

**APROXIMACIÓN A LA INTERACCIÓN RADIACIÓN - TEJIDO HUMANO, UNA  
REVISIÓN DEL PROCESO DE RADIOTERAPIA**

**EDGAR ACUÑA ORTEGÓN**

**DYLAN STIVEN LLANOS CARDONA**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

**LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN FÍSICO MATEMÁTICA**

**BOGOTÁ, COLOMBIA**

**2021**

**APROXIMACIÓN A LA INTERACCIÓN RADIACIÓN - TEJIDO HUMANO, UNA  
REVISIÓN DEL PROCESO DE RADIOTERAPIA**

**EDGAR ACUÑA ORTEGÓN**

**DYLAN STIVEN LLANOS CARDONA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE LICENCIADO EN FÍSICA**

**ASESOR: NESTOR FERNANDO MENDEZ HINCAPIE**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

**LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA Y LA RELACIÓN FÍSICO MATEMÁTICA**

**BOGOTÁ, COLOMBIA**

**2021**

## Índice

Índice	3
Índice de figuras	5
Índice de Tablas	6
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I	10
ELEMENTOS ORIENTADORES DE LA INVESTIGACIÓN	10
Planteamiento del problema	10
Objetivo	11
<b>Objetivos específicos</b>	11
Metodología	11
Justificación	12
Antecedentes	12
<b>Antecedente local</b>	12
<b>Antecedente nacional</b>	13
<b>Antecedente internacional</b>	13
CAPÍTULO II	16
UNA VISIÓN GENERAL DEL DESARROLLO HISTÓRICO DE LA RADIOTERAPIA	16
Primeros procesos de radioterapia	18
CAPÍTULO III	20
FENÓMENOS IMPLÍCITOS DE LA FÍSICA EN LA RADIOTERAPIA	20
El efecto fotoeléctrico	21
Ecuación de Schrödinger	24
Energía del punto cero	25
Tiempo de vida de los estados excitados	27
CAPÍTULO IV	32
RADIACIÓN EN LA MATERIA HUMANA	32
<b>Etapa Física</b>	32
<b>Etapa Físicoquímica</b>	33
<b>Etapa Química</b>	33

	4
<b>Etapa Biológica</b>	35
<b>Estimación de las ionizaciones por núcleo celular</b>	37
CAPITULO V	41
LA ENSEÑANZA DE LA RADIOTERAPIA	41
Diseño del material audiovisual	43
Temario y organización	44
CONCLUSIONES	46
REFERENCIAS	47
ANEXO 1. FENÓMENOS IMPLÍCITOS DE LA FÍSICA EN LA RADIACIÓN	54
Anexo 1.1. Efecto fotoeléctrico.	54
Anexo 1.2. Ecuación de Schrödinger	54
Anexo 1.3. Tiempo de vida de los estados excitados, probabilidad por segundo.	59
Anexo 1.4. El operador posición	64
Operador momentum	65
Conmutador posición-momento.	66
ANEXO 2 - CICLO CELULAR, REPLICACIÓN DEL ADN Y PUNTOS DE CONTROL	67
ANEXO 3 – GUIONES TÉCNICOS	70

## Índice de figuras

Figura 1. Diseño de investigación cualitativa.	12
Figura 2. Descubrimiento de los rayos Röntgen o rayos X.	16
Figura 3. Primera radiografía y diploma Nobel de Física en 1901.	18
Figura 4. Paciente tratada por Leopold Freund con rayos x.	19
Figura 5. Efecto Fotoeléctrico	21
Figura 6. Intensidad vs Voltaje	22
Figura 7. Intensidad vs voltaje para distintas corrientes	23
Figura 8. Emisión espontanea.	28
Figura 9. Colisiones inelásticas contribuyen a la despoblación de $E_i$	30
Figura 10. Curva de decaimiento de la población $N_i$ de un estado excitado $E_i$ con un tiempo de vida $\tau_i$ .	31
Figura 11. Figura energía oscilador armónico (a) y energía de una molécula que no se considera armónica (b).	32
Figura 12. Radiólisis del Agua.	35
Figura 13. Tiempo de duración de las etapas post-interacción radiación átomo	40
Figura 14. Logotipo aprende 123	41
Figura 15. Página aprende 123	42
Figura 16. Guiones técnicos de videos de aprende 123	43
Figura 17. Botones y menús de acceso a los diferentes apartados de aprende 123	45

### Índice de Tablas

Tabla 1. Grosor y densidades de diferentes láminas empleadas por Röntgen	17
Tabla 2. Fechas importantes en el desarrollo de la radioterapia en el mundo y en Colombia. Recopilación de Lars R., Monroy y Cruz, e Instituto Nacional de Cancerología.	19
Tabla 3. Frecuencia de daño causado por un Gy	36
Tabla 4. Niveles de radiación de exposición en humanos.	38
Tabla 5. Umbrales ante daños tisulares	39

## INTRODUCCIÓN

Si pudiésemos hablar de una enfermedad que haya acompañado al hombre desde sus orígenes muchas enfermedades podrían aparecer, pero sin duda una de las que sigue agobiando cada vez más en nuestros tiempos es el cáncer, una enfermedad ampliamente estudiada y conocida. La Organización Mundial de la Salud (OMS) la reconoce como un problema de salud pública. En el año 2018 hubo 101.893 casos nuevos y 46.057 muertes solo en Colombia (International Agency for Research on Cancer - IARC, 2020). Al comparar esta cifra con la que el Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) dio en su informe del 2020 en ese mismo periodo en Colombia hubo 236.931 fallecimientos, representando así que las muertes a causa de cáncer fueron del 19,4% de las defunciones totales.

Por su parte, el país cuenta con 1.780 servicios oncológicos en el 2017 con una distribución poco uniforme, debido a que en algunas regiones como la Amazonia y el Putumayo no se posee cobertura en estas especialidades (Murcia, Aguilera, Wiesner & Pardo, 2018, p. 91). La mayoría de estos servicios se prestan en las ciudades capitales, lo que aumenta las limitantes de acceso de la población rural y consigo los riesgos de complicaciones. Entre los complementos terapéuticos podemos encontrar cirugía, quimioterapia, medicina nuclear y radioterapia. De este último se cuenta en la actualidad con 56 centros de atención dispersos por todo el país, 10 ubicados en Bogotá (Ministerio de Salud, 2020). Como consecuencia se evidencia una baja cantidad de centros de atención para la cantidad de casos que pueden llegar a presentarse en el territorio nacional, aumentando la saturación de estos centros e imposibilitando al personal médico realizar una correcta socialización del procedimiento a cada uno de los pacientes y familias de estos.

Cada uno de estos pacientes cuenta con múltiples derechos, entre los cuales encontramos la accesibilidad a la salud, entendiéndose esta como de fácil acceso, trato y comprensión. Ello se

puede observar mediante la ley estatutaria 1751 donde se regula el derecho fundamental de la salud en el literal d del artículo 10:

A obtener información clara, apropiada y suficiente por parte del profesional de la salud tratante que le permita tomar decisiones libres, conscientes e informadas respecto de los procedimientos que le vayan a practicar y riesgos de estos. Ninguna persona podrá ser obligada, contra su voluntad, a recibir un tratamiento de salud. (Ley 1751, 2015, art.10)

En concordancia a la pasada ley y en relación con el problema de salud pública que representa el cáncer, surge la necesidad de, en primer lugar, brindar las condiciones apropiadas para que los pacientes con esta enfermedad tengan la posibilidad de tratarla y, en segundo lugar, explicarles a los pacientes el tipo de proceso terapéutico el cual están recibiendo, sea curativo o paliativo.

La radioterapia como método de tratamiento es definida como: “tratamiento médico que hace uso de la radiación ionizante<sup>1</sup> con el fin de erradicar un volumen tumoral benigno o maligno, preservando el tejido sano adyacente y mejorando la calidad de vida del paciente” (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2018). Este procedimiento al igual que como muchos otros deben ser explicados de una manera amable, entendiendo el contexto en el cual se encuentran los pacientes y familiares. Esta situación en la que se hace necesaria una explicación adecuada y amena del procedimiento es por lo tanto de importancia para nosotros como docentes en formación dado que, entendiendo la radioterapia como parte de la física médica, desde nuestra disciplina tenemos los conocimientos y herramientas para realizar una explicación del fenómeno en cuestión acorde a las especificidades del contexto. Además, como miembros de la Universidad Pedagógica

---

<sup>1</sup> Entiéndase por radiación ionizante aquella que tiene la capacidad de extraer electrones ligados al átomo con el fin de alterar su estructura.

Nacional (UPN) debemos actuar acorde a la misión de la institución: “la formación de educadores y actores educativos con capacidad de comprender y transformar sus contextos” (UPN, 2010).

El presente trabajo de grado inicia con la contextualización de los elementos orientadores de la investigación, entiéndase por ello el planteamiento del problema, objetivos, metodología justificación y antecedentes. Posteriormente se aborda una breve parte histórica acerca de la radioterapia y la radiación, con una contextualización del escenario en el cual se encuentran inmersas las personas diagnosticadas con cáncer. Se desarrolla después una explicación del fenómeno físico y de allí las fases física, química y biológica presentes en el proceso de la interacción radiación materia. Para finalizar se realizará una propuesta para la explicación de este fenómeno a las personas interesadas (pacientes, familiares y público general), este será el enfoque principal de esta investigación. Realizar un explicación amena, precisa y sencilla que pueda explicar el fenómeno a cualquier persona que ya sea por curiosidad o porque se encuentre en tratamiento recurra al material elaborado en el presente trabajo de grado.

## CAPÍTULO I

### ELEMENTOS ORIENTADORES DE LA INVESTIGACIÓN

#### Planteamiento del problema

Según cifras de la Organización Mundial de Salud (OMS), los casos de cáncer detectados en la población colombiana han tenido un incremento, igualmente han aumentado las muertes ocasionadas por esta enfermedad. En esa situación los pacientes se ven en la necesidad de recurrir a diferentes procesos o procedimientos que les permitan curar o alargar su esperanza de vida, así como su calidad. Es la radioterapia una opción real que se les ofrece como tratamiento, mas este procedimiento no está bien explicado, debido a que en la mayoría de los casos se expone el tratamiento como cualquier otro fármaco y se hace de una forma bastante técnica, sin que el paciente comprenda adecuadamente el procedimiento al que está siendo sometido e, incluso, desconociendo los efectos que podría traer consigo en el cuerpo humano.

Es entonces necesario plantear si el rol de docente e investigador se limita a sólo al aula, dejando de lado las aplicaciones y utilidades que tiene en la modernidad. La actual población necesita una explicación ante un fenómeno físico como lo es la radioterapia; los casos de población con cáncer son significativos y estos tienen la necesidad de conocer acerca de su situación de la manera más completa posible y usando preferiblemente los medios a su alcance. Al mismo tiempo lo anterior se hace necesario puesto que estos pacientes tienen en algunos casos desventajas como la imposibilidad de estudiar, ya que por su proceso de terapia se tienen que ver desligados de las instituciones educativas. Es por eso mismo que la Secretaría de Educación Distrital (SED) ha implementado proyectos como “Aula hospitalaria”, donde los pacientes reciben clases en los hospitales para continuar su formación, esto contenido en el Acuerdo Distrital 453 de 2010 con el contenido de “se crea el servicio de apoyo pedagógico escolar para niños, niñas y jóvenes

hospitalizados e incapacitados en la red adscrita a la Secretaría Distrital de Salud” (Consejo de Bogotá, 2010).

A causa de esto surge el planteamiento del problema que propone el presente trabajo de grado: *¿De qué manera debería ser la enseñanza del proceso de la radioterapia a la población en general con el fin de ofrecer la información por medio de materiales amenos, sencillos y precisos?*

### **Objetivo**

Realizar un material multimedia para la divulgación de los fenómenos implícitos en la radioterapia.

### **Objetivos específicos**

- Categorizar los procesos (físicos, químicos y biológicos) que intervienen en el procedimiento de radioterapia para dar una visión más completa del fenómeno.
- Identificar los efectos físicos adversos que se conllevan al realizar un proceso de radioterapia para su correcta divulgación.
- Desarrollar guiones técnicos, audios descriptivos y animaciones que permitan dar cuenta del fenómeno de radioterapia, para explicarlo al público en general.

### **Metodología**

Al realizar un abordaje del fenómeno con contenidos flexibles y abiertos, sin fronteras precisas, el trabajo se aborda desde una metodología de investigación cualitativa (Hernández, Fernández & Baptista, p. 469. 2014) con el fin de explorar y describir el proceso de radioterapia a través de la comprensión del fenómeno, para así desarrollar un material ameno y sencillo, mostrando una conexión o sucesión de los eventos que allí intervienen. La siguiente figura ilustra el proceso de investigación seguido en este trabajo:

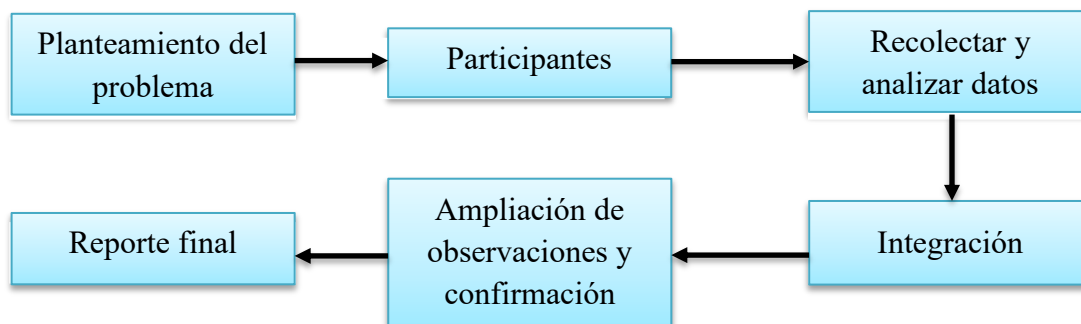


Figura 1. Diseño de investigación cualitativo  
 Imagen adaptada de Hernández donde se evidencian los pasos para llevar un estudio cualitativo  
 (Hernández et al., 2014, p 486). Elaboración propia

## Justificación

El trabajo se realiza con el sentido de comprender el proceso de la radioterapia y así poder realizar una explicación detallada a través de la visión moderna que nos ofrece la mecánica cuántica. Además, se plantea evidenciar la importancia en satisfacer y explicar a una población en constante crecimiento, como lo son los pacientes con cáncer, los procesos que suceden durante las sesiones de radioterapia. Lo anterior se pretende realizar de una manera simple, pero moderna para la comprensión del fenómeno.

## Antecedentes

### Antecedente local

En el trabajo de *Comprendiendo la fenomenología involucrada en la interacción radiación-materia: Estrategia didáctica orientada a la formación tecnológica en los campos de radiología en imágenes diagnósticas* de Felipe Cuarán (2017) es muy importante ya que este es el primer, y el único encontrado, trabajo de la licenciatura en física que aborda la temática relacionada con la radiología. Cuarán realiza un análisis de cómo es comprendido el fenómeno físico de la

radioterapia por los técnicos del SENA. Ante la intervención de Cuarán en el aula donde se forman los técnicos, éste evidencia que hay una carencia en cuanto a la comprensión de la fenomenología física implicada.

Las estrategias usadas por este para aproximar a los técnicos en radioterapia e imágenes diagnósticas del SENA son de notorio interés para nosotros ya que la evidencia de su trabajo nos puede dar señal de qué tan asertiva fue su metodología para la aproximación a los conceptos físicos principales de este fenómeno. Realizar un análisis detallado del pre-test y el post-test que Cuarán realiza podría de ser uno de nuestros intereses principales dado que el material realizado en nuestra investigación podría complementar dicho trabajo y también servir de base para futuras investigaciones más especializadas.

### **Antecedente nacional**

Realizar un análisis del trabajo *Aspectos Físicos de la Hadronterapia* nos parece de gran importancia ya que en este Quiroga (2014) hace un análisis de los efectos de la radiación en *material biológico*. Este análisis no se observa en los antecedentes locales e internacionales, ignorando así que esta interacción es fundamental para nuestra investigación dado que profundiza sobre la radiosensibilidad durante el proceso de división celular, profundizando los conceptos a tener en cuenta para una mejor explicación del fenómeno de la radioterapia ya que comparte ciertos aspectos con el tratamiento con hadronterapia.

### **Antecedente internacional**

Cuando empezamos esta investigación estábamos orientados por caminos distintos. Nuestro interés era profundizar en algoritmos de programación usados en radioterapia para hacer el

fenómeno más eficiente. Uno de los trabajos que encontramos en esta dirección fue el de *Ant Colony Optimization* de Dorigo (2004). En este trabajo podemos resaltar que se utilizan algoritmos basados en el comportamiento de las hormigas para recorrer distintas trayectorias en el menor tiempo posible. Este fenómeno, según el estudio, es principalmente guiado gracias a rastros de feromonas dejados por las hormigas a lo largo de las trayectorias recorridas; si por ejemplo una hormiga se desviara del camino principal segregaría dicha feromona, pero el camino que demarca tendría una menor intensidad que el camino principal, con el paso del tiempo dicha feromona en el camino se disipa si ninguna hormiga pasa por este y se fortalece si el gran ejército de insectos continúa marchando a través de dicho camino. Este planteamiento se puede desarrollar mediante ciertos códigos que implementados en computación son procesos que se realizan millones de veces en unos pocos segundos. Las aplicaciones para este tipo de lógica no solo funcionan para el estratégico comportamiento de las hormigas, en general existe un diseño para los distintos comportamientos de otros insectos que habitan de forma grupal y es llamado *inteligencia de enjambres*. Esta expresión, introducida por Gerardo Beni y Wang Jing en 1989, denota básicamente situaciones que a simple vista parecen aleatorias, pero son altamente elaboradas para lograr la supervivencia de determinada especie. A este tipo de comportamientos se les llama *estocásticos* porque parecen venir de un suceso no determinista en el que por ejemplo se podría tomar cualquier camino para seguir determinada trayectoria a uno o múltiples destinos y es aquí cuando encontramos que una de las aplicaciones de estos algoritmos es usada para el tratamiento en radioterapia porque esta misma lógica es manejada para optimizar los procesos radioterapéuticos.

La fuente que enlaza los fenómenos estocásticos de este tipo con la radioterapia es la siguiente *Optimización basada en algoritmos de colonias de hormigas de la simulación Monte*

*Carlo del transporte de radiación* de García (2012). En este trabajo encontramos que al fusionar estos métodos estadísticos, que tienen su origen en el desorden, se acoplan al parecer bastante bien con un fenómeno cuántico como el de radiación, en principio porque ambas situaciones parten de la premisa de ser no deterministas o estocásticos. Por lo tanto, nos proponemos realizar una revisión completa y detallada del fenómeno analizando que se comporta de forma estadística, aleatoria y cuántica.

Generalmente cuando cierta masa de tipo cancerígena se trata con radioterapia se debe emitir radiación de intensidades más altas comparadas con las que se reciben de manera natural. Ahora bien, cuando estas radiaciones tienen unas intensidades superiores a las recomendadas podría suceder una afectación a los tejidos circundantes al área a tratar. Así pues, el trabajo de García se ve enfocado en cómo se puede lograr una optimización del proceso aun cuando el tumor o blanco se encuentre en una mayor profundidad del tejido, logrando así que disminuya la acción en las áreas que no necesitan ser irradiadas. Esto se logra gracias a los algoritmos basados en colonias de hormigas, que en pocas palabras son algoritmos que describen cómo encontrar la trayectoria más corta cuando se habla de un fenómeno que surge del azar, como la radiación. Así los algoritmos se convierten en una herramienta bastante útil para optimizar un proceso que a simple vista es aleatorio.

## CAPÍTULO II

### UNA VISIÓN GENERAL DEL DESARROLLO HISTÓRICO DE LA RADIOTERAPIA

La historia de la radioterapia comienza con el físico alemán Wilhelm Konrad von Roentgen en 1895 cuando descubre lo que él denominó “Rayos X” (Busch, 2016) mientras se encontraba trabajando con un tubo de rayos catódicos en su laboratorio en Wurzburg. (figura 2).



Figura 2. Descubrimiento de los rayos Röntgen o rayos X.

Ilustración tomada de Alejandro Martínez de Andrés, 2014

En la figura 2 se observa de izquierda a derecha: *la bobina de Ruhmkorff*, usada como transformador elevador de tensión; el *tubo de Crookes*, usado para producir rayos catódicos; y, una *placa de platino-cianuro de bario*, producto fluorescente al interactuar con los rayos catódicos. En su texto *Acerca de un nuevo tipo de radiación*, Röntgen (1895) expone cómo en la habitación oscura después de encender el tubo de Crookes cubierto por un papel negro, la pantalla mostraba cierta luminiscencia la cual solo podía ser producida por un agente que viajó en una trayectoria recta desde el tubo. Procede después a estudiar la permeabilidad de distintos materiales (Tabla 1), encontrando que, al tener diferentes elementos del mismo grosor frente al rayo, su permeabilidad dependerá de su densidad y del tipo de material; puesto que también pone frente al rayo elementos

de igual densidad y se observa que existe una variación en la permeabilidad. El plomo con un espesor de 1,5mm lo considera “prácticamente impermeable”, reconoce que al poner varios objetos frente al rayo los ojos deben protegerse debido a que son lo suficientemente permeables, aunque no detecte una afectación inmediata. Lo nombra “Rayos” por las sombras que generan y procede a usar placas fotográficas para capturar el efecto, escribe en la parte final del documento: “Un tipo de relación entre los nuevos rayos y los rayos de luz parece existir, al menos la formación de sombras, la fluorescencia y el efecto químico que se producen en ambos tipos de rayos lo indica” (Röntgen, p 10, 1895). En su publicación indica que se realiza la primera radiografía a la mano de su esposa, trabajo que le hizo merecedor del primer Premio Nobel de Física encaminando a muchos otros investigadores a profundizar sobre dichos enigmas de la física (Figura 3).

<b>Dicke (Grosor)</b>		<b>relat. Dicke (Grosor relativo)</b>	<b>Dichte (Densidad)</b>
<b>Pt (Platino)</b>	0,018mm	1	21,5
<b>Pb (Plomo)</b>	0,05mm	3	11,3
<b>Zn (Zinc)</b>	0,10mm	6	7,1
<b>Al (Aluminio)</b>	3,5mm	200	2,6

Tabla 1. Grosor y densidades de diferentes láminas empleadas por Röntgen. Adaptado de:  
(Röntgen, p. 3, 1895)

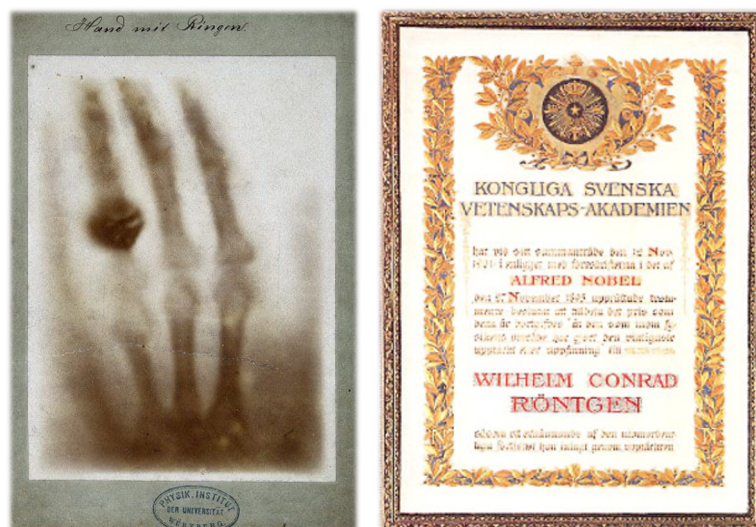


Figura 3. Primera radiografía y diploma Nobel de Física en 1901. Se observa la mano de Anna Bertha Röntgen con un anillo de plomo (izq.), evidenciando la permeabilidad de los tejidos y huesos versus el plomo. Wilhelm Röntgen es el primer físico en recibir un premio Nobel (der.). Imágenes tomadas de foronuclear.org y nobelprize.org respectivamente.

### Primeros procesos de radioterapia

Al realizar la publicación de los rayos Röntgen se conoció en Europa y comenzó una época de cerca de 25 años no muy halagadores para la radioterapia (Lars R., 1995, p. 995). En 1901 Röntgen recibe el premio Nobel de física por el descubrimiento de los rayos que llevan su nombre. Si bien los primeros procedimientos con estos rayos fueron de carácter diagnóstico debido a que facilitaron la identificación de alteraciones óseas, fracturas, luxaciones, etc.; fueron desarrollados al mismo tiempo como método de tratamiento. En la tabla 2 se muestran algunos de los primeros procedimientos terapéuticos en los que se usó la radiación como agente curativo y también aquellas fechas que fueron importantes en el desarrollo de la radioterapia en Colombia y en el mundo. Destaca el caso de Leopold Freund donde usó la radiación ionizante en el tratamiento de una paciente; como efectos secundarios se presentaron algunas úlceras y una ligera dermatitis. El

paciente recibió tratamiento a los seis años y no presentó mayores complicaciones hasta los 75 años, salvo por las cicatrices de las úlceras (Figura 4).

Año	Lugar	Procedimiento
1896	Chicago	Dr. Ludlam expone durante una hora a una persona con cáncer de seno
1896	Austria	Leopold Freund expone a un paciente con un nevus piloso a múltiples sesiones de exposición.
1896	Francia	Un paciente con carcinoma gástrico recibió 80 sesiones de un intervalo de 15 a 20 minutos
1903	Finlandia	Ali Krogus expuso durante dos semanas en sesiones de 10 a 15 minutos a un paciente con sarcoma en el cráneo, con un resultado positivo.
1906	España	Celedonio Calatayud introduce en España la radioterapia (Chiesa Miguel et al., 2013)
1928	Colombia	Claudius Regaud dicta una conferencia ¿Cómo organizar la detección del cáncer?
1928	Colombia	Ley 81 de 1928 da creación al Instituto Nacional de Radium (Monroy García y Cruz Montalvo, 2014, p. 99)
1934	Colombia	Se inaugura la sede del Instituto Nacional de Radium (Monroy García y Cruz Montalvo, 2014, p. 99)
1935	Colombia	Se realiza el primer tratamiento de rayos X profundos (Instituto Nacional de Cancerología, s.f.)
1951	Colombia	El Instituto Nacional de Radium se convierte en Instituto Nacional de Cancerología

Tabla 2. Fechas importantes en el desarrollo de la radioterapia en el mundo y en Colombia.  
Recopilación de Lars R., Monroy y Cruz, e Instituto Nacional de Cancerología.

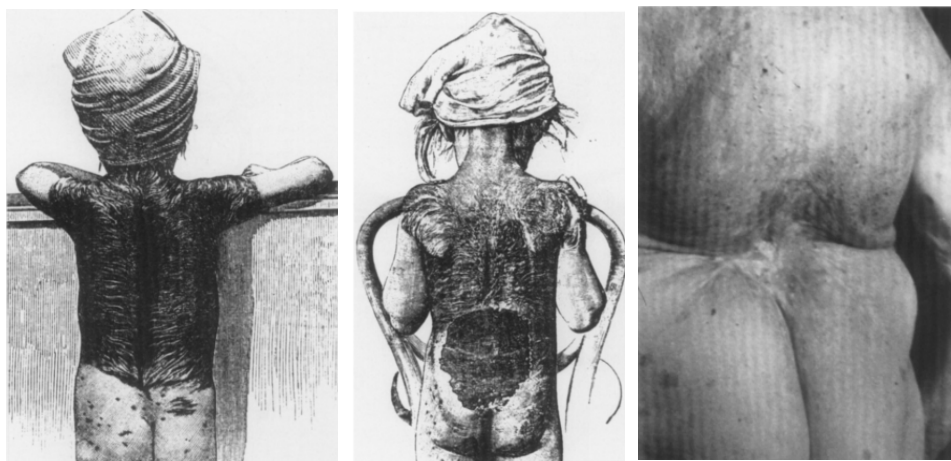


Figura 4. Paciente tratada por Leopold Freund con rayos x.  
Se observa de derecha a izquierda: antes del inicio de la irradiación, una semana después y el resultado final con la paciente a sus 75 años. Imágenes tomadas de desayunoconfotones.org citado de Kogelnik D. en 1997.

### CAPÍTULO III

#### FENÓMENOS IMPLÍCITOS DE LA FÍSICA EN LA RADIOTERAPIA

Si recordamos dos grandes problemas, ley de Dulong Petit y el efecto fotoeléctrico, no explicados por la física clásica es necesario recordar que para su correcta explicación fue necesario introducir la idea del cuanto de energía e introducir la constante de Planck  $\hbar$ . Esto provocó gran revuelo en la comunidad de los físicos porque esta hipótesis supondría entonces que la radiación electromagnética se distribuye de forma discontinua, a pesar de la búsqueda de una teoría distinta en la que no se recurriera a la cuantización.

Para explicar la forma en que los cuerpos emiten radiación, ninguna fue más aceptada que la hipótesis de Planck, aunque se presentaron múltiples ideas en contra por parte de los defensores de la física clásica. Es de gran importancia resaltar este salto en el desarrollo de la física ya que ello permitió grandes avances en la física médica, especialmente la relacionada con el uso de radiaciones ionizantes.

Ciertos experimentos a finales del siglo XIX, desarrollados por Heinrich Hertz, Joseph Thompson y Philip Lenard, mostraron que hacer incidir determinada luz con una característica longitud de onda y frecuencia sobre cierta superficie metálica provocaba la emisión de electrones desde la determinada placa metálica. A los electrones emitidos de esta forma se les conoce con el nombre de fotoelectrones y al fenómeno globalmente se le dio el nombre de “efecto fotoeléctrico” (López, A. 2017). La imposibilidad de explicar ese fenómeno por la física clásica produjo el planteamiento de nuevas teorías sobre el comportamiento de la materia y entre ellas se encontraba la hipótesis de Planck sobre la cuantización de la materia. El efecto fotoeléctrico y otros fenómenos, como la producción de rayos catódicos y rayos X, que ponían en duda las hipótesis

clásicas sobre la estructura de la materia son presentados a continuación de una manera más detallada.

### El efecto fotoeléctrico

Es de nuestro interés mencionar este fenómeno ya que es uno de los primeros que da cuenta, de forma cuantitativa y cualitativa, de la interacción existente entre la radiación con una determinada frecuencia y el estímulo generado a determinado material compuesto de átomos.

En la figura 5 la sección que se encuentra encerrada, de color gris claro, está sometida al vacío. Dentro de esta sección, hecha de vidrio de cuarzo, hay una placa metálica que es donde incide la luz, la terminal positiva. Hay dos detectores, uno de voltaje y otro de corriente, conectados en paralelo y en serie respectivamente. Cuando el experimento está en la oscuridad no se evidencia ninguna lectura en el amperímetro (A), sin embargo, cuando se somete a la acción de la luz con determinada longitud de onda, que depende de la estructura del metal usado, la lectura del amperímetro (A) marca una corriente por lo que podemos intuir que existe un flujo de cargas eléctricas entre las placas encerradas por el cuarzo. (Serway, R. A., & Jewett, J. W. J. 2015)

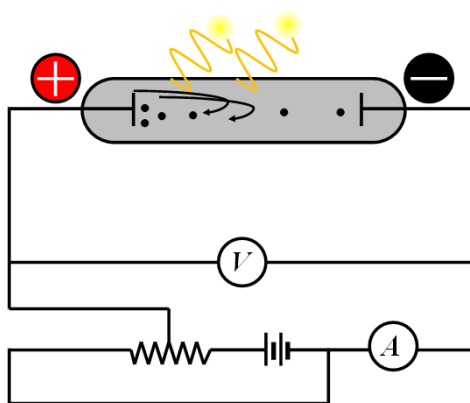


Figura 5. Efecto Fotoeléctrico  
Elaboración propia

La figura 6 es resultado de la realización de una gráfica con las lecturas obtenidas por los detectores cuando se incide luz con determinada intensidad, en ella se relacionan la corriente y la diferencia de potencial.

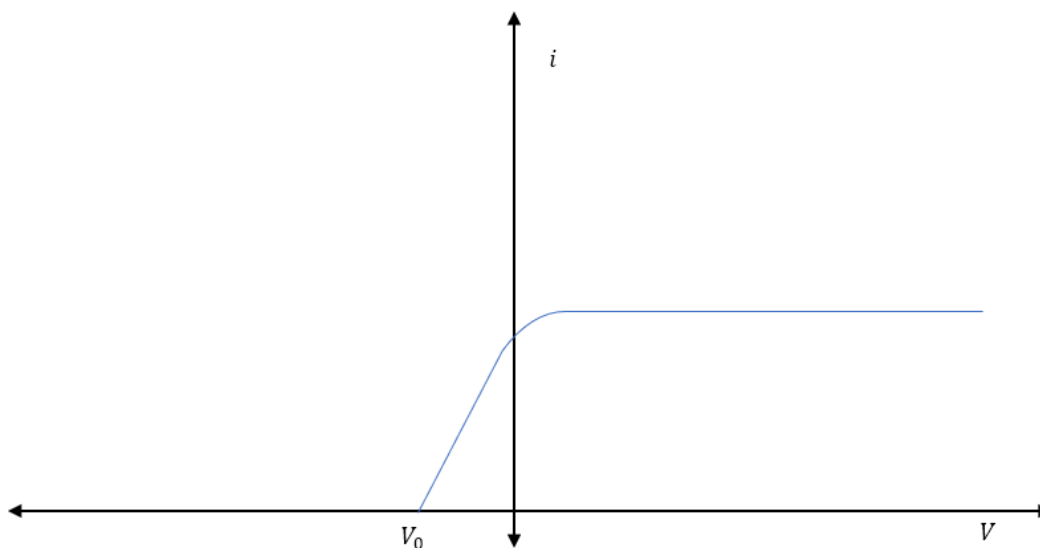


Figura 6. Intensidad vs Voltaje  
Elaboración propia

Se evidenció que al variar la diferencia de potencial con una intensidad lumínica constante variaban las lecturas de la corriente como sigue: a altas intensidades se obtienen mayores corrientes. Para valores muy grandes de diferencia de potencial se alcanza un valor máximo de corriente. Si se invierte el valor de la diferencia de potencial la corriente cae a valores muy bajos. En este caso solo ciertos electrones llegarán a la placa que antes era positiva y serán solo aquellos que superen en energía cinética el valor de la diferencia de potencial. Si la frecuencia no superaba el umbral de la energía cinética mínima, a pesar de que la intensidad fuera grande o pequeña, no se vería ningún efecto en el amperímetro. Sin embargo, cuando se supera la frecuencia umbral se produce corriente de forma inmediata sin importar que la intensidad sea pequeña o grande. Si se cambia la intensidad de la luz producida el fenómeno se puede describir exactamente igual que el anterior con una diferencia, la cual radica en que los valores de corriente máximos alcanzados

aumentan. En la figura 7 podemos observar que para tres intensidades distintas el valor máximo alcanzado es más alto si la intensidad es más alta, es decir  $I_1 < I_2 < I_3$ .

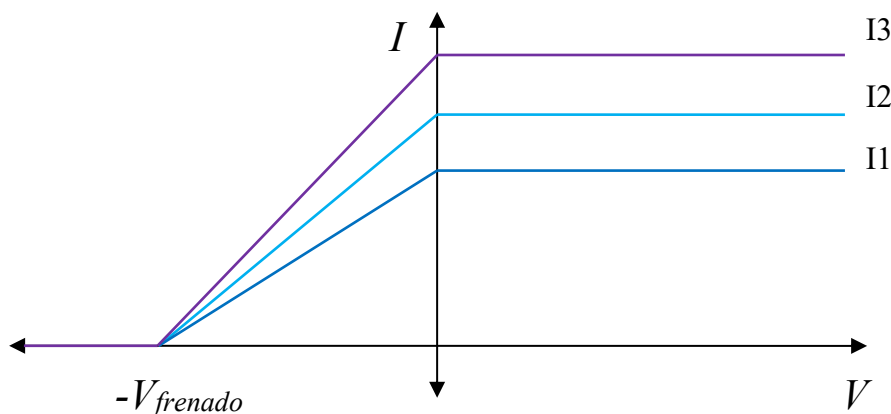


Figura 7. Intensidad vs voltaje para distintas corrientes.  
Elaboración propia

Einstein retomó la idea planteada por Max Planck en la que explicaba el fenómeno de radiación de cuerpo negro. En su trabajo mencionaba que la radiación no era emitida de forma continua si no que esta era emitida en cantidades discretas y su valor proporcional al de las ondas era descrito por la siguiente expresión:

$$E_{\text{cuanto}} = h\nu$$

Donde  $h$  es la constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia.

Con esta suposición tomada por Einstein y teniendo en cuenta que para cada material hay una función de trabajo determinada, es más sencillo describir el efecto fotoeléctrico mencionado. Así entonces se podía decir que, si la energía del fotón es la necesaria para que se pueda absorber por el electrón, esa energía será la utilizada para que el electrón pueda salir del *potencial* en el que

se encuentra inmerso dentro del material, el resto de energía será utilizada en forma de energía cinética para moverse por medio del espacio vacío (Einstein, 1905).<sup>2</sup>

### **Ecuación de Schrödinger**

Para explicar el proceso de radioterapia en su etapa física es importante hablar de Erwin Schrödinger y sus aportes a la teoría de la mecánica cuántica. Para diciembre del año 1926 E. Schrödinger publicó un artículo en la revista “Physical Review” bajo el nombre de *An Undulatory Theory Of The Mechanics Of Atoms And Molecules*. En este trabajo mencionó importantes aspectos de la naturaleza ondulatoria de la materia (protón y electrón) ya investigados por Broglie en la conocida relación  $\lambda = \frac{h}{p}$ . Donde  $\lambda$  es la longitud de onda asociada a la partícula con masa determinada,  $h$  es la constante de Planck y  $p = mv$  la cantidad de movimiento de la partícula con masa  $m$  y velocidad  $v$ .

En esta investigación realizamos un análisis usando el principio de mínima acción de Hamilton que lleva precisamente a describir las trayectorias de mínima acción de determinada partícula sometida a un potencial. A partir de este análisis se llega a la ecuación de Schrödinger<sup>3</sup>.

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + v(x)$$

La ecuación de Schrödinger permite analizar cómo evoluciona la función de onda asociada a determinada partícula microscópica ya sea electrón, protón o núcleo atómico. Es importante

---

<sup>2</sup> Para una explicación más detallada véase el Anexo 1.1.

<sup>3</sup> Para ver la demostración realizada de la ecuación de Schrödinger véase el Anexo 1.2.

analizar este fenómeno ya que esta es la base física que permite analizar cuáles son los estados estables a los cuales se encuentran ligados los átomos.

### **Energía del punto cero**

La energía del punto cero, concepto propuesto por Einstein, es la energía más baja que puede tener un sistema cuántico y es de vital importancia ya que nuestro sentido común podría indicarnos que el valor más bajo de energía puede ser cero. Sin embargo no es así, puesto que la energía más baja incluso en el vacío total tiene determinado valor. Para calcularlo se emplean diversos métodos matemáticos. En la sección anterior se habló sobre la ecuación de Schrödinger y sus implicaciones. Al analizar el oscilador armónico cuántico simple con la ecuación de Schrödinger, que no es más que analizar los estados estacionarios de una función de onda asociada sumida en un potencial de forma cuadrática, encontramos que la solución es equivalente a encontrar la energía  $E$  de la siguiente ecuación:

$$H\psi = E\psi$$

Donde  $H$  es el operador Hamiltoniano y  $\psi$  la función de onda asociada a determinada partícula. Al resolver la ecuación encontramos que los valores de energía metaestables son descritos por la siguiente ecuación:

$$E = (n + \frac{1}{2})\hbar\omega$$

Al reemplazar los distintos valores para  $n$  iguales a 0, 1, 2, 3, 4, 5... encontramos que los valores asociados a la energía son  $E = \frac{\hbar\omega}{2}, 3\frac{\hbar\omega}{2}, 5\frac{\hbar\omega}{2}, 7\frac{\hbar\omega}{2} \dots$  lo que nos indica que en el valor para el nivel  $n=0$ , el valor más bajo, la energía no es cero. Encontrar este valor y la ecuación de los

estados metaestables asociados al *átomo de hidrógeno* es de vital importancia ya que nos dice cuál es la energía que se debe adicionar o que debe perder el átomo en caso de que se quiera desestabilizar la estructura fundamental de la materia como en el proceso realizado en la radioterapia, ya que las células cancerosas son más susceptibles a una alteración en la estructura del ADN porque tienen una tasa de división más alta.

Hay otros tipos de operadores para encontrar las cantidades medibles asociadas a un sistema cuántico además del operador energía. Existen distintos operadores referentes a la posición, el momento, la energía y el tiempo de los cuales podemos detallar que las mediciones que se realizan en un espacio cuántico tienen un límite de exactitud, debido a determinada regla matemática que se cumple en el espacio de Hilbert, donde se aplican estos operadores. La regla nos indica que operadores como el de la posición y el momento  $[\hat{X}, \hat{P}]$  respectivamente no conmutan. Esto significa que no forman un conjunto de funciones propias comunes y sus observables no son compatibles o lo que es igual no forman un conjunto completo de observables compatibles. Recordando que los observables son toda medición del sistema físico en cuestión, el que no conmuten las mediciones de posición y *momentum* nos indica que no se puede medir simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento de una partícula. Lo cual es expresado por el principio de incertidumbre de Heisenberg:

$$\sigma(X)\sigma(P) \geq \frac{1}{2} | \langle [\hat{X}, \hat{P}] \rangle | \geq \frac{\hbar}{2}$$

Esto nos indica que no podemos realizar mediciones con una exactitud superior a  $\frac{\hbar}{2}$ .

## Tiempo de vida de los estados excitados

Para hablar sobre los estados excitados podemos hacer referencia a cualquier estado que tenga mayor energía que un estado en el mínimo absoluto. Los átomos, moléculas, electrones, cualquier partícula que se encuentre en un estado excitado no se encuentra estable por lo que tiende a perder energía y cuando esto sucede "decae espontáneamente" y se muda hacia  $n$  estados con menos energía. En principio la partícula se mudará a estados con proporciones menores de energía hasta que llegue al estado de mínima energía, el estado fundamental. El tiempo que permanecen dichas partículas en un estado con energía mayor a la fundamental suele variar y es más corto dependiendo de ciertos factores, puede partir desde los nanosegundos hasta billones de años dependiendo del elemento químico. Cuando se realiza esta transición de un estado con mayor energía a uno proporcionalmente menor se emite un fotón con energía proporcional a la que pierde la partícula al realizar la transición mencionada (Hehre, W. 2003).

Generalmente este proceso de retorno es llamado *decaimiento*. Algunas de las fuentes mencionan que es una imprecisión llamarlo de esta forma, la traducción exacta del inglés sería *relajarse espontáneamente a un estado con menor energía*. Una partícula puede alcanzar un nivel con mayor energía que el estado fundamental de distintas formas ya sea porque se le incide luz o porque se somete a colisiones con otros átomos; así alcanza un nivel con energía  $E_i$  sobre el nivel fundamental y puede retornar a un estado más bajo con energía  $E_j$  emitiendo un fotón con energía:

$$h\nu = E_i - E_0$$

Cuando se alcanza esta energía, en un nivel excitado, el átomo puede decaer a niveles más bajos ya sea por un proceso llamado emisión espontánea, también llamado fluorescencia porque se emite luz durante el proceso, o por colisión inducida al hacerlo interactuar con un gas de átomos

con menor energía. El proceso en el que un electrón absorbe un fotón y cambia su nivel de energía  $E_0$  a un estado  $E_i$  es mostrado en la figura 8.

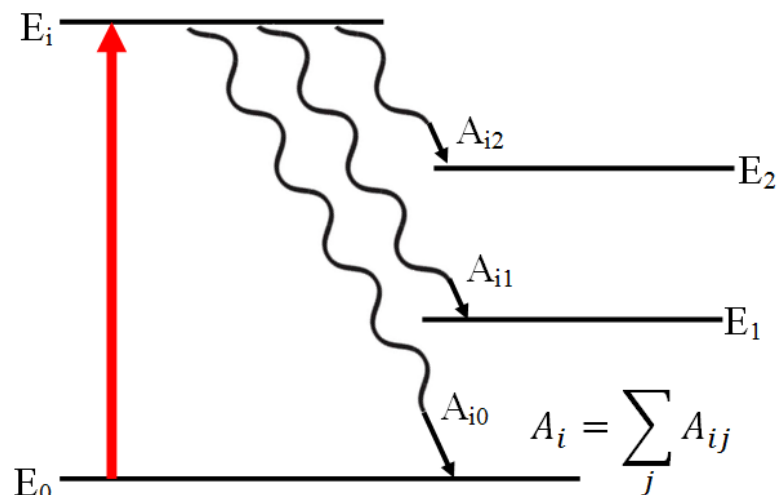


Figura 8. Emisión espontánea. Elaboración propia.

Cuando se tienen átomos interactuando en determinado espacio con un campo de radiación electromagnética y densidad de energía espectral determinada, la probabilidad de que un electrón con energía  $E_0$  absorba un fotón con energía  $h\nu$  y pase a un nivel  $E_i$  aumenta y el resultado es el observado en la figura 9, el electrón pasa de un estado  $E_0$  a un estado  $E_i$ , la línea roja nos indica la transición realizada. Ya que este es un fenómeno cuántico está asociado con determinada probabilidad de que suceda el evento, es decir que no sucederá un 100% de las veces que se realice la práctica en un laboratorio, allí es donde evidenciamos nuevamente la naturaleza estocástica del fenómeno.

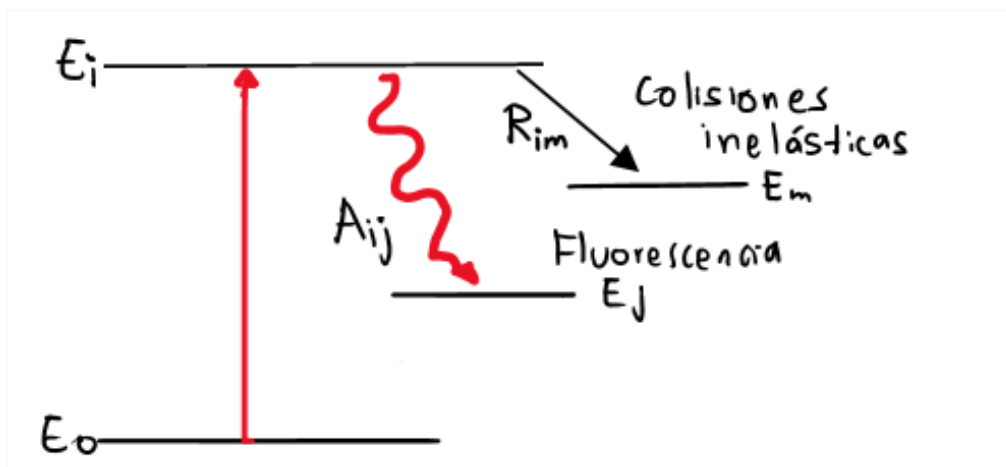


Figura 9. Colisiones inelásticas contribuyen a la despoblación de  $E_i$   
Elaboración propia

Realizamos una investigación más detallada de este fenómeno desde dicha perspectiva, pero requiere de un análisis mucho más profundo (ver anexo 1.3) en el que intervienen variables estadísticas, matrices de transición y distintos coeficientes que nos hablan sobre la naturaleza estocástica del fenómeno.

El tiempo que puede estar un electrón en un estado excitado es descrito por la siguiente ecuación:

$$N_i(t) = N_i(0)e^{-A_i t}$$

Donde  $N_i(t)$  es la cantidad de átomos que hay después de un tiempo  $t$ ,  $N_i(0)$  la cantidad de átomos que habían inicialmente,  $A_i$  es la constante de decaimiento<sup>4</sup> y  $t$  es el tiempo.

Al observar la forma de la ecuación anterior vemos que la forma en que se despobló el estado  $E_i$  es de manera exponencial negativa como vemos en la figura 10. La población del estado excitado  $E_i$  decrece exponencialmente desde su valor inicial  $N_i(0)$  en el tiempo cero a  $N_i(t) \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ .

<sup>4</sup> Es la probabilidad de decaimiento por núcleo por segundo, el proceso de decaimiento radiactivo es un proceso promediado sobre una gran cantidad de átomos (véase anexo 1.3)

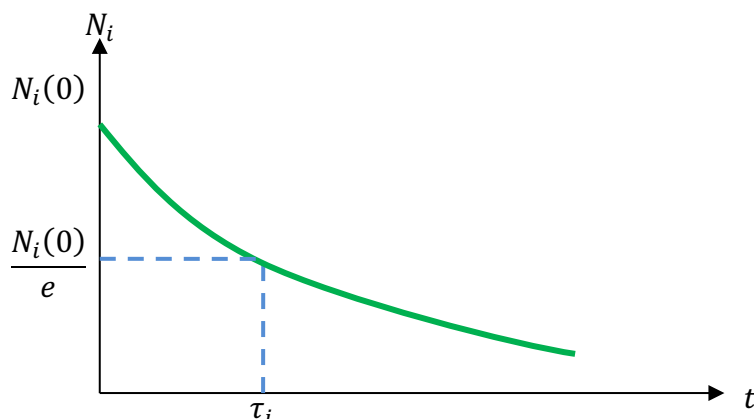


Figura 10. Curva de decaimiento de la población  $N_i$  de un estado excitado  $E_i$  con un tiempo de vida  $\tau_i$ . La constante  $\frac{1}{A_i} = \tau_i$  es el tiempo de vida media del estado  $E_i$ .  $e$  es épsilon

Lo mostrado anteriormente es el tiempo de vida de átomos, con pocos electrones, en estados excitados. Los átomos se pueden interpretar como resonadores armónicos y las frecuencias a las que oscilan se muestran en la figura 11(a), la energía necesaria para pasar de un nivel a otro es  $h\nu$ , los niveles de energía son equidistantes para el oscilador armónico, en el que el potencial en el que está inmerso la partícula es constante y descrito por la función cuadrática. Sin embargo, este es un caso ideal. Para una molécula la energía de transición entre niveles es distinta como se puede observar en la Figura 11(b), ya que el potencial al que se encuentra no es perfectamente descrito

por un potencial cuadrático. Después del cuarto nivel los niveles de energía de una molécula se parecen más a un oscilador forzado pero la distancia entre niveles de energía no es igual.

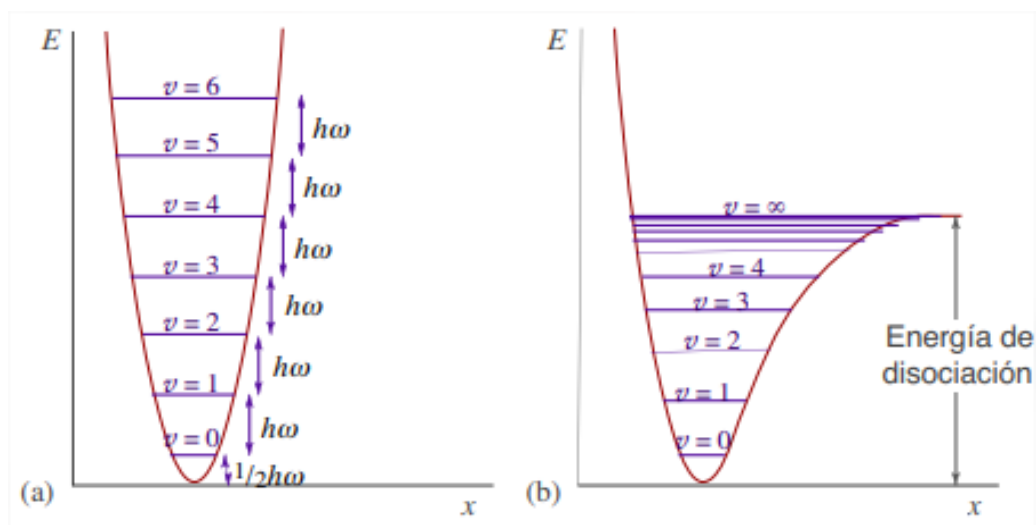


Figura 11. Figura energía oscilador armónico (a) y energía de una molécula que no se considera armónica (b).

Tomado de: <http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/QI.htm>

Podríamos continuar con el estudio de los niveles de energía para las distintas moléculas, realizar un modelo comparando los estados excitados de un átomo con los estados excitados moleculares además analizar cuáles son sus tiempos de vida efectiva pero abarcaría un análisis más profundo de la física molecular y las distintas teorías aplicadas a estos estudios están más allá del alcance y objetivos de este trabajo, para efectos de practicidad se realiza en términos más generales el análisis de las etapas sucesoras de la interacción de la radiación con el tejido vivo.

## CAPÍTULO IV

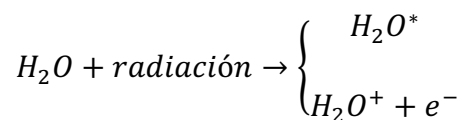
### RADIACIÓN EN LA MATERIA HUMANA

Todo lo que habita el planeta es constantemente bombardeado por radiación que viene desde el espacio, mucha de esta radiación es desviada permitiendo que la vida sea posible (Nasa, 2018). La radiación es medida por unidades de energía sobre unidades de masa, los nombres son dados en reconocimiento a algunos científicos como Louis Harold Gray y Rolf Maximilian Sievert. Las unidades Gray (Gy) y Sievert (Sv), comparten la misma relación de ser J/Kg, indicando la radiación ionizante absorbida por un material y la radiación ionizante con una corrección por el daño biológico generado respectivamente.

En este capítulo se expondrán algunos fenómenos que suceden después de la interacción radiación-átomos y moléculas, dado que en este proceso suceden múltiples subprocesos se organizarán en diferentes etapas siendo: física, fisicoquímica, química y biológica; la mejor manera de clasificarlas por el orden en el cual se llevan a cabo (Broset Serreta, 2016, p. 90).

#### **Etapas Físicas**

La primera etapa del proceso se da desde la interacción de la radiación hasta los  $10^{-18}$ s posterior a esta, es donde se presentan las reacciones de iniciación definida como la formación de radicales libres a partir de no radicales.

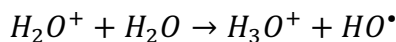


En esta radiolisis<sup>5</sup> del agua se forman dos posibles moléculas de agua,  $H_2O^*$  es una molécula de agua excitada y  $H_2O^+$  es agua ionizada.

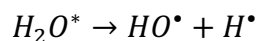
---

<sup>5</sup> Descomposición molecular del agua que produce radicales libres.

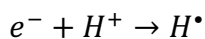
## Etapa Fisicoquímica



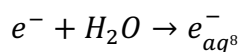
La molécula de agua ionizada en presencia de una molécula de agua forma un ion oxonio o hidronio (con coeficiente de difusión <sup>6</sup>de  $8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  y radio de reactividad<sup>7</sup> de  $0,3 \times 10^{-8} \text{ m}$  (Tuner, 2008)), la molécula  $HO^\bullet$  es altamente oxidante (coeficiente de difusión de  $2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  y radio de reactividad de  $2,4 \times 10^{-8} \text{ m}$ )



Donde la molécula de agua excitada se disocia en  $HO^\bullet$  y  $H^\bullet$ , este último es altamente reductor (coeficiente de difusión de  $8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$  y radio de reactividad de  $0,4 \times 10^{-8} \text{ m}$ ).



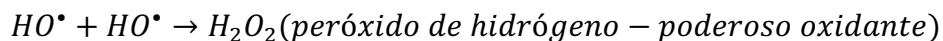
El hidrogenión captura el electrón y se convierte en un reductor.



El electrón se moverá en un medio acuoso aumentando su radio de reactividad a  $2,1 \times 10^{-8} \text{ m}$  y con coeficiente de difusión de  $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$

## Etapa Química

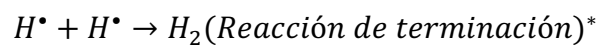
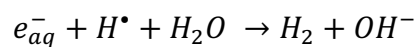
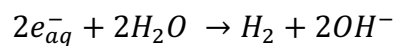
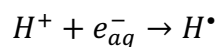
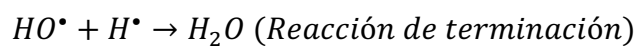
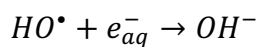
En este proceso suceden una cascada de reacciones las cuales tendrán un tiempo de acción hasta los  $10^{-6}$  segundos después del inicio de la interacción, algunas de las cuales son:



<sup>6</sup>El coeficiente de difusión indica el grado de distribución de un determinado soluto disuelto en el solvente.

<sup>7</sup>Radio en el cual el átomo o molécula tiene un campo de acción o reacción aproximado.

<sup>8</sup>  $e_{aq}^-$  significa electrón acuoso.



La reacción de terminación es cuando se parte de dos radicales libres y se forma un producto estable.

En la figura 12, podemos observar el proceso de radiólisis del agua, el cual inicia en la etapa física y tiene una culminación en la etapa química, pero sus efectos pueden observarse también en la etapa biológica.

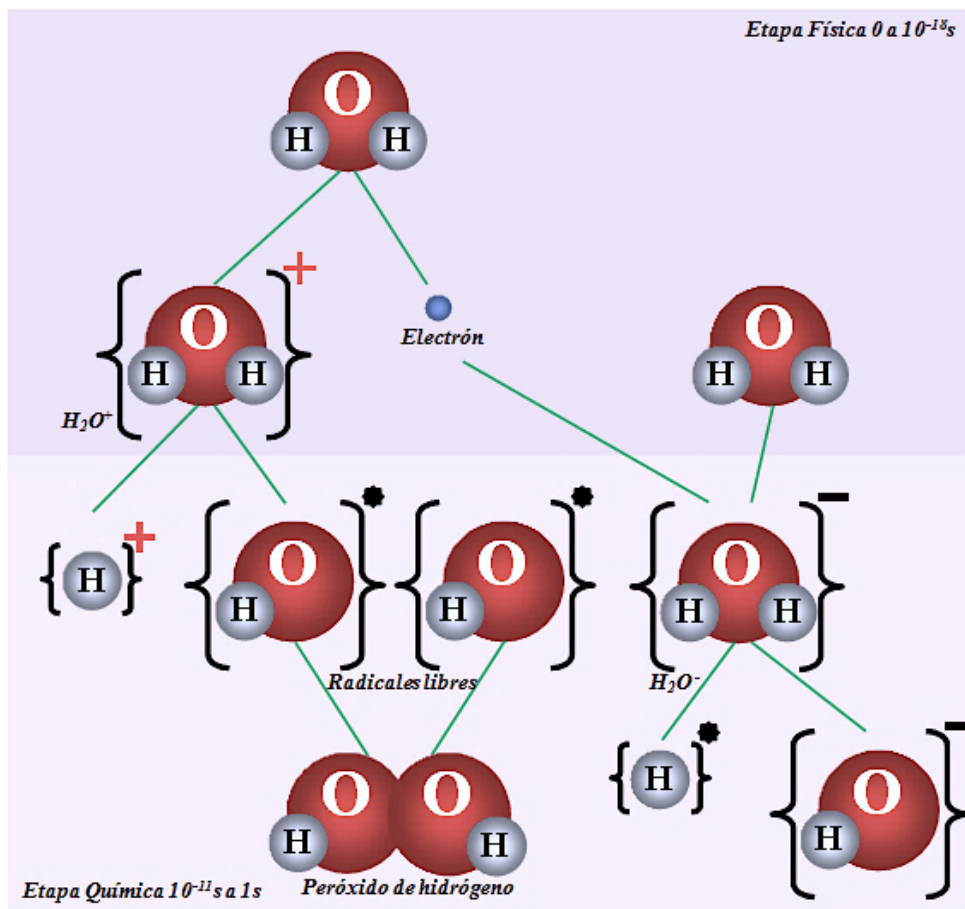


Figura 12. Radiólisis del Agua.  
Elaboración propia.

### Etapa Biológica

Se observan entonces que los daños al material biológico pueden ser producidos de una manera directa e indirecta. Cuando la radiación daña la cadena de ADN (Directa) se produce una senescencia celular o la apoptosis. En la senescencia celular se observa una reducción en la vida media de la célula; asimismo, estas células se detienen en su replicación. Durante la apoptosis la célula entra en una muerte celular programada. (Austin, s.f.). Este proceso inicia por el daño hecho en la estructura (consúltase Anexo 2). A continuación, se nombran algunos tipos de daños al ADN con su afectación a células por radiolesiones (Tabla 3).

<b>Tipo de daño</b>	<b>Células afectadas por Gy</b>
<b>Rotura de puentes de hidrogeno</b>	N/E
<b>Dímeros de bases</b>	N/E
<b>Unión Cruzada ADN -ADN</b>	0,5
<b>Rotura de la doble hebra o cadena</b>	30 - 40
<b>Unión Cruzada ADN-Proteína</b>	150
<b>Perdida o daño en bases</b>	500
<b>Rotura de la hebra o cadena sencilla</b>	1000
<b>Cambio de bases</b>	1000

Tabla 3. Frecuencia de daño causado por un Gy  
 Información recopilada de Consejo de seguridad nuclear (CSN) y Fundación para la Formación e Investigación Sanitarias.

Los daños indirectos son producidos cuando la radiación afecta moléculas presentes en la célula, se estima que cerca de 35% de la energía produce daños directos y el 65% restante produce daños indirectos (Brosed Serreta, 2016, p. 89). En el proceso de interacción de la radiación ionizante con el tejido vivo ocurren diferentes procesos, la radiación y su energía en presencia de los átomos es capaz de desprender los electrones de este. Por esto uno de los efectos principales es la radiólisis del agua (figura 12) produciendo a su vez radicales libres, que se definen como “molécula inestable que se elabora durante el metabolismo normal de las células (cambios químicos que ocurren en una célula). Los radicales libres se pueden acumular en las células y dañar otras moléculas, como el ADN, los lípidos y las proteínas...” (Instituto Nacional del Cáncer - USA, s.f.). Estos radicales libres tienen también la capacidad de producir modificaciones en el ADN desencadenando la aparición de crecimientos anormales de células.

### Estimación de las ionizaciones por núcleo celular

Si estimamos el núcleo de una célula humana promedio de  $5\mu\text{m}$  (Rojas Marcela y Milán Rebeca, 2016, p. 46), con una densidad de  $1\text{g}/\text{cm}^3$ , tendrá un volumen de  $65.45\mu\text{m}^3$ , si convertimos a  $\text{cm}^3$  tendríamos un volumen de  $65,45 \times 10^{-12}\text{cm}^3$  y un peso  $65,45 \times 10^{-15}\text{kg}$ . Si usamos  $1\text{Gy}$  que equivale a  $1\text{J}/\text{Kg}$  tendríamos una dosis de  $65,45 \times 10^{-15}\text{J}$  por cada núcleo; además, “se consumen  $25\text{eV}$  en cada ionización y que aproximadamente solo la mitad de la energía se invierte en ionizaciones, pues la otra mitad se invertirá en excitaciones” (Brosed Serreta, 2016, p. 89). Calculando estos valores obtenemos:

$$65,45 \times 10^{-15}\text{J} = 408538,9\text{eV}$$

$$\text{Energía invertida en ionizaciones} = 204269,45\text{eV por cada núcleo}$$

$$\frac{204269,45\text{eV}}{25\text{eV}} = 8171\text{ ionizaciones por núcleo}$$

Las medidas de radio protección están reglamentadas por la Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), debido a que entre sus pilares se encuentra “promocionar los más altos estándares de seguridad en la energía nuclear y protección radiológica” (Ministerio de asuntos exteriores, Gobierno de España, s.f.). Estas regulaciones buscan disminuir cualquier exposición fuera de los valores seguros (Tabla 4). En el país la reglamentación es dada por el ministerio de minas y energía para el uso de materiales radiactivos. En la siguiente tabla se muestran una serie de eventos (derecha) y la cantidad de milisieverts detectados (izquierda).

Radiación (mSv)	Evento
0,01	Radiografía dental.
0,1	Radiografía de pecho
0,4	Mamografía
2	Radiación que recibimos anualmente de forma natural.
9	Exposición que una tripulación del vuelo Nueva York-Tokio recibe en un año.
10	Tomografía axial computarizada de todo el cuerpo
100	Límite de radiación recomendado cada cinco años para los trabajadores.
1000	Puede causar vómitos, mareos, náuseas, pero no la muerte.
5000	Podría matar al 50% de las personas que se vean expuestas.
6000	Radiación recibida por los trabajadores de Chernóbil que murieron en un mes.
10000	El 100% de las personas que recibe esta dosis de radiación muere en semanas.

Tabla 4. Niveles de radiación de exposición en humanos.  
Información adaptada de cooperativa.cl

Las afectaciones producto de las radiaciones ionizantes en dosis bajas no producen afectaciones en corto plazo, los efectos se clasifican entonces en cuatro categorías:

- **Estocásticos:** “los efectos estocásticos se pueden presentar tanto en el individuo expuesto (efectos estocásticos somáticos, como sería en caso de la carcinogénesis), como también en la descendencia (efectos estocásticos hereditarios)” Fundación para la Formación e Investigación Sanitarias, s.f.
- **Determinísticos:** “los efectos deterministas se producen por la muerte de un número elevado de células de un tejido u órgano: la gravedad del efecto aumenta con la dosis de radiación”. (Real, G., s.f.).
- **Inmediatos:** los efectos se evidencian en un corto periodo de tiempo desde la exposición.
- **Tardíos:** estos pueden observarse después de varios años posteriores a la exposición.

En la tabla 5 se observan algunos daños en tejidos, con sus correspondientes umbrales y periodos de latencia.

Tejido	Efecto	Periodo de latencia aproximado	Umbral aproximado (Gy)	Dosis efectos severos (Gy)	Causa
<b>Sistema hematopoyético</b>	Infecciones hemorragias	2 semanas	0,5	2,0	Leucopenia Plaquetopenia
<b>Sistema inmune</b>	Inmunosupresión Infección sistémica	Algunas horas	0,1	1,0	Linfopenia
<b>Sistema gastrointestinal</b>	Deshidratación Desnutrición	1 semana	2,0	5,0	Lesión del apelio intestinal
<b>Piel</b>	Escamación	3 semanas	3,0	10,0	Daño en la capa basal
<b>Testículo</b>	Esterilidad	2 meses	0,2	3,0	Aspermia celular
<b>Ovario</b>	Esterilidad	< 1 mes	0,5	3,0	Muerte interfásica del oocito
<b>Pulmón</b>	Neumonía	3 meses	8,0	10,0	Fallos en la barrera alveolar
<b>Cristalino</b>	Cataratas	> 1 año	0,2	5,0	Fallos en la maduración
<b>Tiroides</b>	Deficiencias metabólicas	< 1 año	5,0	10,0	Hipotiroidismo
<b>Sistema nervioso central</b>	Encefalopatías y Mielopatías	Muy variable según dosis	15,0	30,0	Demielinización y daño vascular

Tabla 5. Umbrales ante daños tisulares  
Información tomada de Real G., s.f.

En conclusión, podemos observar el proceso de radioterapia como una cadena de sucesos con un orden establecido (figura 13). Estos sucesos tienen elementos y conceptos pertenecientes a otras disciplinas, es necesario entonces plantear una explicación que aborde de una manera interdisciplinar la explicación de la radioterapia con el fin de ser más objetivos y precisos con la información suministrada.

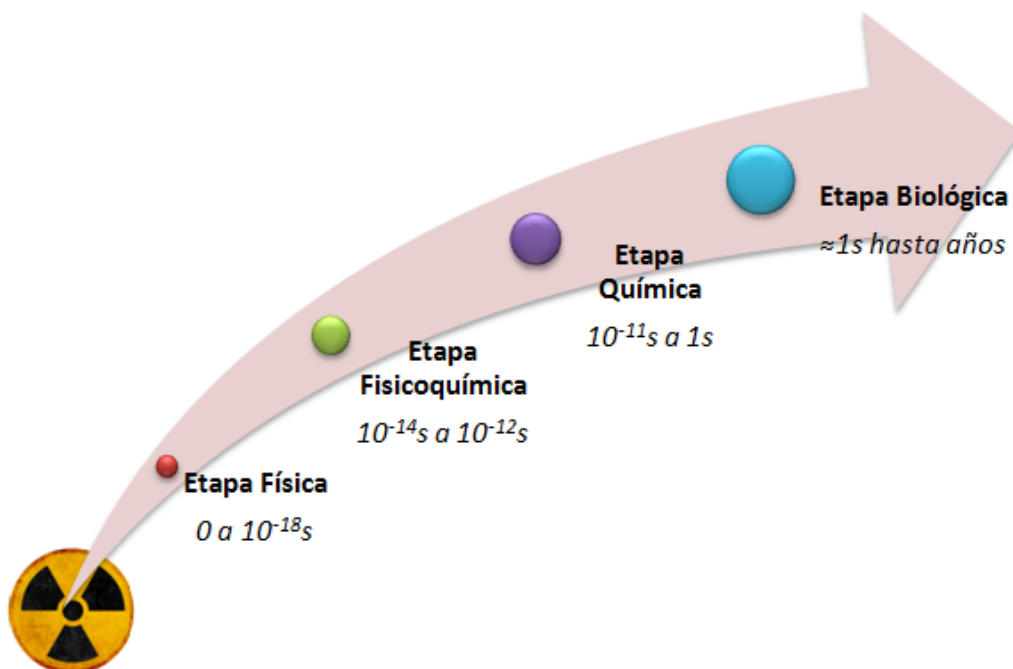


Figura 13. Tiempo de duración de las etapas post interacción radiación átomo. Se observa la continuidad de las etapas con sus diferentes duraciones. Elaboración propia

El orden de las etapas será importante en el desarrollo de la actividad como parámetro que rige la continuidad del proceso; asimismo, permite comprender los otros temas que deben ser también explicados (el átomo, reacciones químicas, la célula, la reproducción celular, el ADN, etc.), dado que estos temas son componentes también esenciales para poder desarrollar una explicación más completa dado el carácter interdisciplinar en el cual se ve inmerso el presente trabajo.

## CAPITULO V

### LA ENSEÑANZA DE LA RADIOTERAPIA

La radioterapia como proceso en el cual se convergen múltiples disciplinas implica la enseñanza desde otras especialidades de la ciencia diferentes a la física. Para un correcto desarrollo de los objetivos planteados en este trabajo se realizaron una serie de videos mediante los cuales se desarrollara de una manera amena, sencilla y precisa la explicación de dicho fenómeno. Estos se desarrollaron basados en las etapas que se suceden al exponer un tejido vivo a la radiación ionizante. Los videos se alojaron en una página diseñada y creada por nosotros a través de Wix.com con el fin de mantener un ambiente agradable y accesible para las personas que deseen consultar el material diseñado.



Figura 14. Logotipo de [Aprende123](#), creado con el fin de generar una identidad a la página y a los videos contenidos en la página.

Con el logo creado (figura 14) y el proveedor de servicio (Wix.com) se desarrolló una página con un menú en el cual cualquier visitante podrá ver la descripción de los videos, así como cualquier material adicional que se desee integrar al espacio según se vaya considerando necesario hacerlo. Asimismo, se implementaron mecanismos para la interacción de visitantes mediante la

opción “¡Vamos a chatear!”, mediante la cual se reciben comentarios, sugerencias y recomendaciones, esto con el fin de un constante crecimiento y mejoramiento del material contenido en la página (Figura 15).

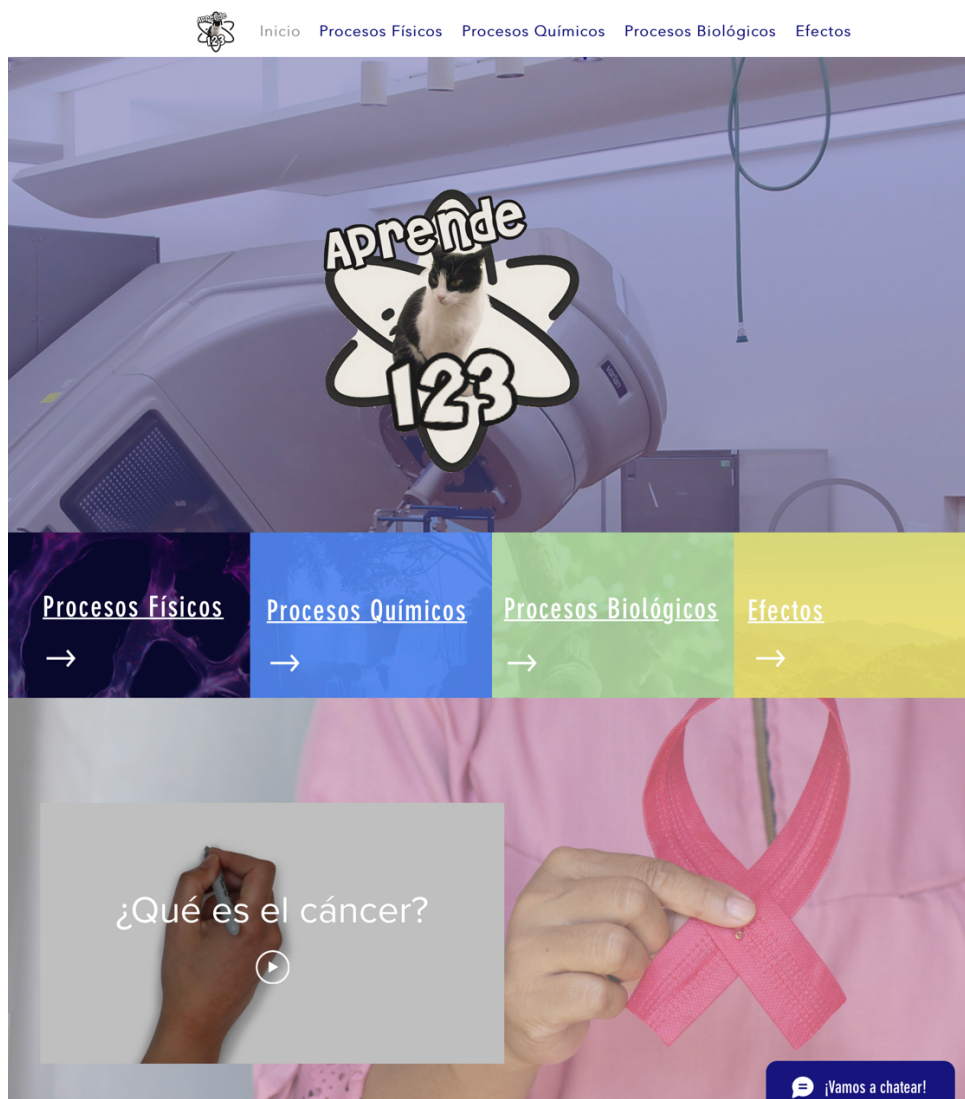


Figura 15. Página [Aprende123](#), se puede observar en el centro el orden secuencial en el cual se desarrolla la explicación de la radioterapia.

## Diseño del material audiovisual

Para el desarrollo de los videos se crearon una serie de guiones técnicos (Anexo 3 y figura 16). Los guiones técnicos son herramientas que permiten realizar videos, series y películas en las cuales se narran historias a través de imágenes. Los videos creados tienen una estructura narrativa-explicativa con el fin de contener la mayor información posible para la correcta y amena explicación de la cuestión a tratar. Con este material terminado se procedió a la grabación de los audios con micrófono semiprofesional (Blue Yeti) y edición de audios en programa Audacity®; la edición de imágenes de distribución libre se hizo mediante los programas Procreate® y GIMP con el fin de adaptarlos al entorno empleado en la página y en los videos; la edición de video se realizó con el programa VideoScribe y VN, con estos programas se buscó alcanzar una alta calidad en el material creado, para así brindar confianza y una mejor atención en el visitante del sitio.

Guion técnico: ¿Qué es el cáncer?

Duración: 2:12.00

Tiempo Inicio	Tiempo final	Audio	Cita Audio	Imagen	Animación
0:00.00	0:10.00	Aprende 123	NI	Logo	Aparición
0:10.30	0:12.33	¿Qué es el cáncer?	NI	Texto titulo	Escritura
0:12.83	0:21.41	Es un crecimiento sin control de algún tipo de célula del cuerpo, generando abultamientos, enrojecimiento y dolor.	NI	Varias células	Dibujo
0:21.71	0:27.63	El abultamiento de un tipo de células se le conoce comúnmente como tumores	NI	"Tumor"	Escritura
0:27.93	0:33.54	Estos crecimientos también pueden invadir tejidos cercanos al sitio de origen	NI	Flecha	Dibujo

Figura 16. Guiones técnicos videos de [Aprende123](#), se observan las principales características de un guion técnico adaptado a las necesidades del trabajo realizado

## Temario y organización

Al desarrollar el presente trabajo de grado nos encontramos un temario multidisciplinar, es en ese momento en el cual se plantea una organización según su tema, área o su disciplina. Por ejemplo, en el primer video titulado “¿Qué es el cáncer?” se desarrolla la definición de esta patología, una breve historia y algunas cifras que permiten introducir al visitante al temario a tratar.

El segundo video recomendado es “¿Cómo funciona la radioterapia?”, allí se muestran los dos tipos de radioterapia comunes (de haz externo e interno), una breve explicación del tratamiento, así como información general. En este video se emplearon fuentes de información como Instituto Nacional del Cáncer de los Institutos Nacionales de la Salud de EE. UU. y el Ministerio de Salud de Colombia, con sus correspondientes citas en video y referencias en la descripción.

Debido a la cantidad de los videos y su poca practicidad al desarrollarlos en la misma ventana, se propuso agruparlos en *procesos físicos*, *procesos químicos* y *procesos biológicos* (figura 17). En cada apartado se incluyeron diferentes elementos que permiten desarrollar un contenido lo más completo posible, manteniendo siempre la idea de proyectar una imagen profesional sin dejar la idea de mantener el material lo más simple y preciso.



Figura 17. Botones y menú de acceso a los diferentes apartados en [aprende123](http://aprende123)

En *procesos físicos* se exponen temas como radioactividad, decaimiento gamma y decaimiento beta, además, se incluye la historia de Wilhelm Röntgen, Henri Becquerel y Marie Curie, estas historias tiene la finalidad de atraer más al visitante a continuar observando los videos. En *Procesos Químicos* se presentan los videos del átomo, la radiólisis y radicales libres, con el fin de mostrar los procesos los cuales se presentan en un proceso de radioterapia. En *Procesos Biológicos* se presentan una cantidad considerable de videos comparadas con las otras etapas, puesto que es la etapa con mayor duración y la cual permite ver los efectos de una manera más directa. En esta etapa se presentan los videos de la célula, el ADN, la reproducción celular, la muerte celular, afectación de las células por radiación. Los efectos adversos de la radioterapia se presentan en el último apartado “Efectos”, así como también los principales cuidados a los que los pacientes deben someterse durante el proceso.

La importancia de los medios audiovisuales en la sociedad actual es claramente innegable, con una conectividad en los hogares de Colombia cercanos al 35% (ITU, p. 218, 2015), las páginas de internet y los videos son cada vez más accesibles a los hogares, también con la constante creciente en el uso de redes sociales como Instagram, Facebook y Tiktok en las cuales las personas comparten videos de corta duración. Lo anterior permite entender las dinámicas que tiene la sociedad actual en cuanto al consumo de contenidos rápidos, simples y amenos. Considerando eso es que se entiende la pertinencia del material audiovisual realizado dado que es uno de los medios con mayor alcance e impacto en la sociedad actual.

## CONCLUSIONES

Las revisiones que realizamos de los textos de física básica realizan una somera interpretación de fenómenos claves como el tiempo de vida de estados excitados con una interpretación clásica. Como se mostró en el trabajo este es un proceso que implica consideraciones tales como entender que el proceso depende de la probabilidad de transición entre niveles de energía. Idealmente se trabaja con interacciones atómicas que son estables, pero en aplicaciones reales para moléculas y macromoléculas se deben tener en cuenta otras consideraciones como por ejemplo los grados de libertad de traslación, rotación, vibración y perturbaciones por lo que la separación entre niveles de energía no es equidistante como se trabaja idealmente.

Trabajos realizados con temas con componentes de varias disciplinas proponen un reto en el docente, dado que los fenómenos que se consideran de una sola de las disciplinas en algunos casos pueden no dar una visión total del proceso a explicar. Es allí cuando el licenciado en cualquier disciplina deberá capacitarse no con el único objetivo de aprender para sí mismo, sino con el fin de poder satisfacer las necesidades y demandas que tanto como alumnos o público al cual se dirige tienen.

Se tiene que visibilizar a la población hospitalaria o que sufre alguna enfermedad para que sea acompañada en su proceso de tratamiento con información actualizada, veraz y acorde a sus necesidades. Dado que algunas de estos individuos no tienen la formación académica regular se deben plantear nuevos espacios en los que las universidades brinden acompañamiento en la formación de médicos y demás personal para desarrollar un correcto acompañamiento a los pacientes.

## REFERENCIAS

- Austin, C. (s.f.). Apoptosis. Recuperado de <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Apoptosis>
- Becquerel, H., (1887). Recherches sur les variations des spectres d'absorption dans les cristaux
- Becquerel, H., (1888). Recherches sur l'absorption de la lumière
- Brosed, A. (2016). Fundamentos de Física Médica, Volumen 8 Radiobiología y principios de Oncología. Sociedad Española de Física Médica. ADI Servicios Editoriales. España.
- Busch, U. (2016). Wilhelm Conrad Roentgen. El descubrimiento de los rayos X y la creación de una nueva profesión médica. Revista Argentina de Radiología. 80. 10.1016/j.rard.2016.08.003.
- Cherry, S., Sorenson, J. & Phelps, M. (2012). Physics in Nuclear Medicine. 4a ed. United States. Elsevier Saunders.
- Chiesa, C., Araujo, A., Rivera, T., Martínez, P., Pérez, A., Araujo, J. (2013). Complicaciones post radioterapia en el área otorrinolaringológica. Sociedad Otorrinolaringológica de Castilla y León, Cantabria y La Rioja.
- Cohen-Tannoudji, c. Diu, B. (1973). Quantum Mechanics, Hermann.
- Concejo de Bogotá. (24 de noviembre de 2010). Por medio del cual se crea el servicio de apoyo pedagógico escolar para niños, niñas y jóvenes hospitalizados e incapacitados en la red adscrita a la Secretaría Distrital de Salud. [Acuerdo 453 de 2010]. Recuperado de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40792&dt=S>

Congreso de Colombia. (16 de febrero de 2015). Artículo 10. [Derechos y deberes de las personas, relacionados con la prestación del servicio de salud]. Por medio de la cual se regula el derecho fundamental a la salud y se dictan otras disposiciones. [Ley estatutaria 1751]. Recuperado de [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/Ley%201751%20de%202015.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Ley%201751%20de%202015.pdf)

Consejo de seguridad nuclear. (2013). Curso de SUPERVISORES de instalaciones radiactivas (IR) Módulo Básico - Tema 7: Aspectos generales de la interacción de la radiación con el medio biológico. Recuperado de [http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros\\_md/1581136598\\_1572009112950.pdf](http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1581136598_1572009112950.pdf)

Cooperativa.cl. (17 de marzo de 2011). Conozca los niveles de radiación que pueden soportar los seres humanos. Recuperado de <https://www.cooperativa.cl/noticias/mundo/japon/conozca-los-niveles-de-radiacion-que-pueden-soportar-los-seres-humanos/2011-03-17/100457.html>

Cuarán Ordoñez, Felipe. (2017). Comprendiendo la fenomenología involucrada en la interacción radiación-materia: Estrategia didáctica orientada a la formación tecnológica en los campos de radiología en imágenes diagnósticas (Trabajo de grado). Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia.

Demtröder, W. (2005). Atoms, Molecules and Photons- An introduction to Atomic Molecular and Quantum Physics, Kaiserslautern Alemania, Springer.

Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas - DANE. (2020). Estadísticas Vitales - EEVV Nacimientos y defunciones. Recuperado de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/pre\\_estadisticasvitalas\\_Itrim\\_2020pr.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/pre_estadisticasvitalas_Itrim_2020pr.pdf)

Dorigo, M. (2004), *Ant Colony optimization*, Londres Inglaterra, MIT Press.

Foro Nuclear. (s.f.). A fondo - Historia de la primera radiografía [fotografía]. Recuperado de

<https://www.foronuclear.org/actualidad/a-fondo/historia-de-la-primera-radiografia/>

Fundación para la Formación e Investigación Sanitarias. (s.f.) RADIOBIOLOGÍA- Estudio de los

efectos de las radiaciones ionizantes en tejidos biológicos. Recuperado de

[https://www.ffis.es/ups/proteccion\\_radiologica\\_radiologia\\_intervencionista/TEMA%209%20radiobiologia%20general.pdf](https://www.ffis.es/ups/proteccion_radiologica_radiologia_intervencionista/TEMA%209%20radiobiologia%20general.pdf)

García, J. [Javier García]. (2016, febrero 16). 26.- Deducción de la Ecuación de Schrödinger

general. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=7CjC3g7oDwE>

García, P. (2012). Optimización basada en algoritmos de colonias de hormigas de la simulación

Monte Carlo del transporte de radiación. (Tesis de Doctorado). Universidad de Granada.

Granada, España.

Hernández, R., Fernández, C. & Baptista, M. (2014). Metodología de la investigación. 6ª ed.

México D.F.

Hehre, W. (2003). A Guide to Molecular Mechanics and Quantum Chemical Calculations. City of

Los Angeles, United States.

International Agency for Research on Cancer. (2020). Colombia Source: Globocan 2018.

Recuperado de <https://gco.iarc.fr/today/data/factsheets/populations/170-colombia-factsheets.pdf>

Instituto Nacional del Cáncer de los Institutos Nacionales de la Salud de EE. UU. (s.f.). Radical libre. Recuperado de <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/radical-libre>

Instituto Nacional de Cancerología. (s.f.). Reseña histórica. Recuperado de <https://www.cancer.gov.co/rese%C3%B1a-hist%C3%B3rica-inc>

Kübler-Ross, E. (1994). Sobre la muerte y los moribundos. (Neri Daurella, trad.) Ediciones Grijalbo, S.A., Barcelona, España. (Obra original publicada en 1972)

Kogelnik, D., (1997). Inauguration of radiotherapy as a new scientific speciality by Leopold Freund 100 years ago. Radiotherapy and Oncology: Journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology. 42 (3), pp. 203–211. Recuperado de <https://desayunoconfotones.org/2016/09/22/los-pioneros-de-la-radioterapia/>

Lars R. Holsti (1995) Development of Clinical Radiotherapy Since 1896, Acta Oncológica, 34:8, 995-1003, DOI: 10.3109/02841869509127225

López, A. (2017). Análisis del Efecto Fotoeléctrico presente en Fotodetectores para Comunicaciones Ópticas. Universidad Politécnica de Cartagena: Escuela Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Cartagena, España.

Martínez, A. (2014). ¡Un resultado inesperado! Descubrimiento de los rayos X en 1895. [Ilustración]. Recuperado de [https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte\\_02.html](https://www.xtal.iqfr.csic.es/Cristalografia/parte_02.html)

Martínez, M. (2009). Los operadores escalera II. Ciudad Juárez, México. Recuperado de: <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com/2009/08/los-operadores-escalera-ii.html>

Ministerio de Asuntos Exteriores – Gobierno de España. (s.f.). OIEA - Aspectos generales.

Recuperado de

[http://www.exteriores.gob.es/RepresentacionesPermanentes/OficinaONUViena/es/quees2/Paginas/OIVIENA/OIEA\\_Aspectos\\_Generales.aspx](http://www.exteriores.gob.es/RepresentacionesPermanentes/OficinaONUViena/es/quees2/Paginas/OIVIENA/OIEA_Aspectos_Generales.aspx)

Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2018). Artículo 4 [Definiciones]. Por la

cual se reglamenta el uso de equipos generadores de radiación ionizante, su control de calidad, la prestación de servicios de protección radiobiológica y se dictan otras disposiciones [Resolución 482 de 2018]. Recuperado de

[https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%20No.%20482%20de%202018.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%20No.%20482%20de%202018.pdf)

Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2020). Registro Especial de Prestadores de

Servicios de Salud (REPS), Registro Actual – Servicios, 711 Radioterapia. Recuperado de [https://prestadores.minsalud.gov.co/habilitacion/consultas/serviciossedes\\_reps.aspx](https://prestadores.minsalud.gov.co/habilitacion/consultas/serviciossedes_reps.aspx)

Monroy, D., Cruz, O. (2014). Instituto Nacional de Cancerología: historia, memoria y patrimonio,

Revista Colombiana de Cancerología, Volumen 18, ISSN 0123-9015, <https://doi.org/10.1016/j.rccan.2014.08.002>.

Murcia, E., Aguilera, J., Wiesner, C., Pardo C. (2018) Servicios oncológicos en Colombia.

Colombia Medica, Volumen 49(1): 89-96. DOI: 10.25100/cm.v49i1.3620

National Human Genome Research Institute. (2018). Cromosma. [Illustration]. NHGHRI.

Recuperado de

[https://www.genome.gov/sites/default/files/tg/es/illustration/Cromosoma\\_adv.jpg](https://www.genome.gov/sites/default/files/tg/es/illustration/Cromosoma_adv.jpg)

Nasa. (2018). La magnetosfera de la Tierra. Recuperado de <https://ciencia.nasa.gov/la-magnetosfera-de-la-tierra>

Nobel Prize. (2020). Wilhelm Conrad Röntgen – Nobel diploma [Imagen]. Sofia Gisberg, Recuperado de <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1901/rontgen/diploma/>

Quiroga, A. (2014). Aspectos Físicos de la Hadronterapia. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.

Real, G. (s.f.) Efectos Biológicos de las Radiaciones Ionizantes. Universidad Complutense. Recuperado de [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-19202/Efectos%20de%20las%20RI\\_UCM\\_27%20nov%202014\\_A%20Real\\_pdf.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-19202/Efectos%20de%20las%20RI_UCM_27%20nov%202014_A%20Real_pdf.pdf)

Rojas, M., & Milán, R. (2016). Los límites entre la histología y la bioquímica: observando al núcleo celular. Revista de la Facultad de Medicina (México), 59(1), 45-56. Recuperado de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0026-17422016000100045&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0026-17422016000100045&lng=es&tlng=es)

Röntgen, W. (1895). Acerca de un nuevo tipo de radiación. Impresión especial de las actuaciones de Física de Wurzburgo-Médico. Recuperado de [https://de.wikisource.org/wiki/Ueber\\_eine\\_neue\\_Art\\_von\\_Strahlen\\_\(Vorl%C3%A4ufige\\_Mitteilung\)](https://de.wikisource.org/wiki/Ueber_eine_neue_Art_von_Strahlen_(Vorl%C3%A4ufige_Mitteilung))

Ross, M., & Pawlina, W. (2015). Histología, Texto y atlas. Séptima edición. Wolters Kluwer.

Serway, R., Beichner, R., Campos, V., García, A., ProbstOleszewski, O. (2002). Física: Para ciencias e ingeniería / Raymond A. Serway y Robert J. Beichner; traducido por Víctor

Campos Olguín y Ana Elizabeth García Hernández; revisado por Oliver Matthias ProbstOleszewski ... [et al.] (5a. ed. --.). México D.F.: McGraw-Hill.

Turner, J. (2007). “Atoms, radiation, and radiation protection”. 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH.

Universidad Pedagógica Nacional de Colombia. (2010). Proyecto Educativo Institucional – PEI. Acuerdo 007 de 2010 del Consejo Superior. Bogotá, Colombia.

Universidad Técnica Federico Santa María. (2016). El efecto fotoeléctrico, o el descubrimiento del fotón y del carácter cuántico del mundo microscópico. Valparaíso, Chile. Recuperado de <http://docplayer.es/330649-O-el-descubrimiento-del-foton-y-del-caracter-cuanticodel-mundo-microscopico.html>

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. (s.f.). Biomoléculas intracelulares. Recuperado de [http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/jaislocr/BIOQUIMICA\\_I/Biomoleculas.pdf](http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/jaislocr/BIOQUIMICA_I/Biomoleculas.pdf)

Universidad de Alcalá. (s.f.). Espectroscopía Vibracional [Imagen]. Recuperado de [http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/DECI/tema\\_2.pdf](http://www3.uah.es/edejesus/resumenes/DECI/tema_2.pdf)

Varela, J. (1 de marzo de 2016). El descubrimiento de la radioactividad; Becquerel. Recuperado de <https://ahombrosdegigantescienciaytecnologia.wordpress.com/2016/03/01/el-descubrimiento-de-la-radioactividad-becquerel/>

## ANEXO 1. FENÓMENOS IMPLÍCITOS DE LA FÍSICA EN LA RADIACIÓN

### Anexo 1.1. Efecto fotoeléctrico.

$$h\nu = E_{pot} + E_k$$

Entonces el voltaje de frenado, que es el que logra frenar al electrón con mayor energía, haría que se devolviera el electrón sin llegar al ánodo. Esto quiere decir que el

$$V_{parada} = E_K$$

Así hemos encontrado por lo tanto que la energía de ese cuanto de luz para que salgan electrones de la placa deber ser.

$$h\nu = E_{pot} + V_{parada}$$

Por lo que la frecuencia se la relaciona con la función de trabajo por medio de la siguiente relación  $f_c = \frac{E_{pot}}{h}$

Así entonces la longitud de corte debe ser (López, A. 2017).

$$\lambda = \frac{c}{f_c} = \frac{hc}{E_{pot}}$$

### Anexo 1.2. Ecuación de Schrödinger

Inicialmente en un espacio n dimensional podemos llamar las coordenadas generalizadas que describen el estado del sistema como  $q_1, q_2, q_3, q_4 \dots q_n$ . Si queremos conocer su razón de cambio conoceríamos la descripción del sistema por medio de sus respectivas ecuaciones diferenciales.

$$\frac{dq_i}{dt} = \dot{q}_i$$

A partir de la definición de la acción S

$$S(q_i(t)) = \int_{t_1}^{t_2} L dt$$

Teniendo en cuenta que la energía cinética  $T$  es igual a:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{q}^2$$

Con masa determinada  $m$  y la energía potencial  $V$  es:

$$V = \frac{1}{2} k q^2$$

Con  $k$  equivalente a determinada constante elástica. Para ello tendremos en cuenta la función Lagrangiana  $L$  definida como:

$$L = T - V$$

Entonces, reemplazamos las energías  $T$  y  $V$  obteniendo:

$$L = \frac{1}{2} m \dot{q}^2 - \frac{1}{2} k q^2$$

Ahora, aplicando la ecuación de Euler-Lagrange, se tiene:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \left( \frac{1}{2} m \dot{q}^2 - \frac{1}{2} k q^2 \right)}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial \left( \frac{1}{2} m \dot{q}^2 - \frac{1}{2} k q^2 \right)}{\partial q} = 0$$

$$\frac{d}{dt} (m \dot{q}) - k q = 0$$

Entonces la acción sería

$$= \int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{m}{2} \dot{q}^2 - v(x) \right) dt$$

Para poder integrar esta expresión debemos encontrar la relación entre  $\dot{q}$  y  $t$ .

A partir de la definición de momento  $P_q = m \dot{q}$  podemos definir a  $\dot{q}$  como

$$\dot{q} = \frac{P_q}{m}$$

Pero esta relación no nos dice como cambia P respecto al tiempo así que lo podemos analizar de la siguiente forma

$$\dot{P} = \left\{ P, \frac{P^2}{2m} \right\}$$

Ya que al resolverlo  $\dot{P} = 0$  podemos decir que P=cte, y al P ser constante tenemos que la relación  $\frac{P_q}{m}$  es constante y la integral quedaría de la siguiente forma para el caso de  $v(x)=0$

$$S(q_i(t)) = \frac{m\dot{q}^2}{2} \int_{t_0}^t dt$$

$$S(q_i(t)) = \frac{m\dot{q}^2}{2} (t - t_0)$$

Ahora como la velocidad es constante  $\dot{q} = \left( \frac{x-x_0}{t-t_0} \right)^2$  y reemplazando en S

$$S(q_i(t)) = \frac{m}{2} \left( \frac{x - x_0}{t - t_0} \right)^2 (t - t_0)$$

$$S(q_i(t)) = \frac{m}{2} \frac{(x - x_0)^2}{t - t_0}$$

Ahora revisando las respectivas derivadas de la función obtenida, tenemos que respecto a t es:

$$\frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{m}{2} \frac{(x - x_0)^2}{(t - t_0)^2}$$

$$= -\frac{m}{2} v^2$$

$$= -\frac{m}{2} \frac{p^2}{m^2}$$

$$= -\frac{p^2}{2m}$$

Y respecto a  $q$ :

$$\frac{\partial s}{\partial q} = m \frac{(x - x_0)}{(t - t_0)} = mv = p$$

Es entonces interesante analizar que se define el hamiltoniano  $H$  como

$$H = P_q(\dot{q}) - L$$

$$H = P_q(\dot{q}) - \frac{1}{2}m\dot{q}^2 + \frac{1}{2}kq^2$$

Reemplazando en el hamiltoniano

$$H = P_q\left(\frac{P_q}{m}\right) - \frac{1}{2}m\left(\frac{P_q}{m}\right)^2 + \frac{1}{2}kq^2$$

$$H = \frac{P_q^2}{m} - \frac{1}{2}\frac{P_q^2}{m} + \frac{1}{2}kq^2$$

$$H = \frac{1}{2}\frac{P_q^2}{m} + \frac{1}{2}kq^2$$

$$H = \frac{1}{2}\left(\frac{P_q^2}{m} + kq^2\right)$$

Para el caso sin potencial

$$H = \frac{P_q^2}{2m}$$

Por lo que podemos decir que las respectivas derivadas de la función  $S(q_i(t))$  encontrada son:

$$P = \frac{\partial s}{\partial q} \quad H = -\frac{\partial s}{\partial t}$$

Volviendo a analizar la función  $S(q_i(t))$  para el caso  $v \neq 0$

$$S(q_i(t)) = \int_{t_1}^{t_2} L dt = \int_{t_1}^{t_2} (P \dot{q} - H) dt$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} P \dot{q} dt - \int_{t_1}^{t_2} H dt$$

Si definimos el lapso  $dt = t_2 - t_1 = \varepsilon$  entonces

$$s = P\dot{q}\varepsilon - H\varepsilon$$

$$s = Pdq - Hdt$$

Así comprobamos que efectivamente se cumple la relación

$$P = \frac{\partial s}{\partial q} \quad H = -\frac{\partial s}{\partial t}$$

Si escribimos el hamiltoniano del sistema

$$H = \frac{P_{qi}^2}{2m} + v(x)$$

Teniendo en cuenta las relaciones anteriores

$$-\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{2m} \left( \frac{\partial s}{\partial q} \right)^2 + v(x)$$

$$0 = \frac{1}{2m} \left( \frac{\partial s}{\partial q} \right)^2 + v(x) + \frac{\partial s}{\partial t}$$

Así hemos obtenido una ecuación diferencial dependiente de coordenadas espaciales  $q$  y temporales que tiene por solución la conocida ecuación de onda

$$\psi(t, x) = e^{i(\text{fase})}$$

Para encontrar la fase de esta función es importante analizar las unidades de la acción  $S$

$$[s] = [\text{energía}][\text{tiempo}]$$

La única cantidad que tiene este tipo de unidades es la constante de Planck al dividir la acción  $s$  entre la constante de Planck  $\hbar$

$$\frac{s}{\hbar} = -\frac{E}{\hbar} + \frac{P}{\hbar}x$$

Reemplazando esta expresión en la función

$$\psi(t, x) = e^{i\frac{s}{\hbar}} = e^{i(-\frac{E}{\hbar}t + \frac{P}{\hbar}x)}$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial t} = \psi i \left( \frac{-E}{\hbar} \right) = -i\psi \left( \frac{1}{\hbar} \right) \left( \frac{P^2}{2m} \right)$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \psi i^2 \left( \frac{P}{\hbar} \right)^2 = -\psi \left( \frac{P^2}{\hbar^2} \right)$$

Despejando  $P^2$

$$P^2 = \frac{2m\hbar}{-i\psi} \frac{\partial\psi}{\partial t}$$

$$P^2 = \frac{\hbar^2}{-\psi} \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}$$

Igualando entonces  $P^2$

$$\frac{2m\hbar}{-i\psi} \frac{\partial\psi}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{-\psi} \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}$$

$$\frac{2m\hbar}{i} \frac{\partial\psi}{\partial t} = \hbar^2 \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}$$

Dividiendo entre  $2m$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = i\hbar \frac{\partial\psi}{\partial t}$$

Esta sería la respuesta si el potencial fuera cero, pero si el potencial no fuera cero se obtendría lo siguiente:

$$i\hbar \frac{\partial\psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} + v(x)$$

**Anexo 1.3. Tiempo de vida de los estados excitados, probabilidad por segundo.**

La probabilidad por segundo de que suceda esta absorción es directamente proporcional a la densidad de energía espectral  $\omega_\nu(\nu) = n(\nu)h\nu$  aquí  $n(\nu)$  es la cantidad de fotones con energía  $h\nu$  por unidad de volumen por eso se llama densidad, es la cantidad de fotones dividida entre el volumen, esto nos lleva a la siguiente relación  $\frac{dP_{ki}^{abs}}{dt} = B_{ki}\omega_\nu(\nu)$  donde  $B_{ki}$  es el coeficiente de Einstein para la absorción.

El campo de radiación electromagnética también podría inducir a un átomo en un nivel con energía  $E_i$  a emitir un fotón con energía  $h\nu$  a este proceso se le da el nombre de emisión estimulada donde la energía del átomo sería  $\Delta E$ . La probabilidad por segundo de que se de dicha emisión es análoga a la absorción inducida  $\frac{dP_{ki}^{ind\ em}}{dt} = B_{ik}\omega_\nu(\nu)$  el coeficiente  $B_{ik}$  es el coeficiente de emisión inducida.

También se puede dar el proceso de emisión espontánea en el que no interviene un campo de radiación electromagnética este caso es el más usual en la naturaleza los casos de emisión inducida son frecuentes en procesos técnicos. La emisión espontánea sucede cuando un átomo se encuentra en un estado excitado y se muda a un estado de menor energía o hasta el estado fundamental emitiendo un fotón en cualquier dirección, la probabilidad por segundo viene dada por  $\frac{dP_{ki}^{abs}}{dt} = A_{ij}$  donde el coeficiente  $A_{ij}$  que es el coeficiente de emisión espontanea. (Demtröder, W. 2005).

Si  $N_i$  átomos están en el estado de energía  $E_i$  la tasa de transición de  $\langle i | \rightarrow \langle j |$  estará dada por la ecuación diferencial.

$$dN_i = A_i N_i dt$$

$$\int \frac{dN_i}{N_i} = \int A_i dt$$

El estado  $E_i$  puede decaer en varios estados  $E_j < E_i$ . Al integrar la ecuación anterior obtenemos la densidad de población dependiente del tiempo

$$N_i(t) = N_i(0)e^{-A_i t}$$

Al observar la forma de la ecuación anterior vemos que la forma en que se despobló el estado  $E_i$  es de manera exponencial negativa como vemos en la siguiente figura. La población del estado excitado  $E_i$  decrece exponencialmente desde su valor inicial  $N_i(0)$  en el tiempo cero a  $N_i(t) \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$

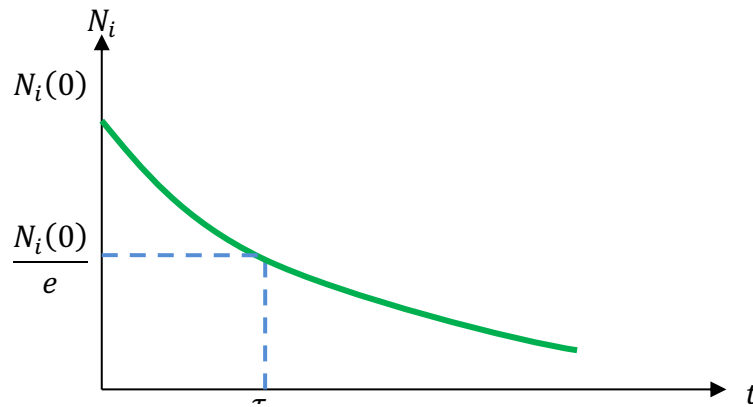


Figura. Curva de decaimiento de la población  $N_i$  de un estado excitado  $E_i$  con un tiempo de vida  $\tau_i$ .

La constante  $\frac{1}{A_i} = \tau_i$  es el tiempo de vida media del estado  $E_i$ . Esto lo podemos observar cómo sigue. El tiempo de vida media es definido como:

$$\begin{aligned} \langle t_i \rangle &= \frac{1}{N_i(0)} \int_{N=N_0}^{N=0} dN_i(t) \\ &= \int_0^{\infty} t A_i e^{-A_i t} dt \end{aligned}$$

Donde:  $\frac{1}{N_0} dN_i dt$  es la probabilidad de decaimiento de un átomo sin el intervalo de tiempo entre  $t$  y  $t+dt$ . Después del tiempo  $\langle t_i = \tau_i \rangle$  la población inicial  $N_i(t = 0)$  ha decrecido a  $\frac{N_i}{e}$

Mediciones del principal tiempo de vida de un nivel con energía  $E_i$  permite la determinación de la probabilidad total de transición  $A_{ij} = \sum A_{in} = \frac{1}{\tau}$ . Las probabilidades de transición específicas  $A_{in}$  pueden ser inferidas de las mediciones de las líneas relativas de transición de transiciones individuales  $E_i \rightarrow E_n$

$$A_{in} = \sum A_{in} \frac{I_{in}/h\nu_{in}}{\sum_n I_{in}/h\nu_{in}}$$

Esto produce los elementos de la matriz de probabilidad de transición  $M_{ik}$ . Otro proceso de retorno, por ejemplo, con la presencia de colisiones por algún gas circundante en la ausencia de vacío, se agrega la probabilidad  $R_i$  por segundo, así el proceso para la de población de átomos  $N_i$  del nivel  $E_i$  debe ser modificado a:

$$dN_i = -(A_i + R_i) N_i dt$$

Así integrando esta ecuación obtenemos

$$N_i(t) = N_i(0)e^{-(A_i+R_i)t}$$

Así el tiempo de vida efectivo pasa a ser

$$A_i + R_i = \frac{1}{\tau_i^{eff}}$$

Por lo que

$$\tau_i^{eff} = \frac{1}{A_i + R_i}$$

Si el nivel  $E_i$  es despoblado por colisiones inelásticas con otros átomos B la tasa de colisión inducida será

$$R_i = n_B \overline{v_{AB}} \sigma_i^{inel}$$

Donde  $n_B = \frac{N_B}{V}$  es la densidad de átomos B en el volumen  $v$

$$\overline{v_{AB}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi\mu}}$$

Es la velocidad de colisión promedio relativa de los dos átomos circundantes con masa reducida  $\mu$

$$\mu = \frac{M_a M_b}{M_a + M_b}$$

Graficando el inverso del tiempo de vida efectiva (siguiente figura)

$$\frac{1}{\tau_i^{eff}} = \frac{1}{\tau_i^{spont}} + n_B \overline{v_{AB}} \sigma_i^{inel}$$

Como función del producto  $n_B \overline{v_{AB}}$  (Relación Stern Vollmer) se obtiene una línea recta con pendiente igual a la sección transversal de colisión inelástica  $\sigma_i^{inel}$ .

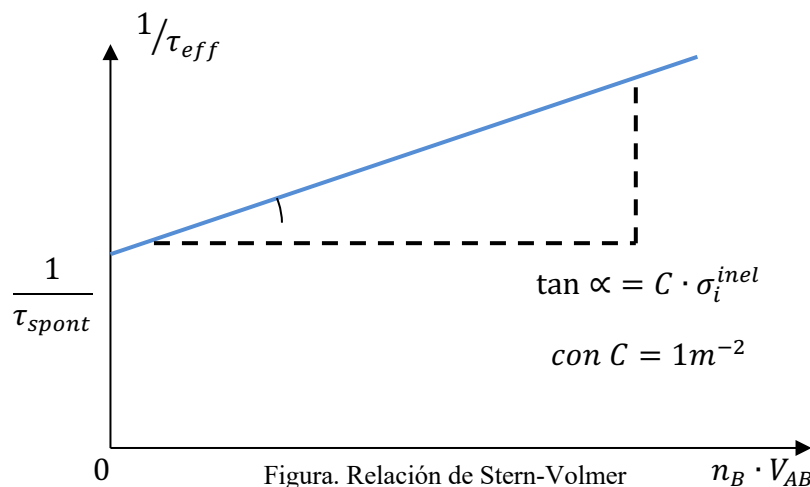


Figura. Relación de Stern-Volmer

Elaboración propia. Inverso de tiempo de vida efectivo  $1/\tau_{eff}$  como función de densidad  $n_B$  de colisión con vecinos B (Elaboración propia)

La intersección de esta línea recta con el eje es  $n_B = 0$  produciendo el inverso del tiempo de vida espontáneo.

De la ecuación general de estado

$$PV = NkT$$

El número de densidad  $n_B = \frac{N_B}{V} = \frac{P}{KT}$  puede ser expresado por la presión y la temperatura T la cual puede ser determinada experimentalmente mucho más fácil que la densidad  $n_B$  esto da la relación:

$$\frac{1}{\tau_i^{eff}} = \frac{1}{\tau_i^{spont}} + \sigma_i^{inel} \sqrt{\frac{8}{\pi\mu KT}} P$$

#### Anexo 1.4. El operador posición

Partiendo de las definiciones de los operadores. El operador creación está definido cómo:

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left( \hat{X} + \frac{i\hat{P}}{m\omega} \right)$$

Y el operador destrucción

$$\hat{a}^\dagger = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left( \hat{X} - \frac{i\hat{P}}{m\omega} \right)$$

Donde las variables son respectivamente m: masa,  $\omega$ : velocidad angular,  $\hat{P}$ : operador momentum,  $\hat{X}$ : operador posición,  $\hbar$ : constante de Planck reducida  $h/2\pi$ , “i” simboliza la raíz cuadrada de -1, un número que multiplicado por sí mismo sea -1. Martínez, M. (2009).

Desarrollando  $\hat{a}^\dagger + \hat{a}$  a partir de esta relación obtenemos lo siguiente.

$$\hat{a}^\dagger + \hat{a} = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} (2\hat{X})$$

Y despejando de aquí el operador posición

$$\hat{X} = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega}} (\hat{a}^\dagger + \hat{a})$$

De esta relación obtenemos el factor  $X_{zp} = \sqrt{\frac{\hbar}{2m\omega}}$  por lo que el operador posición quedará definido finalmente como

$$\hat{q} = x_{zp}(\hat{a}^\dagger + \hat{a})$$

Al aplicar el operador posición sobre una función de onda asociada a una partícula, descrita por la Ec. De Schrödinger, conoceremos el eigenvalor de la posición.

### Operador momentum

De la relación anterior también podemos efectuar la resta de los operadores creación y destrucción Martínez, M. (2009).

$$\hat{a}^\dagger - \hat{a} = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}} \left( \frac{2i\hat{P}}{m\omega} \right)$$

Despejando el operador  $\hat{P}$

$$\hat{P} = i \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\hbar}{m\omega}} (\hat{a}^\dagger - \hat{a})$$

Simplificando

$$\hat{P} = i \sqrt{\frac{m\omega\hbar}{2}} (\hat{a}^\dagger - \hat{a})$$

Donde el factor  $P_{zp} = \sqrt{\frac{m\omega\hbar}{2}}$  finalmente obtenemos el operador momentum  $\hat{P}$

$$\hat{P} = iP_{zp}(\hat{a}^\dagger - \hat{a})$$

Al aplicar el operador momentum sobre una función de onda asociada a una partícula, descrita por la Ec. De Schrödinger, conoceremos el eigenvalor de la posición.

### Conmutador posición-momento.

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$$

Reemplazar los operadores  $\hat{A}$  y  $\hat{B}$  por los operadores  $\hat{X}$  y  $\hat{P}$  resulta en:

$$[\hat{X}, \hat{P}] = \hat{X}\hat{P} - \hat{P}\hat{X}$$

Sabiendo que  $\hat{P} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$  y aplicando a una función

$$\begin{aligned} [\hat{X}, \hat{P}]f &= \hat{X}\hat{P}f - \hat{P}\hat{X}f = \hat{X}\left(-i\hbar \frac{\partial f}{\partial x}\right) - \\ &= -i\hbar \hat{X} \frac{\partial f}{\partial x} + i\hbar f + i\hbar \hat{X} \frac{\partial f}{\partial x} \end{aligned}$$

Finalmente cancelando los términos semejantes y cancelando la función introducida inicialmente  $[\hat{X}, \hat{P}] = i\hbar$

## ANEXO 2 - CICLO CELULAR, REPLICACIÓN DEL ADN Y PUNTOS DE CONTROL

Tal como el átomo ha sido considerado como el componente fundamental de la materia desde la época griega, la célula se considera el componente fundamental de la vida, la célula es una unidad compacta que tiene una o varias funciones, forma y cantidad de organelos dispuestos por toda la matriz citoplasmática. La célula cuenta a su vez con un núcleo en el cual se encuentra todo el material genético en las células eucariotas, se encuentra delimitada o envuelta por una membrana nuclear.

El núcleo celular contiene el material genético en forma de moléculas lineales de ADN (Ácido desoxirribonucleico) y proteínas, conocidas como cromatina, son estas moléculas lineales las que conforman el cromosoma, siendo los cromosomas la parte esencial al contener toda la información hereditaria que la célula posee y que transmitirá a sus células hijas durante la división celular. El tamaño del cromosoma humano en la metafase es de 1400nm y la molécula de ADN es de 2nm (Ross y Pawlina, 2015, p. 85), lo cual se muestra en la siguiente figura, se observa también como el ADN se enrolla en las histonas formando nucleosomas en lo conocido como *collar de cuentas*.

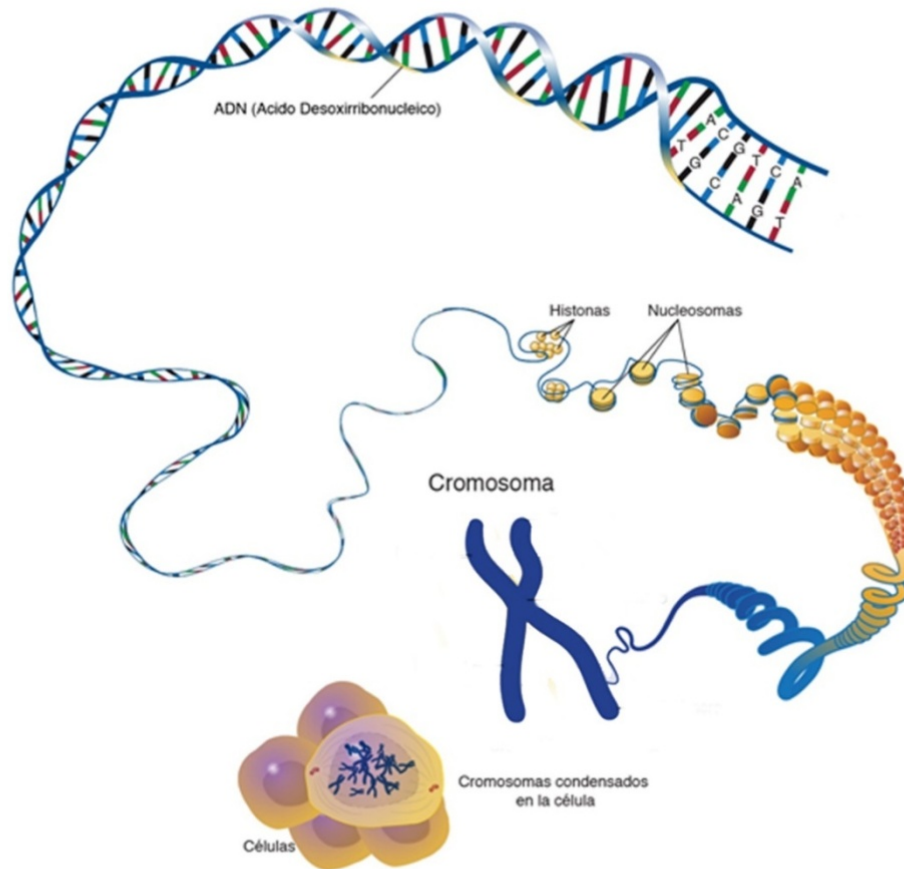


Figura. Estructura de un cromosoma, imagen tomada y modificada del National Human Genome Research Institute – Cromosoma (2018).

La reproducción de la célula es un proceso mediante el cual a través de una célula se originan dos células hijas, en este ciclo celular se lleva a cabo varios procesos (crecimiento, duplicación del ADN, reorganización y división). En el caso de las células humanas de rápida reproducción el ciclo puede realizarse en un tiempo aproximado de 24 horas (Ross y Pawlina, 2015). El proceso puede dividirse en dos fases: Interfase y Fase M, En la Interfase se observan tres momentos importantes que son mostrados en la siguiente figura los cuales son  $G_1$ , S y  $G_2$  en cada uno existe unos puntos de control que permiten evaluar el estado de la célula para frenar el proceso y/o iniciar el proceso de apoptosis o *muerte celular programada*.

Durante la fase  $G_1$  la célula tiene dos puntos de control, el primero es el punto de control de restricción, mediante el cual la célula evalúa su tamaño y las diversas condiciones para continuar con el proceso. El segundo punto de control es la evaluación de daño en el ADN en  $G_1$  donde se verifica la integridad del ADN replicado mediante la acumulación de una proteína supresora de tumores p53 la cual se encarga de detener la reproducción celular en el caso de una gran acumulación por daño al ADN de manera irreparable, esta proteína recibe también el nombre de “guardián del genoma”.

Mientras en la fase S,  $G_2$  y M son reguladas por dos proteínas ATM (Ataxia Telangiectasia Mutado) y ARM (relacionado con ATM y Rad3), las cuales intervienen durante varias etapas del proceso de control en el ciclo celular, estas proteínas se encargan de la reparación del ADN, pero cuando la célula se encuentra con un daño que no puede ser reparado inician un proceso de muerte celular.

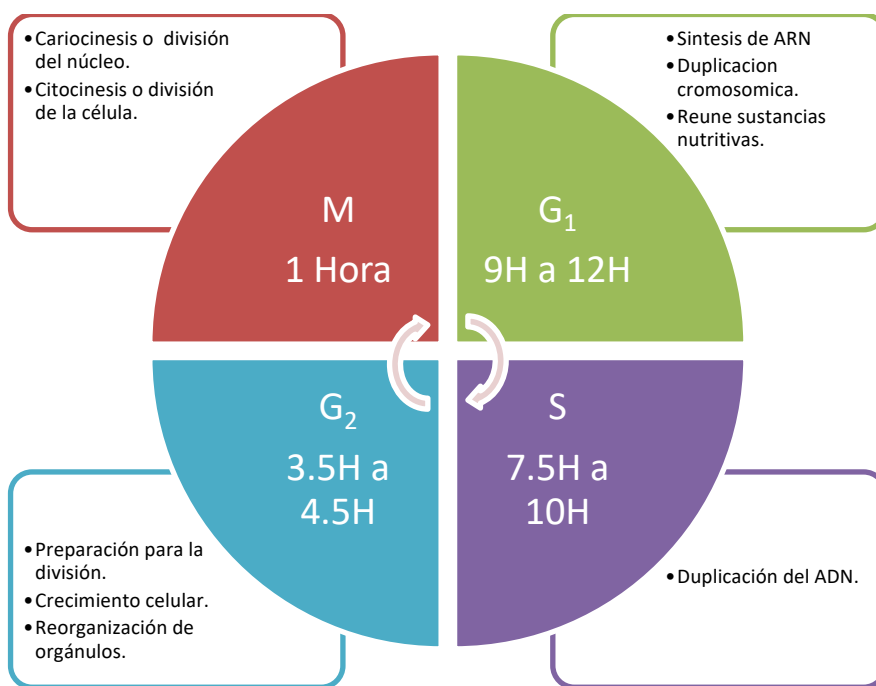


Figura. Ciclo celular, información recopilada de Ross y Pawlina.

### ANEXO 3 – GUIONES TÉCNICOS

Guion técnico: ¿Qué es el cáncer?

Duración: 2:12.00

Tiempo Inicio	Tiempo final	Audio	Cita Audio	Imagen	Animación
0:00.00	0:10.00	Aprende 123	NI	Logo	Aparición
0:10.30	0:12.33	¿Qué es el cáncer?	NI	Texto titulo	Escritura
0:12.83	0:21.41	Es un crecimiento sin control de algún tipo de célula del cuerpo, generando abultamientos, enrojecimiento y dolor.	NI	Varias células	Dibujo
0:21.71	0:27.63	El abultamiento de un tipo de células se le conoce comúnmente como tumores	NI	"Tumor"	Escritura
0:27.93	0:33.54	Estos crecimientos también pueden invadir tejidos cercanos al sitio de origen	NI	Flecha	Dibujo
0:33.84	0:39.57	Se han hallado tumores en los huesos desde hace más de 150.000 años	<a href="http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1726-46342013000100026">http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&amp;pid=S1726-46342013000100026</a>	Cavernícola	Deslizamiento

0:39.87	0:46.84	El primero en nombrar a estos tumores con el nombre de cáncer es el griego Hipócrates en la antigua Grecia.	NI	Hipócrates	Deslizamiento
0:47.14	0:56.25	El cáncer es el causante de cerca del 16% de todas las muertes en el mundo. Según la Organización Mundial para la salud.	<a href="https://www.who.int/features/factfiles/cancer/es/">https://www.who.int/features/factfiles/cancer/es/</a>	Logo OMS	Aparición
0:56.55	1:07.00	Esta enfermedad que no reconoce clases sociales, genero ni religión, todos somos susceptibles a padecerlo y debemos cuidarnos.	NI	Múltiples personas	Deslizamiento
1:07.30	1:16.42	Entre los principales tipos de cáncer que afectan a los humanos se encuentran el de mama, próstata, pulmón, estomago entre otros.	NI	Cuerpo y sitios señalados	Dibujo
1:16.72	1:20.61	Se estima que existen más de 100 tipos de cáncer.	NI		
1:20.91	1:31.27	No es fácil saber quién o cuando va a padecer esta enfermedad, pero si se conocen algunos factores que pueden aumentar las posibilidades de tenerlo.	NI	Lupa	Dibujo
1:31.57	1:56.97	El tabaco, el alcohol, una mala dieta son factores que aumentan la incidencia de allí que es importante tomar conciencia y mantener una vida sana.	NI	Vicios	Aparición
1:57.27	2:04.17	Una buena alimentación, con una rutina de ejercicios puede ayudarnos no solo para mejorar nuestra calidad de vida en un futuro próximo, nos previene también de algunas otras enfermedades.	NI	Persona haciendo deporte	Aparición
2:04.47	2:12.00	Además, recuerda visitar a tu medico con cierta regularidad y ante cualquier situación acudir oportunamente, esto puede salvarte la vida.	NI	Medico	Dibujo

## Guion técnico: La Célula

Duración: 2:08.58

Tiempo Inicio	Tiempo final	Audio	Cita Audio	Imagen	Animación
0:00.00	0:10.00	NA	NA	Logo	Aparición
0:10.30	0:12.50	La célula	NA	Texto titulo	Escritura
0:12.80	0:29.94	Todos los organismos vivos están compuestos por al menos una célula.	NA	Célula	Dibujo
0:30.24	0:42.76	Estas células se agrupan formando tejidos y estos a su vez unidos forman órganos y sistemas complejos, todo esto da origen a un cuerpo humano completamente desarrollado.	NA	Jerarquía Órganos, tejido, células	Aparición
0:43.06	0:57.98	Una parte de todas nuestras células están en constante reproducción, aunque hay algunas que no experimentan incremento alguno en su población, como es el caso de las neuronas.	NA	Dos células y un corazón	Aparición
0:58.28	1:04.69	Una sola célula puede producir dos células hijas con la misma información genética que la su progenitora, esto	NA	Fotocopia	Dibujo

		es importante para evitar que se creen nuevas células con algún error o malformación.			
1:04.89	1:12.82	La reproducción celular recibe el nombre de ciclo celular, debido a que este es constante.	NA	Circulo	Dibujo
1:13.12	1:22.37	El ciclo celular comúnmente se divide en 4 fases. G1, S, G2 y M.	NA	Fases Ciclo celular	Aparición
1:22.57	1:26.91	G1 y G2 donde la célula aumenta su tamaño y comienza a prepararse para su división	NA		
1:27.21	1:34.67	En la fase S la célula replica su información genética.	NA	Señalado	Dibujo
1:34.97	1:39.60	En la fase M es donde se realizan los 4 sub procesos que producirán finalmente dos células hijas.	NA		
1:39.90	1:44.64	Los cuatro subprocesos son: Profase, Metafase, Anafase y Telofase.	NA	“Profase, Metafase, Anafase y Telofase”	Escritura
1:44.94	1:50.05	En la profase los cromosomas se concentran o condensan	NA	Profase	Aparición
1:50.35	1:55.67	En la metafase los cromosomas se alinean en la mitad de la célula.	NA	Metafase	Aparición

1:55.97	2:03.23	Ya en la anafase los cromosomas se separan y la célula se alarga.	NA	Anafase	Aparición
2:03.53	2:08.58	Para finalizar en la telofase termina la división celular y da origen a dos nuevas células hijas.	NA	Telofase y metafase	Aparición

