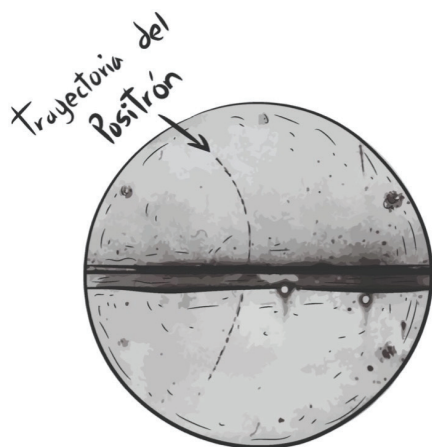


Figura 12. Ilustración de la trayectoria registrada del positrón vista por primera vez por Anderson en la cámara de niebla. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

DECAIMIENTO GAMMA: Este proceso de estabilidad del núcleo también es llamado transición isomérica, se caracteriza porque el núcleo no cambia a otro elemento, sino que simplemente expulsa el exceso de energía en forma de radiación electromagnética (fotones gamma). El proceso ocurre cuando los núcleos atómicos se encuentran en un estado llamado "metaestable", que pudo originarse por un decaimiento previo, alfa o beta. En consecuencia, la metaestabilidad se pierde al irradiar la energía en exceso para quedar el núcleo, en la mayoría de las veces, en un núcleo estable. Un ejemplo de este decaimiento son el ^{99m}Tc (usado en un método de imagen, como veremos), el ^{201}Tl o los estados metaestables del ^{131}I . La figura 13 muestra la emisión de un fotón proveniente del núcleo atómico.



Figura 13. Transición isomérica o decaimiento gamma se caracteriza por la emisión de fotones generados en el núcleo atómico, por consiguiente, llamados fotones gamma. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

CAPTURA ELECTRÓNICA: el proceso se caracteriza porque el núcleo atómico en lugar de transformar un nucleón como los decaimientos beta, se ata a un electrón de sus propias órbitas, 90% de la capa K y 10% de la capa L para “combinarlo” con un protón, dando lugar a la formación de neutrón y un neutrino. El núcleo resultante es el mismo que un decaimiento beta positivo, considerándose hasta cierto punto como decaimientos que compiten uno con otro. Cabe señalar que entre más grande sea el número de masa en los núclidos, es más probable que se favorezca la captura electrónica en lugar del decaimiento por positrones, pues la atracción eléctrica es mayor. Algunos ejemplos en este proceso de estabilidad se encuentran los siguientes núcleos: ^{123}I , ^{86}Y , ^{89}Zr .

CONVERSIÓN INTERNA: Es un mecanismo en el cual un núcleo inestable transfiere su energía en forma de “un cuanto o quantum” a uno de los electrones orbitales, mismo que adquieren energía cinética y abandonan el átomo, quedando ionizado. El proceso se favorece con electrones orbitales cercanos al núcleo, lo que implica la formación de vacancias (huecos por

los electrones que escapan del átomo), las cuales son llenadas por electrones de las capas externas, produciendo una recombinación electrónica y por consiguiente la emisión de fotones, denominados rayos X característicos o fluorescencia. En algunas ocasiones, los rayos X interaccionando con los electrones orbitales del mismo átomo transfiriéndoles energía cinética (de movimiento) que les permite escapar del átomo. Estos electrones tienen una energía definida, monoenergética, a este tipo de electrones se les conoce como electrones Auger. (en la actualidad estos electrones son de gran utilidad en tratamientos contra el cáncer). Como ejemplo de núcleos que presentan conversión interna se encuentra el ^{176}Lu .

Espectro electromagnético

Desde los inicios de la humanidad, la luz ha atraído al ser humano en su búsqueda por entender su naturaleza. Uno de los primeros científicos en hacer estudios de óptica (rama de la física que estudia a la luz) fue Isaac Newton, que, usando un prisma observó los diferentes colores que formaban la luz blanca concluyendo que la luz es de naturaleza corpuscular (materia). Sin embargo, diferentes estudios posteriores mostraron que la luz era una onda de origen electromagnético. Se desarrollaron experimentos para estudiar los campos eléctricos y magnéticos con los que James Clerk Maxwell, basado en todo el conocimiento adquirido hasta el siglo XIX, postula las leyes del electromagnetismo como hoy en día las conocemos y aplicamos desde la vida cotidiana hasta en innumerables avances tecnológicos.

Actualmente, sabemos que la luz forma parte del denominado espectro electromagnético, como se ilustra en figura 14 (Suetens, 2009). El espectro abarca un rango de fotones

que comparten la misma naturaleza electromagnética, pero se diferencian unos respecto a otros por su longitud de onda y energía, concepto que puede describirse mediante la ecuación siguiente:

$$E=h\nu$$

Donde E corresponde a la energía del fotón, h es una constante, conocida como la constante de Planck y ν es la frecuencia de oscilación (comportamiento ondulatorio de los fotones).

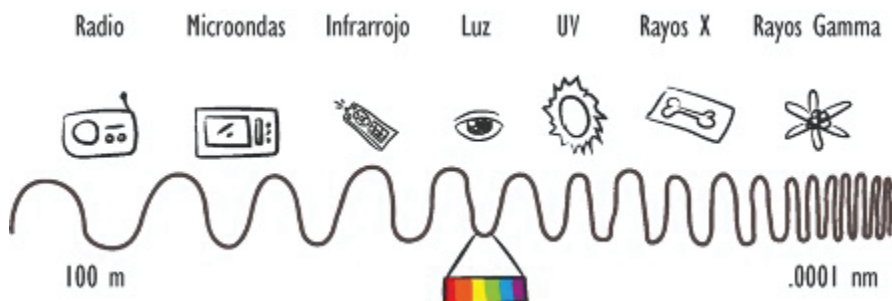


Figura 14. El espectro electromagnético representa una amplia gama de fotones que se caracteriza por compartir la misma naturaleza electromagnética, pero poseen energía diferente. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Como se observa en la figura 14, el espectro electromagnético comprende diferentes longitudes de onda, es decir, de energía, de tal manera que se ha clasificado en dos grupos: radiación no ionizante y radiación ionizante: el primer grupo corresponde a longitudes de onda que no cuentan con la suficiente energía para producir un par de iones en el átomo, por ejemplo: las ondas de radio, microondas, infrarroja, el visible y el ultravioleta. El segundo grupo del espectro está conformado por rayos X y rayos gamma, que son fotones con la energía suficiente para producir ionización en la materia.

Hablando de las aplicaciones del espectro electromagnético, las ondas de radio con longitud de metros son las responsables de las telecomunicaciones (radio, te, wifi, redes de teléfono como la 5G). Adicionalmente, las ondas de radio son usadas como ondas de radiofrecuencia en imágenes por resonancia magnética, como veremos. Las microondas y el infrarrojo, con longitudes de onda aproximadamente de 1 cm a 1 μ m, también se usan en nuestra rutina diaria al calentar una taza de café en el microondas, en el cual los fotones hacen vibrar las moléculas del agua para producir calor, mientras que diferentes dispositivos electrónicos como los controles remotos aún tiene una señal en esta longitud de onda para encender o apagar o simplemente nuestro cuerpo emite infrarrojo que percibimos en forma de calor. Continuando con el espectro, el visible o también llamado luz, corresponde a los fotones con los que el ser humano puede observar su alrededor, las longitudes de onda correspondientes son de 400 a 700 nm (que va desde los colores fríos como el azul hasta los cálidos como el rojo, dependiendo de la longitud de onda, nuestros ojos perciben un color u otro) (Hecht, 2017). Por otra parte, el ultravioleta, presenta mayor energía que de los fotones de los que hemos hablado hasta ahora, es usado como una fuente de radiación para esterilizar diversos materiales, muchos laboratorios en donde suelen manipular muestras biológicas lo hacen mediante campanas de bioseguridad que contiene radiación ultravioleta. Entre los fotones, que consideramos con alta energía se encuentran los rayos X y los rayos gamma, ambos con longitudes de onda del orden de nanómetros. Una aplicación de los rayos X es en la radiología, en la cual es posible obtener una imagen del cuerpo, por otra parte, los fotones gamma son usados en lo que hoy se conoce como medicina nuclear, que también

proporciona imágenes médicas con información metabólica del paciente.

Mostrando un poco sobre las aplicaciones del espectro electromagnético en nuestra vida, consideremos las siguientes situaciones a modo de ejemplo: cuando encendemos una televisión, cuando mandamos un mensaje por teléfono o consultamos una página en internet, estamos usando ondas de alguna parte del espectro electromagnético. Estos fotones de los que hablamos son simplemente radiación electromagnética, que visto desde la física son las partículas de interacción entre dos cargas eléctricas, y suelen representarse con una onda, pero también como una pequeña esfera, como una pelota diminuta. Esta idealización se debe a que a los fotones se les ha atribuido una naturaleza dual “onda-partícula”, explicada por Louis De Broglie. Otra característica de los fotones es la ausencia de carga eléctrica, por lo cual este tipo de partículas pueden recorrer grandes distancias antes de interactuar con la materia.

Principales efectos de interacción fotones – materia

La interacción de los fotones con la materia ocurre con cualquier fotón del espectro electromagnético. Algunas de las formas de interacción son a través de los procesos de atenuación (que se refiere a la disminución de la intensidad del haz incidente sobre la materia) y dispersión, fenómeno que implica un cambio en la dirección del fotón incidente, este ángulo de dispersión puede ser grande o pequeño.

Por otro lado, los fotones pueden interactuar con la materia mediante los tres principales efectos de la radiación electromagnética-materia: efecto fotoeléctrico, dispersión Compton y producción de pares, los cuales se explican a continuación (Attix, 2004; Cherry *et al.*, 2012). Una manera

sencilla de comprender los efectos es a través de pensar en el juego de billar, donde las bolas pueden considerarse como electrones que son golpeados por fotones que también sería una bola de billar (en este caso la bola blanca).

Efecto fotoeléctrico

Heinrich Hertz observó el fenómeno fotoeléctrico en 1887, que consiste en la emisión de electrones de un metal al irradiarse con radiación electromagnética, incluso con la luz, aunque la corriente eléctrica podía medirse, la explicación del porqué se generaba no se conocía. Esta llegó por Albert Einstein en 1905, para ello asumió que la energía está cuantizada, tal como lo había expresado Max Planck en su teoría desarrollada para solucionar la radiación de cuerpo negro (catástrofe ultravioleta) (Beiser, 2003). A Einstein, se le concedió el Premio Nobel de Física en 1921 por explicar este fenómeno.

Por otra parte, entender el efecto, desde el punto de vista atómico, que consiste en la interacción de un fotón/fotones con los electrones de un material, generalmente con los electrones de las capas internas del átomo, lo que da como resultado la ionización de la materia: ion negativo (electrón saliente), ion positivo (el resto del átomo). Este fenómeno se caracteriza por que el fotón incidente cede toda su energía al electrón que libera del orbital, por consiguiente, el electrón se libera de su energía de amarre del núcleo atómico y escapa del mismo, el proceso se favorece con fotones de baja energía y con elementos de Z alta como son los metales (Cherry *et al.*, 2012) (figura 15).

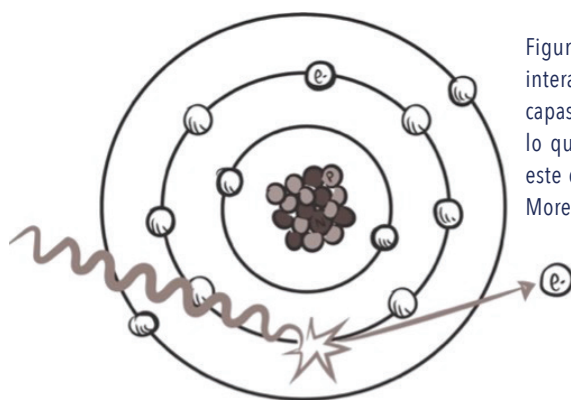


Figura 15. Efecto fotoeléctrico: un fotón interacciona con un electrón orbital de las capas internas, cediéndole su energía por lo que el electrón abandona el átomo y este queda ionizado. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

La figura anterior ilustra el efecto fotoeléctrico, en este caso un fotón de energía $h\nu$ interacciona con un electrón de la capa L, como se observa en la imagen el electrón escapa del campo eléctrico del átomo dando lugar a dos iones, el positivo (núcleo remanente) y el negativo (electrón).

Retomando nuestro ejemplo del juego de billar, podemos explicar el efecto fotoeléctrico en estos términos, es decir, primero consideremos a un fotón como una bola de billar (blanca) que golpeará a otra bola rayada o lisa, la cual será el electrón orbital de una capa interna del átomo. Entonces, cuando la bola blanca golpea a la segunda bola, esta recibe toda la energía cinética de la primera, por consiguiente, sale acelerada del lugar inicial de donde se encontraba y la bola que golpeó queda sin energía. En el caso del fotón al ser energía completamente, este desaparece y transfiere la energía a electrón que abandona al átomo.

Dispersión Compton

La dispersión Compton, es un fenómeno que fue explicado por Arthur Compton en 1923, quien hizo un experimento de

dispersión en el cual hacía incidir rayos X sobre electrones libres; observó que, como resultado de la interacción de ambas partículas, podía medir electrones dispersados, pero también fotones con diferente longitud de onda respecto a la del fotón incidente. La explicación del fenómeno lo llevó a ganar el Premio Nobel en 1927. La dispersión Compton es el proceso en el cual un fotón de energía $h\nu$ interacciona con un electrón orbital correspondiente a las capas externas de átomo, el electrón al recibir parte de la energía del fotón puede escapar de átomo, produciendo ionización. Cabe señalar que la energía del fotón incidente se reparte entre el electrón eyectado (dispersado) y un nuevo fotón (Cherry *et al.*, 2012). El efecto se favorece a energías consideradas intermedias y con cualquier tipo de materia, es decir, con cualquier elemento (Z). Además, debemos resaltar que este fenómeno es el que más se favorece cuando se irradia el tejido vivo con fotones como son los rayos X en el cuerpo humano (figura 16).

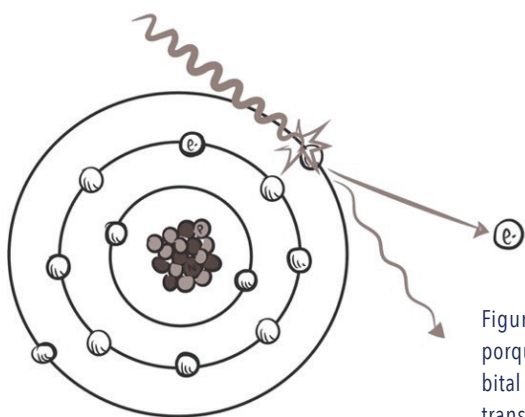


Figura 16. Dispersión Compton: se caracteriza porque el fotón interacciona con un electrón orbital en las capas externas, en este caso el fotón transmite una parte de su energía al electrón, generando una dispersión tanto para el electrón como en el fotón y la ionización del átomo. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

En la figura se observa cómo un fotón de energía $h\nu$ interactúa con un electrón de la última capa del átomo, lo que da lugar a la dispersión de las dos partículas, considerando que se reparten la energía del fotón inicial, nótese, que la longitud en la ilustración del fotón dispersado es diferente, lo cual implica que posee una energía diferente al fotón inicial y menor que esta.

Similarmente, si se considera el juego de billar para comprender mejor este fenómeno, nuevamente, la bola blanca (fotón) golpeará a una segunda bola rayada o lisa (electrón de las capas externas de átomo). Cuando la interacción ocurre entre las dos bolas, en lugar de transferir toda su energía cinética, la bola blanca en el momento del golpe cede una fracción de su energía, lo que genera que ambas bolas se muevan y con un determinado ángulo cada una respecto a la dirección de la bola blanca.

Producción de pares

El fenómeno de la producción de pares se caracteriza porque la energía puede convertirse en masa, esto sucede por la interacción de fotones de muy alta energía no con los electrones orbitales, pero sí con el campo nuclear del átomo, que provoca la creación de dos partículas: un electrón y un positrón. Cabe señalar que la energía mínima requerida para que el fotón interactúe de esta manera es de 1.022 MeV o mayor (Cherry *et al.*, 2012), esto es debido a que la suma de las masas en reposo de ambas partículas corresponde a ese valor en energía (masa del electrón en reposo es 0.511 MeV más la masa en reposo del positrón es 0.511 MeV) tal como se observa en la figura 17.

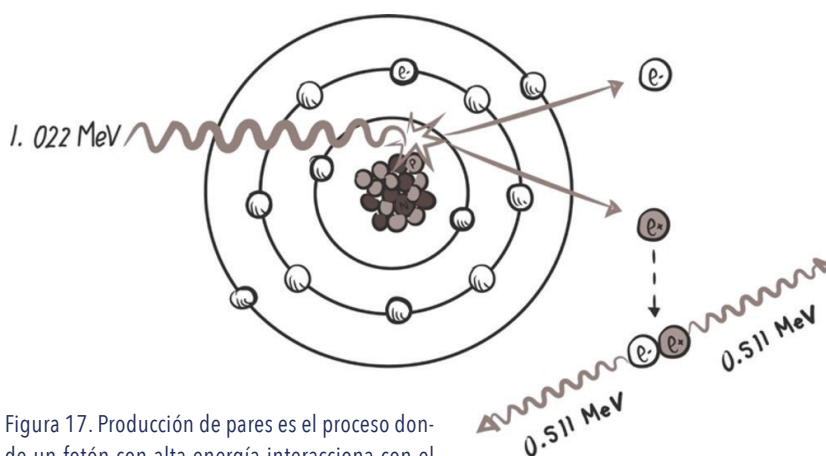


Figura 17. Producción de pares es el proceso donde un fotón con alta energía interactúa con el campo del núcleo atómico, lo que genera que la energía se transforme en masa (un par de partículas electrón - positrón). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Como hemos observado las dos partículas formadas (electrón-positrón) pueden verse como creación de materia y antimateria a la vez, es decir, en este caso el positrón es la antipartícula del electrón, presenta igual masa, pero carga eléctrica opuesta. Por consiguiente, el positrón después de interactuar mediante interacciones coulombianas, perderá su energía cinética, dando lugar al fenómeno de aniquilación de la materia, es decir, el positrón al encontrarse con un electrón en el medio, se transformarán nuevamente en energía, que son precisamente la formación de dos fotones de aniquilación, cada fotón con energía de 0.511 MeV para conservar la masa, pero también se conserva el momento lineal que se ve reflejando en las direcciones de viaje de los nuevos fotones (180 grados uno respecto del otro), tal como se observa en la imagen.

Explicar este efecto con nuestra analogía de bolas de billar, puede ser un tanto más complejo que los dos fenómenos

explicados previamente, esto es porque aquí hay transformación de materia a energía como ya hemos visto. Sin embargo, representando el efecto en el juego, pensemos de esta manera, primero imaginemos que lanzamos la bola blanca muy rápido (equivalente a pensar que tiene mucha energía cinética) y que de pronto al intentar golpear a una segunda bola ya sea lisa o rayada de un conjunto de bolas de billar, justo antes de que sea golpeada, la bola blanca se rompe en dos partes. Los dos fragmentos salen disparados y siguen caminos independientes, en este caso estas partes corresponden al par de partículas electrón-positrón que se forman en la producción de pares cuando el fotón interacciona con el campo nuclear.

Atenuación

Ocurre cuando un haz de fotones disminuye una fracción en su intensidad, explícitamente, es decir, un flujo de fotones que viajan en cierta dirección atraviesa un determinado medio (material) en el que los fotones interactúan con los átomos de este medio mediante procesos de interacción como los explicados anteriormente (fotoeléctrico, Compton, producción de pares). Posteriormente, a la interacción con el medio, el flujo de fotones que logra atravesar el material se le conoce como haz transmitido y tiene un número menor de partículas electromagnéticas que el haz inicial, pero conservan la misma energía (figura 18). La modelación matemática del fenómeno se describe con la Ley de Beer-Lambert, que describe una disminución exponencial para la atenuación de fotones (Attix, 2004; Turner, 2007).

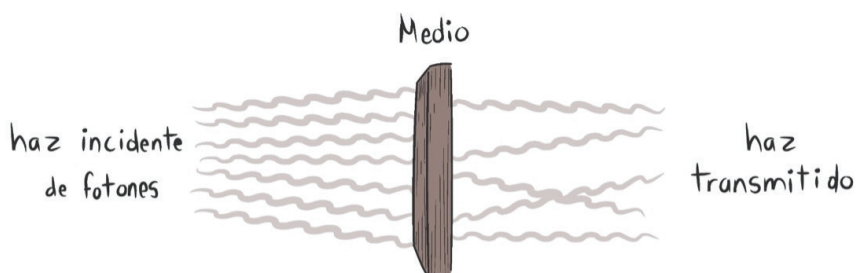


Figura 18. Atenuación de fotones es el fenómeno físico en el cual un haz incidente atraviesa un medio material, donde se lleva la interacción fotón-materia, produciendo que solo una parte del haz inicial salga del medio, denominado haz transmitido. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Rayos X

Hemos hablado sobre los términos radiactividad y radiación electromagnética. Sin embargo, es útil conocer cómo el estudio del espectro electromagnético se profundizó después del descubrimiento de los rayos X. El evento ocurrió en 1895, cuando Willen Conrad Roentgen, quien estudiaba los rayos catódicos, descubre por accidente un tipo de radiación desconocida en ese tiempo a las cuales llamó rayos X (se denomina con la variante X aquello que es desconocido) (Khan, 1994). La nueva radiación se caracterizaba porque podía “atravesar” la materia y obtener algo similar a una fotografía como se ilustra en la figura 19, pero permitía ver dentro del cuerpo (principalmente los huesos).

En la figura se ilustra lo que se conoce como la primera radiografía de la historia, la cual corresponde a la mano de la esposa de Roentgen, quien orgulloso del nuevo descubrimiento, después de notar que se formaban imágenes sobre las placas fotográficas, empezó a buscar que tan penetrantes eran esos rayos, colocando diferentes materiales, incluso



Figura 19. Representación de la primera radiografía de la historia: la mano de la esposa de Roentgen con su anillo de boda. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

pidiéndole a su esposa colocar la mano. Este hecho que pareciera tan sencillo fue la base para revolucionar la medicina, en especial el diagnóstico clínico, ya que mediante los rayos X se podían observar la anatomía de ciertas partes del cuerpo humano.

Cabe señalar, que un tubo de rayos catódicos con lo que trabajó W. Roentgen es un dispositivo con el cual solía estudiarse haces o corriente de electrones, era un tubo al vacío en donde el haz se deflectaba. Posteriormente, eran usados para formar imágenes haciendo incidir el flujo de electrones sobre pantallas electrofluorescentes, siendo una de las aplicaciones de este tipo de tubos de rayos catódicos, fue la televisión. La potencial del haz de electrones era controlada mediante un sistema de electrodos, alimentados por una fuente de voltaje.

Actualmente, la producción de rayos X se realiza con un tubo de rayos X (figura 20), dispositivos de vidrio templado, que albergan un circuito eléctrico, con un sistema ánodo-cátodo alimentado por una fuente de voltaje. Para el funcionamiento de este, se hace pasar una corriente eléctrica a través de un alambre delgado de metal (generalmente

tungsteno) que tiene un elevado punto de fusión (temperatura a la que un material cambia de estado de sólido a líquido), el metal se calienta hasta que encandece y a través del efecto termoiónico, se desprenden electrones que son atraídos hacia un cátodo giratorio por medio de una diferencia de potencial. Los electrones con determinada aceleración impactaran sobre un electrodo positivo, perdiendo su energía de manera súbita lo que genera la producción de rayos X de frenado (también conocidos como rayos X de Bremsstrahlung), estos fotones se caracterizan por tener un espectro de energía continuo. También los electrones acelerados pueden interaccionar con el material blanco, con los electrones orbitales, generando vacancias en las órbitas electrónicas y provocando transiciones reflejadas en rayos X característicos (producción de un espectro discreto o líneas espectrales) (Bushberg *et al.*, 2002).

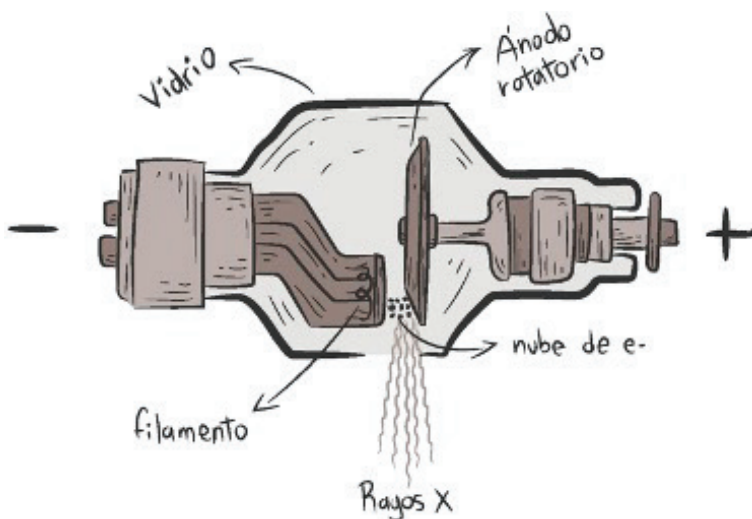


Figura 20. Tubo de rayos X en donde se ilustra la producción de electrones en el filamento (efecto termoiónico), que son acelerados hacia el blanco para producir rayos X. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Detección de la radiación ionizante

Un ion es una partícula o molécula que tiene carga eléctrica positiva o negativa. La mayoría de nosotros hemos experimentado o sentido cargas eléctricas, por ejemplo, pensemos en la estática eléctrica con la cual podemos sentir pequeñas descargas cuanto tocamos algún objeto, de manera explícita, consideremos el fenómeno de fricción o rozamiento, en particular frotar un peine con el cabello, doblar ropa o cobijas, entre otros. En muchos de los casos podemos sentir ese “toque”, que son las descargas de electrones, es decir, las cargas negativas se mueven hacia las positivas.

En la detección de la radiación ionizante se aprovecha el fenómeno de ionización, el cual aparece cuando la radiación electromagnética o partículas cargadas con suficiente energía transfieren parte o toda su energía a electrones de las órbitas del átomo (Turner, 2007). Al adquirir energía, el electrón puede escapar de la atracción eléctrica del núcleo, creando un par de iones: ion positivo (el átomo que ha perdido uno o más de sus electrones) e ion negativo (el que adquirió energía y abandonó al átomo). El hablar de iones es sinónimo de cargas eléctricas, relativamente sencillas de manipular, por eso este principio se usa en la mayoría de los detectores para radiación ionizante.

Por ejemplo, el más conocido es el detector Geiger Müller (figura 21), dispositivo que presenta una cámara de un determinado gas (generalmente Argón), el cual, al sentir el paso de la radiación electromagnética con la energía suficiente, producirá el par de iones en los átomos del gas. Los iones generados por la radiación se recolectan por un par de electrones incorporados en la cámara del gas, luego las cargas se llevan a un electrómetro, dispositivo que cuantifica la señal eléctrica y la traduce proporcionalmente a la cantidad de radiación.

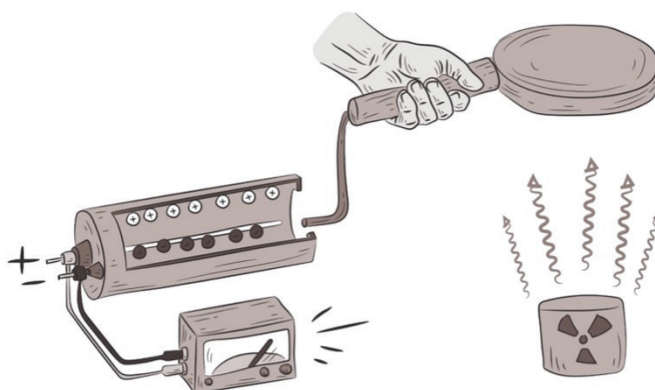


Figura 21. Detector Geiger Müller midiendo la tasa exposición generada por una fuente radiactiva. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

El funcionamiento para detectar la exposición (carga eléctrica por unidad de masa: C/kg) que proviene de una fuente radiactiva es el siguiente: imaginemos una fuente que emana radiación en todas las direcciones (fuente isotrópica), que es pequeña de forma esférica (puntual) y solo irradia un solo tipo de radiación a una sola energía (monoenergética), produciendo ionización en la cámara del dispositivo. Los iones son recolectados por electrodos incorporados en el dispositivo, mismos que producen una señal eléctrica que la mayoría de las veces es amplificada y asociada a la cantidad de radiación recibida.

Protección radiológica

El descubrimiento de la radiación ionizante cautivó tanto a científicos como a la mayoría de la población, por lo cual, este tipo de energía que emanaba de diversos materiales se aplicó a diferentes disciplinas, así como al uso en la vida

cotidiana. En un inicio no se conocían los efectos nocivos para la salud de la radiación ionizante, la industria comercializaba productos con materiales radiactivos, los cuales se incorporaban a diversos productos, por ejemplo, vitaminas, relojes con manecillas brillantes, kit de juego de elementos químicos para niños, por mencionar algunos.

En la actualidad, se conocen los mecanismos de interacción de la radiación ionizante sobre el tejido y los posibles daños asociados a su uso, en este caso se considera como blanco crítico el ácido desoxirribonucleico (ADN, por sus siglas en inglés), lugar donde se guarda toda la información genética. Sin embargo, la radiación puede interaccionar con cualquier organelo o componente de la célula. En el primer caso, se le conoce como acción directa, es decir, la radiación interacciona con alguna o ambas hebras del ADN, produciendo una, o dos rupturas de la cadena, lo que puede generar un proceso de reparación, mutación o incluso la muerte celular. El segundo caso corresponde a la acción indirecta de la radiación, en el cual la interacción se favorece principalmente con la molécula del agua contenida en la misma célula o en alguno de sus componentes, provocando la ionización de la molécula, rompiéndose y generando otros compuestos inorgánicos con alta capacidad oxidativa (proceso conocido como hidrólisis del agua), que llevan a la célula a la muerte por el estrés oxidativo (Turner, 2007) (figura 22).

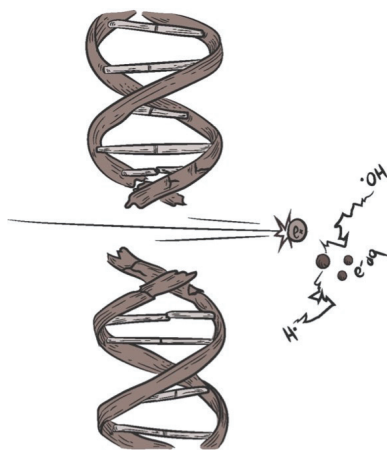


Figura 22. Daño al ADN por radiación ionizante, interacción directa (ruptura del ADN) interacción indirecta (hidrólisis del agua). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

En la figura se ilustra el daño producido por la radiación en el tejido vivo. En la acción directa, se nota un electrón que produce un doble rompimiento de la cadena de ADN. En la acción indirecta, se muestra el proceso de la hidrólisis del agua produciendo los agentes oxidativos que llevarán a la muerte celular (en este caso el electrón es el responsable de la ionización de la molécula del agua).

Las primeras observaciones sobre el uso desmedido de la radiación ionizante se dieron cuando aparecieron diversos casos de cáncer de hueso y se incrementaba la aparición de leucemia en personas que usaban radiación ionizante. En consecuencia, aparecen las primeras organizaciones enfocadas al uso y medida de la radiación ionizante, como los rayos X, de tal manera que en 1925 se crea el Comité Internacional de la Unidad de Rayos X, convirtiéndose en Comité Internacional de Unidades Radiológicas (1931) para, finalmente en 1965, ser nombrado Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU, por sus siglas en inglés) (<https://www.icru.Org/about-Icru/History/>). Similarmente, apareció en

1928, como resultado de la preocupación sobre los efectos nocivos de la radiación ionizante en la comunidad médica, el Comité Internacional de Protección contra Rayos X y Radio (IXRPC, por sus siglas en inglés) que para 1950 y considerando la protección radiológica para cualquier área o disciplina se convirtió en el Comité Internacional de Protección Radiológica (ICPR, por sus siglas en inglés). La organización que emite recomendaciones sobre el buen uso de las radiaciones ionizantes es la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés) formada en 1957 como organismo perteneciente a la Organización de la Naciones Unidas (ONU).

Hoy conocemos que la mejor manera de evitar los efectos nocivos debido a la radiación es evitar cualquier irradiación innecesaria, como manipular o manejar radiaciones ionizantes sin capacitación y medidas de protección radiológica. En contraste, debe tomarse en cuenta que para cualquier tipo de irradiación debe considerarse el riesgo-beneficio de su uso, al menos en términos de aplicaciones médicas, industriales o de investigación.

Para maximizar el beneficio y minimizar el riesgo debido al uso de este tipo de energía, se recomienda seguir los principios básicos de protección radiológica: usar mecanismos que bloqueen el paso de la radiación o la disminuyan (blindaje), exponerse el menor tiempo posible, y aumentar la mayor distancia posible entre la fuente de radiación y la persona (Turner, 2007) (figura 23).

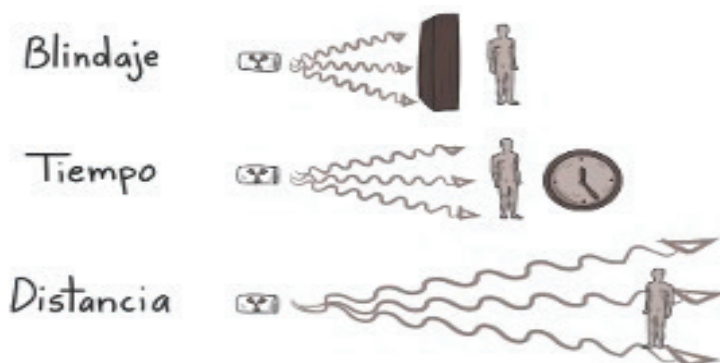


Figura 23. Los factores de protección radiológica nos ayudan a minimizar la dosis o exposición recibida cuando se trabaja con radiaciones ionizantes. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

BLINDAJE: Este factor es de suma importancia cuando el tiempo de irradiación no puede minimizarse ni la distancia maximizarse, en este caso, se debe considerar colocar un blindaje, el cual debe entenderse como aquel material con el grosor suficiente que pueda atenuar o absorber la radiación ionizante. Los blindajes deben escogerse dependiendo el tipo de radiación ionizante con la que se trabaja (figura 24).

TIEMPO: Es un factor importante por considerar cuando nos encontramos en presencia de una fuente de radiación, es decir, la mejor manera de minimizar los estragos de la radiación ionizante sobre el tejido vivo es minimizando el tiempo de exposición.

DISTANCIA: Es el segundo factor de la protección radiológica, hace referencia a maximizar la distancia que hay entre una persona y fuente de radiación ionizante, es decir, entre más alejados estemos del campo de radiación, menor será la irradiación que tendremos debido a la ionización de la radiación.

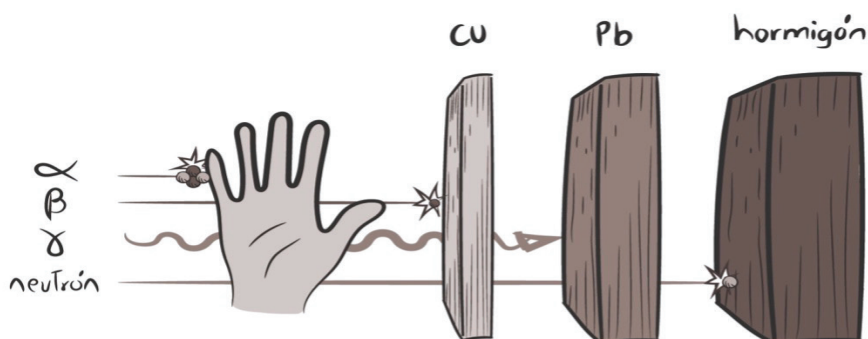


Figura 24. Tipos de blindaje para las diferentes radiaciones ionizantes, las partículas cargadas eléctricamente (alfas y betas) tienen un alcance menor comparadas con las partículas sin carga eléctrica (fotones y neutrones). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Un factor preventivo adicional en el ámbito de la protección radiológica es la señalización, la cual como el mismo nombre lo indica es colocar, hacer uso y saber identificar una señal, un símbolo o simplemente un letrero que nos indique la presencia de radiación ionizante (figura 25).



Figura 25. Símbolo internacional de radiación ionizante, representa el núcleo atómico emitiendo radiación ionizante. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Con estos principios de protección radiológica lo que se pretende es hacer uso correcto y eficiente de la energía radiante para el beneficio de la persona y simultáneamente reducir hasta donde sea posible los efectos que podría causar (Filosofía ALARA por sus siglas en inglés de As Low As Reasonably Achievable).

El campo de la protección radiológica está íntimamente relacionado a la dosis que puede recibir una persona, especialmente, aquella que por sus actividades laborales trabaja o manipula material radiactivo, llamada generalmente como personal ocupacionalmente expuesto (POE) o simplemente personal que manipula material radiactivo (Reglamento General de Seguridad Radiológica, 1988). En cuanto a la dosis, este término se refiere a la energía que deposita la radiación ionizante por unidad de masa, por consiguiente, esta se mide en J/kg, llamándose Gray (Gy) o Sievert (Sv) para la dosis absorbida en cualquier material o cuando se involucran órganos y tejidos humanos, respectivamente (Turner, 2007). La importancia radica en el hecho que entre más alta sea la dosis recibida por la persona, es mayor la incidencia de tener un efecto determinista asociado por el uso de la radiación ionizante. Los límites de dosis que puede recibir el personal ocupacionalmente expuesto pueden variar de país en país, por ejemplo, hay límites anuales permitidos de hasta 50 mSv/año, mientras que para el público los límites son valores inferiores, por ejemplo, del orden de 5 mSv/año (Reglamento General de Seguridad Radiológica, 1988). Sin embargo, también existen valores de límites recomendados internacionalmente, por ejemplo, los que estipula el Comité Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) que corresponden a un límite de dosis anual de 20 mSv para el personal que labora con radiaciones ionizantes y para el público en general, el valor es de 1 mSv al año.

Capítulo 2

Radiografías

Una de las aplicaciones más importantes de los rayos X es la radiografía, la primera radiografía en la historia se hizo, como vimos, a la mano de la esposa de Roentgen (Bushberg *et al.*, 2002), (figura 18). Este hallazgo revolucionó la medicina, en particular el diagnóstico y en consecuencia la decisión para tratamiento. Las imágenes radiográficas son imágenes 2D, que se caracterizan por ser proyecciones, donde los rayos X que provienen de un dispositivo generador de los mismos, atraviesan los tejidos del sujeto de estudio o material blanco (figura 26). Los fotones que pasan los tejidos son los responsables de formar la imagen del paciente en una placa fotográfica. La técnica de radiografía se puede aplicar a diferentes disciplinas, pero en particular estamos familiarizados con las radiografías en el ámbito clínico, por ejemplo, muchos de nosotros nos hemos realizado al menos alguna vez un procedimiento de esta índole, ya sea por el esguince de un tendón, la fractura de un hueso o simplemente en un tratamiento de ortodoncia.

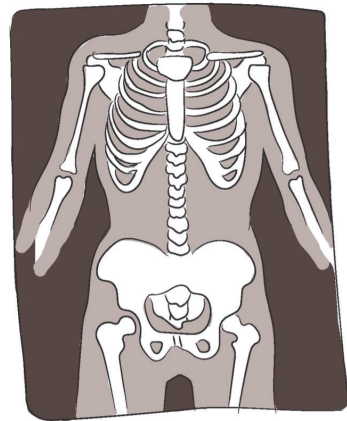


Figura 26. Ilustración de una radiografía de tórax, se muestra la estructura ósea y el tejido blando. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Proyecciones

Para comprender mejor el concepto de imagen radiológica podemos pensar en una analogía, es este caso pensemos en la fotografía, que fue desarrollada por Niepce en 1824, posteriormente, perfeccionada por Daguerre. En esos días, la técnica de la fotografía consistía en colocar una placa sensible a la luz que, mediante reacciones químicas con un medio sensible, se producía el proceso de grabado, es decir, se proyectaba la imagen de un objeto.

Tanto la radiografía como la fotografía son imágenes que se forman a partir de proyecciones de fotones sobre placas radiográficas o fotográficas, respectivamente. Para comprender mejor el concepto de proyección consideremos tres factores, grosso modo: una fuente de radiación, un objeto y una placa de revelado. Podemos entender mejor qué es una proyección con el dibujo de la figura 27, donde la fuente es un foco, el objeto pasa a ser la persona leyendo el libro y finalmente, la sombra que se forma sería la imagen que resultaría sobre la placa de revelado. Podemos decir que la sombra es la proyección de la persona, naturalmente la silueta de la persona se proyecta como el contorno y da forma a la sombra.

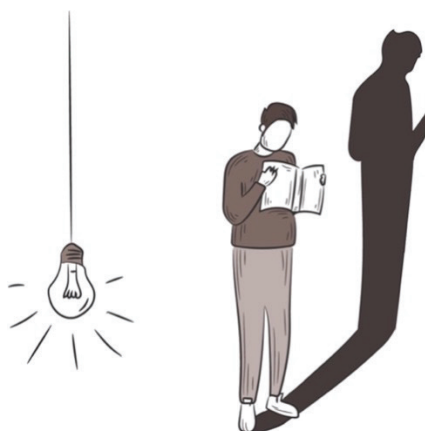


Figura 27. La sombra es la proyección asociada cuando una fuente luminosa irradia un objeto, como cuando un foco que nos ilumina en nuestra casa. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Por otra parte, tomando el hecho que en una radiografía se emplean radiación electromagnética, donde la longitud de onda de los fotones atravesará con mayor facilidad los tejidos menos densos, mientras que, los más densos como los huesos, atenuarán los rayos X de tal manera que se verá un efecto de sombra como se ilustra en la figura 28.

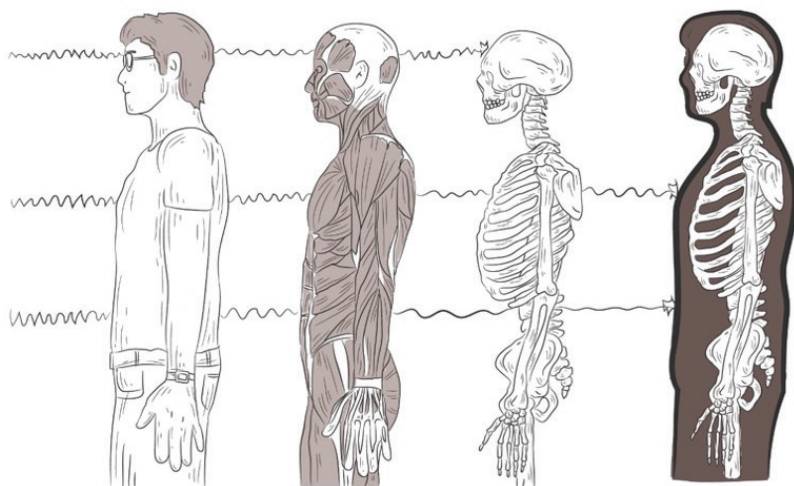


Figura 28. Transmisión de fotones en el cuerpo humano. La ilustración muestra cómo los fotones pasan a través de diferentes tejidos, entre más denso el tejido la atenuación es mayor y viceversa. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

En la imagen se muestra un flujo de fotones (las ondas que se aprecian) que interactúan con las distintas componentes de un sujeto, quien requiere un estudio de diagnóstico por rayos X. Como puede notarse en la imagen, los fotones atraviesan el cuerpo humano. Primero, observamos que los fotones interactúan con la ropa, piel y músculos, sin interactuar mucho con ellos. Posteriormente, la interacción se da con los huesos,

que son los elementos más densos del cuerpo. También, la interacción se da con el tejido pulmonar, que prácticamente se puede considerar aire, sin embargo, tenemos también componentes líquidos como la sangre o el líquido cefalorraquídeo. Retomando la imagen, notamos que los fotones que interactúan con el cráneo y huesos tendrán una mayor probabilidad de atenuarse, ya que el cráneo es uno de los huesos más duros, esto es porque la bóveda craneal protege a uno de los órganos más importantes de los seres humanos: el cerebro. Ahora bien, en la parte superior del tronco está la caja torácica que alberga a los pulmones, donde podemos asumir que el tejido es poco denso porque están llenos de aire y los fotones tienen menos atenuación. Por otra parte, en el tronco inferior tenemos diferentes tejidos blandos donde la atenuación también es menor comparada con la que sucede en los huesos, pero mayor a la de los pulmones.

Tomografías

A diferencia de las radiografías, una tomografía se caracteriza por proporcionar información en tres dimensiones del paciente, la cual puede ser de la anatomía o el funcionamiento de órganos y tejidos. La palabra tomografía desde el punto de vista etimológico proviene de los vocablos griegos τόμος (tomos) ‘corte, sección’ y γραφία (graphía), que a su vez se deriva de γράφειν (gráphein) ‘escribir’, ‘descripción’, o ‘representación gráfica’, por consiguiente, podemos definir que una tomografía es una representación en tercera dimensión de la imagen, la cual es la suma de obtener información del objeto de estudio desde diferentes proyecciones.

Entre las principales técnicas de tomografía aplicadas a la imagen diagnóstica tenemos las que proporcionan

información anatómica del paciente, como lo son la tomografía computada (CT, por sus siglas en inglés) y la imagen por resonancia magnética (MRI, por sus siglas en inglés). Existen otros tipos de tomografías que aportan información metabólica del paciente, la tomografía computada por emisión de fotón único (SPECT, por sus siglas en inglés) y la tomografía por emisión de positrones (PET, por sus siglas en inglés) (Bushberg *et al.*, 2002; Cherry *et al.*, 2012; Khan, 1994). A continuación, se describirán los principios básicos de física usados para la obtención de este tipo de imágenes.

Tomografía computarizada

Esta técnica de imagen, al igual que la radiografía, se basa en el uso de rayos X que interaccionan con los órganos y tejidos del cuerpo (o con cualquier material) para proveer información estructural del sujeto de estudio. La principal diferencia entre las técnicas es que la tomografía provee información 3D versus 2D de la radiografía.

La imagen tomográfica es una imagen de transmisión, es decir, se forma por los fotones (rayos X) que logran atravesar los tejidos del paciente y llegan al detector. El funcionamiento de la técnica inicia con la generación de rayos X en un tubo generador, de donde los fotones son emitidos a través de una apertura denominada ventana. El tubo se encuentra incorporado y fijo a lo que se conoce como "gantry", que es un dispositivo en forma de disco tridimensional y rotatorio. En el otro extremo del gantry y opuesto al tubo de rayos X se encuentran los detectores que registrarán a los rayos X que pasan a través del paciente, es decir, del tubo se emanan los rayos X mientras el gantry rota, de tal manera que el objeto

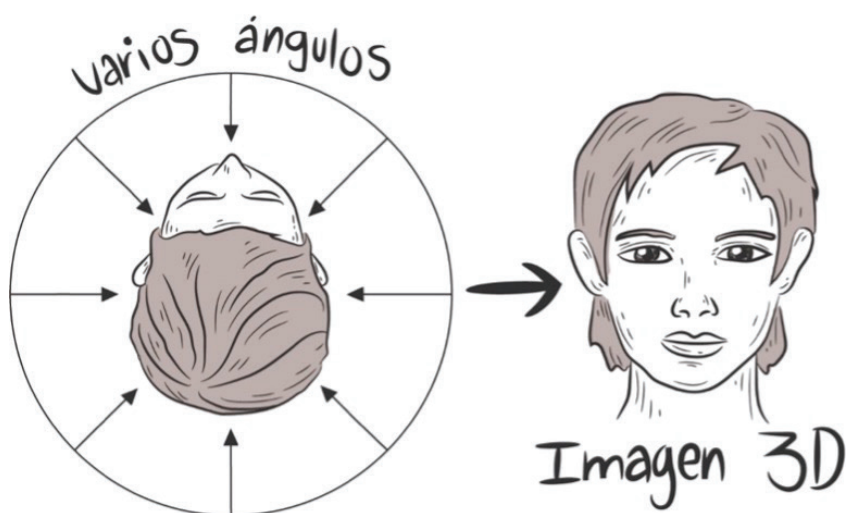


Figura 29. A través de las múltiples proyecciones que se realizan de un objeto con rayos X, se genera la imagen tomográfica. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

de estudio es irradiado en diferentes proyecciones, como se observa en la figura 29.

Los fotones transmitidos y registrados en los detectores trasladan la información del objeto de estudio para cada proyección la cual se almacena en forma de matriz. Entre mayor sean el número de proyecciones del objeto, la calidad de imagen a reconstruir será mejor. Esto es gracias a la transformada de Radon (1917), que menciona que para reconstruir un objeto basta con conocer su proyección. Actualmente, una imagen de CT puede visualizar objetos del orden de micras (millonésima parte de un metro).

Una imagen CT permite conocer la composición de los tejidos (densidad), composición medidas con escala Hounsfield (nombre en honor a uno de los inventores del CT, como veremos más adelante). Esta escala hace referencia al paso

de los rayos X a través de diversas estructuras anatómicas, donde los fotones serán atenuados de acuerdo con la composición de cada tejido, resultando en diferentes valores de los coeficientes lineales de atenuación (μ). Este concepto es la componente principal de una imagen de CT como la proyección (sombra) lo son en la radiografía.

La representación de la escala es mediante tonos de grises que aluden a los coeficientes lineales de atenuación que son característicos de cada estructura y están representados por un valor numérico (Unidades Hounsfield o UH), en la imagen diagnóstica suelen establecerse la escala hasta 4,096 tonos de grises que el ojo humano es incapaz de distinguirlos, mientras que las computadoras sí. Profundizando un poco en conocer la escala Hounsfield, esta generalmente se representa con valores de 1000 a -1000 UH pasando por el cero. Sin embargo, hoy en día tenemos materiales que tienen valores que salen de dicha escala, por ejemplo, hay unidades Hounsfield superiores al 1000, que corresponden a materiales densos a los cuales podemos asociarlos con una determinada dureza, por ejemplo, los metales (que en un paciente pueden encontrarse en prótesis de cadera, rodilla o incluso amalgamas dentales) que en la imagen pueden producir los denominados artefactos, que son perturbaciones en la calidad de la imagen tomográfica por la atenuación de los fotones. Mientras que el valor de 1000 UH y valores cercanos corresponden a los huesos del cuerpo, que como nos estamos imaginando son elementos también bastantes duros y densos, gracias a su composición de calcio. Con el valor de cero, se representa el agua, a pesar de que la composición del ser humano es 75% de agua, el valor hace referencia al agua líquida, incluida aquella que se encuentra circulando en el intestino y en la sangre. También podemos mencionar que valores entre cero y -100 UH corresponde a lo que se

conoce médicamente como tejidos blandos como lo son la piel, el músculo, el tejido conectivo y grasa por mencionar algunos. Finalmente, en la escala los valores cercanos al -1000 UH representan aire (Bushberg *et al.*, 2002), es decir, encontramos tejidos como los pulmones, algunas cavidades como los senos paranasales o incluso aire, dentro del intestino (figura 30).

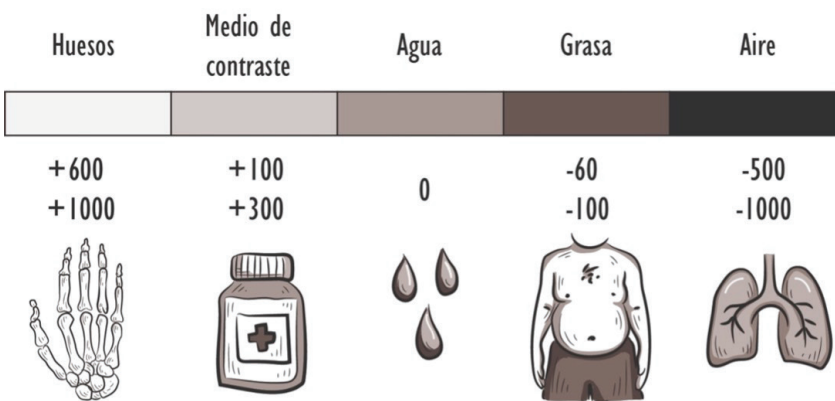


Figura 30. Ejemplo de los valores de algunas sustancias y tejidos en la escala Hounsfield. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

En esta figura se representa la escala Hounsfield, en donde podemos notar los valores desde 1000 hasta el -1000 UH. Sin embargo, un factor importante a enfatizar es justamente el tono de gris asociado para las UH. Es decir, valores que corresponden al hueso (1000 UH) se representan con el color blanco, el agua (0 UH) se asocia con un gris claro, mientras que los tejidos blandos (-100 UH) al gris oscuro y el aire (-1000 UH) como lo observamos en la figura, corresponde al color negro.

La precisión diagnóstica con CT y los avances científicos y tecnológicos han permitido el desarrollo de compuestos (fármacos) que ayudan a identificar estructuras con composiciones similares, tal como las vasculares (venas y arterias) con tejidos blandos como el intestino. A este tipo de compuestos se les conoce como “medios de contraste”, los cuales pueden ser suministrados vía intravenosa u oral. Estas sustancias se caracterizan por atenuar mayormente los rayos X, produciendo un contraste entre los tejidos en cuestión. En la actualidad, estos fármacos están sintetizados a partir del yodo ($Z=53$), elemento que el cuerpo humano puede eliminar de forma natural vía renal, cuentan con poca o nulas restricciones para su uso.

Breve historia de la tomografía computada

I get high with a little help from my friends

John Lennon / Paul McCartney

El desarrollo de la ciencia y la tecnología está lleno de coincidencias que en el momento y en la mente adecuada llevan al avance de algún campo del conocimiento. El desarrollo de las imágenes tomográficas no es la excepción, está ligado a la banda británica The Beatles, su sello discográfico y un ingeniero hasta entonces desconocido (figura 31). A finales de los 60, la banda tenía enorme éxito y vendía millones de discos en todo el mundo. Cuando se encontraba grabando el disco Sergeant Pepper's Lonely Heart's Club Band, bajo el sello de la compañía Electric and Musical Industries (EMI), un ingeniero eléctrico que trabajaba en la misma empresa, llamado Godfrey Hounsfield concibió la idea de visualizar a los órganos en tercera dimensión desde fuera del cuerpo usando rayos X, idea que requería de una gran inversión financiera. En esos años, la compañía EMI tenía ganancias millonarias pues la venta de discos casi había duplicado las utilidades de la empresa, lo cual le permitió invertir una cantidad considerable de dinero para financiar diversos proyectos de investigación, entre ellas la idea de Hounsfield (Freire, 2023).



Figura 31. Sirs Hounsfield, Lennon, Starr, McCarney y Harrison. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

La idea de Hounsfield se originó cuando analizaba el reconocimiento de patrones para radares (ver siguiente sección), los cuales son dispositivos que permiten detectar objetos usando ondas de radio. Hounsfield pensó en el proceso inverso, es decir, encontrar una manera de visualizar un objeto u órgano en tercera dimensión tomando diversas proyecciones desde distintos ángulos (figura 29). Unos años antes, el físico Allan MacLeod Cormack había formulado las bases físicas y matemáticas para esta idea de equipo que pudiera obtener una imagen 3D usando proyecciones, ideas que publicó en dos artículos en los años 1963 y 1964. En estos artículos proponía obtener imágenes a través de radiación ionizante como rayos X o rayos gamma midiendo densidades de diferentes tejidos del cuerpo humano. Adicionalmente, el matemático austriaco Johann Radon había formulado el desarrollo matemático sobre la reconstrucción de imágenes tanto en 2D como en 3D en un artículo publicado en 1917, teoría conocida hoy en día como la Transformada de Radon.

La idea de un equipo así era obtener un gran número de imágenes, ya sea sucesivamente, haciendo girar el aparato, o simultáneamente mediante varios emisores y detectores.

Este dispositivo tendría la capacidad de reproducir estructuras internas de un objeto a través de las líneas de atenuación, como las imágenes de rayos X, pero en 3D.

Para esas fechas, los rayos X ya eran ampliamente utilizados en medicina por medio de radiografías, técnica para detectar diferencias entre tejidos blandos y duros como los huesos. Sin embargo, el contraste que tienen estas imágenes en tejidos blandos como el cerebro, hígado o corazón es limitado, creando imágenes de poca utilidad clínica para estos tejidos, como se ilustra en la figura 32, en la cual es fácil distinguir un brazo roto, pero difícil ver estructuras blandas como el cerebro.



Figura 32. Imagen ilustrativa de una radiografía de fractura de muñeca y una radiografía de cabeza. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Teniendo en mente el problema clínico en tejidos blandos y sabiendo que los fotones se atenúan cuando pasan por un medio, Hounsfield pensó que los diferentes tejidos del cuerpo deberían reducir el haz de fotones en diferentes formas,

si se adquirían de distintos ángulos podría usarse esta característica en la reconstrucción de una imagen 3D.

Retomando el hecho que EMI financiaba proyectos de investigación, Hounsfield formuló y envió su propuesta, titulada "Una forma mejorada de la radiografía por rayos X", en la cual proponía realizar una serie de proyecciones con rayos X sobre un objeto, tomadas a diferentes ángulos para obtener información y reconstruir una imagen que representaría un corte del objeto, es decir, una "rebanada" (tomos). El sistema ideado por Hounsfield consideraba un detector para los rayos colocado en el lado opuesto de donde se emitían, así como un emisor de rayos. Posteriormente, las lecturas registradas se analizarían en un equipo de cómputo para formar la imagen, realizando transformaciones matemáticas. El proyecto fue aceptado por la EMI, autorizando el financiamiento para transformar los conceptos a un producto que auguraba ser bastante útil en la clínica. El Departamento de Salud Británico se interesó en el proyecto y designó a Evan Lennon como radiólogo asesor del proyecto.

Por este desarrollo, Hounsfield y Cormack ganaron el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1979, en cuya conferencia, Hounsfield mencionó que el primer prototipo que utilizó era un sistema con el cual irradiaba objetos mediante una fuente radiactiva de Americio, usada como una fuente portátil de rayos gamma, que rotaba alrededor del objeto de estudio, el escaneo tomó nueve días, registrando unas 28,000 mediciones (hoy en día son necesarios solo unos cuantos segundos para obtener una imagen tomográfica con rayos X). En cuanto al sistema de procesamiento, se empleó una de las computadoras más eficientes de esos días, de tal manera que el tiempo de procesamiento fue aproximadamente 2.5 horas. La optimización del sistema apareció cuando la EMI en conjunto con el Departamento de Salud Británico invirtieron

£12,000 al ver las primeras imágenes, dinero que se usó para adquirir un tubo de rayos X y un generador, obteniendo una reducción del tiempo de escaneo, es decir, se pasó de nueve días a unas nueve horas.

Después de probar su invento con diferentes objetos, Hounsfield colocó tejidos de animales, en particular probó con cerebros de buey y de cerdo obteniendo imágenes que mostraban las diferencias entre materia blanca y materia gris. El siguiente paso fue obtener imágenes de pacientes, no fue fácil, ya que como todo lo nuevo el método causaba desconfianza en el mundo de la medicina, en particular entre los radiólogos, que aún se mantenían escépticos. Finalmente, el doctor Lennon convenció al doctor Jamie Ambrose de reunirse con Hounsfield, Ambrose era médico radiólogo en el Hospital Atkinson Morley de Wimbledon en Londres, que curiosamente también trabajaba con un proyecto para adquirir imágenes del cerebro, pero él lo intentaba con método de ultrasonido y encefalografía. Ambrose le entregó un cerebro humano con un tumor, Hounsfield obtuvo una imagen del cerebro, donde se apreciaba exitosamente el tumor, además se notaba un aparente sangrado dentro del mismo. Después de visualizar diferentes imágenes, se construyó el primer prototipo, el escáner EMI que se instaló en el Hospital de Atkinson en donde se examinó a la primera paciente viva (octubre del 1971). El nombre de la técnica también evolucionó y pronto pasó a llamarse tomografía axial computarizada (TAC, por sus siglas en inglés).

Las imágenes de la primera paciente con sospecha de tumor cerebral confirmaron la existencia de un quiste en el lóbulo frontal, las imágenes impactaron no solo a los radiólogos sino a todo el personal del hospital que conocía sobre el proyecto. Posteriormente, se continuó probando el potencial del escáner con diez pacientes con afecciones

del cerebro, a quienes las imágenes ayudaron en su intervención quirúrgica.

La fama mundial de la técnica comenzó cuando el doctor Ambrose presentó diversas imágenes del cerebro en el Congreso Anual Británico de Radiología en 1972, ganando aceptación como una nueva herramienta para la detección y el diagnóstico de enfermedades permitiendo visualizar el cerebro desde el exterior, mostrando lesiones cerebrales y hemorragias internas.

Los primeros escáneres, aún con el nombre de escáneres EMI, fueron comprados directamente por el Departamento de Salud Británico e instalados en el Manchester Royal Infirmary, en Glasgow y en el Instituto de Neurología de Londres. Más tarde, otros dos escáneres fueron comprados y enviados a Estados Unidos, los cuales se instalaron en la Clínica Mayo y en el Hospital General de Massachusetts.

En la actualidad, existen millones de tomógrafos alrededor del mundo, siendo una herramienta muy útil en el diagnóstico de muchas enfermedades cerebrales y no cerebrales, como se verá más adelante.

Los equipos de tomografía también han evolucionado, pasando por diferentes generaciones de tomógrafos, en donde se optimizan parámetros para un mejor diagnóstico y reducir la dosis de radiación al paciente. Sin embargo, todos los modelos se basan en el uso de una fuente de iones (electrones) que actualmente viene incorporada en el tubo de rayos X, un sistema deflector magnético (imanes cuya función es desviar y variar el haz de electrones para concentrarlo en el blanco donde se producirán los rayos X), el gantry del tomógrafo generalmente presenta un anillo de tungsteno como blindaje a los fotones generados y cubierto mediante una carcasa de fibra de carbono (figura 33). Adicionalmente, se tiene la mesa, que es el lugar donde se sitúa al paciente para llevar

a cabo su exploración. La figura muestra estos componentes presentes en un equipo de tomografía computada.

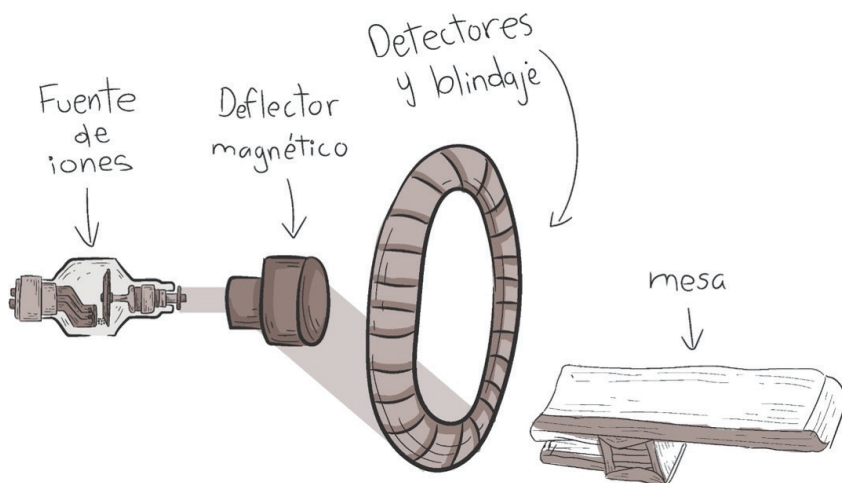


Figura 33. Principales componentes de un equipo de tomografía computarizada. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Se ha hablado de la historia del desarrollo de los equipos de tomografía con rayos X. Sin embargo, no se puede olvidar que en un inicio esta modalidad de imagen se le conocía como TAC, debido a que las imágenes eran cortes axiales o transversales, que a diferencia de la actualidad también se adquieren cortes sagitales y coronales, por lo que se le llama tomografía computada o CT, por sus siglas en inglés, incluso los términos algunas veces son usados como sinónimos para referirse a esta modalidad de imagen.

Resonancia magnética

Magnetismo

Antes de explicar las bases de la resonancia magnética, recordemos que el magnetismo es un fenómeno físico por el que algunos materiales ejercen una fuerza de atracción o repulsión sobre otros materiales (Pujal, 2010).

El fenómeno magnético se puede observar en un imán o una brújula que se alinea al campo magnético de la tierra (figura 34). La fuerza con la que se atraen o repelan los objetos magnéticos se mide en teslas (T), para darnos una idea de esta magnitud, el campo magnético de la Tierra varía de 25 a 65 microteslas (depende en qué parte de la Tierra se mida), mientras que un equipo de resonancia magnética moderno se requiere de miles de veces más el campo magnético terrestre (unidades de teslas, por ejemplo 1.5, 3,7 T). Por lo anterior, cuando se entra a un resonador es necesario no tener ningún objeto metálico pues es atraído fuertemente por el equipo (Gili, 2016).



Figura 34. Campo magnético de la tierra, brújula y un resonador magnético. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

El campo magnético de un resonador es generado de forma artificial por medio de bobinas, una forma de crear un campo magnético es mediante la circulación de una corriente en un alambre enrollado (bobina) (figura 35), en la cual una corriente es generada por baterías y al pasar por un alambre enrollado se genera un campo magnético (si ponemos una brújula en este dispositivo, podemos ver cómo la brújula se orienta).

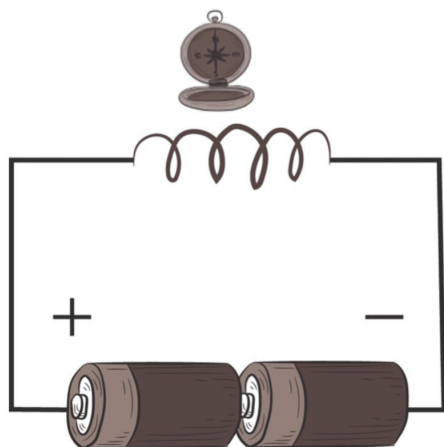


Figura 35. Generación artificial de un campo magnético mediante un arreglo de baterías y un alambre enrollado. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Fenómeno de resonancia magnética nuclear

La resonancia magnética nuclear es un fenómeno físico mediante el cual algunas partículas absorben energía al ser colocadas en un campo magnético intenso. El fenómeno fue descrito y aplicado en 1938 por Isidor Rabi (Premio Nobel de Física en 1944), en 1952 Felix Bloch y Edward Purcell ganaron el Premio Nobel de Física por sus trabajos sobre la medición de

campos magnéticos en núcleos atómicos, trabajos realizados de manera independiente (Carrington & McLachlan, 1967).

Purcell había trabajado en el desarrollo del radar y sus aplicaciones durante la Segunda Guerra Mundial, su trabajo durante ese proyecto era producir y detectar energía de radiofrecuencias y sobre el cómo la materia absorbe energía. El término radar es un acrónimo en inglés (radio detection and ranging) que significa “detección y alcance de radio”, el principio del funcionamiento de un radar en la actualidad tiene muchas aplicaciones, entre ellas el método de imagen médica conocido como ultrasonido. El principio de un radar es muy sencillo, un emisor genera una onda de cualquier longitud y un receptor o antena recibe la señal de la onda reflejada, esta onda es modificada según el medio que atraviese y el objeto (figura 36, por ejemplo, la onda sonora emitida por un murciélago o una onda de radio emitida por una antena). Este principio es muy importante en resonancia magnética, como veremos más adelante.

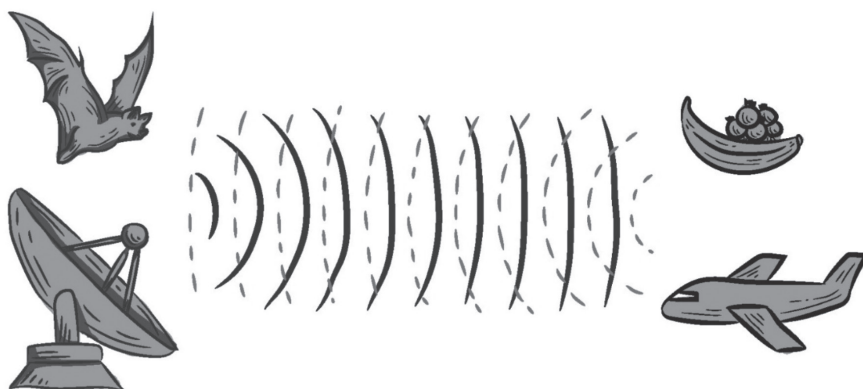


Figura 36. Ilustración de onda emitida, onda reflejada. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Los núcleos que presentan esta propiedad magnética, como el ^1H , pueden absorber energía de radiofrecuencia cuando son colocados en un campo magnético de una potencia específica haciendo posible identificar compuestos con estos núcleos. Diferentes núcleos atómicos dentro de una molécula resuenan a distintas frecuencias de radio para una misma fuerza de campo magnético. La observación de tales frecuencias resonantes magnéticas de los núcleos presentes en una sustancia permite obtener información química, estructural, espacial y dinámica acerca de las moléculas.

Espín giromagnético

Como vimos en el capítulo 1, la materia se compone de átomos, estos a su vez, están compuestos por electrones y un núcleo conformado por protones y neutrones. Los núcleos tienen la propiedad de oscilar sobre su propio eje, esta propiedad se le conoce como el espín giromagnético. Si los protones y neutrones de un átomo es un número par (recordemos que los números pares son aquellos que pueden dividirse entre dos, por ejemplo, los números 8, 102, 1202, etc.), entonces el espín $I = 0$, un espín distinto a cero estará asociado a un momento magnético (μ) distinto a cero, definido como:

$$\mu = \gamma I$$

donde γ es una propiedad intrínseca de cada átomo y se conoce constante giromagnética.

Los átomos con un momento magnético distinto a cero, precesa alrededor del campo magnético que experimenta (figura 37) teniendo una frecuencia específica para cada átomo, por ejemplo, el hidrogeno precesa a 42.5 MHz/T, haciendo de esta característica una huella digital de cada átomo, pues cada átomo precesa a una frecuencia diferente. Esta

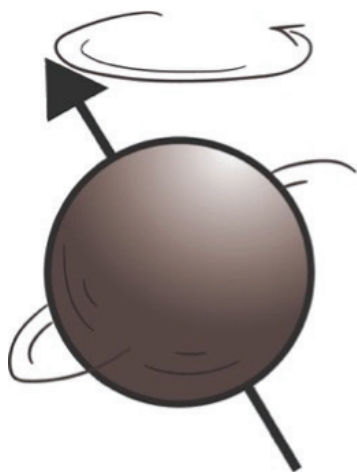


Figura 37. Ilustración de un núcleo precesando en su eje. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

característica del átomo de hidrógeno permite realizar imágenes clínicamente útiles pues los seres humanos estamos compuestos en gran medida de hidrógeno.

Imagen por resonancia magnética

Las imágenes por resonancia magnéticas son adquiridas en un equipo llamado resonador magnético que abarca un conjunto de técnicas que aprovecha diversos fenómenos físicos para obtener imágenes que pueden dar información anatómica, fisiológica e incluso de los materiales que componen la muestra analizada, como veremos más adelante. Aunque el equipo con el que se adquieren imágenes con esta técnica es el mismo, es posible obtener diferentes modalidades de datos, usando las propiedades magnéticas de la materia.

Las imágenes usadas en medicina con esta técnica utilizan, generalmente, la resonancia magnética de los átomos de hidrógeno, elemento abundante en los seres vivos y en la naturaleza debido a que es el elemento más común en el

universo pues es el elemento químico más sencillo, teniendo solamente un protón y un electrón. Recordemos también que los seres vivos estamos compuestos, en gran parte, por agua, elemento químico que se compone de 2 átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O), la palabra hidrógeno significa "creador de agua".

El fenómeno de resonancia magnética nuclear es el proceso por el cual los átomos con un número impar de protones y/o neutrones pueden absorber radiación electromagnética (ondas de radio) al estar en un campo magnético (Akitt & Mann, 2000). Los átomos al absorber esa radiación se alinean (figura 38), una vez alineados, se les puede transferir energía a través de una radiofrecuencia (recordemos del capítulo 1 que las ondas de radio son ondas electromagnéticas con frecuencias de MHz).

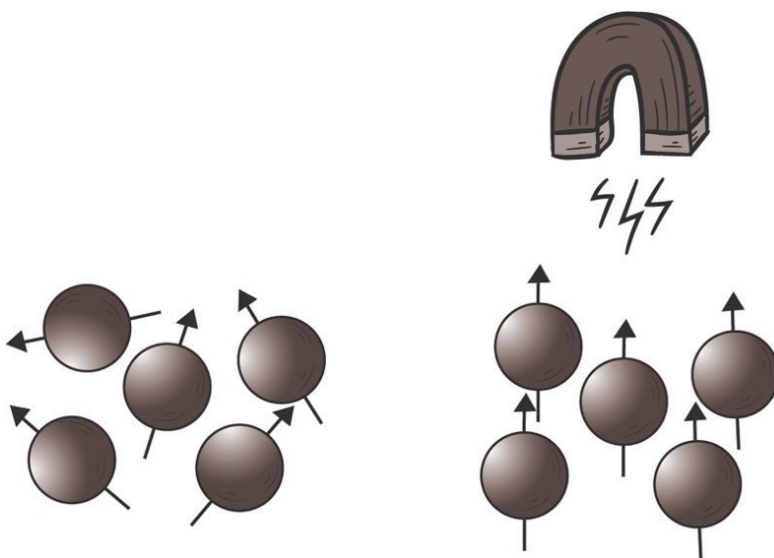


Figura 38. Átomos procesando al azar cuando no están en un campo magnético (izquierda) y alineados al estar en un campo magnético (derecha). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Los átomos al absorber radiación (fenómeno de resonancia) cambian de posición en la que giran, posteriormente, cuando no reciben una onda de radio, liberan ese exceso de energía mediante la emisión de ondas a una radiofrecuencia característica en el espectro de radiofrecuencia (como se ilustra en la figura 39) regresando a su alineación inicial al campo magnético, este fenómeno es conocido como el fenómeno de relajación.

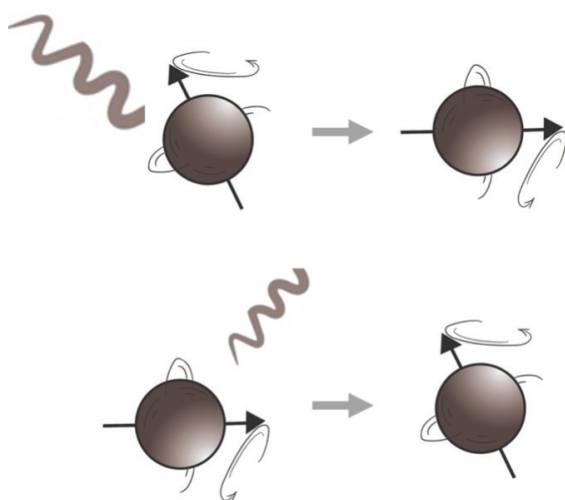


Figura 39. Fenómeno de resonancia magnética, un átomo en un campo magnético puede absorber radiación (arriba) y posteriormente devolverla regresando a su configuración original (abajo). Estas ondas se encuentran en la frecuencia de radio, en el espectro electromagnético. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Aplicando el principio anterior, pero ahora no a un solo átomo sino a una muestra (un objeto o un tejido biológico) compuesta de muchos átomos, los átomos de un mismo elemento realizarán un movimiento de precesión a una misma frecuencia ω , la cual es proporcional al campo

magnético, relacionándose con la ecuación conocida como ecuación de Larmor:

$$\omega = \gamma B_0$$

Donde γ es una constante giromagnética distinta para cada átomo y B_0 el campo magnético, notar que, al ser directamente proporcionales la frecuencia y el campo, a mayor campo magnético, mayor frecuencia.

Una vez que los átomos están alineados al campo magnético, es posible alinearlos en forma perpendicular mediante una onda de radio, como se ilustra en la figura 40, en la cual se muestra cómo los átomos se alinean horizontalmente cuando se emiten ondas de radiofrecuencia específica, una vez que las ondas dejan de emitirse, los átomos se vuelven a alinear al campo magnético.

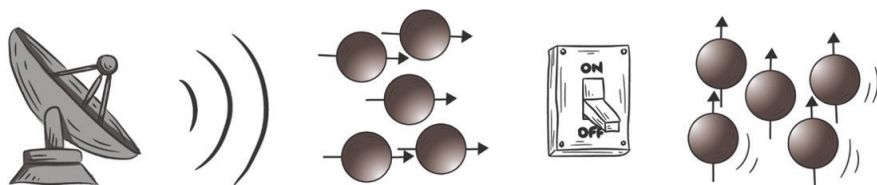


Figura 40. Una onda de radio emitida por una antena es capaz (a la frecuencia adecuada) de cambiar la orientación de giro de los átomos, una vez que la radiofrecuencia cesa, los átomos se alinean al campo magnético y emiten ondas que sirven para obtener información de la composición de la muestra. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Al dejar de emitirse la radiofrecuencia (por la antena), los átomos tenderán a su estado de mínima energía emitiendo el exceso de energía en forma de ondas de radio, es esta energía la que da información del objeto estudiado pues la señal emitida es diferente dependiendo de las moléculas que se encuentren a su alrededor, así la señal que proviene de un

líquido (sangre, por ejemplo) será distinta a la que proviene de un hueso o un tumor.

Lo anterior ocurre en un campo magnético uniforme, si existen pequeñas variaciones se tendrán distintas frecuencias de precesión. Este hecho es utilizado por los equipos de resonancia magnética, si un elemento de volumen (vóxel) es puesto en el campo magnético, los núcleos de hidrógeno precesarán y se orientarán en la misma dirección que el campo magnético, pero tendrán una frecuencia diferente que depende del entorno bioquímico en el que se encuentra, el cual ocasiona un desfaseamiento.

El átomo puede estar en la posición vertical u horizontal (figura 39), a escala de muchos átomos, en un vóxel, existirán un poco más de átomos en el estado menos energético. El cociente del número de partículas entre los dos estados resulta en un vector de magnetización M , el cual es proporcional a la señal que se obtiene de cada vóxel. M aumenta al aumentar el campo magnético, por este motivo los equipos con un campo magnético mayor tendrán una mejor resolución de imagen.

El médico Raymond Damadian propuso el desarrollo de este equipo de resonancia magnética para estudiar el cuerpo humano, basado en estudios que había desarrollado en células vivas analizando las propiedades magnéticas sodio y potasio (Mattson & Simon, 1996). Por otro lado, el químico Richar Robert Ernst realizó trabajos de espectroscopia observando como las frecuencias de resonancia características de los núcleos varían de acuerdo con la composición química del medio, pudiendo caracterizar el entorno de una sustancia o tejido, trabajo que le valió el Premio Nobel de Química en 1991.

Damadian junto con otros investigadores, obtuvieron la primera imagen de un corte axial de tórax en 1977 (figura 41) en el Instituto Smithsonian de Washington. Esta primera imagen de resonancia magnética humana fue adquirida durante cinco horas, imagen con muy baja resolución, pero fue suficiente para demostrar que la técnica era viable y útil. En la actualidad, obtener una imagen de alta resolución, usando esta técnica, se logra en tan solo unos minutos.

Por su parte Paul C. Lauterbur y Peter Mansfield ganaron el Premio Nobel de Fisiología o Medicina 2003, por sus aportes en el desarrollo de la técnica de resonancia magnética.



Figura 41. El doctor Damadian con su asistente Larry Minkoff, en las primeras pruebas de un equipo de Resonancia Magnética para obtener la primera imagen de corazón y pulmones con esta tecnología, en 1977. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Codificación de frecuencia y Transformada de Fourier

Como vimos, cada conjunto de átomos precesando a distintas frecuencias, dependiendo del entorno en que se encuentre y del campo magnético, emiten una señal diferente, cada conjunto precesando tiene un vector de normalización. Ese vector de normalización posee una amplitud que varía proporcionalmente dependiendo de la concentración de H_2O , pues a mayor concentración de átomos de hidrógeno la señal recibida tiene una mayor amplitud.

La señal se detecta como una sola onda, pero esa onda puede ser descompuesta en sus componentes originales mediante una Transformada de Fourier, la cual descompone una señal en las señales que la constituyen (Duoandikoetxea, 1995). Una vez descompuesta, cada señal tendrá información de las distintas frecuencias que se relacionan con el tipo de átomos que hay en la muestra.

Cualquier señal se puede representar como la suma de las distintas señales que la componen, la Transformada de Fourier permite extraer de una función las frecuencias de las que está compuesta, por ejemplo, cuando escuchamos un concierto, la música la escuchamos en conjunto. Si ponemos atención podemos darnos cuenta que está compuesta por diversos instrumentos tocando coordinadamente, el sonido de cada uno es una señal de que, para escucharla por separado, necesitamos una función matemática, conocida como la Transformada de Fourier, la cual permite escuchar cada instrumento por separado (figura 42).

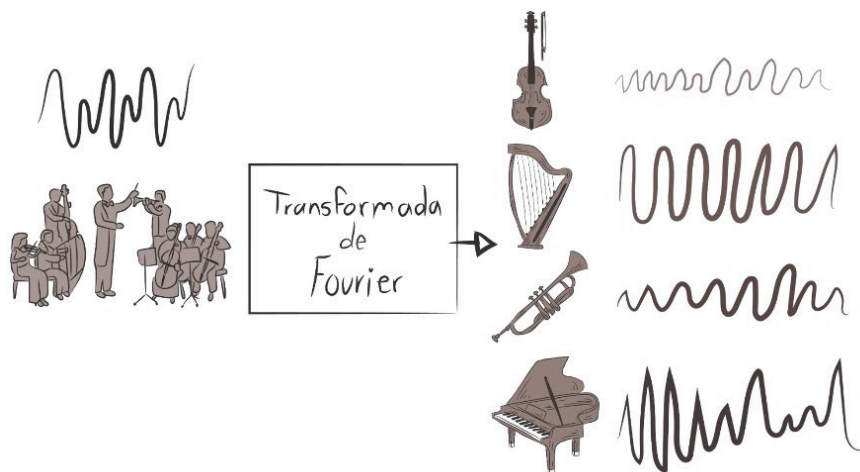


Figura 42. Descomposición de una señal (concierto de música) mediante la Transformada de Fourier en la suma de las señales que la componen (instrumentos musicales). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Codificación espacial

Aun cuando la señal ya estuviera descompuesta mediante la Transformada de Fourier, no sería posible determinar la posición de cada vóxel (elemento mínimo de volumen de una imagen tomográfica, es un pixel en 3D) solamente con los métodos ya expuestos. Es necesaria información extra que permita inferir el sitio donde se encuentra la señal antes de descifrarla. Cuando los protones se encuentran en un campo magnético homogéneo, precesan a la misma frecuencia absorbiendo igual energía de radiofrecuencia. Si ese campo magnético cambia ligeramente a lo largo del espacio, los protones precesarán a distinta frecuencia.

Lo anterior es muy útil para determinar la posición de un conjunto de protones con respecto de otro. En los equipos

de resonancia magnética se aplican cambios lineales en el campo magnético, es decir; un gradiente. De esta manera es posible modificar la frecuencia de resonancia del protón, la cual se hará dependiente de la posición que ocupa espacialmente.

Con dicho gradiente, existirán sitios en el que el campo magnético será ligeramente menos intenso y otras en la que será levemente más intenso con relación a un gradiente principal. El gradiente es generado por bobinas de gradiente los cuales generan un campo magnético mucho menor que el campo magnético principal, sin embargo, esa pequeña variación hace que los valores de intensidad del campo magnético varíen a lo largo de una dirección, permitiendo así codificar la posición espacial de cada vóxel.

Potenciación

El tiempo que transcurre entre el envío de un pulso de radiofrecuencia y la recuperación de la magnetización dentro del campo se denomina tiempo de relajación, este tiempo es lo que tardan los átomos en desfasarse cuando se envía el punto de radiofrecuencia. Como cada vóxel tiene una distinta densidad de átomos, podemos caracterizarlo si medimos los tiempos a los que emiten la señal. Existen diferentes parámetros que se pueden modificar con las distintas frecuencias y tiempos en que se emite y recibe la señal, dependiendo del tejido que se quiera visualizar se escoge uno u otro.

Otros parámetros que hay que considerar es el tiempo de repetición, el cual es el tiempo entre un pulso de radiofrecuencia y otro, el tiempo eco es el que existe entre la aplicación del pulso de radiofrecuencia hasta el pico de señal que recibe la antena.

En general, la técnica de resonancia magnética mide, de manera indirecta la densidad de protones (principalmente) presentes en una muestra, así los sitios donde hay más protones (sitios con más agua) se obtendrá una mejor señal, mientras que sitios con poca densidad de protones (aire) se verán en la imagen negros, pues existen menos protones en materiales menos densos.

Variando los distintos parámetros de tiempo y frecuencia que se emiten y/o reciben las señales de radiofrecuencia, se crea lo que se conoce como las secuencias de pulsos. Variando los tiempos y el número de pulsos que se emiten se pueden crear imágenes con distintos contrastes, en resonancia, las potencializaciones más conocidas son T1 y T2. En las imágenes ponderadas en T1 los líquidos no brillan (señal hipointensa) mientras que los tejidos grasos se ven intensa, estas imágenes son útiles para ver la anatomía del tejido blando y la grasa. En las imágenes ponderadas en T2, el líquido brilla (hiperintensa) y es útil para detectar ciertas alteraciones como tumores, procesos de inflamación y traumatismo.

Resonancia magnética funcional

La imagen por resonancia magnética funcional (fMRI, por sus siglas en inglés) es un proceso ingenioso para detectar cambios en el consumo de oxígeno por las células cerebrales usando un equipo de resonancia magnética. Este método permite obtener una imagen cerebral basada en la actividad neuronal.

Una de las diversas funciones de la sangre es llevar oxígeno a las células, al ceder el oxígeno, las propiedades magnéticas de la sangre cambian, convirtiéndose en paramagnética. Lo anterior permite identificar cambios en los niveles de oxigenación de sangre (contraste BOLD, por sus siglas en inglés) que utilizan las propiedades magnéticas de la oxihemoglobina y

deoxihemoglobina como medio de contraste endógeno. Las regiones del cerebro que están más activas tienden a necesitar más sangre oxigenada lo cual implica que hay una mayor actividad neuronal en esa región del cerebro (Caicedo *et al.* (2009).

Esta técnica permite detectar la actividad neuronal cuando se realizan tareas específicas, por ejemplo, es posible determinar qué regiones del cerebro están activas cuando vemos imágenes de la naturaleza (figura 43). Para esto, a un sujeto se le presentan imágenes de cosas de la naturaleza y cosas que no son de la naturaleza, por ejemplo, autos o edificios. Con el método anterior se pueden inferir las áreas activas del cerebro cuando realizamos distintas actividades cognitivas como escuchar música, hablar, pensar en algo en particular, etc. Con el fin de detectar las regiones activas, se clasifica cada vóxel como región activa o inactiva con respecto al estado de reposo o sin actividad neuronal. Durante un tiempo se presentan estímulos (figura 43, flor, carro, árbol y edificios) llamado bloque de actividad y después se utiliza otro intervalo en el cual no se presenta ningún estímulo (bloque de reposo). De esta forma es posible contrastar la activación cuando el sujeto responde con la actividad basal.

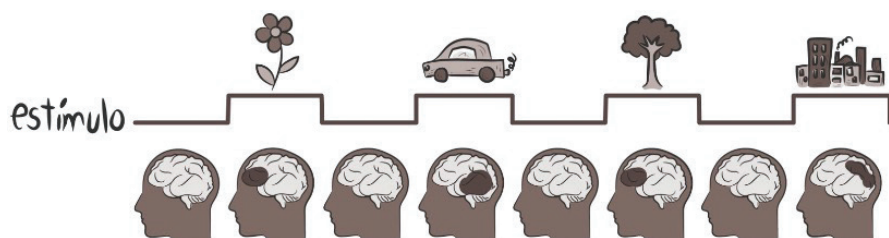


Figura 43. Estímulos visuales que se pueden presentar a un sujeto durante un estudio de fMRI. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Aunque esta técnica comenzó a usarse desde la década de los 90 del siglo XX, ya desde 1890 se sabía que el flujo cerebral de sangre se relaciona con la actividad de las neuronas, lo anterior fue demostrado con experimentos de Roy y Sherrington. Por lo tanto, las medidas del cambio en flujo cerebral de sangre inducidas por alguna estimulación pueden ser usadas para mapear funciones cognitivas pues cambios en el flujo sanguíneo cerebral provocan aumento en el nivel de oxigenación en los capilares.

En 1990, Seiji Ogawa realizó experimentos estimulando la corteza motora de ratas en un resonador magnético, demostrando que es posible el mapeo funcional cerebral usando el efecto BOLD (Ogawa, 1992). Después de esos experimentos se empezaron a realizar experimentos con humanos usando la técnica BOLD.

La fMRI es una técnica muy útil en neurociencias y psiquiatría pues permite visualizar la actividad neuronal del cerebro humano *in vivo* y de forma no invasiva. Esta técnica ha permitido el entendimiento de múltiples procesos que realizamos, por ejemplo, ayuda a localizar qué regiones están activas cuando vemos a una persona que amamos o cuáles cuando nos sentimos en peligro o tenemos miedo, también se estudian las regiones que se activan cuando movemos un brazo, hablamos o escuchamos música que nos gusta. La fMRI ayuda a entender de mejor manera diversas funciones del cerebro en la salud y en la enfermedad.

Imágenes por difusión

Esta técnica de imagen utiliza el principio físico del movimiento de partículas descrito por Albert Einstein. Cuando una partícula pequeña se encuentra en un fluido (un gas o un líquido) tiene un movimiento aleatorio, a este fenómeno se

le conoce como movimiento browniano y, es el resultado de choques contra las pequeñas moléculas del fluido. Einstein publicó en 1905 uno de los primeros artículos sobre este fenómeno (Einstein, 1905), su explicación aportó un argumento sólido para el desarrollo de la teoría atómica, descrita brevemente en el capítulo 1.

Einstein, usando principios de estadística y probabilidad infirió que las partículas tienden a tener una trayectoria promedio definida, aunque el movimiento de la partícula es aleatorio, su desplazamiento es hacia una dirección definida, demostrando que se podía determinar una dirección preferencial para el movimiento. Lo anterior lo podemos pensar como el movimiento de un ciclista en una montaña que va de izquierda a derecha, de arriba a abajo, luego de derecha a izquierda evadiendo una piedra o un árbol, tropieza con un hoyo y se levanta, se detiene a tomar agua, pero se dirige a un punto al final del camino. Una observación del ciclista permite inferir hacia donde se dirige y se pueden hacer predicciones sobre el tiempo que tardará en llegar, incluso sin saber exactamente con cuántos objetos tropezará o cuántas veces se detendrá durante el trayecto, Einstein infirió que, de forma análoga, las moléculas de agua en un medio confinado tienen una trayectoria definida.

Difusión

Si pensamos en el movimiento de las moléculas de agua, cada molécula se moverá con la misma probabilidad en cualquier dirección (figura 44), a menos que se encuentre con barreras físicas que le impidan moverse. Como en el caso del ciclista, se puede obviar el movimiento estocástico a corto plazo para predecir de lo que sucederá en un plazo mayor (el ciclista llegará a la meta).

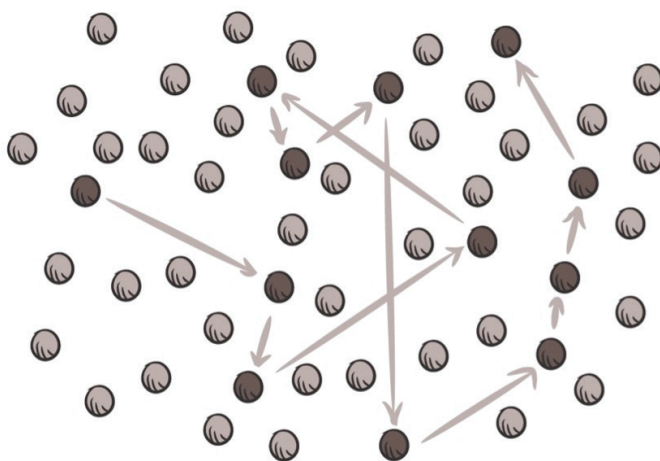


Figura 44. Ejemplo de movimiento browniano de moléculas de agua. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Una aplicación de este concepto en imágenes obtenidas con un resonador magnético, la imagen ponderada por difusión (DWI, por sus siglas en inglés) la cual se basa en la medición del movimiento browniano de las moléculas de agua dentro de un vóxel de tejido, el movimiento de las moléculas se ve limitado por la mielina que envuelve a los nervios periféricos (tractos de materia blanca), pudiendo seguir solamente la difusibilidad en dirección de las fibras nerviosas, propiedad conocida como anisotropía. Así se puede obtener imágenes de los tractos en el cerebro *in vivo* y ver qué estructuras están conectadas entre sí, analizar en ciertas enfermedades neurológicas o en procesos tumorales o isquémicos y qué estructuras están afectadas. Esta técnica permite obtener imágenes 2D y 3D de los tractos nerviosos a través del análisis la imagen obtenida se denomina tractografía.

Dentro de un axón el agua se difunde en la dirección del axón, pero lo hace más contra las paredes mielinizadas, con la resonancia magnética es posible analizar cómo difunde el agua y por lo tanto el sentido del axón. La materia blanca está compuesta por fibras de millones de axones que conectan las distintas partes del cerebro, siguiendo estas fibras podemos saber cómo está conectado el cerebro.

Espectroscopia

Otra de las ventajas de la resonancia magnética es que permite obtener estudios de espectroscopia, la cual se basa en detectar la absorción o emisión de radiación electromagnética. Por medio de esta técnica es posible obtener un espectro de moléculas bioquímicas de interés clínico, generalmente de los principales metabolitos que hay en el cerebro como la creatinina, colina o el N-acetil aspartato. Estas moléculas son detectadas por el equipo debido a que diferencias en su composición química hacen que su frecuencia de resonancia sea única para cada molécula (Keeler, 2005).

Con este método se obtiene un espectro de los metabolitos que se encuentran en el cerebro. Como se vio en el capítulo 1, el espectro electromagnético se puede caracterizar por su longitud de onda, análogamente, en la espectroscopia por resonancia magnética el espectro de los metabolitos en el cerebro se consigue basándose en la diferencia en la frecuencia de resonancia de estos metabolitos (figura 45).

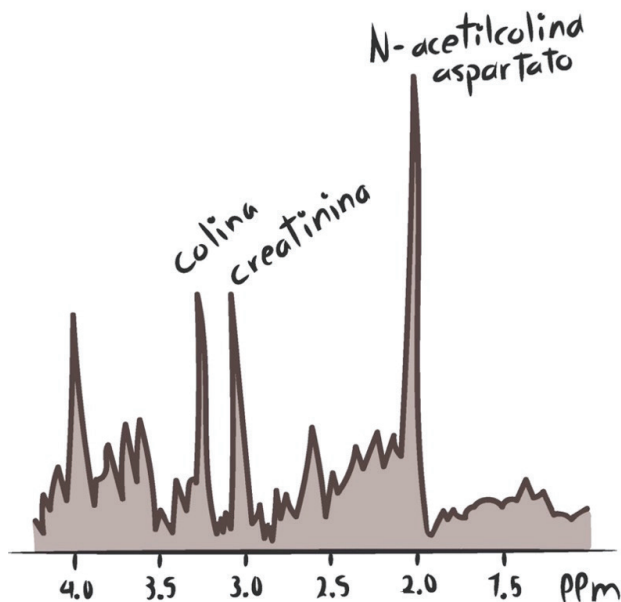


Figura 45. Espectro de algunos metabolitos cerebrales en un vóxel (ppm es el número de partes de ese metabolito por millón). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Este tipo de información es útil para detectar metabolitos específicos que pueden ser usados como biomarcadores en ciertas enfermedades, por ejemplo, en algunos tipos de tumor cerebral hay ciertos metabolitos en mayor o menor cantidad que en una región cerebral sin procesos de cáncer.

Medicina nuclear e imagen molecular

Nada en la vida es para ser temido,
es solo para ser comprendido.
Ahora es el momento de entender más,
de modo que podamos temer menos.

Marie Curie

El entendimiento de la estructura atómica en el siglo XX abrió una caja de Pandora de aplicaciones en el uso del átomo, desde lograr el sueño milenario de la transmutación de los elementos, añorado desde tiempos de Babilonia y Caldea hasta por el padre del método científico, Isaac Newton. Con este entendimiento la gente se dio cuenta que los átomos tienen mucha energía capaz de liberarse por medio de interacciones atómicas, creando cosas atroces como las bombas atómicas, pero permitiendo también la creación de energía de forma eficiente y su uso en medicina para terapia y diagnóstico. Es este último tema el que nos interesa en este libro, haciendo posibles imágenes a través de marcar moléculas con átomos radioactivos.

La medicina nuclear e imagen molecular utiliza átomos inestables (radioisótopos) que emiten energía en forma de ondas o partículas para producir una imagen o dar un tratamiento médico (Cherry *et al.*, 2012). En imagen, son usados para que emitan una señal desde el interior de una persona, a medida que un radioisótopo se desintegra en un átomo estable, se produce un cambio en su núcleo emitiendo algún tipo de señal en forma de onda o partícula. Por medio de tomógrafos, es posible detectar la radiación de estas emisiones y ser utilizada para crear imágenes tomográficas, cabe mencionar que estos tomógrafos son altamente sensibles, por lo cual la cantidad de radiación necesaria para crear una imagen es muy baja, además de que los isótopos usados

para este fin suelen decaer rápidamente, lo que garantiza que el paciente no esté expuesto a la radiactividad durante mucho tiempo.

El radioisótopo por sí solo rara vez irá al sitio de interés biológico de forma natural, hay que unirlo a una molécula de interés, a esta unión se le conoce como radiotrazador o radiofármaco, estos se diseñan para detectar sitios de enfermedades o de algún interés clínico dentro de un ser vivo.

La imagen molecular tiene dos modalidades, la tomografía por emisión de positrones y la tomografía computada por emisión de fotón único. Los isótopos usados en PET son átomos inestables con exceso de protones, que liberan energía que tienen en exceso convirtiendo el protón en un neutrón más un positrón y un neutrino también se le conoce como radioactividad beta+ (ver capítulo 1). Los positrones son la antipartícula del electrón, las antipartículas tienen la misma masa que su partícula, pero carga distinta y poseen la particularidad de que, al encontrarse con su partícula, convierten toda su masa en energía (en forma de radiación).

Cuando ocurre la interacción partícula-antipartícula, la energía es liberada en forma de rayos gamma de 511 keV (que viene de convertir la masa de cada partícula en energía con la ecuación $E=mc^2$) con la característica de ser emitidos a 180 grados entre sí (figura 46). Cuando los positrones atraviesan la materia, van perdiendo su energía cinética (energía de movimiento) hasta que son atraídos mutuamente con un electrón (recordemos que cargas opuestas se atraen). Cuando esto ocurre, ambas partículas se aniquilan y transforman toda su masa en forma de energía (figura 46) en forma de dos rayos gamma (Cherry *et al.*, 2012).

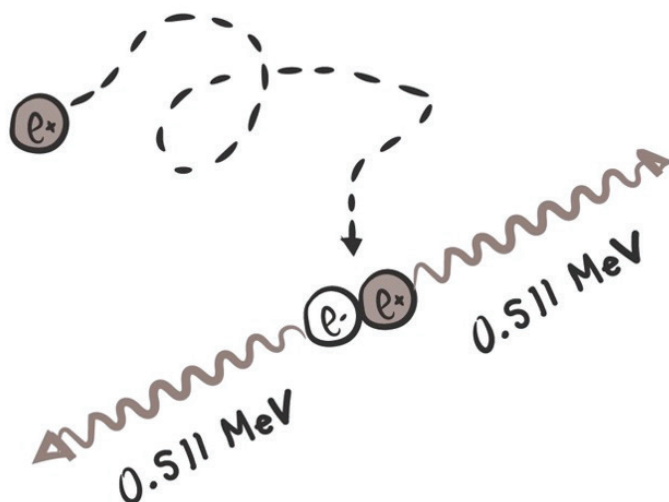


Figura 46. La aniquilación de un positrón con un electrón del medio produce dos fotones gamma de 511 keV cada uno, que viajan en dirección opuesta a 180 grados. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Todos los fotones gama creados a través de la aniquilación de positrones tienen exactamente la misma energía y son emitidos en direcciones opuestas entre sí (180 grados), característica usada para distinguirlos de otros fotones.

Las imágenes moleculares, más que las otras técnicas de imagen requieren que diferentes científicos como físicos, médicos, enfermeros, ingenieros y técnicos trabajen en estrecha colaboración. Los físicos e ingenieros nucleares diseñan formas de fabricar los radioisótopos y detectar la radiactividad. Los químicos sintetizan los radiotrazadores uniendo los radioisótopos a los vectores moleculares y realizan un estricto control de calidad de estos para que puedan ser usados en humanos, garantizando un producto estéril que no cause ningún daño al sujeto. Los científicos biomédicos prueban los radiotrazadores en células y en animales para realizar

investigación que nos ayude a entender una enfermedad o desarrollar nuevos tratamientos. Los médicos radiólogos y nucleares analizan las imágenes que se generan y las interpretan. Los físicos médicos trabajan con radiólogos para predecir cuánta radiación es probable que reciba cada parte del cuerpo de un paciente y así evitar posibles daños del personal que labora en las instalaciones, también ayudan a reducir las dosis que reciben los pacientes y se encargan de garantizar la calidad de las imágenes para que puedan ser interpretadas de manera correcta por los médicos. Los enfermeros se encargan de administrar el radiofármaco y cuidar el bienestar del paciente durante todo el procedimiento, mientras que los técnicos en imagen médica se encargan de adquirir y reconstruir las imágenes, también existen matemáticos y científicos de datos, encargados de diseñar modelos que ayuden a evaluar de manera más eficiente las imágenes.

Después de inyectar a un sujeto con un radiofármaco y, que este se biodistribuya en el cuerpo, se pasa al paciente a una cámara PET, que está compuesta por un anillo de detectores de centelleo. Un detector de este tipo tiene la función de absorber emisiones radiactivas y emitir destellos de luz visible o ultravioleta, que luego se pueden medir para generar una imagen con esa información por medio de diversos métodos matemáticos. El centelleo es el proceso por el cual ciertos materiales generan destellos de luz al interactuar con radiación (figura 47).

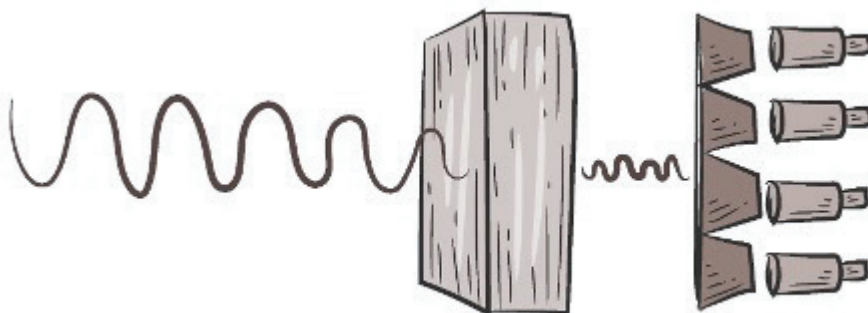


Figura 47. Cristales centelladores, al interactuar con la radiación, generan luz. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

La detección en PET se basa en el registro de dos fotones de 511 keV provenientes de una misma aniquilación del positrón emitido. Para que un evento sea considerado como verdadero se requiere que cumplan con ciertos criterios: una ventana temporal, una ventana energética y cumplir una determinada angulación (figura 48). La primera característica hace referencia a que los fotones sean detectados en un determinado tiempo, generalmente del orden de nanosegundos, en los equipos clínicos típicamente, esta ventana va de 6-12 nanosegundos. La segunda característica consiste en que ambos fotones deben poseer una energía cercana a la energía inicial, la ventana energética comúnmente es de 350 a 650 keV, la cual no es otra cosa que considerar los 511 más un rango permitido por si el fotón sufrió una interacción (posiblemente dispersión Compton) previa a su registro. El tercer parámetro, implica que de manera ideal los dos fotones de aniquilación deben tener un ángulo de 180 grados uno respecto del otro, por conservación de momento lineal, pero en la mayoría de los casos, no se cumple del todo, pues pueden tener una

ligera desviación de hasta 0.25 grados en la línea que forman los dos fotones.

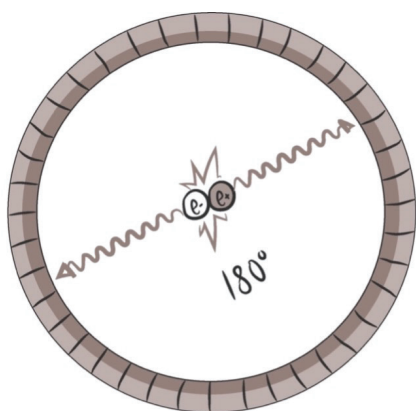


Figura 48. Representación de la detección de dos fotones gamma de aniquilación en un anillo detector. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Ahora bien, si el registro cumple con las tres condiciones, se conoce como evento verdadero y se asocia a una línea de respuesta (LOR, por sus siglas en inglés). Una tomografía tipo PET está formada por millones de estas LOR que son registradas mediante el uso de algoritmos especializado que las calcula, las almacena (forma el sinograma) y analiza para posteriormente reconstruir la imagen tomográfica.

Existen otros eventos que ocurren en el registro en PET, que no necesariamente provienen de una desintegración electrón-positrón, contribuyendo al ruido de la imagen, los más comunes son: únicos, dispersados, múltiples y aleatorios. Los únicos, son un tipo de evento donde únicamente es detectado un solo fotón, mientras que, el fotón complementario se pierde en el trayecto antes de llegar al detector, los motivos pueden ser porque llegó retrasado, sin cumplir con la ventana temporal, poseía energía menor a la requerida o simplemente se atenuó o dispersó en el medio y nunca llegó al detector.

Los dispersados, son los fotones que son discriminados porque han sufrido efecto Compton, lo que produce un cambio en su energía y dirección, por consiguiente, no cumplen con las condiciones de evento verdadero. Los eventos múltiples, hacen referencia al registro simultáneo de fotones provenientes de diferentes aniquilaciones, es decir, aunque se cumpla con las condiciones establecidas para eventos verdaderos, las LOR que se forman son hechas a partir de aniquilaciones de diferentes positrones, lo cual causa que la información registrada sea incorrecta. Finalmente, los eventos aleatorios como su nombre lo indica son el registro probabilístico de dos fotones también que pertenecen a distinta aniquilación por consiguiente, la LOR cumple, pero es incorrecta. Cabe señalar, que los eventos múltiples como aleatorios aumentan en ocurrencia con la actividad, es decir, entre mayor actividad se administre al paciente o sujeto de estudio es más probable que se favorezcan estos tipos de eventos.

Una de las desventajas en PET es el hecho de no conocer el lugar donde ocurre la aniquilación del positrón, para ello se han desarrollado métodos para estimar este parámetro, el denominado tiempo de vuelo (TOF, por sus siglas en inglés), el cual se obtiene gracias a la electrónica sofisticada que poseen los equipos de tomografía capaces de detectar ventanas temporales cada vez más precisas. El TOF consiste en conocer el tiempo del registro de los dos fotones, uno respecto al otro en los detectores. En la detección de fotones, uno de ellos llegará primero a un detector, mientras que el fotón complementario será registrado con una pequeña diferencia de tiempo por un detector opuesto, justo a 180 grados. La diferencia de tiempo es el parámetro por analizar para estimar la posición de donde provenían ambos fotones y, por consiguiente, conocer la posición de aniquilación del positrón. La electrónica sofisticada de los equipos modernos permite

conocer las diferencias en tiempo de los fotones, y considerando que viajan aproximadamente a la velocidad de la luz, es fácil calcular la distancia de su origen mediante la fórmula de velocidad (v), que es la distancia (d) entre el tiempo (t). De esta manera se estima la posición de aniquilación y se asocia una función de probabilidad (figura 49).

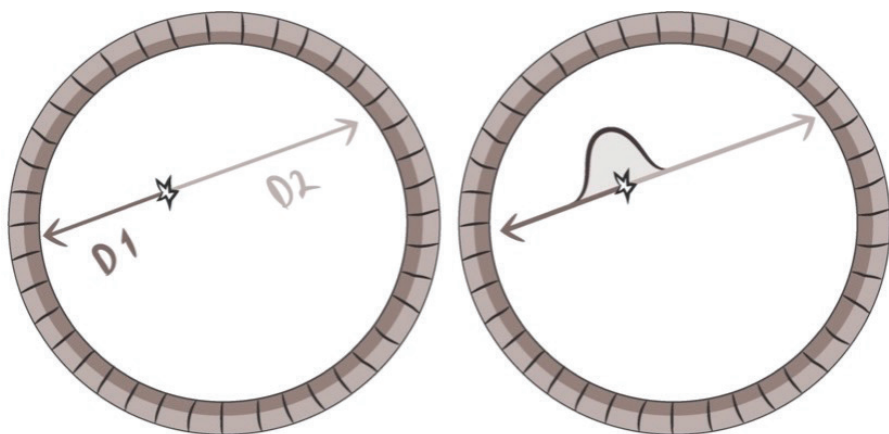


Figura 49. Tiempo de Vuelo (TOF) es un método para estimar probabilísticamente donde ocurrió la aniquilación del positrón, para ello se calculan las distancias $D1$ y $D2$ que recorre cada fotón antes de ser detectado en el anillo, estimando ese punto se le asocia una función de probabilidad tal como se muestra en ilustración de la derecha. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Radioisótopos en PET

Hoy en día, existen más de 3,800 radioisótopos, de los cuales solamente 541 de ellos son emisores de positrones. Sin embargo, no todos son aptos para PET. Hay algunas cualidades importantes que hacen que un radioisótopo sea útil para la obtención de imágenes PET, por ejemplo, una cualidad importante es la fracción de emisión para este decaimiento, de tal

manera que el ^{18}F es un radionúclido excelente en PET porque emite positrones hasta en 98% de su decaimiento, mientras que el ^{90}Y decae solo 34 partes por millón en positrones.

Un segundo aspecto por considerar es que los radioisótopos que emitan positrones de baja energía pues a menor energía del positrón emitido, menor será la distancia que recorre antes de ser aniquilado, por ende, la desintegración se aproximará mejor a la posición del radiofármaco en su blanco molecular.

Por último, el radioisótopo PET debe tener una vida media relativamente corta, pero suficientemente larga para realizar el estudio y eliminarse rápidamente (minutos o/a pocas horas), los radioisótopos con vidas medias cortas hacen que el paciente esté expuesto a una menor radiación. Los isótopos de PET tienen vidas medias que van desde unos pocos segundos hasta unos pocos días, pero no semanas o meses.

También es importante que los isótopos de PET se pueden preparar en cantidades utilizables mediante reacciones nucleares que no generan una gran cantidad de radioisótopos adicionales no deseados, de forma rápida y suficiente para muchos pacientes.

Producción de radionúclidos para uso médico

En términos generales, se pueden considerar que existen dos formas para la producción de radionúclidos para aplicaciones médicas, estos son los aceleradores tipo ciclotrón y por medio de reactores nucleares. Sin embargo, se puede considerar un tercer método denominado generador que en realidad proviene de las reacciones nucleares de un reactor nuclear. Estas tres formas de producir estos núcleos radiactivos se describen a continuación:

Aceleradores de partículas tipo ciclotrón

Los ciclotrones son dispositivos que aceleran partículas, el primer prototipo fue fabricado por Ernest Lawrence en 1931 en California (Childs, 1968). La principal característica de estos aceleradores es su forma circular, su uso es destinado para la producción de radionúclidos en aplicaciones médicas e investigación. En términos generales el proceso de producción de los núcleos radiactivos consiste en bombardear un material blanco con un haz de partículas cargadas con energía suficiente, capaces de inducir una reacción nuclear en los átomos de material blanco, transformándolo en un elemento distinto.

La teoría física en la cual se basa el funcionamiento de un acelerador, en particular el ciclotrón es en la teoría electromagnética, es decir, para que se lleve a cabo la reacción nuclear de la partícula cargada se requiere el uso de dos campos: un campo eléctrico (**E**) y un campo magnético (**B**), el primero es el responsable de incrementar la velocidad de la partícula y por consiguiente su energía, la fuerza eléctrica se define como el producto del campo eléctrico por la carga de la partícula, es decir, $F=qE$. El segundo campo, el campo magnético es el responsable de curvar la trayectoria de la partícula, confinándola a describir una trayectoria en forma de espiral, esto es debido a la fuerza Lorentz, $F= qv \times B$. Con relación a la energía cinética de la partícula, ésta se incrementará directamente conforme se alcanza un número mayor de vueltas en el interior del ciclotrón, pero disminuye si se acelera más de una partícula.

Los componentes principales de un ciclotrón son: una fuente de iones, electroimanes, electrodos en forma de "D", un generador de radiofrecuencia, deflectores de haz, sistema de vacío y un blindaje (figura 50).

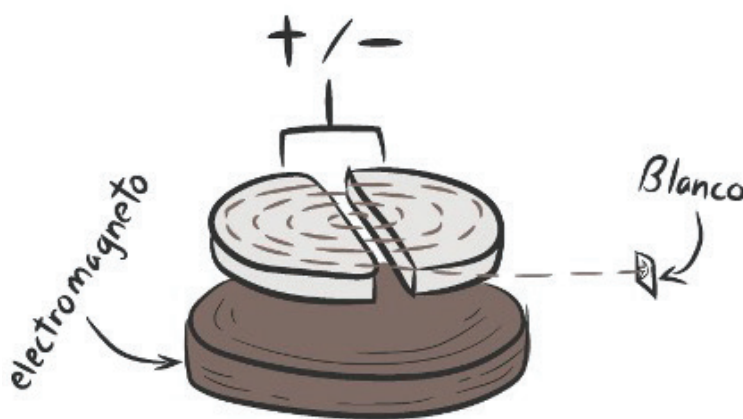


Figura 50. Diagrama de un Ciclotrón, se ilustra el electroimán responsable de generar el campo magnético, se muestran los electrodos D en los cuales pasa el haz de partículas que describen una trayectoria curva, finalmente se muestra la extracción para realizar el bombardeo en el material blanco. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Cada uno de los componentes es esencial para la producción de radionúclidos, por ejemplo, la fuente de iones es un elemento fundamental, ya que mediante este componente se generarán las partículas primarias que se van a acelerar mediante el campo eléctrico. Los electrodos D, son los componentes que atraerán e impulsarán a la partícula mediante una onda de radiofrecuencia (que también es un componente de un ciclotrón), cambiando la polaridad de la partícula muchas veces por segundo (del orden de MegaHertz). Los deflectores son dispositivos que tienen la función de redirigir el haz de partículas moldeando la trayectoria. Por otra parte, el sistema de vacío es fundamental para crear el vacío suficiente para reducir la fricción de las partículas con el medio y alcanzar la energía correspondiente. Finalmente, el blindaje es la protección exterior que tienen los diferentes modelos de ciclotrones para atenuar y absorber la radiación ionizante que se genera por la interacción del haz de partículas con los

componentes del ciclotrón y con el mismo blanco (proceso denominado activación).

Las partículas que se aceleran en estos dispositivos pueden ser partículas cargadas positiva o negativamente, es decir, son iones. Generalmente, es más común que los ciclotrones aceleren iones negativos en particular el de hidrógeno (H^-), que ha mostrado ventajas en cuanto se refiere a la extracción del haz versus otros tipos de ciclotrones que iones positivos como son: H , He , $+4He$. En ambos casos, la fuente de iones puede estar al interior de la cámara del ciclotrón o hallarse de manera externa a la misma.

Los ciclotrones pueden clasificarse de acuerdo con la energía nominal del haz de las partículas, por ejemplo, los ciclotrones biomédicos compactos son aquellos con energías relativamente pequeñas (aproximadamente 8-18 MeV) destinados a la producción de radionúclidos para uso médico. Con energías mayores de aproximadamente 25-30 MeV también pueden usarse para la producción de radionúclidos para medicina e investigación.

Energías mayores suelen usarse para terapia médica (hadronterapia o protonterapia, de aproximadamente 70 MeV) y finalmente, ciclotrones con energías mayores son empleados para investigación y desarrollos como el ciclotrón canadiense más grande del mundo, que tiene un haz de energía nominal de 500 MeV.

Un ejemplo para comprender más a detalle la producción de radionúclidos para uso médico es considerar un ciclotrón biomédico compacto que acelera iones negativos de hidrógeno. Estos son suministrados mediante una fuente de iones que alberga un gas de hidrógeno molecular, el cual es sometido a una corriente eléctrica para generar los iones, los cuales son atraídos a la cámara de aceleración (a veces denominada olla), lugar en donde empieza la aceleración por el campo eléctrico,

pero a su vez sienten la influencia del campo magnético, haciendo que el flujo de partículas gane velocidad mientras mantiene una trayectoria curva pasando a través de las cavidades de los electrodos tipo D. Con relación a la energía, esta se va incrementando conforme los iones ganan velocidad, en otras palabras, el ciclotrón es capaz de acelerar partículas a altas energías en un espacio relativamente pequeño. Para la extracción del haz, a diferencia de un flujo de iones positivos que requieren un deflector, el haz de iones negativos pasa a través de una lámina llamada "stripper foil" hecha de grafito, que tiene la propiedad de cambiar la polaridad del haz arrancando los electrones del ion de hidrógeno, es decir, se obtiene un haz de protones. Posteriormente, este nuevo haz es canalizado para el bombardeo del material blanco y generar los radionúclidos. Los principales núcleos radiactivos para el marcado de moléculas para uso médico en PET son: ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , radioisótopos que se generan mediante reacciones nucleares (p,n) o (p, α).

Las reacciones nucleares que se llevan a cabo en el ciclotrón deben cumplir dos condiciones: la primera es que la partícula proyectil o que bombardea posea la suficiente energía cinética para vencer la barrera de Coulomb, fuerza de repulsión que ejerce el material blanco y la segunda es superar la barrera de la energía umbral para que la reacción pueda llevarse a cabo.

Reactores nucleares

Otro dispositivo que se usa para producir radionúclidos para fines médicos es el reactor nuclear, el primer prototipo fue desarrollado por Enrico Fermi en 1941 (Schwartz, 2017). Este tipo de equipos ha tenido gran relevancia desde la Segunda Guerra Mundial, ya que es un mecanismo capaz de

aprovechar la fisión nuclear y producir mucha energía en el proceso. Los reactores, usados para producir radionúclidos y para generar electricidad, están en centrales nucleoelectricas, generalmente, véase figura 51. Estas son instalaciones para manejar energía nuclear y siguen normas operativas rigurosas para evitar accidentes e incidentes.

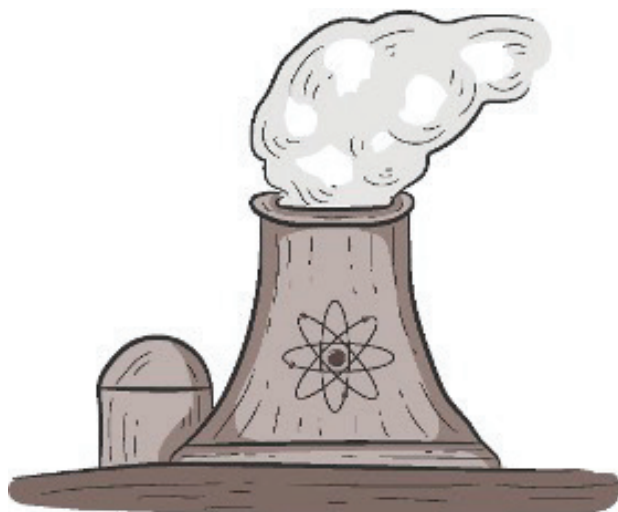


Figura 51. Reactor nuclear en una central nuclear, ampliamente usados para la producción de electricidad. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Un reactor nuclear se compone de estos elementos: una vasija de acero, el combustible nuclear, un moderador, barras de control, sistemas de intercambio y extracción de calor, y un blindaje. La vasija tiene la función de albergar el material combustible con el cual se llevará a cabo las fisiones nucleares a través de reacciones en cadena, que son controladas por las denominadas barras de control, las cuales están hechas de materiales con afinidad para absorber neutrones, por otra

parte, los moderadores son elementos que tienen la función de reducir la velocidad de los neutrones rápidos (neutrones con mucha energía cinética). Los sistemas de intercambio de calor son los responsables de mantener el sistema estable y evitar que el calor generado por cada reacción nuclear incrementalmente fundiendo los componentes anteriores, estos sistemas de intercambio de calor generalmente son sistemas a base de circuitos de agua que ayudan a enfriar el mismo reactor, finalmente, tenemos el blindaje el cual es indispensable para evitar la radiación ionizantes que se genera durante el funcionamiento del reactor, por ejemplo hay radiación gamma, por neutrones e incluso puede haber radiación debido a partículas cargadas como alfas o betas.

La fisión nuclear, como se ha dicho, se lleva dentro de la vasija, este proceso consiste en que los núcleos atómicos de un elemento fisionable (material blanco), por ejemplo, ^{235}U o ^{239}Pu son bombardeados por neutrones, los cuales son generados por un elemento proyectil que emite neutrones de manera espontánea (Brünglinghaus, 2017). Cuando el núcleo del material blanco recibe el impacto, este se vuelve inestable, produciéndose la fragmentación de este, generando núcleos más ligeros y la liberación de otros neutrones que impactaran con otros núcleos blancos, para continuar con el proceso de fisión, este proceso se le conoce como reacción en cadena (figura 52). Adicionalmente, los productos de fragmentación que generalmente son isótopos radiactivos tienen vidas medias largas y son acompañados de la emisión de otros tipos de radiación como beta, gamma, etc. Sin olvidar que el proceso genera una gran cantidad de calor que se emplea para la producción de vapor de agua que moverá las turbinas para la generación de corriente eléctrica.

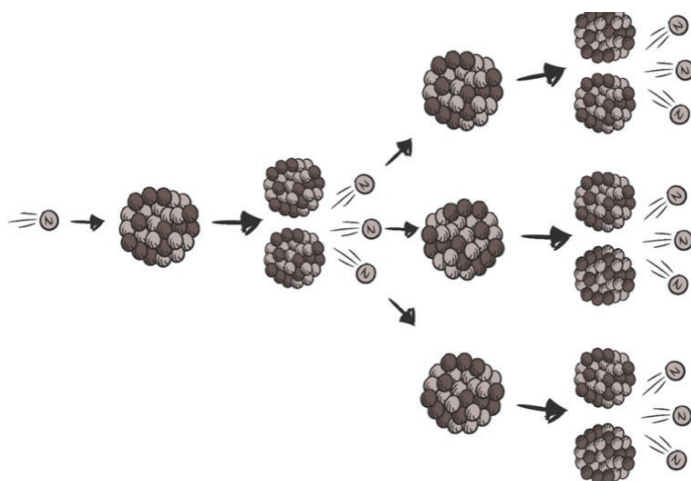


Figura 52. Reacción en cadena de un material fisionable. Un neutrón incide en un núcleo fisionable generando diferentes fragmentos de otros núcleos atómicos y la liberación de neutrones que interaccionarán con otros núcleos inestables, produciendo una reacción en cadena. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

El sistema del reactor puede ser subcrítico, crítico, supercrítico. Los tres términos hacen referencia a la generación de neutrones debido a la fisión nuclear, de manera que un sistema subcrítico es aquel donde se generarán menos neutrones que los que inician la reacción, el estado crítico es cuando la cantidad de neutrones generados es igual a la cantidad de neutrones iniciales y finalmente, el sistema supercrítico se tiene cuando la cantidad de neutrones es mucho mayor a los iniciales. Para cualquier caso, el flujo de neutrones puede ser controlado por medio de las barras de control que tienen la propiedad de absorberlos, además, las velocidades de los neutrones pueden ser reducidas mediante moderadores.

Las turbinas que generan la corriente eléctrica son movidas por el vapor de agua generado por la energía térmica

liberada de la reacción nuclear (aproximadamente por cada núcleo fisionado se producen 200 MeV). El vapor de agua se produce a través de un sistema de circulación de agua para enfriar el reactor. Este sistema puede estar en contacto directo con el reactor o circular por fuera del mismo. El primer caso es llamado reactores de agua a presión, en los cuales el agua en estado líquido se encuentra a una presión bastante alta y circula dentro del reactor, la generación del vapor se produce fuera del reactor a través de un intercambiador de calor. El segundo caso es para los reactores de agua de ebullición donde el vapor se produce dentro de la vasija del reactor y este es extraído y redirigido hacia las turbinas.

En resumen, la energía nuclear es una forma de generar calor mediante el proceso de fisión, el proceso de fisión es la división de átomos pesados en átomos más pequeños. La fisión ocurre cuando los neutrones interactúan y son absorbidos por átomos pesados, como el uranio, lo que hace que se vuelvan inestables y se dividan por fisión. Este proceso genera calor. Ciertos átomos pesados también liberan neutrones cuando se fisionan. Cuando estos neutrones adicionales provocan más fisiones, se produce una reacción en cadena que sustenta la generación de calor y otros elementos radioactivos, algunos de estos elementos son de utilidad para imagen médica.

Generadores

Un tercer método para la producción de radionúclidos para uso médico es a través de los generadores conocidos comúnmente como “vaquitas” (figura 53), debido a que la extracción de radioisótopos es primordialmente a cierto tiempo, como si fuera un horario similar a los horarios de ordeña de una vaca.

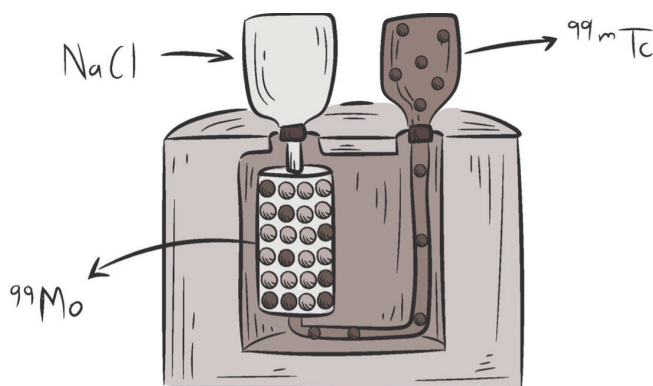


Figura 53. Ilustración típica de un generador de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ para el área de medicina nuclear y gammagrafía. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Un generador es relativamente pequeño (30-50 kg), lo cual lo convierte en una herramienta portátil y ampliamente útil cuando no se tiene un ciclotrón o un reactor para la producción de radionúclidos, este está conformado principalmente por un sistema de extracción de material radiactivo, el material radiactivo, sistema de boquillas y blindaje, principalmente. Su funcionamiento se basa en el decaimiento de un núcleo padre (proveniente de un reactor nuclear) que decae a su núcleo hija y este material es el que se emplea para el radio-marcado de moléculas de interés biológico. El núcleo padre se encuentra impregnado en una resina dentro del contenedor en el generador, ahí mismo también se produce el núcleo hija, las actividades de ambos radionúclidos pronto llegan a un equilibrio transitorio (condición que nos indica que la vida media del padre es mayor que la vida media del núcleo hija).

El proceso de extracción del núcleo de interés se hace a través del sistema de extracción, administrando generalmente solución salina al 0.9% o agua inyectable (productos estériles), la solución suele ser de algunos cuantos mililitros y esta pasa a

través de pequeños tubos de plástico que atraviesan la resina con los radionúclidos padre-hija, arrastrando con la solución el radioisótopo hija, extrayéndola por la boquilla de salida del generador, donde es recolectada en un vial para posteriormente llevarla al proceso de radiomarcado. Cabe señalar, que el generador se encuentra en todo momento blindado o dentro de un contenedor que evita la exposición a la radiación ionizante.

Entre los generadores más conocidos para radionúclidos de uso médicos, se encuentra el generador de $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ que es un núcleo radiactivo que se emplea en las técnicas de SPECT y gammagrafía, mientras que para PET se tienen generadores de $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ y $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$, por mencionar algunos.

Emisores gamma

Son núcleos radiactivos que presentan un exceso de energía, la cual liberan a través de la emisión de fotones de alta energía, denominados rayos gamma por generarse en el núcleo atómico. Este tipo de radionúclidos son usados en técnicas de imagen en la medicina nuclear convencional (gammagrafía) y en la tomografía computarizada por emisión de fotón único (SPECT). Los fotones gamma pueden presentar un amplio rango de energía, la cual es aprovechada para estas modalidades de imagen, por ejemplo, el $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (la "m" hace referencia a que es un elemento metaestable) emite fotones gamma de 140 keV, mientras que otros como el ^{201}Tl emite fotones de 88 keV, por lo que se establecen ventanas energéticas, que hacen referencia a detectar los fotopicos para una energía en particular, es decir, se determinan para cada radionúclido.

Detectores

Una vez que un emisor de positrones o un emisor de gamas es creado irá emitiendo radiación al desintegrarse, al unirlo a una molécula de interés biológico es posible localizar la molécula blanco dentro del ser vivo, detectando la radiación que emite desde ese blanco una vez que se une, para lo anterior es necesario el uso de detectores.

Un detector de radiación en medicina nuclear es un sistema que es capaz de detectar la radiación ionizante proveniente del paciente para analizarla y formar la imagen diagnóstica. Un detector típico está compuesto por los siguientes elementos: un cristal centellador que es acoplado a un sistema de tubos fotomultiplicadores comúnmente conocidos como PMT (por sus siglas en inglés de tubo fotomultiplicador) tal como se muestran en la figura 54 o con un sistema de fotodetectores de estados sólido-basados en silicio denominados como SiPM (por sus siglas en inglés de fotomultiplicador de silicio). Entre estos dos elementos suele colocarse una guía de luz, cuya función es transportar y distribuir los fotones visibles que se generan en el centellador cuando la radiación ionizante electromagnética interacciona en el hacia los fotomultiplicadores. Adicionalmente, entre cada elemento se le añade una capa de grasa óptica con propiedades refractivas muy similares al cristal y la guía de luz para evitar la pérdida de luz cuando los fotones cambian de interfaz.

En cuanto al cristal centellador, este es un elemento fundamental y es el responsable de transformar la energía de los fotones gamma o rayos X en luz visible, los cuales viajan por todo el detector hasta alcanzar el cátodo de los fotomultiplicadores. Los cristales la mayoría de las veces son recubiertos en al menos cinco de sus caras con materiales altamente reflejantes para evitar que la luz que alcanzan las orillas pueda

escapar, de tal manera que este proceso optimiza la recolección de fotones que formarán la imagen. Por otra parte, cuando los fotones de luz llegan al fotocátodo en el PMT estos generan electrones que son atraídos por una diferencia de voltaje a un sistema de electrodos conocidos como dinodos, en los cuales se genera una ganancia en la señal eléctrica que es hasta del orden de 10^6 , la señal es recolectada en un sistema de electrónica en la cual se lleva el análisis y procesamiento de la misma para formar la imagen del paciente, en donde se le pueden aplicar una serie de filtros de corrección y suavizado para mejorar la calidad de la misma (Bushberg *et al.*, 2002).

Estos detectores de radiación están diseñados para cada modalidad de imagen en medicina nuclear, en PET los detectores siguen la misma configuración como la que se describió a diferencia de los detectores de SPECT y gammagrafía que además de los elementos mencionados tienen un aditamento llamado colimador, el cual es importante para la selección de fotones que formarán la imagen en esta modalidad, este aditamento se describe en el siguiente párrafo debido a que existen diferentes modelos y ampliamente usado en la denominada medicina nuclear convencional.

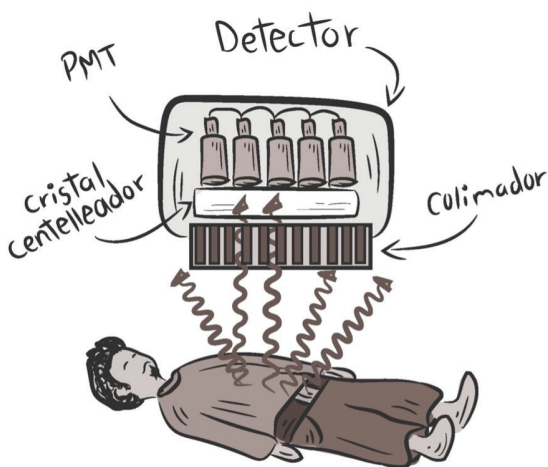
Colimador

Es un elemento físico e indispensable en los equipos de gammagrafía y en el SPECT, este aditamento es el primer medio en el que interaccionan los fotones provenientes del paciente antes de formar la imagen. La función principal del mismo es discriminar fotones que no presenten una dirección preferencial, ya que muchos de los que llegan al colimador presentan una determinada angulación, misma que pudo ocurrir por un proceso de dispersión previamente, lo que se

traduce como una pérdida de energía del fotón, implicando que la imagen presente mala resolución espacial. Los colimadores son placas con orificios que permiten el paso de la radiación electromagnética en una dirección particular, son hechas generalmente de plomo, elemento que atenúa gran parte de esta radiación dispersa, estos se colocan previamente en los detectores y también sirven para proteger a los cristales centelleadores de golpes físicos o mecánicos, figura 54.

El diseño de un colimador involucra cuestiones geométricas de los septos (longitud de los orificios), grosores, característica de las imágenes a obtener incluso energías de los fotones. Por ejemplo, los colimadores más usados son: hoyos paralelos (parallel hole), tipo alfiler (pinhole), convergente (converging) y divergente (diverging) (Cherry *et al.*, 2012). Además, se clasifican como baja energía y alta resolución o energía y baja resolución, esto último es debido a la relación que existe entre sensibilidad y resolución espacial en el colimador.

Figura 54. Sistema de detección en Medicina nuclear, la imagen muestra un detector integrado por el cristal centelleador, la guía de luz y el fotodetector (PMT). En la imagen también se muestra el colimador, aditamento que selecciona los fotones en una determinada dirección. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.



PEM

El cáncer de mama, junto con el cervicouterino son las principales causas de muerte en mujeres en el mundo. En la actualidad, la mejor herramienta contra el cáncer de mama es la mastografía pues ayuda a una detección oportuna de la malignidad, lo cual es determinante para un correcto control de la enfermedad; sin embargo, cuando ha avanzado, es necesario medir la efectividad de los tratamientos, para lo cual se recurre a los métodos tomográficos como CT, MRI o PET, este último con radiofármacos específicos que ayudan a discernir entre variantes de la enfermedad, incluso se han desarrollado equipos exprofeso para esta tarea, como se ilustró en el capítulo anterior. La enfermedad tiene tanta incidencia social que se ha desarrollado un equipo basado en medicina nuclear específico para detectarla, la mamografía por emisión de positrones, mejor conocida como PEM (positron emission mamography), técnica de la imagen molecular, que al igual que el PET se basa en el uso de radiofármacos marcados con emisores de positrones. La PEM se considera una herramienta complementaria a la mastografía radiológica o incluso a otras técnicas para la detección de neoplasias de la mama, como lo son el ultrasonido o la resonancia magnética. Se caracteriza por proporcionar información metabólica del tejido escaneado a través de imágenes 3D. También, es útil para la evaluación y estadificación de los diferentes estadios de cáncer de mama.

El radiofármaco más usado en PEM es la fluorodesoxiglucosa ($[^{18}\text{F}]\text{FDG}$). Sin embargo, existen otros posibles candidatos como el fluroestradiol ($[^{18}\text{F}]\text{FES}$) y fármacos en desarrollo marcados con isótopos de radiometales, por ejemplo, ^{68}Ga o ^{64}Cu . En cuanto a la actividad inyectada en una paciente, suele aplicarse alrededor de 185 MBq (5 mCi) con $[^{18}\text{F}]\text{FDG}$ vía intravenosa, los protocolos a seguir son parecidos a PET, ya que

la biodistribución del radiofármaco también se considera del orden de 40-60 minutos antes de pasar al paciente al escáner. Para llevarse a cabo el estudio, algunos equipos comprimen la mama moderadamente, buscando aumentar la sensibilidad, lo que se traduce en una imagen de mayor calidad (figura 55).

Los equipos PEM actuales, suelen estar conformados por un par de placas que presentan una fila de detectores en cada una, basados en cristales centelleantes acoplados a fotodetectores, los cuales pueden desplazarse horizontalmente sobre la longitud de la mama. Mientras que las adquisiciones a distintos ángulos se realizan debido a un brazo mecánico con diferentes grados de libertad (figura 55).

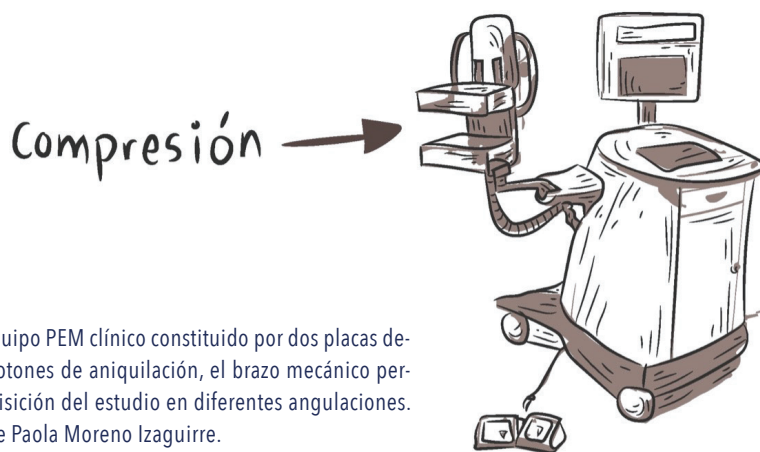


Figura 55. Equipo PEM clínico constituido por dos placas detectoras de fotones de aniquilación, el brazo mecánico permite la adquisición del estudio en diferentes angulaciones. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Radiofármacos

La medicina nuclear e imagen molecular es un método que permite obtener imágenes funcionales de diversos procesos fisiológicos, metabólicos, cognitivos, circulatorios y farmacológicos. En este método se inyecta en el paciente una sustancia química radiactiva llamada radiofármaco. Los radiofármacos o radiotrazadores tienen dos partes principales: una que apunta al blanco molecular y un átomo inestable (radioisótopo) que emite radiación. Con esto se pueden detectar señales radiactivas dentro del cuerpo y usarlas para crear una imagen 3D del sitio donde se encuentra el marcador (y la enfermedad). Podemos imaginar estos procesos como si fuera una ruta de carretera en donde cada automóvil tiene uno o varios destinos distintos y viaja (sistema circulatorio o respiratorio) hasta llegar a su lugar de destino, donde tiene un cajón de estacionamiento en el que encaja perfectamente y desde ahí va a emitir una señal para ser localizado (figura 56). Un radiofármaco está compuesto de millones de átomos, entonces al llegar a su blanco molécula es donde emitirá mayor número de interacciones.

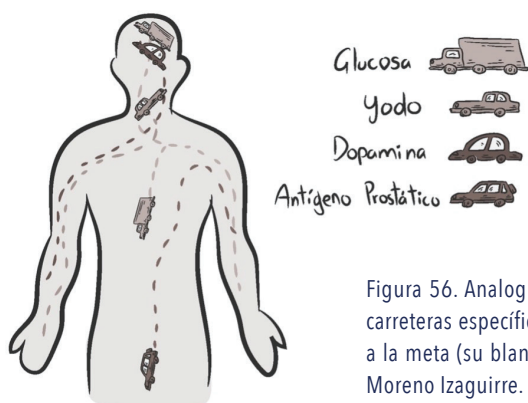


Figura 56. Analogía entre radiofármacos y autos con carreteras específicas (rutas metabólicas) hasta llegar a la meta (su blanco molecular). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Existen diversos radiofármacos usados en medicina nuclear, dependiendo la enfermedad o los procesos que se requieran evaluar se usa uno u otro. Sin embargo, la mayoría de ellos se marcan con un radionúclido en particular para cada modalidad de tomografía en medicina nuclear, de tal manera que, el radionúclido estándar en PET es el ^{18}F , mientras que en SPECT lo es el $^{99\text{m}}\text{Tc}$.

Sin importar que tipo de técnica de imagenología nuclear se elija, los radiofármacos son muy útiles para evaluar diversos procesos fisiológicos pues generalmente este tipo de cambios preceden a los cambios morfológicos.

Aplicaciones teranósticas

Este grupo de núcleos radiactivos denominados teranósticos son aquellos que debido a su decaimiento pueden emitir más de una forma de radiación, en particular nos referimos a la emisión de fotones y la emisión de partículas cargadas, como alfas y betas. El nombre para esta clase de núcleos se formó de las palabras, terapia y diagnóstico: teranóstico y su interés en la aplicación surgió hace más de una década porque pueden ser aprovechados tanto en técnicas de imagen, ya sea en PET o SPECT como en terapia a través de tratamientos con radiofármacos enfocados a ciertas enfermedades. A pesar de que el concepto es relativamente reciente, el uso de estos fue primero. Un radionúclido que puede considerarse como el primero de esta índole es el ^{131}I , el cual se caracteriza por poseer una vida media de ocho días y presentar un decaimiento beta negativo a ^{131}Xe , elemento estable. Sin embargo, antes de llegar a la estabilidad mencionada, en el decaimiento se forman estados metaestables, denominados $^{131\text{m}}\text{Xe}$, los cuales, como hemos estudiado, se liberan de la energía sobrante a través de la

emisión de fotones. Por consiguiente, este isótopo de yodo es ampliamente usado para el tratamiento de afecciones de la tiroides, gracias a las partículas betas menos, con energía de 606 keV, que tienen un alcance de unos cuantos milímetros en el tejido, destruyendo las células de este parénquima, pero también, el isótopo se aprovecha para obtener imágenes de gammagrafías planares o tomografías tipo SPECT para el diagnóstico clínico, en este caso se utilizan los fotones que se emiten de los estados metaestables, en particular el fotón de 365 keV es el de interés por la probabilidad de emisión.

Aunque parece que hay radionúclidos que pueden caer en esta estirpe de átomos, no todos presentan características deseables para aplicaciones médicas, ya que los núcleos pueden ser más tóxicos que otros, tener vida media muy larga y difícil de marcar, por mencionar factores. Otros radionúclidos con capacidad teragnóstica son el ^{64}Cu y el ^{177}Lu .

Capítulo 3

Aplicaciones de imágenes tomográficas

Las imágenes tomográficas son de gran utilidad en la actualidad, pues no solo permiten hacer diagnósticos clínicos, sino que se han utilizado en diversas áreas, ayudando a arqueólogos, historiadores, conservadores, veterinarios, forenses, neurocientíficos, mercadólogos, psicólogos, químicos, entre otros, a aclarar sus dudas e investigaciones. Esto es posible gracias no solo a los equipos sofisticados usados para obtener imágenes 3D de un sujeto o un objeto (figura 57), sino gracias a todo el personal involucrado en los centros de tomografías, a quienes debemos un agradecimiento.

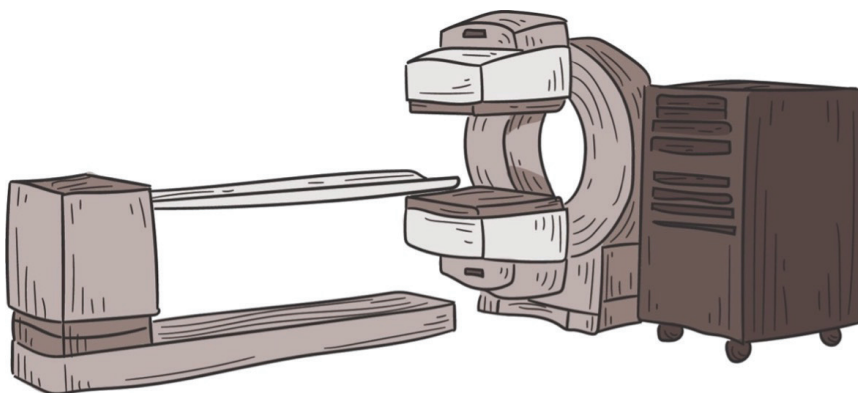


Figura 57. Ilustración de un tomógrafo para la detección, por fotón único (gammacámara). Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Los distintos métodos para crear imágenes tomográficas, así como la versatilidad de las técnicas permiten evaluar distintas enfermedades creando decenas de aplicaciones que han ayudado a su mejor entendimiento, a precisar un diagnóstico y a entender mejor cómo funciona nuestro cerebro. En esta sección, mencionaremos algunas de las aplicaciones tanto clínicas como de investigación a modo de ejemplo, sin ser nuestro objetivo abarcar el amplio espectro que cubre la técnica.

Aunque creemos que el diagnóstico clínico en nuestros días es fácil de realizar con toda la tecnología que existe, la realidad es que llegar a un diagnóstico preciso y oportuno es poco frecuente, debido, en parte, a malas costumbres de acudir al médico hasta que sentimos los síntomas, pero aun en los casos en que existe una supervisión médica eficaz, el diagnóstico sigue siendo un reto. Las imágenes médicas en todas sus modalidades están ayudando enormemente a cumplir este reto, pero el camino por recorrer aún es largo.

Aplicaciones clínicas

Las tomografías, hoy en día, son utilizadas en todo el mundo para ayudar a diagnosticar una amplia gama de enfermedades, ayudando a hacer un diagnóstico personalizado, una planeación quirúrgica o de radioterapia, ayudan a medir objetivamente la respuesta a un tratamiento y también son útiles para auxiliar al médico tratante a tomar una mejor decisión sobre continuar, suspender o modificar determinado tratamiento. Sirven para evaluar si una enfermedad reincide, o para evaluar diversos trastornos psiquiátricos y ayudan a realizar un diagnóstico diferenciado en muchas enfermedades neurológicas.

En oncología, las imágenes médicas juegan un papel relevante pues permiten evaluar todo el cuerpo y no solo una muestra como en el caso de las biopsias (procedimiento quirúrgico en el que se extraen células o tejidos para su análisis), que hoy en día son necesarias para hacer un diagnóstico de cáncer, pero en un futuro la imagenología podría cambiar este paradigma. A continuación, se describen algunos de los usos de imágenes médicas en esta malignidad.

Aplicaciones oncológicas

El cáncer es una de las principales causas de muerte en todos los países del mundo, es una enfermedad genética originada por distintas causas en la que algunas células del cuerpo se replican (multiplican) sin control y se diseminan a otras partes del cuerpo, siendo de las principales causas de muerte antes de los 70 años. Aunque a lo anterior se le denomina cáncer, en general, es tan variado, dependiendo de muchos factores como el tipo de células que lo originaron. El diagnóstico y tratamiento depende de cada caso, por lo cual es complejo; un diagnóstico oportuno y preciso es fundamental para una adecuada toma de decisiones, por lo anterior, la imagen médica tiene un papel primordial.

El diagnóstico definitivo de cáncer se logra mediante una biopsia, para realizarla, normalmente, se deben tener fuertes sospechas de que el paciente padece cáncer mediante la evaluación clínica, la cual es basada, generalmente, en sus síntomas. Para este momento, la enfermedad seguramente ya está avanzada, de aquí el rol fundamental de los métodos de imagen en los cuales se han desarrollado diversas estrategias para tratar de detectar distintos tipos de cáncer ya sea por medio de radiofármacos específicos (PET y SPECT) o por medio de los diferentes tipos de contrastes y secuencias (CT y MRI).

Aunado a otros métodos de diagnóstico, la imagen se vuelve una herramienta muy eficaz, ayudando a los médicos a elegir el mejor tratamiento para el paciente de cáncer, el cual puede ser quirúrgico, químico, inmunológico, por medio de radiación o la combinación de dos o más de ellos.

Las tomografías ayudan a detectar tumores, sean benignos o malignos, incluso antes de que se presenten los primeros síntomas, esto es una gran ventaja en las enfermedades oncológicas pues mientras más rápido se detecte la enfermedad, la persona tiene mayor probabilidad de sobrevivencia. En este sentido, las imágenes son muy importantes en la oncología pues permiten evaluar las variantes de esta enfermedad, entre ellas: tumores cerebrales y cáncer de cabeza y cuello, pulmonares, linfomas, cáncer colorrectal, cáncer gastrointestinal, cáncer mama, melanoma, cáncer urológico, sarcomas, cáncer de tiroides, cánceres adrenales, páncreas e hígado, hueso, testículos, cervicouterino, esófago, páncreas, riñón, vejiga, próstata, cáncer cervicouterino, ovario, etcétera.

Óseas

Las imágenes tomográficas son de gran utilidad para diagnosticar las diversas causas de dolor originadas en el sistema óseo, por ejemplo, permiten evaluar la lesión después de un trauma (accidente), para diagnosticar y controlar trastornos infecciosos o inflamatorios y también para tumores de origen óseo. Es posible obtener imágenes de huesos y articulaciones ayudando a diagnosticar lesiones relacionadas con el deporte, detectar la presencia de un tumor o infección oculto en una articulación. Ayudan a diagnosticar anomalías en el desarrollo de las articulaciones, a detectar el cáncer de hueso, inspeccionar la médula en busca de leucemia y otras enfermedades, evaluar la pérdida ósea, examinar fracturas

complejas, etc. Una CT permite evaluar con excelente calidad de imagen, los huesos, por eso tiene múltiples aplicaciones como la evaluación de fracturas que no son visibles con una simple radiografía.

Las tomografías ayudan a un mejor diagnóstico de enfermedades como la enfermedad de Paget en el hueso, la cual hace que los huesos crezcan mucho y sin mucha fuerza, o a un mejor diagnóstico y seguimiento de tratamiento de enfermedades como artritis, el cáncer originado en huesos o el originado en otro sitio y es propagado a los huesos, procesos de infección de articulaciones y también es útil para ver prótesis.

Cardiológicas y sistema circulatorio

Recordar:
Del latín *re-cordis*,
volver a pasar por el corazón
Eduardo Galeano

Por medio de imágenes tomográficas es posible evaluar el flujo sanguíneo en los distintos órganos mediante estudios contrastados con tomografía computarizada, resonancia magnética o estudios de medicina nuclear.

Como se mencionó en uno de los capítulos anteriores, un medio de contraste en imagenología, es una sustancia que ayuda a incrementar las diferencias entre un medio y otro (por ejemplo, entre sangre y tejido) (Vivas, 2013). Los medios de contraste surgieron de la necesidad de visualizar estructuras vasculares y de tejidos blandos, que no podían ser vistas con claridad cuando se empezaron a usar los rayos X con fines de diagnóstico. Buscando una solución a lo anterior, científicos como Dutto, Hascheck y Lindenthal colocaban algunas sustancias en los vasos sanguíneos de cadáveres para evaluar

el efecto de atenuación a los rayos X (yeso de París o pasta de Teichman) y lograr un mejor contraste. Gracias a estos primeros experimentos a inicios del siglo XX, se consolidó la idea de crear una sustancia líquida que pudiese inyectarse al torrente sanguíneo con el fin de atenuar el paso de los rayos X aumentando el contraste entre la circulación sanguínea y el tejido. En resonancia magnética se sigue el mismo principio, solamente que aquí las sustancias deben tener determinadas propiedades magnéticas que sirvan para resaltar el contraste cuando se quiere evaluar al sistema circulatorio.

En la actualidad en TC el contraste es una sustancia yodada, siendo un medicamento que, a pesar de tener contraindicaciones y posibles reacciones alérgicas, se podría denominar relativamente seguro debido a la baja incidencia de repercusiones graves o severas.

El yodo posee la característica de tener un número atómico más alto que el calcio, por lo que es excelente para la absorción de los rayos X y, por consecuencia, un tono blanco en la CT (ver escala Hounsfield). Cabe destacar que existen diferentes presentaciones en las que la concentración de yodo se señala por medio de un número. Debido a que su excreción es a través de la vía renal, una de las contraindicaciones para su administración es que la creatinina no se encuentre en rangos óptimos para favorecer su salida del cuerpo pues es una medida indirecta del óptimo funcionamiento de los riñones (cuando existe una dificultad en el sistema renal, la creatinina se acumula en la sangre, saliendo en menor cantidad por la orina, como ocurre normalmente). Pacientes con la función renal desfavorecida no son candidatos a este tipo de estudios.

La información que pueden llegar a proporcionar los estudios contrastados es enorme, ya que la irrigación de ciertas lesiones, así como el comportamiento arterial y venoso de los órganos puede llegar a ser decisivo para un diagnóstico. Debido

a la forma en la que nuestra circulación sanguínea funciona, en los protocolos de adquisición existen diferentes fases en las que se adquiere un barrido tomográfico, a grandes rasgos se clasifican de la siguiente manera:

SIMPLE: aquella adquisición que se realiza previa a la inyección de medio de contraste también es útil para observar litiasis (piedras) en algunos órganos.

ARTERIAL: cuando el interés es visualizar arterias, por lo regular se hace el barrido en los primeros segundos posteriores a la inyección del medio de contraste y pueden llegar a usar una velocidad de inyección alta.

VENOSA: esta fase se realiza para observar el flujo venoso, dependiendo de diversos factores puede variar el tiempo en el que se realiza el barrido, pero por lo general podrían tomarse como referencia 70 segundos posteriores a la inyección.

EQUILIBRIO: alrededor de los 90 segundos posteriores a la administración del contraste.

TARDÍA: última fase que dependiendo la circunstancia puede omitirse o ser indispensable, generalmente son minutos posteriores a la inyección. Puede ayudar a observar la excreción por los uréteres en la vía renal y así identificar la eliminación del medio de contraste hacia la vejiga. Otra utilidad es observar un "realce" del medio de contraste en una lesión que generalmente se da de forma tardía.

Para ejemplificar lo anterior en la figura 58 se muestra un corte axial de abdomen donde se puede observar las estructuras que realzan con el medio de contraste en las diferentes fases durante una tomografía. La fase simple que observamos del lado izquierdo es la primera adquisición, previa a la inyección del medio de contraste, en ella se visualizan las estructuras como piel, grasa, músculo, vértebra y órganos de interés (en este caso, riñones), algunos litos (piedras) podrían también ser visibles en esta adquisición en caso de existir. Al iniciar

la inyección del medio de contraste dentro de los primeros segundos en la fase arterial comenzará a “teñirse” de blanco la arteria aorta y la corteza renal que está recibiendo el fármaco por el torrente sanguíneo. En la tercera adquisición, que sucederá varios segundos después, permite ver el parénquima renal que se encuentra procesando el medio de contraste y a su vez la vena cava. Por último, la fase tardía que refleja únicamente la eliminación del medio de contraste que ya fue procesado por los riñones y ahora está siendo excretado por los uréteres.

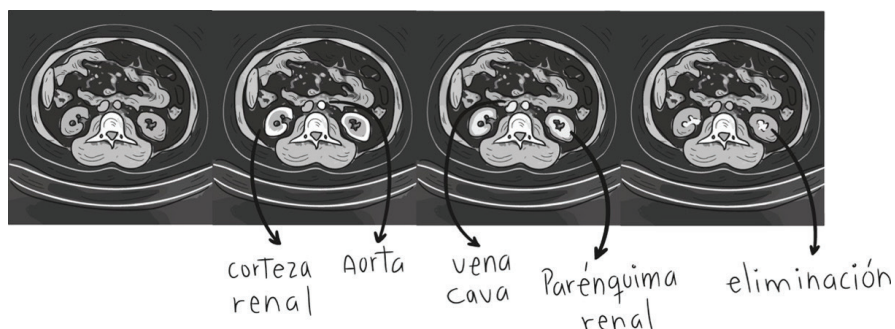


Figura 58. Ejemplo de las distintas imágenes que se pueden observar en un mismo corte anatómico gracias al uso de medios de contraste. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Desglosando cada uno de estos aspectos en el área de cardiología, entenderemos la perfusión miocárdica como la forma en la que el corazón tiene su propio sistema de irrigación sanguínea que lo mantiene, esto sucede mediante tres arterias muy pequeñas (milimétricas en cuanto a grosor) que se denominan coronarias, las cuales, debido a factores ya sea hereditarios o propios del estilo de vida como el sedentarismo, mala calidad de alimentación (elevando las cantidades de triglicéridos y colesterol en la sangre), tabaquismo, y enfermedades

crónicas, pueden llegar a obstruirse mediante placas de calcio que se van acumulando a lo largo del tiempo, aumentando la probabilidad de infartos.

Podríamos hacer una analogía pensando en que las arterias son similares a las tuberías y, por lo tanto, las placas de calcio son el sarro que va haciendo que el flujo del agua (la sangre) sea menor. La isquemia es la consecuencia de la reducción de sangre que irriga al músculo cardíaco ya sea por una obstrucción parcial de las arterias coronarias o total, por lo que el órgano no tiene suficiente aporte de oxígeno para realizar sus funciones de contracción adecuadamente.

En ocasiones, parte del músculo cardíaco cesa sus funciones de contracción porque las células intentan sobrevivir con lo poco que reciben y bajan su metabolismo al mínimo para evitar la necrosis (muerte celular), este es un mecanismo en el que se mantienen en una especie de hibernación y, justamente a ese tejido se le denomina miocardio hibernado. Cuando se realiza un estudio de viabilidad cardíaca se hace para saber si ese tejido que ya no se mueve y parece muerto, en realidad aún sigue vivo, en caso de ser así puede procederse a una cirugía para revascularizar esa zona, de lo contrario no valdría la pena hacer una intervención de tal magnitud.

Cabe destacar que la utilidad de la angiotomografía de arterias coronarias es un excelente método para evaluar estas obstrucciones por placas, pero como se mencionó dichas arterias son milimétricas por lo que es necesario dentro de los protocolos habituales de adquisición de dicho estudio utilizar un medicamento vasodilatador que ayude a aumentar el diámetro de esos vasos. También es necesario contar con electrodos que se conectan al pecho y ayudan a sincronizar el disparo de rayos X con el latido cardíaco del paciente. En este método siempre se utiliza medio de contraste

yodado aplicado de forma intravenosa para poder visualizar las arterias.

En el corazón, la resonancia magnética se utiliza a menudo como complemento de la ecocardiografía (ultrasonido cardíaco), la tomografía computarizada y la angiografía para proporcionar información anatómica y funcional tanto antes como después del tratamiento.

La resonancia magnética cardíaca puede usarse para evaluar la estructura del corazón y los vasos sanguíneos circundantes, evaluar las causas de la arritmia (ritmo cardíaco anormal), evaluar infecciones, evaluar el flujo de sangre al músculo cardíaco, hallazgos tras la cirugía cardiovascular, y será un método relevante para determinar si el tejido cardíaco posee viabilidad porque se puede observar claramente cuando ya está muerto y queda en forma de cicatriz.

Por otro lado, las imágenes funcionales PET y SPECT poseen gran sensibilidad para determinar perfusión cardíaca, en este método de adquisición se rastrea el radiofármaco en forma dinámica, es decir, desde su introducción al torrente sanguíneo hasta su llegada al ventrículo izquierdo del corazón. Este protocolo también se sincroniza con el latido, y consta regularmente de dos fases: reposo (paciente recostado sin ningún estímulo), y estrés (aplicando un fármaco vía intravenosa que ayuda a simular el gasto cardíaco cuando el paciente realiza un ejercicio). Ambas fases se comparan, proporcionando datos muy relevantes para el área médica respecto a flujos miocárdicos. Una imagen PET cardíaca también es de utilidad con el radiofármaco [^{18}F]FDG para viabilidad, ya que un tejido que esté hibernado absorberá la glucosa, a diferencia de uno que ya sea necrótico.

Pediatría y embarazo

Aunque las imágenes por ultrasonido son muy útiles durante el periodo de gestación, cuando esta modalidad de imagen no provee suficiente información para realizar un diagnóstico, la resonancia magnética es una herramienta alternativa para dar seguimiento a este periodo esencial del desarrollo humano debido a su alta resolución espacial y al hecho de no usar radiación ionizante, que puede dañar el desarrollo fetal, recordemos que CT, PET y SPECT la usan, por lo que estas técnicas no son utilizadas en ese periodo.

El médico puede ordenar una imagen por resonancia si es necesario por el bienestar del feto o la madre y el diagnóstico no puede esperar después del parto. No existen riesgos comprobados para las mujeres embarazadas o sus hijos de los exámenes realizados con MRI. Durante las últimas décadas, miles de mujeres embarazadas se han realizado exámenes con esta técnica y no se han encontrado efectos nocivos para el bebé, por lo anterior, no se debe rechazar una MRI cuando es necesaria en esta etapa, además del posible diagnóstico para la madre, la MRI es de utilidad en el gestante para corroborar o descartar malformaciones fetales que no son vistas con otras técnicas.

Cuando se necesitan imágenes del cerebro y la médula espinal de un niño, la resonancia magnética es útil debido a su capacidad para ver a través del cráneo y los huesos del cráneo y la columna vertebral sin radiación afecciones en los niños debido a lesiones, enfermedades o anomalías congénitas.

En medicina, siempre se pondera el costo/beneficio de un tratamiento en el paciente, por lo tanto, una imagen CT, PET o SPECT solamente debe realizarse en la etapa pediátrica cuando es estrictamente necesario. Para prevenir los efectos de la radiación ionizante, se han creado protocolos para dar el mínimo de radiación en niños cuando una de estas modalidades

de imagen es requerida. Los beneficios del diagnóstico de todas las modalidades de tomografía que son aplicadas en adultos son trasladados a niños, pero su adquisición siempre debe ponderarse en beneficio del menor.

Neurológicas y psiquiátricas

Uno de los grandes aportes de las tomografías a la ciencia es permitir estudiar el cerebro humano *in vivo*. El sistema nervioso humano es el sistema más complejo que existe de todos los seres vivos. El cerebro se encarga de funciones básicas como respirar, los latidos del corazón o nos hace sentir cuando algo nos duele o nos da placer, nos quemamos o nos avisa que tenemos que comer. Sin embargo, estas funciones, aunque complejas, ya se presentan en especies no tan desarrolladas como la nuestra, siendo el nuestro diferente por encargarse de cosas más complejas como el pensamiento abstracto.

Las tomografías del cerebro y la columna vertebral se usa para detectar una variedad de condiciones y anomalías cerebrales como quistes, tumores, sangrado, hinchazón o problemas con los vasos sanguíneos, detectar daños en el cerebro causados por una lesión o un accidente cerebrovascular, diagnosticar enfermedades infecciosas o autoinmunes como encefalopatía o encefalitis, evaluar problemas como dolores de cabeza persistentes, mareos, debilidad, visión borrosa o convulsiones, ayudar a detectar ciertas enfermedades crónicas del sistema nervioso, como la esclerosis múltiple, diagnosticar problemas con la glándula pituitaria y el tronco encefálico, evaluar la causa del retraso en el desarrollo, identificar y evaluar discos espinales degenerados o herniados, evaluar los huesos de la columna vertebral en busca de anomalías congénitas o adquiridas, determinar la condición del tejido nervioso dentro de la médula espinal, permiten

evaluar enfermedades como meningiomas, diversos tipos de gliomas, epilepsia, enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer, Parkinson y la enfermedad de Huntington, demencias, desórdenes del movimiento, cerebrovascular, así como enfermedades psiquiátricas.

Estudios de neuroquímica

Las dos formas principales en que las neuronas (células del sistema nervioso central) se comunican es mediante actividad eléctrica y comunicación por medio de sustancias químicas llamadas neurotransmisores (Cox, 1924). Una forma eficiente de estudiar la segunda es mediante el uso de imágenes funcionales (PET o SPECT) que permiten marcar sustancias análogas a los neurotransmisores (con radioisótopos) y evaluar su funcionamiento *in vivo*. Se pueden marcar directamente los neurotransmisores, sus precursores bioquímicos, sustancias que cumplen una función similar a ellos (agonista) o se encargan de inhibir su función (antagonista), se pueden también marcar moléculas que tienen afinidad por ciertas estructuras que se encargan de almacenar o sintetizar a los neurotransmisores. El espacio físico en el cual las neuronas están conectadas se le denomina sinapsis, la neurona que comunica se le llama neurona pre-sináptica y las que recibe una señal se le denomina neurona post-sináptica (Sabbatini, 2003) (figura 59).

Mediante la técnica de espectroscopia por resonancia magnética también es posible detectar los niveles de algunos neurotransmisores.

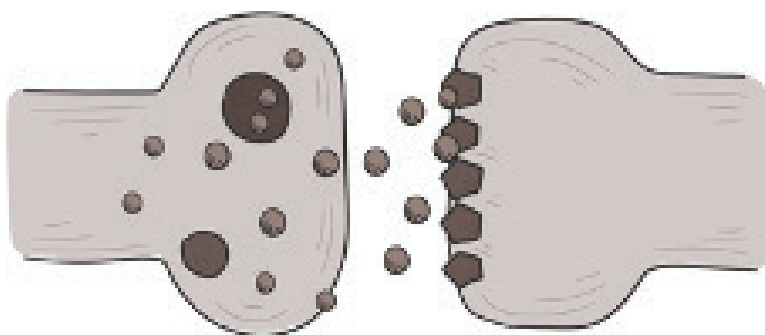


Figura 59. Ejemplo de comunicación celular por medio de transmisores. En la imagen se observa una neurona pre-sináptica (izquierda) que se encarga de almacenar y liberar a los neurotransmisores y una postsináptica (derecha). Las esferas simbolizan un neurotransmisor, mientras que los pentágonos simbolizan a su receptor. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

El estudio por imagen de la comunicación neuroquímica es muy importante a la hora de realizar diagnósticos diferenciados en neurología y psiquiatría, pues la forma en que se sintetizan y usan caracterizan ciertas enfermedades de este tipo.

Epilepsia

Los protocolos de adquisición de estudios neurológicos pueden variar de acuerdo a la técnica que se utilice para la exploración, en el caso de la epilepsia, estudiada mediante la técnica SPECT, pueden emplearse herramientas como luces estroboscópicas que favorezcan la aparición de una crisis que permita ubicar el foco epileptógeno cuando se encuentra activo (el sitio donde se origina la descarga a nivel cerebral) a este momento se le conoce como periodo ictal y es justo el momento indicado para aplicar el radiofármaco.

Una vez que la crisis ha terminado comienza el periodo postictal, en donde el área que estuvo fuertemente activa

comienza a regresar a su estado normal, este lapso se evita en dichos estudios puesto que puede hacer una falsa idea de que el foco es más grande de lo que en realidad es.

En el caso de un estudio PET, el paciente debe permanecer sin estímulos auditivos y/o visuales, luces apagadas y sin dormir durante el lapso de reposo previo a la inyección del radiofármaco para evitar que el cerebro tenga excitación y requiera más glucosa que esté activa en todas las áreas cerebrales. En este estudio se pretende adquirir un periodo interictal, libre de recientes crisis epilépticas, para poder observar un área de la corteza cerebral que esté hipometabólica (desgastada por las constantes crisis) a comparación del resto del cerebro. Estos estudios son de gran utilidad en pacientes con epilepsia farmacorresistente que pueden ser candidatos a cirugía.

En la figura 60 se representa el momento interictal en el que el cerebro se encuentra en su estado habitual, el periodo ictal cuando está activo el momento de la crisis epiléptica en el área frontal del cerebro, y el estatus postictal.

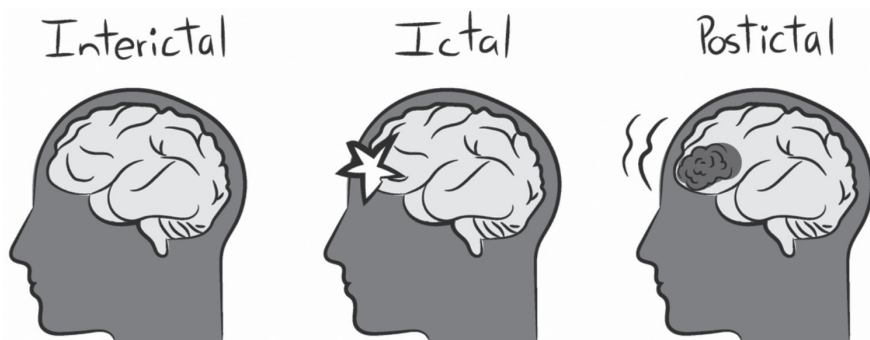


Figura 60. Distintas fases en que se pueden adquirir imágenes de pacientes con epilepsia. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Procesos cognitivos (aplicaciones en psicología y neurociencias)

Desde siempre, se ha intentado entender la función del cerebro, es decir, conocer los procesos mentales que llevan a cabo las distintas estructuras que lo componen. Como se ha mencionado, la localización de áreas de interés como la del alma fue de gran fascinación durante el Renacimiento. No fue hasta mediados del siglo XIX que se comenzó a entender la relación entre estructura y función del cerebro, creando ramas como la frenología (pseudociencia que trataba de estudiar los rasgos de la personalidad y el carácter de cada individuo según sus características individuales de forma del cerebro). En esta búsqueda, el médico francés Paul Broca mediante estudios post mórtem de personas que habían tenido problemas de habla identificó una región que asoció al proceso mental, por primera vez de forma correcta, que es ahora conocida como la región de Broca, la cual se encuentra en la tercera circunvolución del lóbulo frontal izquierdo de la corteza cerebral (Frédy, 1996).

Desde entonces se comenzaron a caracterizar distintas regiones cerebrales asociándolas a su función (Luria 1977), pero no fue hasta finales del siglo XX que, las técnicas de imagen permitieron un mejor entendimiento de estas, aunque actualmente se sabe que una sola estructura solo tiene cierto papel predominante en una tarea, en realidad son redes neuronales lo que nos permiten percibir e interpretar la información.

Las imágenes funcionales cerebrales como la fMRI y PET permiten evaluar diversos procesos cognitivos *in vivo*, que no son posibles evaluar de otra manera, respondiendo preguntas de la neurociencia, como ¿qué áreas de nuestro cerebro están activas cuando nos enamoramos, escuchamos música o vemos imágenes de cosas que nos disgustan? Estos métodos

de imagen han sido de gran utilidad para localizar las regiones del cerebro que están activas cuando realizamos alguna actividad, por ejemplo, se han obtenido imágenes cerebrales de las áreas más activas cuando alguien lee o habla, cuando alguien mueve una mano, se puede ver la activación cerebral del sitio que el cerebro usa para moverla.

Se han evaluado también sentimientos humanos como la empatía, tristeza, enamoramiento etc. En la visualización de películas para el mapeo del lenguaje prequirúrgico en pacientes con tumor cerebral y han permitido evaluar la mejoría en conexiones cerebrales en pacientes con esclerosis múltiple debido a videojuegos, por citar solo algunos ejemplos.

Conectoma humano

El cerebro humano es uno de los misterios más fascinantes del universo, su estudio, en comparación con otras ramas de la medicina ha sido más lento, formalmente comenzó a finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

El estudio de sus conexiones, hipotetizando las direcciones de la señal eléctrica (correctamente), lo inició el científico español Santiago Ramón y Cajal, quien dibujaba de forma espléndida lo que veía en el microscopio, creando obras maestras como lo describe Eduardo Galeano:

En 1906, Santiago Ramón y Cajal recibió el Premio Nobel de Medicina. Él había querido ser artista pintor. Su padre no lo dejó, y no tuvo más remedio que convertirse en el científico español más importante de todos los tiempos. Se vengó dibujando lo que descubría. Sus paisajes del cerebro competían con Miró, con Klee: -El jardín de la neurología brinda emociones artísticas incomparables- solía decir. Él

disfrutaba explorando los misterios del sistema nervioso, pero más disfrutaba dibujándolos. (Galeano, 2011)

Pasó más de un siglo desde que Cajal pintaba y escudriñaba las conexiones cerebrales hasta que en el año 2010, se creó el proyecto conectoma humano. Proyecto multidisciplinario que tiene como objetivo el estudio de las conexiones en el cerebro humano, mediante imágenes de resonancia magnética. El proyecto inició con la meta de acelerar los avances en el entendimiento del cerebro humano basándose en estudios de neuroimagen, con el fin de entender mejor la conectividad cerebral y aplicar estos avances y compartir los datos y las herramientas entre la comunidad científica. Hasta la fecha se han logrado mejores segmentaciones corticales, análisis de conectividad basados en resonancia magnética funcional y de difusión, y análisis de relaciones cerebro-conducta.

Otro de los objetivos es crear un conjunto de herramientas de neuroimagen no invasivas que permita obtener datos de conectividad de humanos *in vivo*; crear datos de alta calidad y bien caracterizados de conectividad humana y vincularlos a bases de datos genéticos y conductuales de cientos de sujetos adultos sanos (de ambos sexos). Con lo anterior se pretende una base de datos disponible para la comunidad científica, de modelos y herramientas de conectividad a la comunidad de investigación a través de actividades de divulgación y una plataforma informática.

Las imágenes tomográficas de cerebro están jugando un papel fundamental en esta búsqueda pues, junto con los métodos de análisis computacionales, se pueden evaluar redes funcionales y estructurales que ayudan a estudiar mejor al cerebro. Es un proyecto análogo al de descifrar el genoma humano, que nos ayudó a entender muchas enfermedades ya

que para comprender el funcionamiento de una red, se deben conocer sus elementos y sus interconexiones.

Medicina del deporte

Las imágenes tomográficas han expandido su utilidad a diversas áreas, una de ellas es la medicina del deporte en la cual es una herramienta auxiliar no solo para el diagnóstico, sino para la prevención. En la actualidad, se usan imágenes tomográficas para evaluar las condiciones en las que se encuentra, por ejemplo, la rodilla de un futbolista y así diseñar entrenamientos personalizados para que tenga un óptimo rendimiento. Las tomografías en el deporte ayudan a confirmar de manera más precisa un diagnóstico, facilitan la planificación de la gestión y la recuperación del deportista, además son de utilidad para decidir el momento oportuno en el que el deportista pueda regresar a su actividad normal. También se han usado como criterios de selección en los comités olímpicos.

Son usadas, también, en la evaluación en lesiones de tejidos blandos, incluida la documentación de la extensión del daño muscular, son útiles para identificar el estrés óseo, que ocurre en una amplia variedad de lesiones deportivas. Resultan útiles para evaluar los traumatismos óseos agudos e insidiosos y las enfermedades articulares degenerativas, como las fracturas por estrés de las extremidades inferiores y el pinzamiento del tobillo. Las técnicas funcionales PET y SPECT se emplean para observar procesos de inflamación, así como el seguimiento de su evolución.

Veterinaria

Las imágenes tomográficas no solo han servido para beneficio de la humanidad, también muchas especies de animales se han visto beneficiadas con estas técnicas. Desde la investigación de nuevas terapias con animales de laboratorio como conejos, ratas y ratones hasta animales grandes como leones de zoológicos han sido evaluados con estas técnicas.

En el área veterinaria se han implementado estas técnicas, ayudando a los médicos veterinarios a detectar huesos rotos, o cuando un animal come un objeto extraño, hasta detección de tumores.

Medicina forense

La medicina forense también se ha beneficiado de las técnicas de imagen estructural (MRI y CT), pues permiten lo que se conoce como necropsia virtual o virtopsia en la cual se adquiere una tomografía de un cadáver con el fin de observar o inferir la presencia de lesiones para determinar las armas u objetos que la causaron, ayudando a identificar las causas de muerte de las personas, sobre todo en aquellos casos judiciales que no es fácil saber las causas (Thali *et al.* 2003).

La virtopsia, utiliza una tomografía para obtener información anatómica sobre la posible causa y el momento que han provocado la muerte de un sujeto, así como toda información que pueda ayudar a esclarecer un caso (Aso, 2015). Es posible, mediante esta técnica, determinar las trayectorias de la lesión, detectar fracturas, cuerpos extraños, así como detectar aire al interior del cuerpo.

También puede ser útil cuando existe riesgo para el personal que realiza las autopsias tradicionales en personas fallecidas por enfermedades altamente infecciosas, como

el ébola, o en casos de algún arma de guerra química mediante la utilización de gases tóxicos, donde abrir el cadáver pone en riesgo la vida e integridad de las personas que intervienen en ella.

Aplicaciones preclínicas

Como vimos, nuestro cerebro se comunica principalmente por medio de señales químicas y eléctricas al igual que el de otros animales. ¿Sabías que las ranas, las moscas, los peces, ratas y monos tienen estructuras similares a nosotros en el cerebro y usan neurotransmisores iguales o similares a nosotros? Esto es debido a que la estructura y función del cerebro está, evolutivamente, preservada, así los procesos cognitivos como la forma en que aprendemos algo nuevo y lo recordamos se realizan por mecanismos similares en los animales. Además, diversos procesos como la producción de insulina o la segregación de adrenalina son muy similares entre especies. Por lo anterior, es posible estudiar algunos procesos en animales para entendernos a nosotros mismos.

Asimismo, dentro de la investigación preclínica que se realiza con diversos métodos, es posible evaluar a los animales con los métodos de tomografía, para lo que se han desarrollado equipos que son específicos para el estudio de animales, micro-tomógrafos (MicroPET, MicroMRI, MicroCT y MicroSPECT).

El estudio en animales siempre debe estar debidamente justificado, para lo cual se crean comités de expertos que evalúan la pertinencia de realizar un experimento, evitando el sufrimiento y usando el mínimo posible de animales. Los métodos de imagen presentan diversas ventajas con respecto a otras técnicas usadas en investigación biomédica pues todos los procedimientos que se realizan para obtener una

imagen son *in vivo*, de forma no invasiva y bajo anestesia, permitiendo evaluar al mismo animal en distintas ocasiones, reduciendo así el número de animales necesarios para probar una teoría o evaluar una nueva terapia para el posible uso en humanos.

Las especies animales tienen diferencias y similitudes anatómicas, fisiológicas y genéticas entre ellas y con respecto a los humanos, pero, aun así, en muchas ocasiones es posible evaluar el desarrollo de nuevas terapias farmacológicas en modelos animales antes de ser probadas en humanos.

Arte

Con las tomografías computarizadas, es posible detectar diferentes tipos de materiales que fueron usados para crear una obra de arte y las capas que lo componen, sin necesidad de manipular la obra más allá de su colocación en un CT. Una tomografía permite evaluar distintas características ocultas a simple vista en la obra, por ejemplo, el estado de conservación en que se encuentra la escultura, pintura, etc., es posible detectar marcas de herramientas que se usaron para fabricar el objeto, o descubrir madera escondida dentro de la obra que se pueden utilizar para fechar la obra usando carbono 14. Las imágenes ayudan a tomar la decisión de restaurarla o dejarla en el estado en que se encuentra si la reparación significa un riesgo.

Muchas imágenes médicas parecen obras de arte, tanto así que algunos artistas han incorporado estas técnicas en sus obras, por ejemplo, el inglés Francis Bacon y el mexicano Diego Rivera, incorporaron a sus obras imágenes radiográficas, el primero en su obra "Crucifixión con cráneo" y el segundo en su obra "El hombre controlador del universo". Estos son

claros ejemplos de cómo la ciencia inspira al arte, pero también la ciencia lo estudia.

Otra de las aplicaciones son los estudios de neuroimagen que permiten evaluar la función cerebral. Con este tipo de estudios se ha demostrado que las intervenciones de artes visuales tienen efectos positivos en el ser humano, reduciendo la angustia, ayudando a aumentar la autorreflexión y la autoconciencia mejora los patrones de pensamiento y las conexiones neuronales. También se ha evaluado cómo los músicos perciben la música y, cómo los no músicos la percibimos.

Otras aplicaciones

Las tomografías han influido en numerosos campos distintos a la medicina desde su aparición como lo son la biología, paleontología, antropología, arqueología y ciencias forenses, ciencias de materiales y otros campos del conocimiento.

El campo de la paleoantropología se benefició significativamente de este medio eficiente y no invasivo en términos de conservación, reconstrucción y análisis de restos humanos fósiles. Durante la última década, ha habido un aumento constante en el número de estudios antropológicos forenses que incorporan análisis osteológicos virtuales. "Antropología virtual" la antropología forense (Uldin, 2017). La paleorradiología se encarga del estudio de imágenes de restos arqueológicos u objetos antiguos, se empezó a utilizar tan solo unos meses después del descubrimiento de los rayos X. En 1986 Carl Koenig comenzó a estudiar momias egipcias, tanto humanas como animales. En la actualidad se han hecho reconstrucciones de tráquea y laringe (impresas en 3D) por medio de resonancia magnética con el fin de imitar la posible voz de un faraón.

Tendencias, futuro y ejemplos de la imagenología

La matemática posee no solo la verdad,
sino belleza suprema; una belleza como una escultura,
sin apelación a ninguna parte de nuestra naturaleza débil,
sin la hermosura de las pinturas o la música, pero sublime y pura.
El verdadero espíritu del deleite, de exaltación,
el sentido de ser más grande que el hombre,
puede ser encontrado tanto en matemática como en la poesía.

Bertrand Russell

Como hemos visto, los métodos de imagen son de gran ayuda para entender diversas enfermedades y mejorar los diagnósticos, por lo cual, su aportación comienza a ser de tanta relevancia para la medicina como lo son las vacunas o el entendimiento del genoma. El diagnóstico de una enfermedad no siempre es fácil de realizar pues muchas enfermedades comparten síntomas y más aún, muchas de ellas no presentan evidencia clínica hasta que están muy avanzadas. En este sentido, las imágenes médicas juegan un papel importante para ayudar a un diagnóstico diferenciado, oportuno y certero, sobre todo en la medicina personalizada, la cual es una tendencia en la que se trata al paciente y no solo a la enfermedad dependiendo de las necesidades genéticas, fisiológicas, socioculturales, alimenticias, etc., de cada persona.

Dentro de las tendencias está el diagnóstico asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) en el cual algoritmos computacionales ayudan a mejorar el diagnóstico, guiando a los médicos en la interpretación de imágenes clínicas en cortos periodos de tiempo, por ejemplo, nuevos algoritmos pueden ayudar a decidir a los médicos cuando una imagen de lesión, vista con algún método de imagen y analizada computacionalmente, debe ser tratada como emergencia (figura 61), optimizando así los servicios médicos.



Figura 61. Ejemplo de diagnóstico asistido por computadora, en el cual la decisión clínica es ayudada por un algoritmo computacional. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Radiómica

A partir de que se descubrió el ADN, se comenzó a entender que lo que nos compone y hace diferentes entre especies y entre nuestra misma especie son los genes, los cuales son segmentos de ADN (compuestos de combinaciones cíclicas de adenina, guanina, citosina y uracilo) con una secuencia específica. Los genes contienen las instrucciones específicas para producir las proteínas y componentes esenciales de cada ser vivo, en cada célula humana hay alrededor de 20,000 genes que, en conjunto, constituyen el material hereditario que contiene las instrucciones para formar un nuevo ser vivo. El estudio de genes y su interacción entre ellos se le denomina genómica, ciencia que estudia las combinaciones posibles en que pueden combinarse los genes. Las ciencias ómicas (oma, significa conjunto, aglomeración) se encargan del estudio integral de las interacciones complejas entre moléculas, la caracterización y la cuantificación y sus interacciones en las diferentes capas de biología de sistemas. Las principales tecnologías ómicas incluyen la genómica, la transcriptómica, la proteómica y la metabolómica.

En imágenes médicas, el término se toma de la radiología y ómica, formando la palabra radiómica. Aunque en un inicio se comenzó a estudiar las imágenes radiológicas, en la actualidad, cualquier imagen médica en 2D O 3D puede ser analizada con esta técnica, la cual se encarga de extraer decenas de características de una imagen. Matemáticamente, cualquier imagen digital puede representarse como una matriz de intensidades, recordemos que una matriz puede constituirse como un conjunto de números representados de forma rectangular, organizados en filas y columnas, así una imagen puede ser representada computacionalmente por el valor de intensidad en escala de grises en una matriz (figura 62).



Figura 62. Representación de una imagen en los niveles de intensidad en escala de grises y su interpretación numérica como una matriz. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

La radiómica se encarga de analizar fragmentos de las imágenes médicas que tienen algún interés clínico o biológico, por ejemplo, un tumor (Timmeren et al., 2020). De una imagen tomográfica es posible segmentar la región de interés, por ejemplo, el tumor primario, una vez localizado y representarlo en forma de matriz (figura 63), se extraen características

matemáticas que permiten evaluar esa región estadísticamente, extrayendo cientos de datos que pueden ser relacionados con los provenientes de la clínica o de otras ciencias ómicas, permitiendo relacionarlos con ellas para predecir o inferir algún proceso de interés clínico.

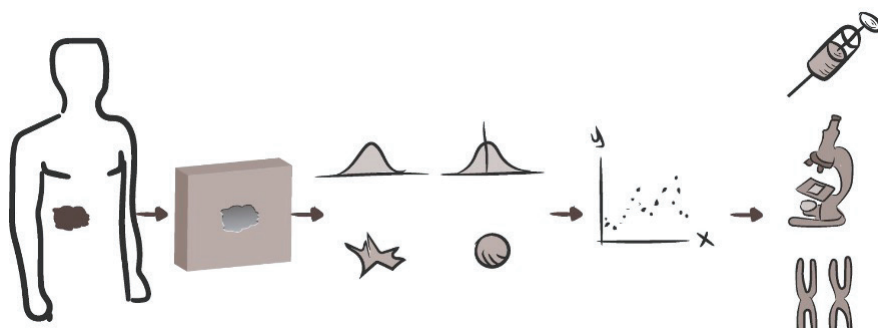


Figura 63. Representación de los pasos a seguir en la radiómica. Obtención de la imagen médica, segmentación de la región de interés, estadística de los parámetros obtenidos y relación con otros datos clínicos. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Una vez que la región de interés (por ejemplo, el tumor) es segmentado de la imagen, se pueden extraer diversas características matemáticas, por ejemplo, hay tumores que crecen como una esfera y otros de forma irregular, en ocasiones la forma en que crece puede dar información de qué tan agresivo es o qué tan rápido se desarrolla. La ventaja de tener ese segmento de imagen en forma de matriz es que podemos extraer esas características matemáticas de forma sencilla, calculando parámetros como la esfericidad que es la relación entre la superficie que tendría una esfera del mismo volumen y la superficie real del objeto estudiado (en este caso, el tumor). Existen muchas otras características que pueden ser

obtenidas de las imágenes, que se relacionan con la textura o los niveles de intensidad de la imagen.

Para diagnosticar algunas enfermedades, entre ellas las oncológicas en la actualidad, es necesario obtener una biopsia del tejido afectado del paciente (una muestra obtenida por medio de cirugía) para corroborar o descartar la malignidad por medio de estudios de patología. En el futuro próximo, se pronostica que las imágenes médicas pueden sustituir esa tarea por medio de la obtención de las características radiómicas de una imagen médica (figura 64).

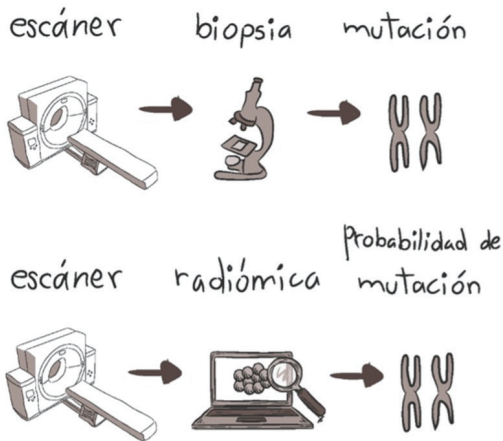


Figura 64. Presente y futuro del diagnóstico clínico por imagen, en la actualidad es necesaria una biopsia para obtener el diagnóstico preciso de muchas enfermedades, en un futuro, la radiómica permitirá inferir matemáticamente el diagnóstico. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Una de las razones por las que las imágenes médicas están tomando tanta relevancia en el diagnóstico clínico, además de tener la gran ventaja de ser no invasivos y gran disponibilidad en los hospitales, es debido al desarrollo de la inteligencia artificial, tema que se expone brevemente a continuación.

Inteligencia artificial en imagen

Los avances en las ciencias computacionales tanto en hardware como en software han permitido que el campo de la imagenología biomédica creciera enormemente en los últimos años. Las imágenes médicas son datos que requieren grandes capacidades de cómputo para su procesamiento y almacenamiento, por ejemplo, en tomografías computarizadas la escala de grises puede ser de hasta 4,096 tonos distintos, es decir, 213 tonos de grises. Para ejemplificar el tamaño de una imagen supongamos una sección cerebral de una tomografía tiene solamente cuatro cortes transversales con una resolución de 255 x 256 píxeles (figura 65) (un corte es una imagen 2D que en conjunto forman la imagen tomográfica).

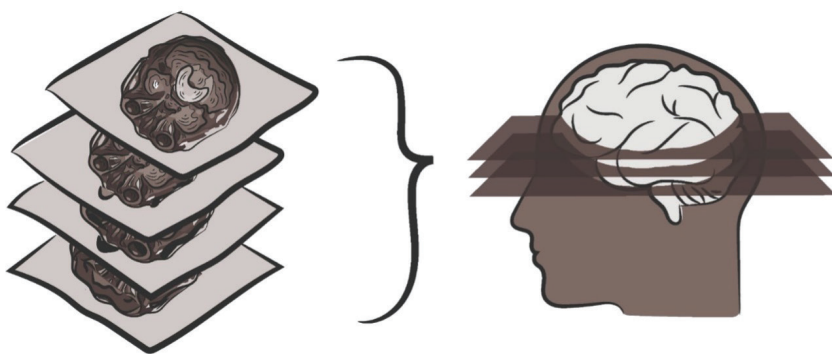


Figura 65. Ilustración de cortes axiales que componen una imagen tomográfica. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

En este ejemplo, estos cortes de la imagen cerebral ¡no del cuerpo entero!, tiene millones de combinaciones distintas de posibles valores que pueden valer los píxeles. En el pasado las computadoras no podían procesar eficientemente tal

cantidad de datos, sin embargo, hoy en día, es una tarea sencilla para procesar, incluso para un teléfono celular moderno. El poder de cómputo actual permite, en tiempo real, procesar toda esa información generada no solo en imágenes, sino en cualquier forma que se pueda procesar información como voz, geolocalización, video, etc. lo cual permite a algoritmos dar una respuesta casi instantánea a cierta tarea.

En computación se han acuñado términos como la minería de datos, la cual es el proceso de extraer y analizar patrones en grandes conjuntos de datos. Aunque las computadoras no funcionan como nuestro cerebro, el cual es mucho más complejo y eficiente, la tecnología actual intenta simular su funcionamiento. Por ejemplo, cuando vemos un piano, por su tamaño y forma, nuestro cerebro puede interpretar esas señales visuales de ese aparato grande de color negro con teclas, como un piano y no como una guitarra, proceso en el cual ciertas neuronas se activan al mismo tiempo y hacen que tengamos la percepción de un piano, lo mismo sucede si escuchamos el sonido emanado de él, es información distinta que el cerebro codifica para que podamos saber que un piano es un piano. En este proceso se puede contar con información visual o sonora (incluso olfativa, si un olor nos hace evocar el sonido de un piano) que el cerebro usa para codificar un piano conectando distintas neuronas (figura 66). Los estímulos son procesados como una señal de entrada, el cerebro lo procesa, codifica y lo percibe como un piano.

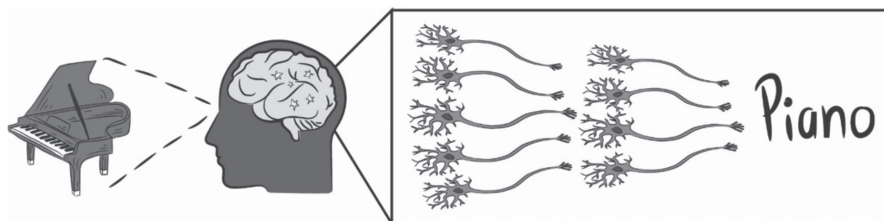


Figura 66. Representación de una red neuronal que nos permite percibir un piano. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Es este proceso que realiza nuestro cerebro para determinar que un piano es un piano el que las computadoras simulan mediante redes neuronales artificiales, las cuales usan los datos de entrada en forma digital (una computadora solo sabe de unos y ceros), los procesa ponderando la información recibida y da información de salida como respuesta a la entrada (después de procesar la información mediante algoritmos previamente aprendidos).

Aunque las bases de lo que hoy usamos en nuestro día a día en aplicaciones como bocinas inteligentes, correctores ortográficos, relojes inteligentes, lista de reproducción musical usuario dependientes, rutas de mapas, etc., se han desarrollado en los últimos años, la teoría para aplicar esta tecnología no es nueva, Alan Turing desde la primera mitad del siglo XX la desarrolló (Agar, 2001), sin embargo, es hasta ahora que es una realidad (debido al poder de cómputo actual).

Una computadora moderna puede realizar en milisegundos miles de millones de operaciones matemáticas, mientras que un ser humano tardaría muchísimo tiempo en hacer esa misma tarea. Sin embargo, hay otras cosas que los humanos hacemos eficientemente en milisegundos y las computadoras no (hoy en día), como reconocer que un piano es un piano viendo solamente una parte de él, pues somos muy eficientes para reconocer patrones visuales (evolucionamos para estar alertas visualmente para cualquier eventualidad que pusiera en peligro nuestra especie). Computacionalmente, son llamados problemas complejos aquellos que no tienen una solución única, por lo cual no es posible programar con operadores matemáticos o computacionales (if, else, or, etc) una solución, mientras nosotros lo resolvemos de forma rápida y eficiente, como retirar nuestras manos inmediatamente del fuego, si estamos cerca de él.

Para ejemplificar lo anterior, pensemos en lo que a un humano nos cuesta reconocer una manzana en una imagen digital. Esta simple tarea, que a la mayoría de nosotros nos cuesta tan solo unos milisegundos en reconocerla, para una computadora es un trabajo relativamente complejo. Para que una computadora decida que es una manzana y no un corazón, primero debe “aprender” qué es cada cosa. Para lo anterior, se han desarrollado algoritmos que aparentan el comportamiento humano mediante inteligencia artificial, la cual trata de simular el comportamiento complejo de las redes neuronales, mediante redes neuronales artificiales, asignando distintos pesos a la información de entrada (que viene de los sentidos en el ser humano, como la vista, el tacto o el olfato), la procesa asignándole distinto peso para dar una salida. Un ejemplo más sencillo computacionalmente hablando es la clasificación de números, en la cual la entrada es un número escrito por un humano, la tarea de la computadora es clasificar cada número escrito en su equivalente digital (figura 67), para realizar esta tarea, el algoritmo debe descomponer la imagen en una matriz de píxeles, que según se relacionen sus componentes, pueda diferenciar un tres de un cinco, para lo cual es necesario entrenar a un algoritmo con muchos datos.

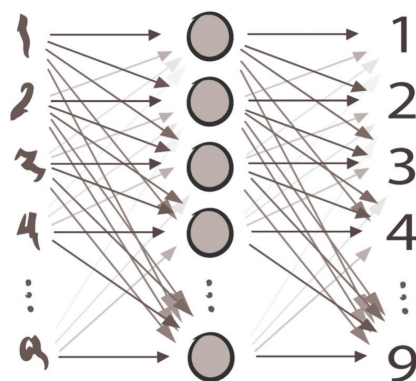


Figura 67. Representación de una red neuronal para clasificar números. Ilustración de Paola Moreno Izaguirre.

Los algoritmos deben “aprender a hacer generalizaciones”, de igual manera que los seres humanos somos capaces de realizarlas y clasificar imágenes que nunca hemos visto, basados en la experiencia previa, haciendo comparaciones y analogías entre el contenido de la imagen nueva que se presenta y el contenido de las imágenes vistas previamente. Por este motivo podemos identificar la cara de un señor que está triste o enojado, aunque nunca lo hayamos visto antes.

Estos procesos que realizamos gracias a nuestras redes neuronales, son imitados por los algoritmos actuales usados para clasificar información ayudando a tomar decisiones clínicas, en tomográficas empiezan a ser de gran utilidad para reconocer tumores, tipos de tumores, ayudar a clasificar a un paciente con un tipo de enfermedad u otra, isquemias o incluso, algunos algoritmos comienzan a predecir como resultará una terapia antes de que inicie, también son eficientes para predecir el desarrollo de alguna enfermedad antes de que el ojo humano pueda detectar alguna anomalía por imagen detectado y aún no se manifiesta ningún síntoma.

Ejemplos

Si se ama el arte de la medicina,
también se ama a la humanidad

Hipócrates de Cos

En este apartado se exponen algunos ejemplos de tomografías con el único fin de ilustrar la enorme utilidad y versatilidad de las técnicas, mostrando no solamente el potencial para mejorar el diagnóstico y de investigación científica, sino también, la belleza que tienen este tipo de imágenes, que muchas veces bien pueden confundirse con una obra de arte.

Tomografía computada

Las imágenes de tomografía computada son muy útiles para localizar estructuras anatómicas, por ejemplo, en un traumatismo (lesión producida por un golpe fuerte) en donde los equipos de emergencia tienen que actuar de manera rápida para tratar de evitar un mayor daño debido a la probable existencia de hemorragias internas que puedan comprometer la vida del paciente, estos equipos están altamente disponibles en la clínica. Su ventaja en la amplitud de diagnósticos puede detectar alteraciones en los huesos y músculos, ayudan a localizar ciertos tumores o bloqueos en el sistema circulatorio, ayudan a guiar cirugías, radioterapia, y hacer un abordaje más seguro en la toma de biopsias. También es eficaz para medir órganos pequeños como la tiroides, o algunos de mayor tamaño como páncreas, riñones e hígado y así poder determinar si hay crecimiento anormal, litos (piedras), quistes, o inflamación en ellos. Ejemplos de algunas aplicaciones se pueden ver en la figura 68, donde se muestra, de izquierda a derecha, una proyección de un niño, una reconstrucción resaltando senos paranasales, boca, laringe, tráquea, bronquios, pulmones, e intestino, la tercera imagen corresponde a la reconstrucción de un corazón y la última, una reconstrucción del sistema óseo.



Figura 68. Diferentes proyecciones que se pueden reconstruir de tomografía computarizada. Cortesía de la Unidad PET/CT, Facultad de Medicina, UNAM

Como se mencionó, las aplicaciones de las imágenes no se limitan al área clínica, sino que resultan útiles en otros campos del conocimiento, por ejemplo, en la paleontología y en la conchiliología (griego κογχύλιον, "concha" y -λογία, "estudio"), en donde se pueden apreciar las estructuras de fósiles o conchas (figura 69).

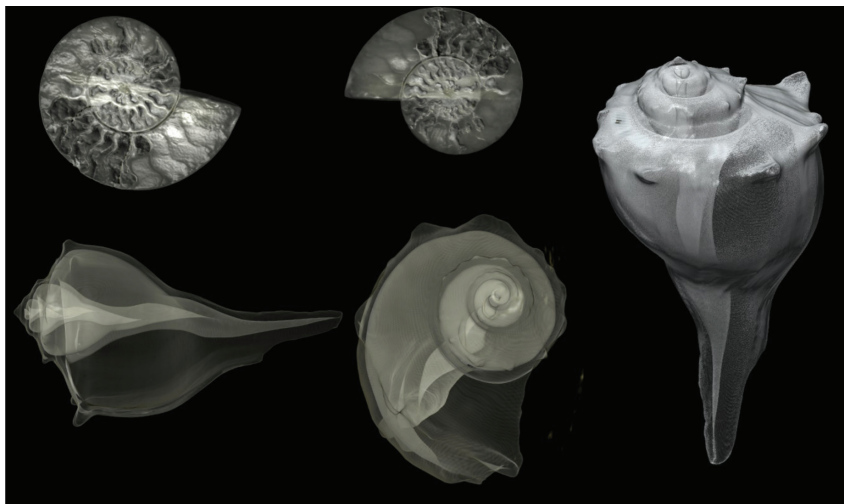


Figura 69. Proyecciones tomográficas de un fósil (Nautilus, del griego ναυτίλος, "marinero") y un caracol marino. Cortesía de la Unidad PET/CT, Facultad de Medicina, UNAM.

MRI

Las imágenes de resonancia magnética dan información que no podemos ver desde el exterior, como ejemplo, en la figura 70 se ilustran distintos cortes axiales de un cerebro humano, adquiridas con esta técnica.

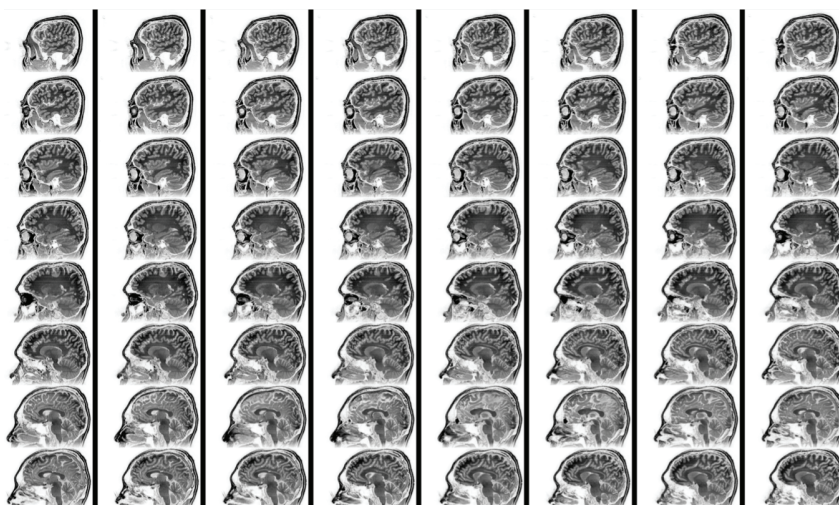


Figura 70. Serie de cortes sagitales del cerebro del mismo sujeto. Cortesía de la Unidad de Resonancia Magnética, Instituto de Neurobiología, UNAM.

En la actualidad, existen resonadores que dan amplia resolución espacial del cerebro (7T), pero su uso es en investigación, un ejemplo de estas imágenes se ilustra en la figura 71, en la cual se muestran las imágenes de un mismo paciente adquiridas con resonadores con distinto campo magnético.

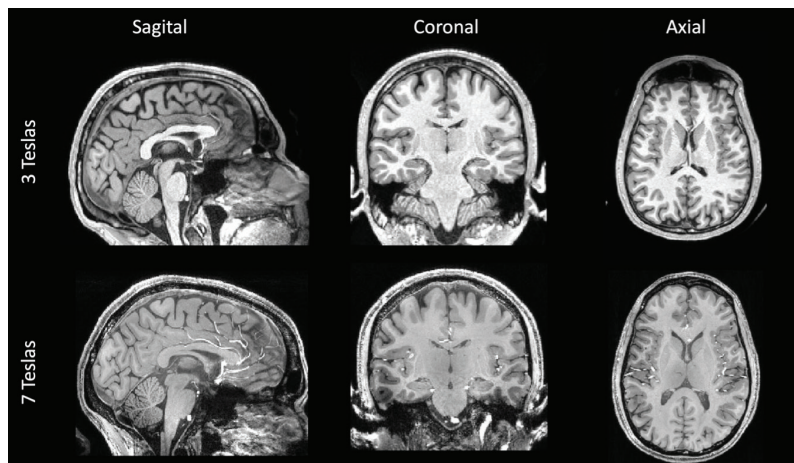


Figura 71. Imágenes anatómicas de 3 Teslas y 7 Teslas Cortesía de María Guadalupe García Gomar y Marta Bianciardi. Brainstem Imaging Laboratory, Athinoula A. Martinos Center for Biomedical Imaging, Massachusetts General Hospital.

Resonancia magnética en animales

Entre las múltiples aplicaciones que pueden ser usadas, está la que se utiliza en investigación para evaluar la activación cerebral cuando un perro realiza una tarea. Los científicos han encontrado que grandes regiones del cerebro están activas cuando reconocen rostros humanos, también han descubierto que los perros pueden hacer distinción entre idiomas (figura 72).

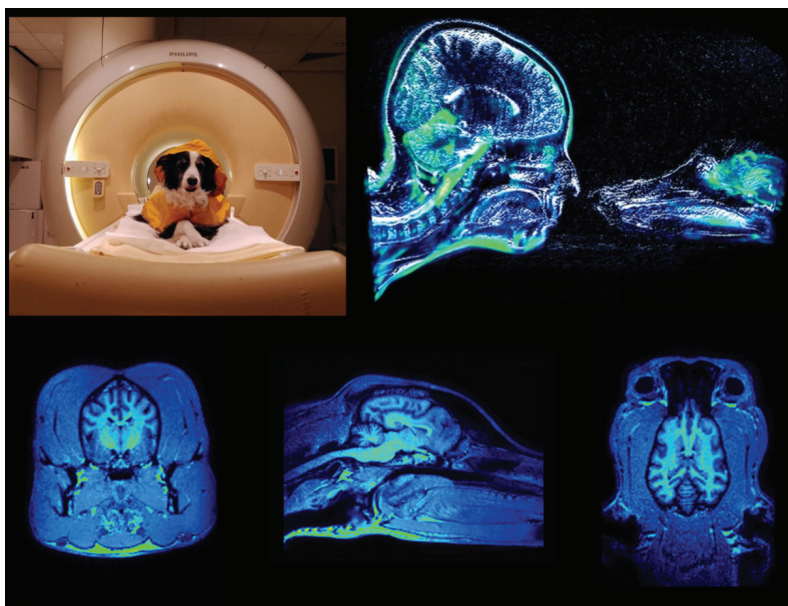


Figura 72. Imágenes de un perro en un resonador, una imagen adquirida con su dueña, se distinguen distintos cortes anatómicos centrados en el cerebro del perro. Cortesía de Laura Cuaya (ELTE, Budapest, Hungría, Instituto de Neurobiología, Campus Juriquilla, UNAM).

Los equipos de resonancia magnética pueden crear imágenes que se relacionan con los tractos dentro del cerebro, este tipo de estudios es importante para estudiar enfermedades neurológicas, pues permiten el estudio de las conexiones entre las distintas regiones del cerebro (figura 73, izquierda y centro). Otra de las aplicaciones de un resonador es la imagen fMRI en la cual es posible localizar las regiones cerebrales que están activas cuando un sujeto realiza una tarea, como ejemplo se ilustran las áreas activas de un sujeto mientras habla (figura 73, derecha).

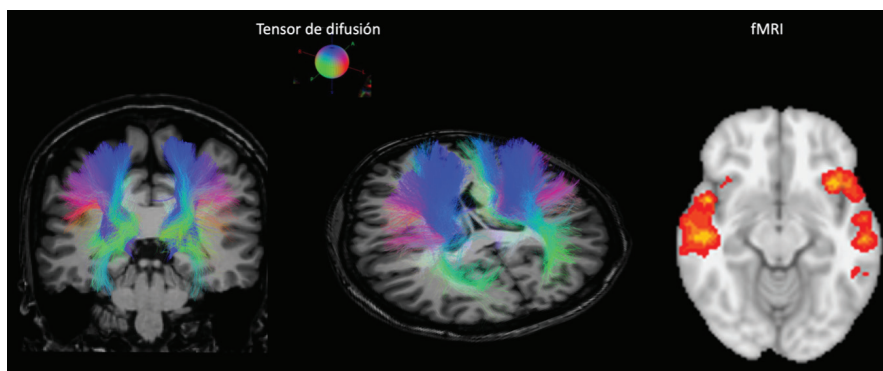


Figura 73. Tensor de difusión. Vista coronal y axial de tractografía de fibras tálamo corticales en un resonador de 3 Teslas, fusionada a una imagen anatómica. Los colores indican la dirección del tracto. Cortesía de Juan Rodrigo Guerrero Morales, Merlin Fair y María Guadalupe García Gomar del Laboratorio Nacional de Imagenología por Resonancia Magnética, Instituto de Neurobiología, UNAM. fMRI: Ejemplo de imagen obtenida con esta técnica cuando alguien está hablando. Cortesía de la Unidad de resonancia Magnética, Instituto de Neurobiología, UNAM.

PET

La tomografía por emisión de positrones es de gran utilidad en aplicaciones oncológicas, pues permite medir y visualizar de manera objetiva la respuesta a un tratamiento, como ejemplo, en la figura 74 (izquierda) se ilustra un paciente con el diagnóstico de linfoma no Hodgking, el cual se ha esparcido el tumor a diversas partes del cuerpo, tiempo después de recibir una terapia, se adquiere una imagen y se ve que la metástasis ha cedido exitosamente al tratamiento (figura 74, derecha).

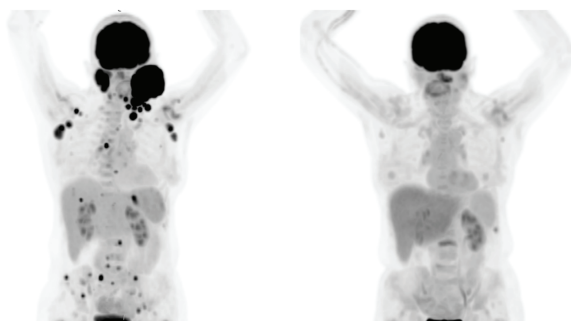


Figura 74. Paciente con metástasis antes y después de tratamiento. Cortesía de la Unidad PET/CT, Facultad de Medicina, UNAM.

La técnica PET es muy útil para evaluar la integridad del corazón, por ejemplo, en la figura 75 se observa la captación normal de un radiofármaco en el corazón (lado izquierdo), comparado con la captación en un corazón que tuvo un infarto (derecha), en ese paciente se observa que la captación pierde continuidad y la TC muestra la sustitución de músculo cardíaco por grasa, lo que evidencia el infarto.

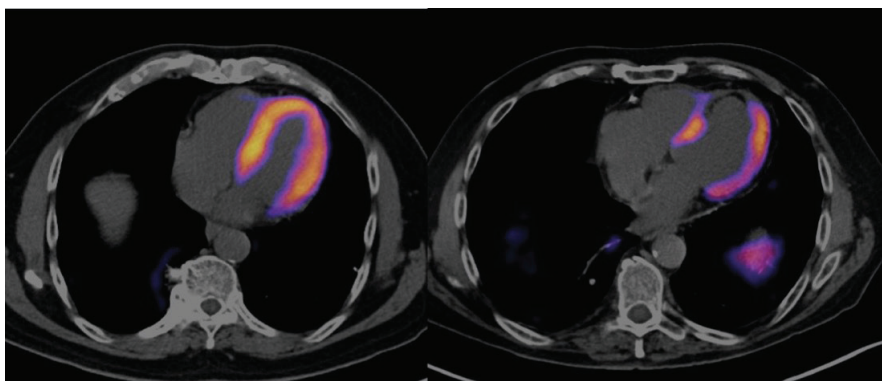


Figura 75. Imágenes de la fusión PET/CT de un sujeto sano (izquierda) comparado con un paciente que ha tenido un infarto. Cortesía de la Unidad PET/CT, Facultad de Medicina, UNAM.

Investigación en animales

Se han desarrollado equipos ex profeso para estudiar animales con un equipo MicroPET, en la figura 76 se puede observar un ratón con un tumor del lado derecho, el sistema circulatorio y óseo de una rata, la distribución de un fármaco en un conejo y un acocil (crustáceo).

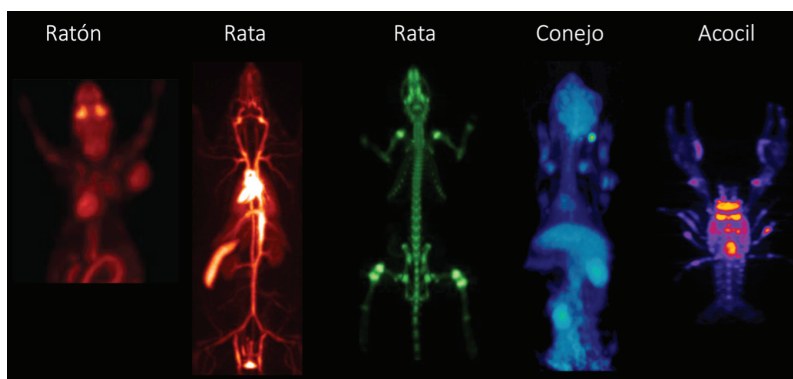


Figura 76. Imágenes de ratón, rata, conejos y acocil adquiridos con la técnica microPET. Cortesía del Laboratorio de investigación Preclínica MicroPET, Facultad de Medicina, UNAM.

SPECT

La técnica SPECT permite evaluar diversas enfermedades por medio del marcar moléculas con emisores gamas. Una de las mayores aplicaciones con esta técnica es para evaluar tumores y funciones cerebrales. Es muy usado en enfermedades como la epilepsia, pues ayuda a encontrar el foco epiléptico; en la figura 77 se muestra un paciente con epilepsia que en la MRI no se detecta ninguna anomalía, mientras que la SPECT es capaz detectar el foco epileptogénico en la región frontal del hemisferio cerebral derecho.

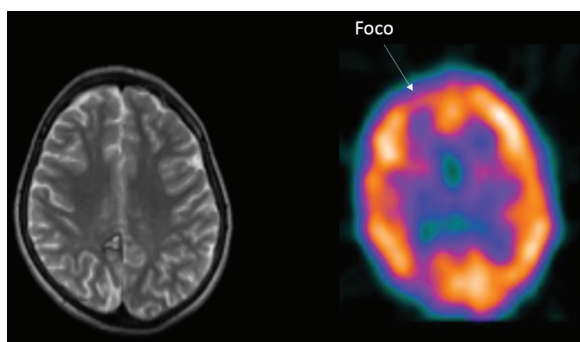


Figura 77. Imagen de MRI sin hallazgos clínicos (izquierda) y SPECT con captación disminuida en paciente con epilepsia correspondiente al foco epiléptico (derecha). Cortesía de doctora Paola Vallejo.

Fusión de tomografías

En la actualidad es común contar con equipos híbridos que permiten adquirir tomografías de dos distintas modalidades al mismo tiempo, o fusionarlas, por ejemplo, PET/CT, SPECT/CT e incluso PET/MRI. Lo anterior permite obtener información anatómica y funcional al mismo tiempo. Como ejemplo, en la figura 78 se ilustra una imagen cerebral PET de un sujeto usando un radiofármaco que se une a receptores de dopamina (captación funcional, se muestra en colores) y su correspondiente imagen anatómica adquirida mediante MRI (en grises).

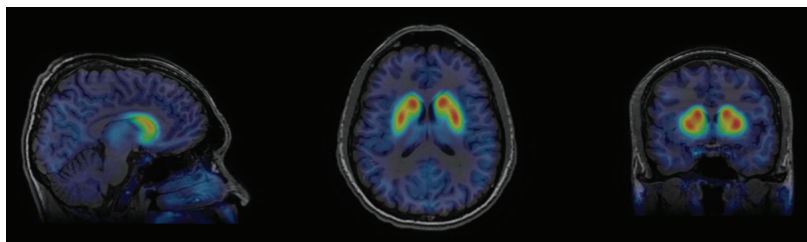


Figura 78. Fusión de imagen PET Y MRI. Cortesía de la Unidad PET/CT y Unidad Radiofarmacia Ciclotrón, Facultad de Medicina, UNAM.

Epílogo

Nuestro espíritu se enriquece con lo que recibimos,
nuestro corazón con lo que damos.”

Victor Hugo

Esta obra no pretende ser un compendio –empresa poco menos que imposible– de las ideas de grandes personajes que han sido pilares del pensamiento científico y filosófico que llevaron a la creación y mejora de los equipos de imagen conocidos como tomógrafos. Más bien, debe leerse como una breve introducción, esperando sea estimulante para que las personas se acerquen a la ciencia a través de este hermoso mundo de las imágenes médicas, vistas desde los ojos de la física o la medicina, pero también es posible acercarse mediante la química, computación, ingeniería, psicología, biología o neurociencias.

Los físicos estudian a la materia y sus interacciones ¿y qué son los átomos y moléculas interaccionando? No son más que química, y esos átomos que forman moléculas que al agruparse forman complejas cadenas como el ADN, son el objeto de estudio de la biología. Siguiendo un eslabón más, el ADN guarda las instrucciones para formar órganos y tejidos, el estudio de su estructura y función, en salud y enfermedad, le llamamos medicina. Y esos órganos y tejidos, en conjunto con las moléculas que nos constituyen forman nuestro cerebro, que nos da el ser, que es el objeto de estudio, por medio de la psique de la psicología y más allá, de la filosofía.

Lo que nos da identidad y el propio ser no son solo los genes, sino su conjunto y expresión en el entorno en el que vivimos, es decir, una sociedad, materia de estudio de la sociología, política, historia y antropología, por mencionar algunas ramas que por alejadas que parezcan no es más que un estudio de muchos átomos (billones de ellos) actuando en conjunto, problema poco menos que imposible de resolver. Cualquier ciencia, por alejada que parezca, no es más que el objeto de estudio de la física, a una escala mucho, muchísimo más compleja. Por lo anterior, hoy más que nunca se necesita gente que se especialice en todas las áreas del conocimiento, se zambulla en ese conocimiento y después emerja para entender al mundo desde una perspectiva distinta.

Estudiar ciencia permite ver al mundo con otros ojos, ayuda a entender las hermosas aplicaciones que el humano ha logrado crear. Saber un poco de ciencia permite maravillarse de los avances tecnológicos y del ingenio humano para llevarlos a cabo. Por ejemplo, un gran logro de la ciencia y tecnología humana fue el lanzamiento de la sonda espacial Voyager 2 en la segunda mitad del siglo XX, la cual ya ha logrado salir del sistema solar, siguiendo su camino hacia la estrella Ross 248 a donde llegará en aproximadamente 200 000 años. La sonda tiene un disco de oro ideado por Carl Sagan con el fin de ser encontrado y descifrado por vida inteligente en otros lugares del Universo, contiene imágenes de planetas, animales, montañas, ríos, bosques, radiografías, fetos, desiertos, conchas, monos, madres con sus hijos, niños, diagramas del crecimiento celular, de las etapas embrionarias, etc. También se encuentran grabados sonidos de saludos humanos en distintos idiomas, cantos de grillos, de pájaros, maullidos, ramas rompiéndose, ruido de cascadas, truenos, latidos de corazón y demás sonidos maravillosos que se encuentran en la naturaleza. Además, contiene música de Beethoven, Bach

y Louis Armstrong; una canción con mariachi, "El cascabel" de Lorenzo Barcelata con el Mariachi México. Si algún día alguna civilización inteligente llega a encontrar y descifrar el disco, seguramente pensará: "¡Qué hermoso lugar para vivir es esa Tierra!" Y sí, es un lugar fantástico para vivir y enamorarse. A veces los humanos nos preocupamos por cosas sin importancia y vivimos nuestra corta existencia infelices, pensando en cosas que podríamos tener en lugar de disfrutar este hermoso lugar donde nos tocó vivir por tan solo un periodo de tiempo.

Si se envía otra sonda espacial, esperemos que se integren instrucciones para construir tomógrafos, tecnología que tanto ha beneficiado a nuestra especie y sin duda, lo seguirá haciendo.

Glosario

ADN: Ácido desoxirribonucleico

Átomo: Indivisible, el concepto refiere a la parte fundamental de la materia que ya no puede ser dividida.

CT: Tomografía computarizada, por sus siglas en inglés (Computed Tomography).

Espectro de radiación: Rango de fotones de diferente energía que se caracterizan por su naturaleza electromagnética y se diferencian por su longitud de onda.

Fotón: Partícula de interacción de la fuerza electromagnética, se caracteriza por su comportamiento dual: onda, partícula.

fMRI: Técnica de imagen usada para localizar regiones del cerebro activas cuando se realiza una tarea, resonancia magnética funcional (fMRI, por su siglas en inglés)

Isotópo: núcleos atómicos que se caracterizan por poseer el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones, por ejemplo, los isótopos del hidrógeno: 1H (protio), 2H (deuterio), 3H (tritio).

Neutrino: partícula subatómica, sin carga eléctrica y masa despreciable. Su nombre significa neutrón pequeño y se genera durante los decaimientos beta.

Número de masa (A): Es el número total de nucleones, la suma de neutrones y protones en un núcleo.

Número atómico (Z): es el número de protones, representa la identidad del átomo.

Radiofármaco: Sustancia radiactiva compuesta de una molécula de interés biológico, que en su estructura química presenta un o más átomos radiactivos y presenta forma farmacéutica.

Rayo gamma: también llamado fotón gamma, es un fotón cuyo origen es en el núcleo atómico.

Rayos X: fotón que su origen se encuentra por transiciones electrónicas en los orbitales atómicos.

Onda: perturbación en el espacio debido a la transferencia de energía, ya sea de origen mecánico, electromagnético o térmico.

MRI: Imagen por resonancia magnética, por sus siglas en inglés (Magnetic Resonance Imaging).

PET: Tomografía por emisión de positrones, por sus siglas en inglés (Positron emission tomography).

PET/CT: Sistema híbrido de imagen donde se fusiona imágenes PET y CT.

Fotopico: registro de la energía correspondiente a un fotón de un núcleo emisor gamma.

SPECT: Tomografía computarizada por emisión de fotón único, por sus siglas en inglés (Single photon emission computed tomography).

TAC: Tomografía axial computarizada, por sus siglas en inglés (tomography axial computed).

Tomografía: corte o sección.

Vida Media: Tiempo que le toma a una muestra de núcleos radiactivos decaer a la mitad de su valor.

Voxel: Mínima unidad de volumen de una imagen caracterizada por tres coordenadas espaciales (que es la mínima unidad de volumen caracterizada por tres coordenadas espaciales (x,y,z)).

Referencias

- Agar, Jon (2001). *Turing and the Universal Machine*. Duxford: Icon.
- Cox, R. (1974). *Cell communication*. Wiley, pp, 54.65.
- Akitt J. W., Mann, B. E. (2000). *NMR and Chemistry*. Stanley Thornes
- Asimov, I. (1998). *Historia de los egipcios*. Dorian Press.
- Aso, J. (2015). *Virtopsia. Aplicaciones de un nuevo método de inspección corporal no invasiva en ciencias forenses*, Cuadernos de Medicina Forense.
- Attix, F. H. (2004). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Protection*. Wiley-VCH.
- Beiser, A. (2003). *Concepts of Modern Physics* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Brünglinghaus, M. (2017) *Nuclear fision*. European Nuclear Society.
- Bushberg, J. T., Seibert, J. A., Leidholdt, E. M., & Boone, J. (2002). *The Essential Physics of Medical Imag-ing* (2nd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Caicedo O. H, Aldana, C. A. y Hernández, C. A. (2009). *Resonancia magnética funcional: evolución y avances en clínica*. Tecnura.
- Campbell, J. (2017). *Las máscaras de Dios*. Ediciones Atalanta.
- Carrington, A. McLachlan A.D. (1967). *Introduction To Magnetic Resonance*. Chapman and Hall.
- Cherry, S. R., Sorenson, J. A., & Phelps, M. E. (2012). *Physics in Nuclear Medicine* (4th ed.).
- Childs, H. (1968). *An American Genius: The Life of Ernest Orlando Lawrence, Father of the Cyclotron*. E. P. Dutton.
- Clayton, M. (2012). *Medicine: Leonardo's anatomy years*. Nature.

- Dawkins, R. (1990). *El gen egoísta: las bases biológicas de nuestra conducta*. Salvat ciencia.
- Descartes, R. (2010). *Las pasiones del alma*. Gredos.
- Duoandikoetxea, Z. (1995). *Análisis de Fourier*. Addison-Wesley Iberoamericana.
- Einstein, A. (1905). *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen*. Annalen der Physik.
- Escandell, M. V. (1993). *Aportaciones de la Pragmática*. Antropos, Barcelona-Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- Frédy, D. (1996). *Paul Broca (1824-1880)*. Histoire Des Sciences Médicales.
- Freire, N. (2023). El éxito de los Beatles contribuyó a la tomografía computada. National Geographic.
- Friedlander, G., Kennedy, J. W., Macias, E. S., & Miller, J. M. (1981). *Nuclear and Radiochemistry* (Third Edition). John Wiley & Sons, Inc.
- Foucault, M. (2013). *El orden del discurso*. Tusquets.
- Galeano, E. (2012). *Los hijos de los días*. Siglo XXI Editores.
- Garrison, F. H. (1929). *An introduction to the history of medicine*. W. B. Saunders Co.
- Gili, J. (2016). *Introducción biofísica a la Resonancia Magnética en Neuroimagen*. Books Médicos.
- Halliday, D., & Resnick, R. (1986). *Fundamentos de Física. Versión Ampliada*. Compañía Editorial Continental.
- Keeler, J. (2005). *Understanding NMR Spectroscopy*. John Wiley & Sons.
- Khan, F. (1994). *The Physics of Radiation Therapy* (2nd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Krauss, L. (2006). *Historia de un átomo*. Laetoli.
- Kundera, M. (1985). *La insoportable levedad del ser*. Tusquets Editores.
- León-Portilla, M. (1961). *Los antiguos mexicanos*. Fondo de Cultura Económica.

- Lévi-Strauss, C. (1978). *Antropología Estructural*. Capítulo IX: El hechicero y su magia. Ed. Universitaria de Buenos Aires.
- Luria, A. R. (1977). *Las funciones corticales superiores en el hombre*. Fontanella.
- Mattson, J & Merrill, S. (1996). *Pioneers of NMR and magnetic resonance in medicine: the history of MRI*. Barra-Ilan University Press.
- Ogawa, S., Tank, D. W., Menon, R., Ellermann, J. M., Kim, S. G., Merkle, H., & Ugurbil, K. (1992). Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89(13), 5951-5955. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.13.5951>
- Pujal, M. (2010). *Electricidad y magnetismo*. Reverté.
- Reglamento General de Seguridad Radiológica. (1988). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/122476/reglamento_general_seguridad_radiologica.pdf
- Resnick, R., Halliday, D., & Krane, S. K. (2002a). *Física 1*. CECSA.
- Resnick, R., Halliday, D., & Krane, S. K. (2002b). *Física 2*. CECSA.
- Rigoni, M. A. (2017). *Vanidad*. Ai Trani.
- Sabbatini, E. (2003). *Neurons and Synapses: The History of Its Discovery*. Brain & Mind Magazine.
- Schwartz, D. (2017). *The Last Man Who Knew Everything: The Life and Times of Enrico Fermi, Father of the Nuclear Age*. Hachette.
- Schopenhauer, A. (2020). *El mundo como voluntad y la representación*. Gredos.
- Suetens, P. (2009). *Fundamentals of Medical Imaging* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Thali, M. J., Yen, K., Schweitzer, W., Vock, P., Boesch, C., Ozdoba, C., Schroth, G., Ith, M., Sonnenschein, M., Doernhoefer, T., Scheurer, E., Plattner, T., & Dirnhofer, R. (2003). Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and

- magnetic resonance imaging (MRI)--a feasibility study. *Journal of forensic sciences*, 48(2), 386-403.
- Tippens, P. E. (2007). *Física. Conceptos y aplicaciones* (Séptima Edición). McGraw-Hill.
- Turner, J. E. (2007). *Atoms, Radiation and Radiation Protection*. Wiley-VCH.
- Uldin T. (2017). Virtual anthropology - a brief review of the literature and history of computed tomography. *Forensic sciences research*, 2(4), 165-173. <https://doi.org/10.1080/20961790.2017.1369621>
- Unamuno, M. (1970). *Del sentimiento trágico de la vida*. Aguilar.
- van Timmeren, J. E., Cester, D., Tanadini-Lang, S., Alkadhi, H., & Baessler, B. (2020). Radiomics in medical imaging-"how-to" guide and critical reflection. *Insights into imaging*, 11(1), 91. <https://doi.org/10.1186/s13244-020-00887-2>
- Vesalius, A. (1543). *De humani corporis fabrica libri septem*. Basileae: ex Officina Ioannis Oporini.
- Vivas, I. (2013). Nuevos horizontes en el desarrollo de medios de contraste en Radiología. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 36(2), 189-192. <https://dx.doi.org/10.4321/S1137-66272013000200001>

¿Sabías que la existencia de las tomografías nació con ayuda de la fama de The Beatles?

Esta obra nació de una necesidad de la comunidad universitaria por contar con un texto que sirva de puente entre la medicina y la ciencia básica. En este libro se explican de manera clara los principios básicos necesarios para entender como son creadas las imágenes médicas modernas desde una perspectiva física e histórica que lleva al lector no especializado de la mano a explorar el mundo del diagnóstico clínico por imagen tomográfica.

El objetivo es ser de utilidad para que la comunidad médica entienda los principios básicos de física que son usados para crear una imagen diagnóstica, por otra parte, está pensado para que personas interesadas en la ciencia exploren una de las tantas formas en que el conocimiento científico puede ser usado para fines médicos.

El libro puede ser usado por alumnos interesados en temas de física, por médicos de pregrado y médicos especialistas con curiosidad en los principios de los diversos métodos de imagen que usan en el diagnóstico rutinario. También será útil en la enseñanza de las Unidades PET/CT y Radiofarmacia/Ciclotrón en sus cursos para técnicos radiológicos y en el curso de alta especialidad PET/CT, así como para el área Física Médica y Física Biomédica.



SDI SECRETARÍA DE
DESARROLLO
INSTITUCIONAL

Facultad de Medicina

