

Estudio computacional de la dinámica estructural del ADN, posterior a su interacción con radiación ionizante

Informe Final de Pasantía



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

Autor: Jaiver Estiven Salazar Ortiz

Supervisor: Alfonso Leyva

Co-Supervisor: Edwin Munévar

Proyecto Curricular de Licenciatura en Física

Facultad de Ciencias y Educación

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

25 de septiembre de 2019

Agradecimientos

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne die Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden. Ich versichere, dass die eingereichte elektronische Fassung der eingereichten Druckfassung vollständig entspricht.

Die Strafbarkeit einer falschen eidesstattlichen Versicherung ist mir bekannt, namentlich die Strafandrohung gemäß § 156 StGB bis zu drei Jahren Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei vorsätzlicher Begehung der Tat bzw. gemäß § 161 Abs. 1 StGB bis zu einem Jahr Freiheitsstrafe oder Geldstrafe bei fahrlässiger Begehung.

Jaiver Estiven Salazar Ortiz

Köln, den xx.xx.20xx

Abstract

[Abstract goes here (max. 1 page)]

Índice

1. Justificación	1
2. Una revisión al ADN	2
2.1. Historia del ADN	2
2.2. Estructura del ADN	4
2.2.1. Daño inducido por radiación al ADN	4
2.2.1.1. Rompimientos simples	4
2.2.1.2. Rompimientos dobles	4
2.2.1.3. Daño base	4
2.2.1.4. Dimeridos de pirimidina	5
2.3. Daño Celular	5
2.3.1. Reparación del ADN	5
2.3.2. Mecanismos de defensa	5
2.3.3. Respuesta adaptativa	5
3. Interacción radiación-materia	6
3.1. Interacciones de fotones en la materia	6
3.1.0.1. Dispersión de Compton(Dispersión incoherente) .	6
3.1.0.2. Dispersión de Rayleigh(Dispersión coherente) . .	7
3.1.0.3. Efecto Fotoelectrico	7
3.1.0.4. Producción de pares	8
3.1.0.4.1. Producción nuclear de pares	9
3.1.0.4.2. Producción electrónica de pares	9
3.1.0.5. Reacciones fotonucleares	9
3.2. Interacciones de partículas cargadas en la materia	10
3.2.0.1. Colisión de radiación($b \ll a$)	11
3.2.0.1.1. Bremsstrahlung	11
3.2.0.2. Colisión fuerte($b \approx a$)	11
3.2.0.3. Colisión debil($b \gg a$)	12
4. GEANT4	13
4.1. PDB4DNA	13
4.1.1. PDB	13
4.1.2. pdb reader	14
4.1.3. Visualización	14
4.1.4. Simulación	16
4.1.5. Algoritmo para encontrar el atomo más cercano	16
4.1.6. Rompimientos simples y dobles	16

4.1.7.	Archivos Relevantes	18
4.1.7.1.	PhysicsList	18
4.1.7.2.	PDBlib	19
4.1.7.3.	DetectorConstruction	19
4.1.7.4.	SteppingAction	19
5.	Modificaciones PDB4DNA	20
6.	Section X	21
6.1.	Exemplary Citation	21
A.	Appendix	22

Índice de figuras

1.	Fotografía cristalográfica del ADN	3
2.	Diagrama esquemático del ADN	3
3.	Efecto Compton	7
4.	Dispersión de Rayleigh	8
5.	Efecto fotoeléctrico	8
6.	Producción nuclear de pares	9
7.	Producción electrónica de pares	10
8.	Reacción fotonuclear	10
9.	Colisión de radiación	11
10.	Colisión fuerte	12
11.	Colisión débil o suave	12
12.	Esquema de un PDB	14
13.	Barycentros	15
14.	VDW	15
15.	Residuos	15
16.	Caja delimitadora	16
17.	Esferas ligadas y nucleótidos	17
18.	Esquema rompimientos simples y dobles en el ADN	17
19.	Histograma de Root	18
20.	Diagrama de flujo de PDB4DNA	18

Índice de cuadros

1. Justificación

La importancia de este capítulo es dar las bases necesarias para el resto del documento

2. Una revisión al ADN

La importancia de este capítulo es dar las bases necesarias para ADN

2.1. Historia del ADN

La epopeya del ADN tiene sus inicios en 1869 con un bioquímico llamado Friedrich Miescher, éste estaba interesado en la estructura química de las fascinantes unidades fundamentales de la vida conocidas como células. Miescher viajaba todos los días a la clínica más cercana para tomar las vendas sucias, esto debido a que estaban recubiertas de pus (lo cual era una buena fuente de leucocitos), añadiendo álcali hizo que los núcleos se abrieran liberando sus componentes, de esta manera Miescher extrajo un componente (ADN), al que el nombre nucleína, realizando un análisis de esta nucleína mostró que era un ácido que contenía fósforo y por tanto no calificaba en ninguno de los grupos conocidos en ese momento como carbohidratos y proteínas, este fue clasificado como un ácido nucleico y su relevancia biológica no fue descubierta hasta mucho tiempo después [1].

En 1928 Fredrick Griffith realizaba una investigación con neumococos, tenía dos tipos: el primero patógeno fue cultivado en placas de petri conocido como s(smooth-suave) debido a su apariencia, el segundo inofensivo y conocido como r(rough-áspero), Griffith descubrió que al añadir un extracto de los neumococos tipos S al tipo R, éste último podría heredar las propiedades del tipo S, este principio de transformación indicaba que el extracto contenía la molécula de herencia.

Oswald Avery junto con MacLeod y McCarty demostraron que la sustancia efectiva en el experimento de Griffiths era la molécula de ADN y que a su vez, era el portador de genes en la célula, también es importante mencionar que Alfred Hershey y Martha Chase quienes confirmaron la conclusión en 1952 mediante experimentos con trazadores radioactivos[8].

Es relevante mencionar otros aportes significativos:

1. Erwin Chargaff encontró una regularidad peculiar en los ratios de las bases de los nucleótidos.
2. Sven Furger trabajó en la estructura de los componentes del ADN, encontró que la base plana(plano de la citocina) era perpendicular a la molécula de azúcar.
3. Rosalind Franklin logró distinguir dos tipos de ADN dependiendo de la hidratación y que ambos tenían estructura helicoidal mediante cristalografía, véase figura 1.

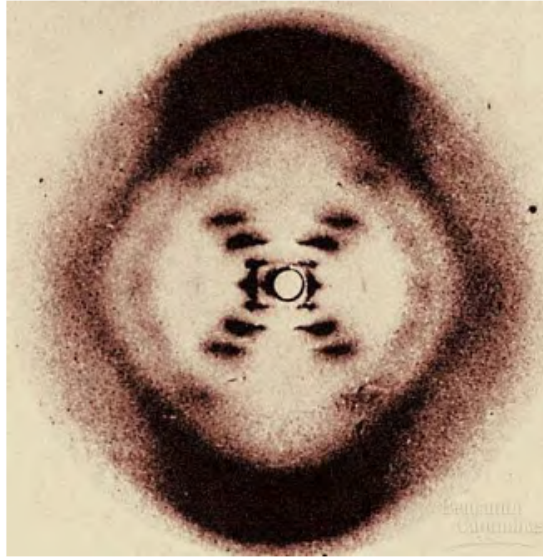


Figura 1: Fotografía cristalográfica del ADN tomada por Rosalind Franklin en 1952

El ultimo paso hacia la estructura del ADN fue llevado acabo por James Watson y Francis Crick en el laboratorio de Cavendish en francia, juntos trabajaron en diferentes modelos de la molecula de ADN , en 1953 publicaron un articulo en la prestigiosa revista Nature titulado: "Molecular Structure of Nucleid Acids", el articulo solo tenia una pagina, pero era de un impacto significativo debido al modelo de ADN que contenía, un modelo de doble hélice(figura 2), y sugerían que el emparejamiento especifico que habían postulado intuía un posible mecanismo para copiar material genético.



Figura 2: Diagrama esquemático del ADN publicado por Watson y Crick en 1953, imagen tomada de [7].

2.2. Estructura del ADN

El ADN es una molécula compuesta por seis diferentes tipos de bloques: cuatro bases, citosina, timina, guanina, adenina, junto con una molécula de azúcar y un grupo fosfato, el fosfato el azúcar y la base forman un nucleótido, y el ADN esta conformado por dos cadenas largas de nucleótidos. If all the DNA in a single human cell was tied together and stretched out, it would be approximately 2 meters long. One strand of DNA binds to the other strand through hydrogen bonds that extend between base pairs. Thus, C binds specifically with G and A binds with T forming the C – G and A – T base pairs. The human double helix contains about 6 billion base pairs. Three adjacent bases (a triplet or codon) on one strand code for a certain amino acid in a protein. If a protein consists of 200 amino acids, the DNA that codes for this protein consists of at least 600 bases, i.e., 200 triplet codons. This is a gene.

2.2.1. Daño inducido por radiación al ADN

The most important types of damage to the DNA molecule, induced by radiation, are outlined in the figure below. There are four common types of damage

2.2.1.1. Rompimientos simples A single strand break is simply a break in one of the sugar-phosphate chains. This damage is usually simple to repair and, in experiments, it has been shown that approximately 90 % of the single strand breaks are repaired in the course of one hour at 37°C.

2.2.1.2. Rompimientos dobles This type of damage involves both strands of the DNA helix, which are broken opposite to each other or within a distance of a few base pairs. This type of damage (also called a clustered damage) would kill the cell and in experiments with bacteria a correlation is found between double strand breaks and cell death (David Freifelder in the 1960-ties). Double strand breaks are more difficult to repair correctly. However, they actually are. The DNA-molecule is packed together with proteins supporting the structure and preventing the pieces from falling apart, even when breaks occur on both strands of the helix. There are in fact a number of mechanisms that complex organisms (such as humans) have evolved for repairing double strand breaks. But as one might guess, this type of break is more difficult to repair and does correlate with cell death and observable damage to chromosomes.

2.2.1.3. Daño base Experiments indicate that the radiation sensitivity varies from one base to another. After an initial ionization, rapid electronic reorganizations take place with the result that the damage is transported to certain

regions of the macromolecule. The base guanine is particularly sensitive. Damage to a base is one of the starting points for a mutation. If a base is changed, information may be lost or changed. As the result of a misrepair or no repair, the altered triplet codon is likely to lead to insertion of the incorrect amino acid in the protein. In turn, the changed protein might not function properly.

2.2.1.4. Dimeridos de pirimidina Pyrimidine dimers are also examples of clustered damage. In this example, two adjacent bases, T and T, on the same strand have been chemically altered. This is but one out of a myriad of possibilities. All the possibilities have the common feature that two or more damaged sites lie in close proximity to one another. Double strand break Base damage We shall return to repair mechanisms, but would like to mention the problems posed by clustered damage. One of the strands is needed to replicate the adjacent strand. When both strands are damaged at the same site there is no template to work from. This is in contrast to damage such as a single base alteration or a single strand break

2.3. Daño Celular

2.3.1. Reparación del ADN

2.3.2. Mecanismos de defensa

2.3.3. Respuesta adaptativa

3. Interacción radiación-materia

En general este apartado se basa en dar una pequeña explicación de algunos fenómenos físicos relevantes en la interacción radiación materia, estos se basan en las diversas interacciones de partículas cargadas o fotones con átomos, existen otros procesos que son relevantes como la interacción de neutrones pero debido a que poco tienen que ver(por ahora) con el desarrollo de este trabajo no son incluidos.

3.1. Interacciones de fotones en la materia

A menudo se asume que son solo cuatro los eventos relevantes para fotones al interactuar con átomos: dispersión de Compton, dispersión de Rayleigh, efecto fotoeléctrico, y producción de pares. Pero en Realidad las interacciones más importantes de fotones con la materia son principalmente seis, las cuales son: dispersión de Compton, dispersión de Rayleigh, efecto fotoeléctrico, producción de nuclear de pares, producción electrónica de pares, y reacciones fotonucleares, esto es debido a que usualmente la producción de nuclear de pares junto a la producción electrónica de pares se manejan ambas bajo el nombre de producción de pares y los efectos de las reacciones fotonucleares son ignorados. A continuación se muestra una explicación sencilla de cada uno de ellos.

3.1.0.1. Dispersión de Compton(Dispersión incoherente) El efecto Compton recibe su nombre en honor a Arthur Compton quien en 1922 fue la primera persona en realizar mediciones de una dispersión entre un fotón y un electrón libre, este fenómeno se basa en la interacción de un fotón con una energía $h\nu$ junto con un electrón débilmente ligado a un orbital de cierto átomo, cuando esto ocurre, se produce un fotón de energía menor $h\nu'$ y un electrón conocido como el electrón de Compton(dispersado) es expulsado del átomo con una energía cinética E_k , es pertinente mencionar que en estudios teóricos se asume que el electrón está libre y estacionario[3], generalmente es posible usar los cálculos de mecánica clásica con la conservación de energía y momento, sin embargo es importante entender la naturaleza cuántica del proceso, y en particular la transferencia de energía y la asignación de momento a un fotón implicada, los cálculos clásicos funcionan mientras, la velocidad no sea relativista, la energía de los fotones implicados no sea muy baja o el material tenga un número atómico Z muy alto, si alguna de estas situaciones se cumple es necesario realizar las correcciones apropiadas[4].

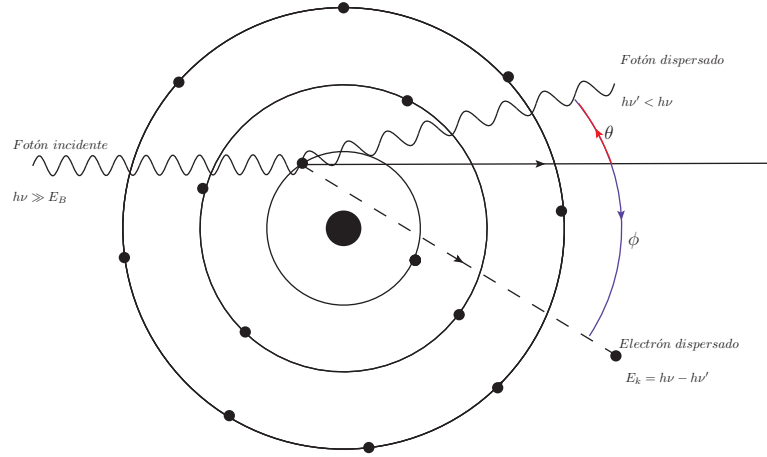


Figura 3: Efecto Compton: un fotón incidente con energía $h\nu$ colisiona con un electrón débilmente ligado de un átomo produciendo un fotón con energía menor $h\nu'$ con ángulo θ y a su vez es expulsando un electrón de Compton con energía cinética E_k y ángulo ϕ

3.1.0.2. Dispersión de Rayleigh(Dispersión coherente) Recibe el nombre de Rayleigh debido a el físico John W. Rayleigh quien en 1900 desarrollo una teoría para la dispersión de radiación electromagnética debido a átomos, este fenómeno ocurre principalmente con fotones a bajas energías $h\nu$ junto con un receptor que tenga numero atómico Z alto, consiste en que un fotón incidente es dispersado cuando interactuá con alguno de los electrones ligados a un átomo, el átomo absorbe el momento transferido y el fotón es dispersado con un ángulo ϕ y con una energía relativamente igual a la que tenía antes de la interacción, los ángulos de este fenómeno son relativamente pequeños dado que la energía impartida al átomo no produce ionización o excitación y este vuelve a su estado original después de la interacción[3]. También se conoce como Dispersión coherente debido a que el fotón es dispersado por la acción combinada de todo el átomo, debido a esto el evento es elástico en el sentido de que el fotón no pierde casi nada de su energía[6].

3.1.0.3. Efecto Fotoelectrico Se conoce como efecto fotoeléctrico a la interacción entre un fotón y un electrón orbital fuertemente ligado a un átomo, el fotón incidente con energía $h\nu$ interactúa con el electrón del átomo, entonces es absorbido completamente y el electrón orbital conocido como fotoelectrón es expulsado con energía cinética $E_k = h\nu - E_B(K)$ Donde $E_B(K)$ es la energía de ionización del electrón, la vacante en el orbital es subsecuentemente tomada por con un electrón más alto y la energía de la transición del electrón sera emitida en la formá de un fotón característico(fluorescencia) o como un electrón de Auger.

A diferencia del efecto Compton el cual ocurre cuando un fotón interactúa

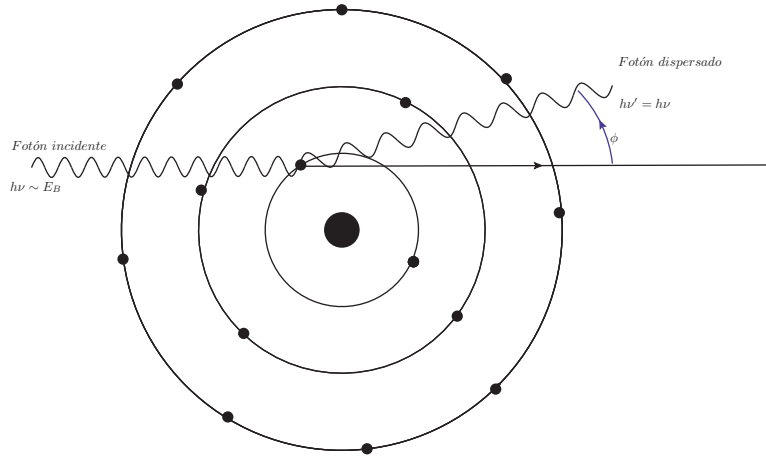


Figura 4: Dispersión de Rayleigh: un fotón incidente con energía $h\nu$ interactúa con un electrón ligado a un átomo, este fotón es dispersado con un ángulo pequeño ϕ y una energía $h\nu'$ relativamente igual a $h\nu$

con un electrón "libre" (débilmente ligado), el efecto fotoeléctrico sucede entre un fotón y un electrón "ligado fuertemente", la diferencia entre estos radica en la magnitud relativa de la energía del fotón $h\nu$ y la energía necesaria para remover un electrón de un átomo (energía de ionización) E_B en vez de un valor absoluto de $h\nu$ o E_B , entonces cuando $E_B \ll h\nu$ se dice que el electrón está débilmente ligado o libre y cuando $E_B \lesssim h\nu$ se asume que el electrón está fuertemente ligado [3].

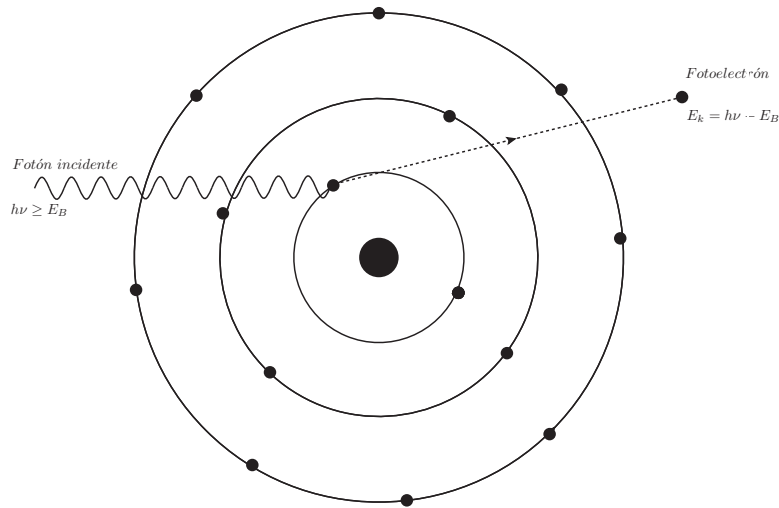


Figura 5: Efecto fotoeléctrico: un fotón incidente con energía $h\nu$ interactúa con el electrón del átomo, entonces es absorbido completamente y el electrón orbital conocido como fotoelectrón es expulsado con energía cinética E_k

3.1.0.4. Producción de pares Si un fotón con una energía mayor 1.02 MeV entra en un receptor, puede interactuar con los átomos de este por un proceso conocido como producción de pares, en este mecanismo de transferencia de energía

el fotón al pasar cerca del átomo esta sujeto a efectos de campo fuerte debido al núcleo, y puede desaparecer y reaparecer como un par de electrones positivo y negativo.[4] Debido a que el momento p_ν antes de la interacción de producción de pares es mucho más grande que el momento total p_{pair} después de la interacción de producción de pares, entonces el fotón debe poseer un exceso de momento que no puede ser absorbido por el par electrón-positrón, por tanto, debe ser absorbido por otro ente de colisión, sea el núcleo atómico, o un electrón orbital[3], dada alguna de estas condiciones tenemos:

3.1.0.4.1. Producción nuclear de pares Cuando el fotón interactúa con el núcleo atómico, éste juega un rol más o menos pasivo, el estado del núcleo dispersado antes y después del evento es el mismo, excepto por un cambio en su energía cinética y momento. Simplemente un fotón se ha convertido en un electrón y un positrón[4].

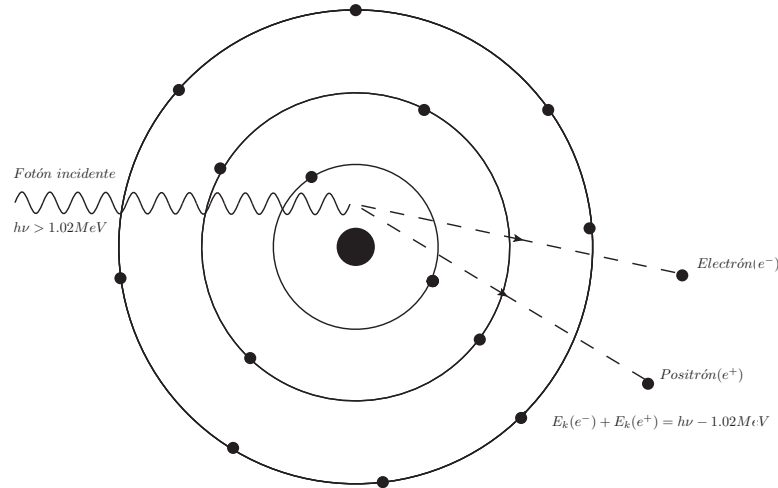


Figura 6: Producción nuclear de pares: Un fotón experimenta una producción de pares estándar, electrón-Positrón

3.1.0.4.2. Producción electrónica de pares El fotón incidente interactúa con un electrón orbital, en lugar de con un núcleo atómico, debido a esto el electrón es dispersado, dado que tiene una masa pequeña, tomará una energía cinética significativa y aparecerá como un producto de la interacción. Además, un electrón y un positrón se generan como resultado de la desaparición del fotón incidente [4].

3.1.0.5. Reacciones fotonucleares Usualmente este tipo de fenómeno también recibe el nombre de "fotodesintegración"ó "efecto nuclear fotoeléctrico", se basa en la interacción entre un fotón energético y un núcleo causando desintegración nuclear. En la reacción fotonuclear el núcleo absorbe el fotón y el resultado

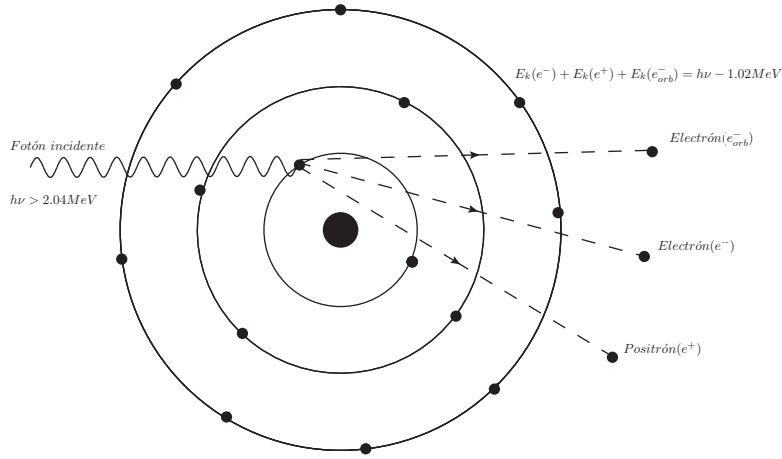


Figura 7: Producción electrónica de pares: Un fotón experimenta una producción de pares triple, un electrón dispersado–electrón–Positrón

más probable es la emisión de un solo neutrón, aunque es posible que se emitan otras partículas como α , rayos γ , más de un neutrón o fragmentos de fisión, aunque estos eventos son menos probables, un neutrón producido por este fenómeno se conoce como fotoneutrón[3].

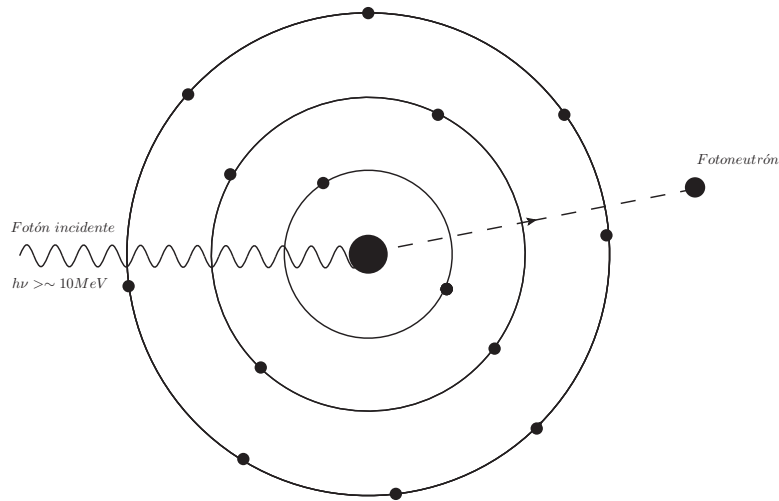


Figura 8: Reacción fotonuclear: Un fotón es absorbido por un núcleo atómico y éste produce un fotoneutrón

3.2. Interacciones de partículas cargadas en la materia

A medida que una partícula viaja en un receptor experimenta interacciones de Coulomb con los núcleos y electrones de los átomos de este mismo, estas interacciones pueden ser divididas en tres categorías dependiendo del tamaño clásico del parámetro de impacto b de la trayectoria de la partícula cargada comparado al radio clásico del átomo a con el que la partícula interactúa.

3.2.0.1. Colisión de radiación($b \ll a$) Cuando el parámetro de impacto b de una partícula cargada es mucho más pequeño que el radio a del átomo, la partícula cargada interactuá más que todo con el núcleo y experimenta dispersión elástica o inelástica junto con un posible cambio en la dirección del movimiento. En la mayoría de los casos se presenta dispersión elástica en cuyo caso la partícula es dispersada por el núcleo pero solo sufre una pequeña pérdida de su energía cinética, sin embargo un pequeño porcentaje de estas interacciones son inelásticas y pueden resultar en pérdida significativa de energía para la partícula cargada acompañada por la emisión de fotones de rayos-x, este tipo de interacción se conoce como colisión de bremsstrahlung[3].

3.2.0.1.1. Bremsstrahlung Bremsstrahlung es un tipo de fotón de rayos-x producido cuando partículas ligeras experimentan interacción radioactiva inelástica con núcleos de átomos de dado receptor, en esta interacción la partícula presenta ralentización dando una fracción significativa de energía cinética al fotón[6]. Las partículas cargadas de interés para la física medica y dosimetría se pueden clasificar en dos categorías:

1. Partículas ligeras cargadas: electrones e^- y positrones e^+ , ambos pueden producir fotones bremsstrahlung debido a su masa relativamente pequeña[3].
2. Partículas pesadas cargadas: protones p , deuterones d , partículas alfa α , iones pesados tales como Li^+ , Be^+ , C^+ , Ne^+ , etc. producen una cantidad insignificante de fotones bremsstrahlung[3].

Bremsstrahlung es la palabra en alemán para designar radiación de frenado.

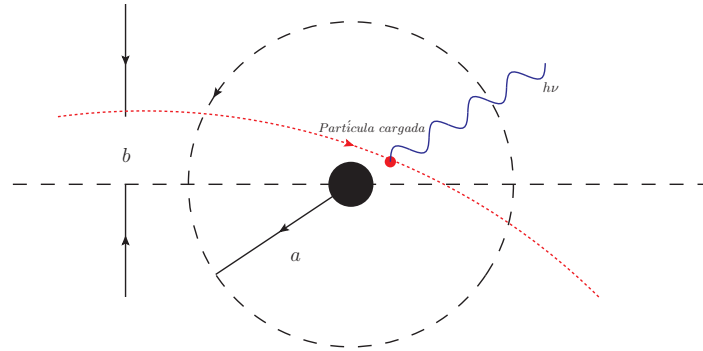


Figura 9: Colisión de radiación(producción de bremsstrahlung)

3.2.0.2. Colisión fuerte($b \approx a$) Cuando el parámetro b de la trayectoria de una partícula cargada sea aproximadamente del orden del radio a del átomo, la partícula cargada puede tener un impacto directo de Coulomb con un electrón de un orbital, a este fenómeno se le conoce como Colisión fuerte en el cual se transfiere una cantidad significativa de energía de la partícula al electrón, luego

de la interacción el electrón deja el átomo como un rayo γ , el numero de colisiones fuertes que experimenta una partícula cargada moviéndose en un receptor es generalmente pequeño, sin embargo la transferencia de energía asociada es relativamente grande[3].

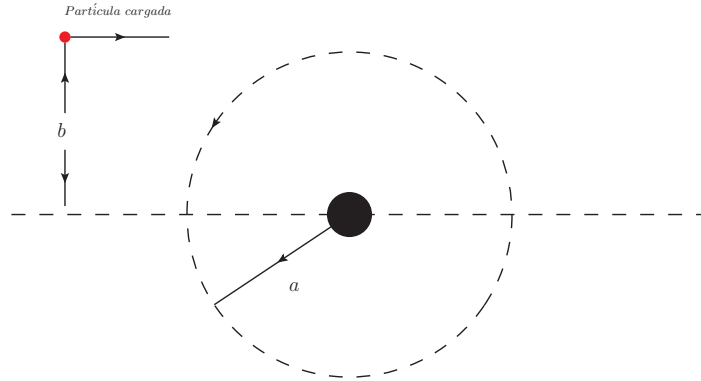


Figura 10: Colisión fuerte

3.2.0.3. Colisión debil($b \gg a$) Cando el parámetro b de la partícula cargada es mucho más grande que el radio a del átomo, la partícula cargada interactuá con todo el átomo el cual se compone de electrones ligados, la energía transferida por la partícula cargada en este evento a los electrones ligados es muy pequeña, sin embargo el numero de estas interacciones es bastante grande, y debido a esto la partícula pierde mucha energía, estas mini-interacciones pueden causar polarización atómica, excitación o ionización mediante la remoción de un electrón de valencia, este fenómeno recibe el nombre de colisión débil o colisión suave[3].

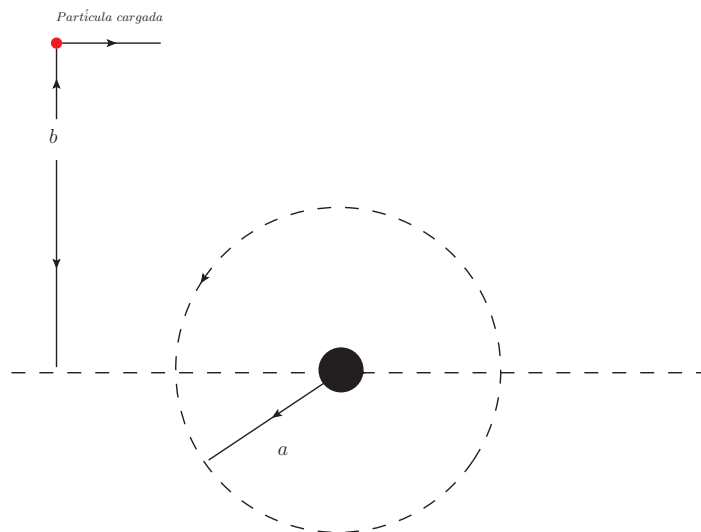


Figura 11: Colisión débil o suave

4. GEANT4

GEANT4(**GE**ometry **ANd** **T**racking - 4 versión) es una plataforma computacional para la simulación de diversos procesos físicos que se centra en la interacción de partículas viajando a través de la materia haciendo uso de monte carlo. Geant es creado en 1974 por el CERN pensado originalmente para la simulación de experimentos en física de altas energías, esto cambiaría con el desarrollo de subsecuentes versiones las cuales serían empleadas en muchos otros campos, su cuarta versión Geant4 es publicada en 1998, esta ultima a su vez también ha tenido diversas versiones actualizadas cada año, su lanzamiento más reciente ha sido Geant4-10.5.p01 y su versión beta Geant4-10.6-beta ambas versiones liberadas en el presente año, cuenta con áreas de aplicación que incluyen física de altas energías, física espacial, física médica, transferencia tecnológica, entre otras, su desarrollo, aplicación y mantenimiento son debido al equipo colaborativo a nivel global Geant4 Collaboration los cuales se centran en que el software pueda ser lo mejor posible.

GEANT4 se proporciona bajo la licencia [Geant4 Software License](#).

4.1. PDB4DNA

PPB4DNA es una aplicación relativamente nueva de Geant4 creada por Geant4-DNA project, se basa en el uso adicional de una librería construida en c++ llamada PDBlib, la cual permite hacer uso de la estructura atómica de una molécula de ADN al extraer datos que se encuentran en un archivo .pdb para posteriormente ser usados en Geant4 para evaluar el daño inducido por partículas ionizantes al mismo, mediante un conteo de rompimientos simples, rompimientos dobles y su correspondiente deposición de energía.

El objetivo principal de Geant4-DNA project es extender Geant4 con diversos procesos para el modelar el daño biológico inducido por radiación ionizante en la escala del ADN, es coordinado desde el 2008 por el National Institute for Nuclear and Particle Physics (IN2P3) del National Centre for Scientific Research (CNRS) en Francia.

4.1.1. PDB

Un archivo .pdb (Protein Data Bank) es un archivo de texto que contiene la información estructural de una molécula, se compone de cientos a miles de líneas y en general debe contener lo siguiente

HEADER: Registra si la molécula es ADN o proteína.

REMARK: Designa comentarios los cuales pueden dar información relevante.

ATOM: Registra el símbolo del átomo, id de cadena, numero de residuo o nucleótido y coordenadas espaciales x y z.

Para observar un ejemplo de como esta conformado un archivo pdb véase figura 12.

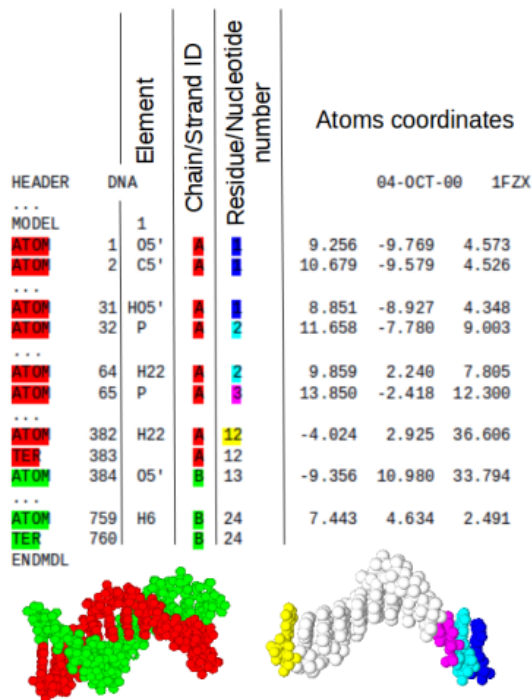


Figura 12: Esquema de un PDB y molecula vista en vmd(visual molecular dynamics)

4.1.2. pdb reader

Esta funcionalidad presente en PDBlib permite leer la estructura molecular de un pdb en Geant4 sin la necesidad de usar otras librerías de terceros, la función se encarga de recolectar la siguiente información: elemento, id de cadena, numero de residuo y coordenadas del átomo, mediante el uso de palabras clave como ATOM y TER[2].

4.1.3. Visualización

Pdb4dna viene preestablecido con la molécula 1ZBB esto debido a que describe la estructura de ADN más grande que se encuentre en formato pdb, el ejemplo hace uso de la geometría de Geant4 simplemente para objetivos de visualización como formas, distribución espacial, materiales y atributos de visualización para cada átomo, por ahora PDB4DNA solo presenta tres modos de visualización, esferas ligadas(baricentros), vista atómica (VDW) y residuos[2].

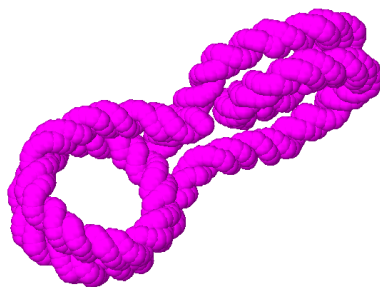


Figura 13: Barycentros

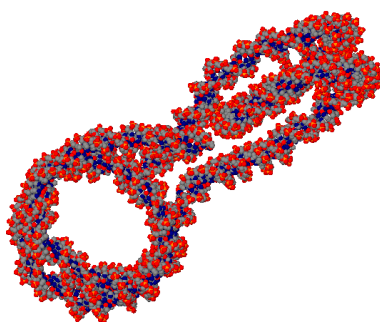


Figura 14: VDW

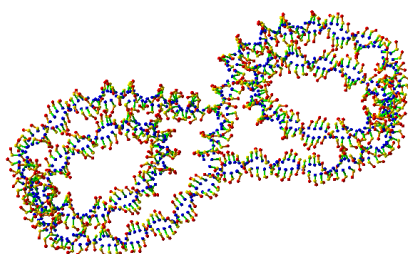


Figura 15: Residuos

4.1.4. Simulación

Debido a que Geant4 no contiene secciones transversales definidas para ADN, las simulaciones son realizadas en agua y las deposiciones de energía resultantes son entonces alocadas en grupos de átomos constituyendo la molécula de ADN, para este propósito se hace uso de un bounding box(caja delimitadora) el cual es un volumen constituido de agua con dimensiones correspondientes a la respectiva molécula de ADN, la lista de física empleada es Geant4-DNA adaptada a micro y nano dosimetría, los procesos de esta extienden la física para electrones, hidrógeno, átomos de helio y algunos iones[2].

4.1.5. Algoritmo para encontrar el atomo más cercano

Es necesario el uso de un algoritmo cuyo objetivo de este es alocar la deposición de energía en un elemento(azúcar base o fosfato) del nucleótido para luego deducir rompimientos de cadena simples y rompimientos dobles. Para empezar se forman múltiples esferas a partir del baricentro geométrico de cada nucleótido, el radio de cada esfera es la máxima distancia entre el baricentro y las coordenadas de los átomos que constituyen el nucleótido, incluyendo el máximo radio de Van der Waals (1.8 Angstrom para el elemento del fósforo), si una deposición de energía es localizada en una esfera ligada un segundo proceso verifica los radios de Van der Waals, para encontrar el átomo del nucleótido más cercano a dicha deposición. debido a que las esferas ligadas de los nucleótidos se superponen , los dos nucleótidos más cercanos son incluidos en el algoritmo, cuando se cumple un evento, el algoritmo retorna la deposición de energía, la cadena de ADN, el id de nucleótido, y el id del grupo sea base, fosfato o azúcar, todo este proceso puede verse con más claridad en las figuras 16 y 17.



Figura 16: Caja delimitadora, lista de esferas, deposición de energía, imagen tomadas de [5]

4.1.6. Rompimientos simples y dobles

El calculo de rompimientos simples se hace a partir de la asunción de que la energía sobrepase un estimado de 8.22 eV en un grupo de azúcar fosfato, es decir en un enlace fosfodiéster, para los rompimientos dobles se asume que la distancia máxima son diez pares base separando dos rompimientos simples en cadenas de

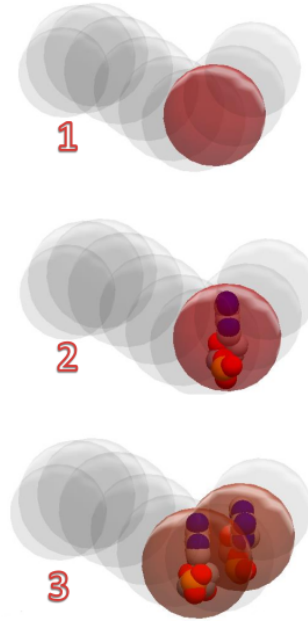


Figura 17: Esferas ligadas y nucleótidos, imagen tomada de [5]

ADN opuestas, cuando esto sucede se considera que ha sucedido un rompimiento doble[2], esto puede ser observado en la figura 18.

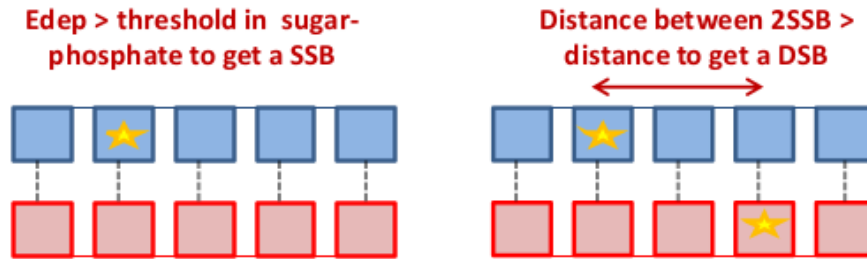


Figura 18: Esquema rompimientos simples y dobles en el ADN, imagen tomada de [5]

Al principio de la simulación se crea un registro para cada cadena de ADN, los valores de dicho registro corresponden a los id de los nucleótidos y la deposición total de energía por cada evento, lo cual se tiene correlación al seguimiento de una partícula primaria y todas sus secundarias, los registros son actualizados cada vez que el algoritmo para encontrar el átomo más cercano se completa correctamente, al final de cada evento, los registros son leídos para computar el numero de rompimientos simples y dobles, cuando la simulación termina se almacena en un histograma de ROOT la energía total de deposición en la caja de agua, y el numero de rompimientos simples y dobles[2], como muestra la figura 19.

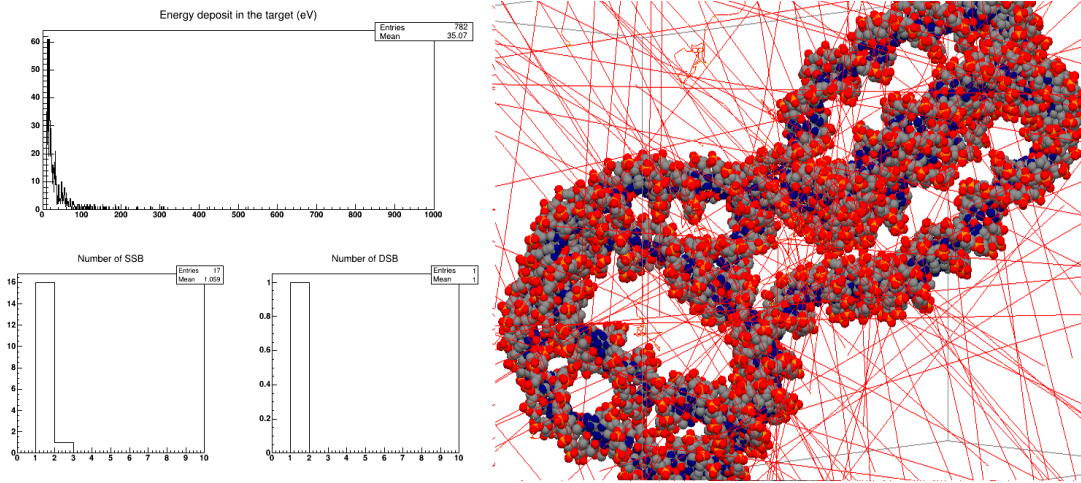


Figura 19: Histograma de Root y visualización en Geant4

4.1.7. Archivos Relevantes

Todos los ejemplos de Geant4 se componen de múltiples archivos cada uno con un propósito, esta sección aborda una explicación de los archivos fundamentales para entender pdb4dna. Un diagrama de flujo con todos los archivos de pdb4dna puede ser visto en la figura 20.

4.1.7.1. PhysicsList Se encarga de llamar la física relevante para cada ejemplo, en este caso se trata de la librería "G4EmDNAPhysics" la cual contiene diversos fenómenos y procesos adaptados para nano y micro dosimetría, algunos de estos fenómenos son dispersión de Compton, dispersión de Rayleigh, efecto fotoeléctrico, etc.

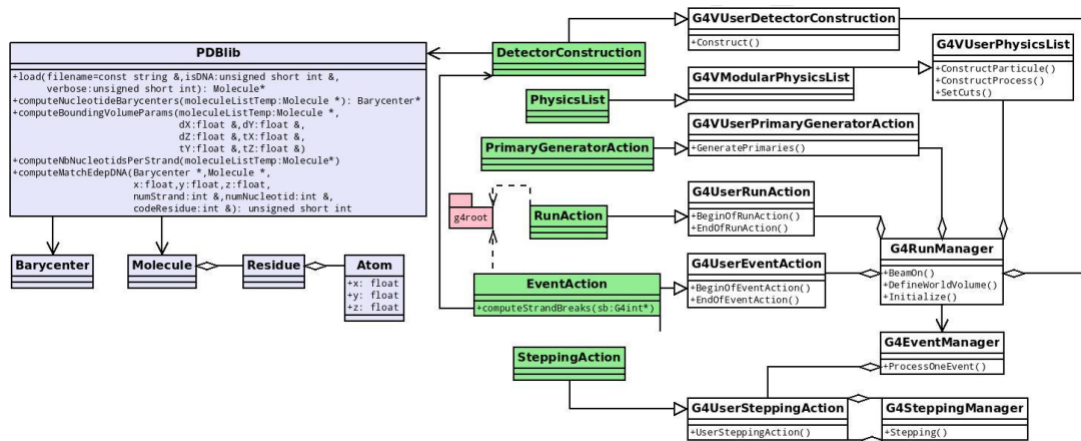


Figura 20: Diagrama de flujo de PDB4DNA:Geant4 user application: Clases virtuales Geant4 (blanco), clases implementadas Geant4 (verde), librería PDB (morado) y interfaz para análisis en Root (rojo), imagen tomada de [2].

4.1.7.2. PDBlib PDBlib es básicamente el corazón de PDB4DNA, es el encargado de leer el archivo de pdb, identificar si este es ADN, luego identifica las diferentes partes de la molécula de ADN como es la base, el fosfato, y el azúcar, y como el resto del código puede identifica estos para llevar a cabo el calculo de rompimientos simples y dobles, ademas de ello se encarga de crear los diferentes tipos de visualización los cuales son exportados a DetectorConstruction, contiene el algoritmo para encontrar el átomo más cercano a la deposición de energía ya mencionado anteriormente.

4.1.7.3. DetectorConstruction En Geant4 este archivo se encarga de crear y posicionar los diferentes volúmenes que sean relevantes para la simulación, en el ejemplo pdb4dna es algo curioso que DetectorConstruction funciona como un archivo más de visualización para crear diferentes representaciones de la molécula de ADN, tal como se observa en las figuras: 13, 14, 15, sin embargo es pertinente mencionar que igual mantiene su objetivo de controlar características relevantes para la simulación como el tamaño del mundo(volumen madre donde se encuentran otros volúmenes) y el bounding box ya mencionado anteriormente.

4.1.7.4. SteppingAction Es el encargado de seguir la deposición de energía en el bounding box, primero el PDBlib se encarga de asignar un numero en base a la estructura del ADN es decir se asignan los valores numéricos: 0 para el fosfato, 1 para el azúcar y 2 para la base, esto se realiza mediante la estructura del pdb, cuando se corre un evento SteppingAction se encarga de calcular la deposición de energía en cada uno de estos, debido a que es un enlace fosfodiester el programa solo retorna los valores de energía depositados en el fosfato o el azúcar, estos valores son enviados a subsecuentes librerías las cuales se encargan de realizar un conteo que consiste en que si la energía sobrepasa el valor de 8.22 eV cuenta como un rompimiento simple y si en 10 pares base en la cadena opuesta se presenta otro rompimiento se toma como rompimiento doble, como se muestra en la figura 18, luego todos estos datos para múltiples eventos son enviados a un archivo Root para la visualización del histograma.

5. Modificaciones PDB4DNA

6. Section X

6.1. Exemplary Citation

In this research we follow [**Ketter2016**]...

A. Appendix

...

Referencias

- [1] Susan Aldridge. *The DNA story*. URL: <https://www.chemistryworld.com/news/the-dna-story/3003946.article>. (accedido: 05.08.2019).
- [2] Delage E y col. "PDB4DNA: Implementation of DNA geometry from the Protein Data Bank (PDB) description for Geant4-DNA Monte-Carlo simulations". En: *Computer Physics Communications* 192 (2015), págs. 282-288. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2015.02.026>.
- [3] Podgorsak E.B. *Radiation Physics for Medical Physicists*. biological and medical physics, biomedical engineering. biological y medical physics, biomedical engineering, 2010. ISBN: 978-3-642-00875-7.
- [4] Alpen Edward. *Radiation Biophysics*. Academic Press, 1997. ISBN: 9780120530854.
- [5] Delage Emmanuel y Perrot Yann. *Hands-on pdb4dna*. URL: http://pdb4dna.in2p3.fr/HandsOn_pdb4dna_vf.pdf. (accedido: 01.09.2019).
- [6] Attix F.H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1986. ISBN: 9780471011460.
- [7] Watson James y Crick Francis. "Molecular Structure of Nucleid Acids". En: *Nature* 4356 (1953), págs. 737-738.
- [8] Henriksen Thormod y Biophysics group at UiO. *Radiation and Health*. URL: <https://www.mn.uio.no/fysikk/english/services/knowledge/radiation-and-health/>. (accedido: 10.09.2019).