

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO**  
**FACULTAD DE MEDICINA**  
**CARRERA DE TECNOLOGÍA MÉDICA**

**“¿Qué es lo que se conoce realmente sobre el  $^{137}\text{Cs}$  en Chile?”**

**Seminario de grado presentando en conformidad a los requisitos  
para obtener el grado académico de  
“Licenciado en Tecnología Médica con mención en Imagenología y Física Médica”**

**Autores:**

**Vanesa Graves Durán**

**Franco Salinas Cortés**

**Catalina Vallebuona Reyes**

**Profesor Guía:**

**TM. Claudio Cuellar Fritis**

**Profesor Co Guía:**

**Ing. Cristóbal Guerrero Lara**

**2021**

**UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO**

**FACULTAD DE MEDICINA**

**CARRERA DE TECNOLOGÍA MÉDICA**

**“¿Qué es lo que se conoce realmente sobre el  $^{137}\text{Cs}$  en Chile?”**

**Seminario de grado presentando en conformidad a los requisitos  
para obtener el grado académico de  
“Licenciado en Tecnología Médica con mención en Imagenología y Física Médica”**

**Autores:**

**Vanesa Graves Durán**

**Franco Salinas Cortés**

**Catalina Vallebuona Reyes**

**Profesor Guía:**

**TM. Claudio Cuellar Fritis**

**Profesor Co Guía:**

**Ing. Cristóbal Guerrero Lara**

**2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Le agradecemos a nuestras familias y amigos por brindarnos todo el apoyo para finalizar este arduo trabajo. Y también a nuestro jefe de carrera Claudio Cuellar porque a pesar de todos los inconvenientes nunca nos dejó solos...*

## DEDICATORIA

*“Le dedicó esta revisión a mi hijo Nicolás, a Alejandro, a toda mi familia y amigos por siempre confiar en mí, darme fortaleza y palabras de aliento cuando lo necesité para no bajar los brazos y poder concluir mi etapa universitaria. Le doy las gracias en especial a mi grupo de tesis, porque a pesar de las dificultades jamás nos dimos por vencidos. Les amo.” Vanesa Graves.*

*“Le dedico esta revisión a todas aquellas personas a las que en algún momento pude pedir un consejo, una opinión o simplemente su ayuda durante todo este periodo.*

*A mi familia, amigos y a mi grupo que pese a todo no nos rendimos...” Franco Salinas.*

*“Le dedico esta revisión a mi familia, especialmente a mi mamá, quienes desde que inicie mi carrera siempre creyeron en mí. A mis amigos, quienes siempre tuvieron una palabra de aliento cuando sentía que no podía más. Y por último a mis compañeros de tesis, Franco y Vanesa, con quienes, a pesar de todo lo que pasamos, pudimos sacar adelante esto.” Catalina Vallebuona.*

## RESUMEN

**INTRODUCCIÓN:** Existen fuentes de emisión radiactiva naturales y fuentes de origen antropogénico, como por ejemplo el armamento nuclear, que se ha asociado a la incorporación de radioisótopos al medio ambiente. La población consume alimentos que se ven influenciados por diferentes fuentes de radiación, ya sea útil como conservación o la proveniente de la contaminación radiactiva ambiental, definida como la incorporación de elementos radiactivos al ambiente. Dentro de estos se encuentra el  $^{137}\text{Cs}$  originado en accidentes o ensayos nucleares y que puede ser transportado vía aérea y/o acuática, para finalmente depositarse en el suelo. Este puede ingresar a la cadena trófica por las plantas y animales, por medio de los cuales es incorporado a los seres humanos; dependiendo de las dosis a las que las personas se vean expuestas puede provocar efectos adversos de variable gravedad y hoy en día existen muy pocos estudios de aquello. **OBJETIVOS:** Con esta revisión se busca sintetizar la dinámica del  $^{137}\text{Cs}$ , desde su origen (primigenio) hasta las implicancias clínicas sobre la salud en el ser humano producto del consumo. **DESARROLLO:** Esta tesis corresponde a una revisión narrativa, en la cual la búsqueda de información fue realizada a través de revistas indexadas como PubMed, Scielo, etc. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN:** El  $^{137}\text{Cs}$  aparece como un subproducto que proviene de fuentes radiactivas y se ha visto transportado a lo largo del planeta; Chile no está exento a esto, siendo el sur una de las zonas más propensas. Parte de los alimentos provenientes de estas zonas se ven influenciados por este radioisótopo, lo que podría provocar un incremento en la dosis efectiva de la población a largo plazo al ser consumidos por la misma. El dilema ético no permite estudios de los efectos del  $^{137}\text{Cs}$  en humanos, sin embargo, es posible estimar la dosis atribuible a incorporación de este radioisótopo, analizando la concentración de actividad en alimentos y correlacionando con la tasa de consumo; además Chile posee reactores nucleares, por lo que no escapa a posibles accidentes. Por estas razones, es necesario que el país indague más a cabalidad sobre las posibles consecuencias que podría traer el consumo de alimentos contaminados con  $^{137}\text{Cs}$ .

## **PALABRAS CLAVE**

<sup>137</sup>Cs, radioisótopos, fallout, movimiento atmosférico, biodisponibilidad, deposición de particulado, modelos biocinéticos, alimentación, implicancias clínicas de la radiación.

## ABSTRACT

**INTRODUCTION:** There are natural sources of radioactive emissions and anthropogenic sources, such as nuclear weapons, which have been associated with the incorporation of radioisotopes into the environment. The population consumes food that is influenced by different sources of radiation, either useful as conservation or from environmental radioactive contamination, defined as the incorporation of radioactive elements into the environment. Among these is the  $^{137}\text{Cs}$  originating in accidents or nuclear tests and that can be transported by air and/or water, to finally be deposited in the soil. It can enter the trophic chain through plants and animals, through which it is incorporated into humans; depending on the doses to which people are exposed, it can cause adverse effects of varying severity and today there are very few studies of this. **OBJECTIVES:** This review seeks to synthesize the dynamics of  $^{137}\text{Cs}$ , from its origin (primordial) to the clinical implications on human health as a result of its consumption. **DEVELOPMENT:** This thesis corresponds to a narrative review, in which the search for information was carried out through indexed journals such as PubMed, Scielo, etc. **DISCUSSION AND CONCLUSION:**  $^{137}\text{Cs}$  appears as a by-product that comes from radioactive sources and has been transported throughout the planet; Chile is not exempt from this, being the south one of the most prone areas. Part of the food coming from these areas is influenced by this radioisotope, which could cause an increase in the effective dose of the population in the long term when consumed by them. The ethical dilemma does not allow studies of the effects of  $^{137}\text{Cs}$  in humans, however, it is possible to estimate the dose attributable to the incorporation of this radioisotope, analyzing the concentration of activity in food and correlating it with the rate of consumption; in addition, Chile has nuclear reactors, so it does not escape possible accidents. For these reasons, it is necessary for the country to investigate more fully the possible consequences that could result from the consumption of food contaminated with  $^{137}\text{Cs}$ .

## **KEY WORDS**

<sup>137</sup>Cs, radioisotopes, fallout, atmospheric movement, bioavailability, particulate deposition, biokinetic models, food, clinical implications of radiation.

## LISTADO DE ACRÓNIMOS

Cs: Cesio

<sup>137</sup>Cs: Cesio 137

CCHEN: Comisión Chilena de Energía Nuclear

INE: Instituto Nacional de Estadística

UUATSDR: Agency for Toxic Substances and Disease Registry - En español: Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades.

CSN: Consejo de Seguridad Nuclear

IAEA: International Atomic Energy Agency - En español: Agencia Internacional de Energía Atómica

UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - En español: Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de la Radiaciones Atómicas

ICRP: International Commission on Radiological Protection - En español: Comisión Internacional de Protección Radiológica.

EEUU: Estados Unidos

TPCEN: Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares

BWR: Boiling Water Reactor - En español: Reactores de agua hirviendo

PWR: Pressurized Water Reactor - En español: Reactores de agua a presión

HTGR: High Temperature Gas Cooled Reactor - En español: Reactores de alta temperatura enfriados con gas

HWR: High Water Reactor - En español: Reactores de agua pesada)

FBR: Fast Breeder Reactor - En español: Reactor de metal líquido o Reactor reproductor rápido

AGR: Gas cooled Reactor - En español: Reactor avanzado refrigerado por gas

CNEN: Comisión Nacional de Energía Nuclear

INES: The International Nuclear and Radiological Event Scale- En español: Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos

CFC: clorofluorocarbonos

CLP: Capa Límite Planetaria

PNT: Predicción Numérica del Tiempo

$^{137}\text{CsCl}$ : Cloruro de  $^{137}\text{Cs}$

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO 2: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	16
2.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	16
2.3 RELEVANCIA .....	16
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS .....	18
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DE ESTUDIO.....	19
4.1 TIPO DE ESTUDIO .....	19
4.2 FUENTES Y MÉTODOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	19
4.3 PROCEDIMIENTOS Y/O ACTIVIDADES.....	20
4.4 FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
CAPÍTULO 5: DESARROLLO .....	21
5.1 INFORMACIÓN GENERAL DEL CESIO Y SU RADIOISÓTOPO <sup>137</sup> Cs.....	21
5.1.1 CARACTERÍSTICAS FISICO-QUÍMICAS DEL GRUPO A1 ....	21
5.1.2 PROPIEDADES PERIÓDICAS .....	22
5.1.3 ISÓTOPOS DE CESIO .....	24
5.2 ORIGEN DEL <sup>137</sup> Cs, SU MOVIMIENTO A TRAVÉS DEL PLANETA Y SU BIODISPONIBILIDAD AMBIENTAL.....	33
5.2.1 ORIGEN DEL <sup>137</sup> Cs AMBIENTAL .....	34
5.2.1.1 ENSAYOS DE ARMAMENTO NUCLEAR .....	34
5.2.1.2 ACCIDENTES .....	36
5.2.2 MOVIMIENTO DEL <sup>137</sup> Cs A TRAVÉS DEL PLANETA.....	40
5.2.2.1 FALLOUT.....	41
5.2.2.2 DINÁMICA DE LA ATMÓSFERA .....	43

5.2.2.2.1 CINÉTICA DEL VIENTO.....	45
5.2.2.3 CICLOS BIOGEOQUÍMICOS.....	50
5.2.2.4 COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DEL FALLOUT .....	53
5.2.3. BIODISPONIBILIDAD Y COMPORTAMIENTO DEL <sup>137</sup> Cs DENTRO DE LA CADENA TRÓFICA .....	55
5.2.3.1. SUELO.....	56
5.2.3.2 DEPOSICIÓN DE <sup>137</sup> Cs EN EL SUELO .....	58
5.2.3.3 TRANSFERENCIA DE <sup>137</sup> Cs ENTRE SERES VIVOS .....	60
5.3 RELACIÓN ENTRE EL <sup>137</sup> Cs Y LA SALUD HUMANA Y SUS IMPLICANCIAS .....	61
5.3.1 MODELOS BIOCINÉTICOS.....	62
5.3.2 POSIBLES IMPLICANCIAS CLÍNICAS .....	66
5.3.2.1 EFECTOS EVIDENCIADOS DEL CESIO EN EL ORGANISMO .....	67
5.3.2.2 EFECTOS EVIDENCIADOS DE LA RADIACIÓN DEL <sup>137</sup> Cs EN EL ORGANISMO.....	68
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	80

## CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

La radioactividad se define como la propiedad de ciertos cuerpos cuyos átomos al desintegrarse espontáneamente emiten radiaciones, siendo su unidad de medida en el sistema internacional el becquerel (1), y corresponde a un fenómeno intrínseco de la tierra y el universo. Además de las fuentes de radiación natural, el hombre también está constantemente expuesto a otros tipos de radiaciones de origen antropogénico, es decir, derivado de la propia actividad humana, como es el caso del desarrollo de armamento nuclear, cuya radiación se ha asociado de forma directa con la incorporación masiva de radioisótopos artificiales al medio ambiente. Los radioisótopos liberados en ensayos de armamento nuclear iniciados en 1945 y en accidentes de centrales nucleares, entre otros, se moviliza hacia la atmósfera y termina por asentarse principalmente por medio de la lluvia radiactiva sobre la superficie terrestre, afectando en zonas continentales y océanos, lo cual se denomina fallout y es la mayor causa de esparcimiento de radiación (2, 3, 4).

A través de los años, la irradiación en los alimentos ha sido utilizada como una alternativa de conservación alimentaria, por medio de irradiación a través de fotones de un radioisótopo, que resulta en la destrucción de organismos patógenos que se puedan encontrar en los alimentos, siendo beneficioso para los seres humanos. Sin embargo, los alimentos también se han visto expuestos a la radiación provenientes de la contaminación por radioisótopos derivados de otras fuentes artificiales, este tipo de radiación es la que cobra mayor protagonismo en comparación a la radiación proveniente de fuentes naturales, ya que es posible encontrarlos en el agua, ser consumido por los animales e incorporarse a muchos tipos de alimento (7, 9). El efecto que puede recibir la población está directamente relacionado al tipo de exposición que esta reciba, ya que la irradiación de alimentos no afecta al ser humano; por otra, parte el consumo de alimentos que han sido expuesto a trazas de contaminación radiactiva derivados del fallout, si resulta en una exposición a la radiación proveniente de radioisótopos artificiales.

La contaminación se define como el cambio perjudicial en las características físicas, químicas y biológicas de la tierra, el agua y el aire, lo que podría afectar o afecta nocivamente al ecosistema y a la vida humana. Estos cambios se deben a la incorporación de cualquier sustancia o forma de energía con potencial para provocar daños, irreversibles o

no, en el medio receptor, siendo considerada la contaminación radiactiva ambiental como la incorporación de elementos radiactivos, llamados radioisótopos que emiten radiación ionizante, en un componente ambiental determinado (biológico, hidrológico, geológico o atmosférico). Aproximadamente 65 elementos de la tabla periódica pueden generar isótopos radiactivos mediante procesos de fisión o activación, donde parte de estos radioisótopos se utilizan en aplicaciones industriales, agricultura, medicina o como combustible para reactores nucleares (2) los cuales, dada algunas características propias del agua, aire y hielo, pudieran ser transportados grandes distancias.

El Cesio (Cs) radiactivo se produce utilizando combustible nuclear de fisión durante el funcionamiento normal de un reactor nuclear o al detonar armamento nuclear, de todos sus isótopos el más importante es el  $^{137}\text{Cs}$  por su largo periodo de semidesintegración, que al buscar la estabilidad emite radiación de tipo Beta negativo, y producto de explosiones que impliquen material radiactivo este fue liberado al medio ambiente como fallout. Por su parte, el aire es el principal mecanismo de transporte de radioisótopos, los que por procesos naturales terminarán por depositarse sobre la superficie terrestre (5); el agua, por ejemplo de ríos, puede transportar radioisótopos al igual que el aire por su gran capacidad de fluidez y causar deposiciones húmedas/secas (6); finalmente el hielo, que durante su proceso de formación puede incorporar sedimentos y radioisótopos a su estructura, y dada su capacidad de interceptar otros radioisótopos durante su deriva oceánica, puede transportarlos a través de grandes distancias (3). Los compuestos del Cs se unen fuertemente a la mayoría de los suelos y no descienden muy por debajo de la superficie, por lo que el  $^{137}\text{Cs}$  no está disponible para la absorción de vegetación que posea raíces profundas, sin embargo, la mayoría de los compuestos son muy hidrosolubles, por lo que, cuando el  $^{137}\text{Cs}$  entra en contacto con la superficie de las hojas puede entrar en las plantas sin mayor oposición (7).

Si una persona se acerca, toca, inhala o ingiere el radioisótopo  $^{137}\text{Cs}$ , una vez ingresado al organismo, entra en contacto con mucosas del cuerpo y es absorbido, pudiendo llegar a diferentes tejidos mediante la circulación sanguínea, y dado a un similar comportamiento al del potasio, interferir en procesos que impliquen señales eléctricas, como funciones musculares y nerviosas. Cuando la concentración de  $^{137}\text{Cs}$  a la que se ha

estado en contacto son significativas, como es el caso de la irradiación de cuerpo completo o incorporación de material radiactivo, la persona puede experimentar el síndrome de radiación aguda, el cual se caracteriza por náuseas, vómitos, diarrea, sangrado o hasta la muerte. Diversos estudios han demostrado una relación directa entre el incremento de casos oncológicos y la exposición a la radiación proveniente tanto de fuentes naturales y/o artificiales, convirtiéndose en un tema de gran relevancia en la actualidad para los organismos de regulación sanitaria y epidemiológica (7, 8, 10).

Como se mencionó anteriormente, los radioisótopos son capaces de repercutir de forma muy negativa en la salud de la población, por lo que, ante la escasa información existente en publicaciones científicas; las investigaciones al respecto resultarán de gran importancia para dejar en evidencia esta problemática que afecta la salud pública. Es así como esta revisión pretende aportar información sobre la influencia que puede tener la exposición por incorporación del radioisótopo  $^{137}\text{Cs}$ , buscando de esta manera evidenciar la necesidad de realizar futuras investigaciones y el establecimiento de políticas públicas sobre este radioisótopo.

## CAPÍTULO 2: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel mundial, no existen muchas investigaciones que aludan a los daños que pueden recibir las personas por el consumo de isótopos radiactivos como  $^{137}\text{Cs}$  a través de la ingesta de alimentos o bebidas. Eventos desde pruebas de armamento nuclear como los realizados en la polinesia francesa hasta desastres nucleares recientes que se han producido en las últimas décadas tales como Chernobyl en 1986 y/o Fukushima en 2011, han causado que las concentraciones ambientales de  $^{137}\text{Cs}$  haya aumentado de forma masiva en la biosfera mundial, lo que está generando una exposición alimentaria cuya dosis que no ha sido estimada aún en Chile, ya que, en condiciones normales, este radioisótopo no se encuentra en la naturaleza.

A continuación, se detallarán los elementos pertenecientes al problema de investigación.

### 2.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la información que existe sobre la incorporación de  $^{137}\text{Cs}$  a través de la ingesta de alimentos contaminados y su efecto sobre la salud de las personas?

### 2.3 RELEVANCIA

El  $^{137}\text{Cs}$  es uno de los isótopos radiactivos del elemento Cs, que se forma por la fisión de Uranio en las centrales nucleares o por las pruebas de detonación de armamento nuclear. Este isótopo, toma importancia por ser inestable, por lo que alcanzará la estabilidad nuclear tras un proceso denominado *desintegración radiactiva* a través de emisión de partículas beta y fotones gamma. Además de ello, posee un periodo de semidesintegración físico de aproximadamente **30 años**, lo que se traduce en un largo período emitiendo radiación en el ambiente, sugiriendo un riesgo para quienes se encuentren expuestos, y una vida media biológica de aproximadamente **110 días**, por lo que permanece en el cuerpo por un período prolongado.

Además, la imposibilidad de experimentación con humanos, por cuestiones éticas, también es una limitación a la hora de obtener más información acerca de los efectos biológicos que puedan repercutir en la salud de la población, existiendo solo

investigaciones sobre accidentes nucleares en las que se vieron involucradas personas frente a estos hechos. A ello, sumado el corto periodo de tiempo transcurrido entre las emisiones ambientales de Cs, no se ha cuantificado el daño que este podría llegar a tener en los biomas, además de las concentraciones y actividades de este radioisótopo tampoco han sido determinadas, lo que también conlleva a una falta de información.

De acuerdo, a los antecedentes encontrados en la base de datos gubernamentales, existe la presencia de  $^{137}\text{Cs}$  en ciertos grupos de alimentos ingeridos por la población chilena, pero no existen estudios publicados que indiquen cuál es la dosis de radiación a la que la población está expuesta al ingerir este grupo de alimentos; y la normativa sanitaria vigente no abarca completamente los lineamientos que se deberían seguir sobre este tema.

## **CAPÍTULO 3: OBJETIVOS**

A continuación, se especificarán los objetivos de esta revisión.

### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Sintetizar la dinámica del  $^{137}\text{Cs}$ , desde su origen (primigenio) hasta las implicancias clínicas sobre la salud en el ser humano producto de su incorporación.

### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Describir la información general del Cesio y su radioisótopo  $^{137}\text{Cs}$ .
- b. Explicar el origen del  $^{137}\text{Cs}$ , su movimiento a través del planeta y su biodisponibilidad ambiental.
- c. Describir la relación entre el  $^{137}\text{Cs}$  y la salud humana y sus implicancias clínicas.

## **CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

A continuación, se detallará la metodología de estudio

### **4.1 TIPO DE ESTUDIO**

La presente investigación se desarrollará como un estudio bibliográfico denominado Revisión Narrativa, en el cual la obtención de información se lleva a cabo a través de fuentes secundarias de información. Este tipo de estudio permite explorar, describir y discutir de manera amplia la información referente a un tema, por medio de un proceso cronológico y evolutivo al momento de la narración. Otra forma de referirse a la Revisión Narrativa es mediante el término “opinión científica”, ya que los autores tienen plena libertad de elección de la información que formará parte del estudio. Además, los investigadores tienen la facultad de realizar un examen crítico del estado de los conocimientos que se encuentran en la literatura, sin la necesidad de hacer una declaración de los artículos empleados ni la metodología de búsqueda. Todo lo anterior hace que la interpretación esté sujeta a la subjetividad, por lo que no se recomienda su uso en la toma de decisiones.

### **4.2 FUENTES Y MÉTODOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

La principal fuente de información para la realización de este estudio será secundaria, ya que al ser una revisión de tipo narrativa no se hace necesario el uso de otras fuentes. El método de recolección de datos será mediante la extracción de información directamente desde las organizaciones internacionales o de revistas indexadas relacionadas al tema en estudio.

Los términos usados fueron: “Cesium”, “Cesium chemical properties”, “properties group A1”, “Radiocesium”, “Cesium 137”, “Cesium isotopes”, “Radioactivity” XOR “Nuclear testing”, “Nuclear accidents”, “Environmental radioactive disasters” AND “Atmospheric cesium”, “Stratospheric cesium”, “Fallout”, “Stratospheric fallout”, “Atmosphere”, “Radioactive environmental contamination”, “Environmental cesium”, “Cesium and ecosystem” AND “Water cycle”, “Air cycle”, “Wind dynamics”, “Biogeochemical cycles” AND “Fallout deposition in soil”, “Cesium 137 in plants”,

“Cesium 137 in animals” XOR “Biokinetic models”, “Biokinetic models of cesium”, “Cesium in the body”, “Cesium in the organism”, “Cesium 137 in the human”, “Adverse effects of cesium in the human organism” AND “Adverse effects of radiation”. La búsqueda de fuentes se limitó a los idiomas español e inglés.

### **4.3 PROCEDIMIENTOS Y/O ACTIVIDADES**

El primer paso de nuestro estudio será la búsqueda de información referente a cada capítulo, descritos más adelante. Después, se realizará un análisis de las fuentes para determinar qué secciones usaremos en la redacción de cada capítulo. Tras tener las fuentes analizadas, decidiendo que se usará, se procederá con la redacción de los capítulos de forma cronológica y/o narrativa.

Nuestras fuentes de información se basarán principalmente en revistas indexadas tales como PubMed, ScienceDirect (Elsevier), Scielo, etc.; Así como también de entidades internacionales como UNSCEAR, ICRP, AIEA, entre otras; Además de datos sacados de instituciones nacionales como CCHEN e ISP.

A continuación, realizaremos una discusión de los capítulos sobre la información más relevante de nuestra investigación. Por último, agregaremos bibliografía anexa sobre tópicos relacionados al problema de investigación.

### **4.4 FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN**

Se espera que los gastos asociados a la investigación sean mínimos, considerando internet y pagos para la revisión de documentos, los cuales serán costeados por los alumnos tesistas. Por otro lado, el equipo de investigación no recibirá ningún financiamiento para la ejecución del estudio.

Desde el punto de vista técnico, se espera satisfacer todos los requisitos que necesite el proyecto, mediante el uso de computadores para la búsqueda de información y acceso a internet. Debido al tipo de estudio a realizar, no se necesita aprobación de tipo ética de instituciones hospitalarias o la propia universidad.

Los alumnos tesistas esperan completar el seminario de grado, antes del término del presente año.

## CAPÍTULO 5: DESARROLLO

### 5.1 INFORMACIÓN GENERAL DEL CESIO Y SU RADIOISÓTOPO

#### $^{137}\text{Cs}$

El Cesio (Cs) es un elemento químico de aspecto oro-plata que pertenece al grupo 1 de los metales alcalinos, cuyo número atómico es el 55 entre los elementos representativos, es decir, aquellos elementos químicos de los grupos largos de la tabla periódica, todos ellos representados por la letra “A”. De la misma forma que los elementos de su mismo grupo, el Cs comparte propiedades comunes con ellos, por lo tanto, es posible predecir cuál será su comportamiento bioquímico al estar en contacto con los seres vivos.

#### 5.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DEL GRUPO A1

El grupo A1 o grupo de los metales alcalinos es aquel en que todos los elementos son metales brillantes; al igual que cualquier metal, poseen conductividad eléctrica y térmica elevada. Por otro lado, los metales alcalinos son muy poco comunes, muy maleables y con bajo punto de ebullición, todo esto se ve más acentuado conforme vaya descendiendo su posición dentro del grupo (Tabla 5.1). La ductilidad y bajo del punto de ebullición de estos metales se puede atribuir a los enlaces metálicos débiles de estos elementos, para un metal “típico” la entalpía de atomización es mayor en comparación a la de los elementos de este grupo.

La densidad de los metales alcalinos es otro punto de comparación, en general los metales tienen una densidad que varía entre 5 y 15  $\text{gr}/\text{cm}^3$ . Sin embargo, para los elementos del grupo A1 la densidad alcanza valores mucho más bajos que el promedio, como es el caso del Cs que posee una densidad de aproximadamente 1.87  $\text{gr}/\text{cm}^3$ . Sumado a su baja densidad, estos metales presentan una elevada reactividad química, sobre todo con los elementos no metálicos, como por ejemplo el Oxígeno.

Como se mencionó anteriormente, los elementos pertenecientes al grupo A1 comparten ciertas características en común, las cuales se explican a continuación.

*Carácter iónico.* Los iones de metales alcalinos siempre tienen un número de oxidación  $+1$  y casi todos sus compuestos son sólidos iónicos estables. Aunque estos elementos son

altamente electropositivos, los enlaces de sus compuestos con no metales tienen un pequeño componente covalente.

*Estabilización de aniones grandes con carga baja.* Dado que los cationes de los metales alcalinos se encuentran entre los que tienen más baja densidad de carga, estos son capaces de estabilizar aniones grandes con cargas bajas, por ejemplo, los iones del sodio al cesio son los únicos cationes que forman sales de hidrógeno carbonato sólidas.

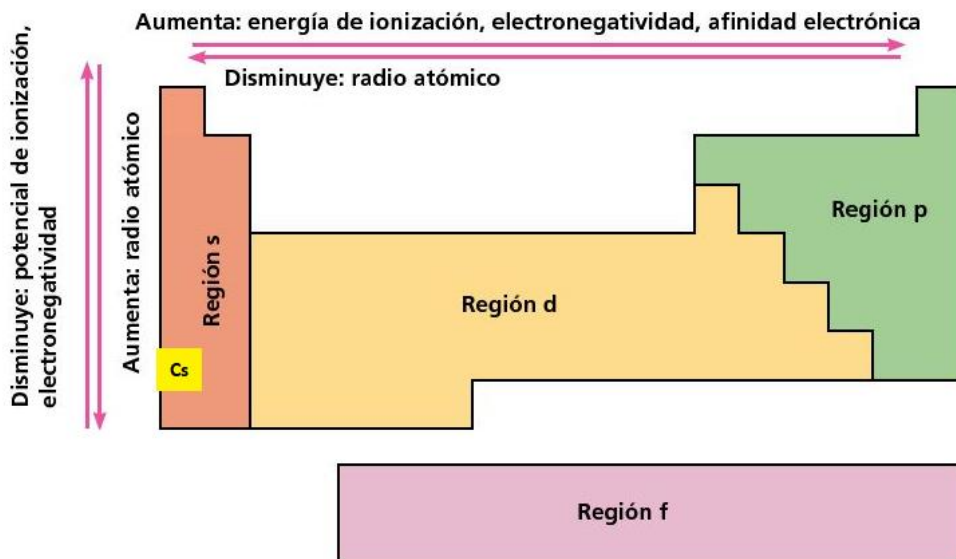
*Solubilidad.* Los metales alcalinos en su mayoría son solubles en agua, pero lo son en diferentes grados, esta tendencia se explica en base al ciclo de energía que interviene en la formación de solución a partir de un sólido. Esta característica hace que los elementos de este grupo sean útiles como reactivos en los laboratorios de química, ya que siempre se podrá contar con la sal del metal alcalino que permitirá preparar una solución de anión requerida.

### 5.1.2 PROPIEDADES PERIÓDICAS

La tabla periódica es una representación esquemática de los elementos químicos de acuerdo con un único criterio: **el número atómico (Z)**. Estos elementos son ordenados en la tabla periódica dispuestos en periodos y grupos, en donde ambos comparten ciertas características fisicoquímicas. Entonces, al determinar la ubicación de un elemento en la tabla, ya sea en un periodo o en un grupo, es posible predecir tanto sus propiedades fisicoquímicas como su comportamiento químico.

Las propiedades periódicas que existen son: Radio atómico, Afinidad electrónica, Energía de ionización, Estructura electrónica, Electronegatividad, Carácter metálico y Valencia iónica (11) (Fig. 5.1).

**Figura 5.1:** Propiedades periódicas con respecto al Cesio



*Figura 5.1: Comportamiento de las propiedades periódicas desde la posición en la que se encuentra el Cs (Fuente: Ortega, G. “Propiedades periódicas de los elementos”. ABC. Editorial AZETA S.A. Asunción, Paraguay. [Internet]. 2014. [Citado el 11 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/propiedades-periodicas-de-los-elementos-1227981.html>)*

En la siguiente tabla se nombran algunas propiedades de los elementos pertenecientes al grupo IA.

**TABLA 5.1:** Propiedades periódicas de los metales alcalinos

PROPIEDAD	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr
Número Atómico (Z)	3	11	19	37	55	87
Configuración electrónica en el estado fundamental	[He]2s <sup>1</sup>	[Ne]3s <sup>1</sup>	[Ar]4s <sup>1</sup>	[Kr]5s <sup>1</sup>	[Xe]6s <sup>1</sup>	[Rn]7s <sup>1</sup>

<b>Entalpía de atomización,</b> $\Delta H^{\circ}_{fus}$ (298K)/KJ mol <sup>-1</sup>	161	108	90	82	78	75
<b>Punto de fusión, pf/K</b>	453,5	371	336	312	301,5	300
<b>Punto de ebullición, pe/K</b>	1615	1156	1032	959	942	950
<b>Primera energía de ionización, EI<sub>1</sub>/kJ mol<sup>-1</sup></b>	520,2	495,8	418,8	403,0	375,7	392,96
<b>Radio metálico, r<sub>metal</sub>/pm<sup>†</sup></b>	152	186	227	248	265	-
<b>Radio iónico, r<sub>ion</sub>/pm*</b>	76	102	138	149	170	194

Tabla 5.1: Se definen los diferentes valores que poseen las propiedades periódicas de los metales alcalinos (grupo AI de la tabla periódica). (Fuente: Housecroft C, Sharpe A. *Química inorgánica. 2nd ed. Madrid: Pearson educación S.A; 2006.*)

### 5.1.3 ISÓTOPOS DE CESIO

Para comprender los procesos relacionados con la radiación ionizante debemos recordar los componentes de los átomos, estos están formados por el núcleo y la nube electrónica; en la primera encontramos los nucleones, correspondientes a los protones y neutrones, y en la segunda los electrones. La representación de un nucleido está definida por  ${}^A_ZX$ , donde Z es el número atómico, es decir, el número de protones que tiene el núcleo y A es el número másico que corresponde a la suma del número de protones y de neutrones que lo forman. Además, podemos definir el número de neutrones (N) como  $N=A-Z$ .

Por otra parte, tenemos nucleidos de un mismo elemento que poseen el mismo número de protones, pero pueden tener números másicos diferentes, es decir, varía en el número de neutrones. Por lo tanto, constituyen el mismo elemento y se ubican en el mismo lugar en la tabla periódica; a este concepto se le denomina, **Isótopo**. Los isótopos de algunos elementos se dan en la naturaleza mientras que otros pueden obtenerse de manera artificial. Además, se pueden clasificar en:

- A. Isótopos estables, no se descompone al pasar el tiempo
- B. Isótopos inestables que son radiactivos, es decir, emite radiación durante el proceso que permite llegar a la estabilidad de su núcleo transformándose en otro nucleido.

Para poder comprender de mejor manera como los isótopos inestables son capaces de emitir radiación es importante entender algunos conceptos fisicoquímicos:

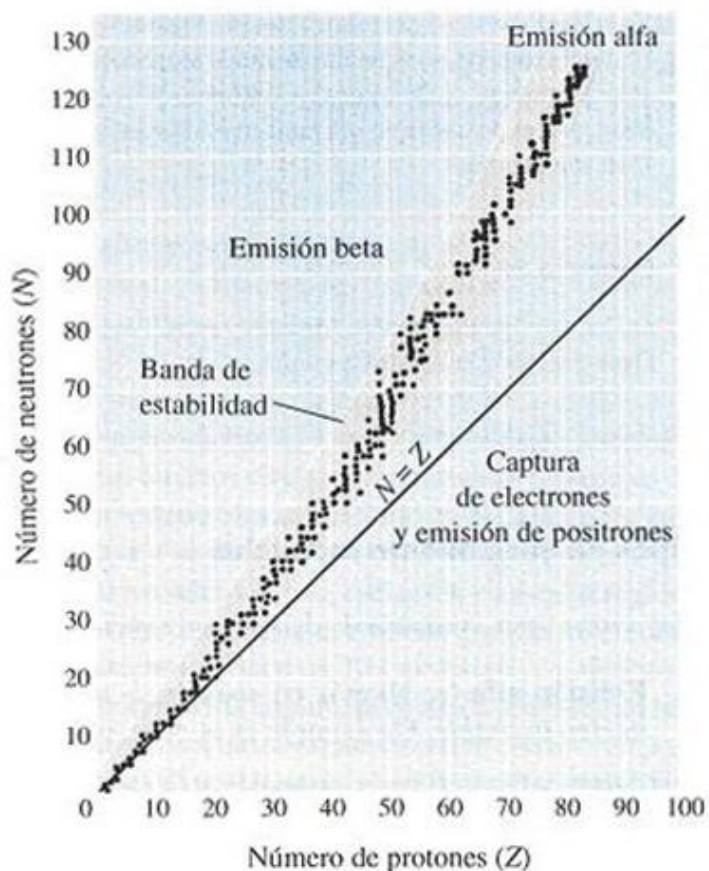
*Radiactividad.* La RAE lo define como “Propiedad de ciertos cuerpos cuyos átomos, al desintegrarse espontáneamente, emiten radiaciones, y cuya unidad de medida en el sistema internacional es el *becquerel (Bq)*” (1). Fue propuesto por Marie Curie para describir la emisión de radiación ionizante de algunos metales pesados, está al interaccionar con la materia tiene la capacidad de producir iones, es decir, es lo suficientemente energética como para romper los enlaces químicos; esta radiación puede estar formada por partículas u ondas electromagnéticas.

*Estabilidad nuclear.* El núcleo está formado por los protones, que tienen carga positiva y por los neutrones que no poseen carga. Las fuerzas repulsivas entre las cargas de los protones harían que un núcleo fuese inestable. Los protones se mantienen unidos gracias a una fuerza de atracción entre los nucleones llamada *interacción nuclear fuerte*, en la que participan íntimamente los neutrones, esta interacción se caracteriza por ser de corto alcance, es atractiva y no depende de la carga y su intensidad es muy elevada, es cien veces mayor que la fuerza electromagnética.

Se cree que los neutrones proporcionan una fuerza nuclear de unión entre protones y neutrones formando una unidad estable. Sin los neutrones, las fuerzas electrostáticas de repulsión entre los protones cargados harían que el núcleo estallara. Para los elementos con números atómicos bajos, hasta aproximadamente 20, el número de

neutrones necesarios para que el núcleo se mantenga estable es aproximadamente igual al número de protones. A medida que el número atómico va aumentando, es necesario mayor cantidad de neutrones para mantener la estabilidad del núcleo, obteniendo una razón neutrones/protones ( $N/Z$ ) mayor. Para los números atómicos por encima del 83, el núcleo es inestable, independientemente del número de neutrones presentes, por lo tanto, todos los isótopos de los elementos conocidos con  $Z > 83$  son radiactivos.

**Figura 5.2:** Estabilidad de los núclidos



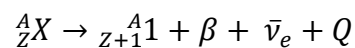
*Figura 5.2: Se observa la estabilidad que poseen los núclidos hasta el valor de  $Z = 83$ . Después de este valor, sobrepasan la franja, perdiendo estabilidad. (Fuente: Candia. S. "Estabilidad Nuclear". Santiago, Chile. [Internet]. 2009. [Citado el 14 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/escolar/propiedades-periodicas-de-los-elementos-1227981.html>)*

Los núcleos estables se encuentran dentro de la franja de estabilidad, en ella podemos encontrar algunos radioisótopos, pero la gran mayoría se encuentra fuera y se indica su forma de decaimiento radiactivo. Los nucleidos estables de números atómicos bajos se encuentran sobre o cerca la franja  $N=Z$ , la razón neutrón-protón de estos es sobre o cercana a uno, mientras que para los que poseen números atómicos mayores esta razón aumenta hasta alrededor de 1,5 (Fig. 5.2) (12).

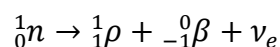
*Modos de decaimiento.* Cuando un núcleo se encuentra en un estado energéticamente inestable perderá energía, ya sea por emisión de partículas o por ondas electromagnéticas, por medio de un proceso llamado *decaimiento radiactivo* (12, 13).

Existen diferentes formas de decaimiento, siendo las principales: partículas alfa ( $\alpha$ ), partículas beta ( $\beta^-/\beta^+$ ), captura electrónica y rayos gamma ( $\gamma$ ), en donde se hará referencia al nucleido que decaerá como “padre” y al producto como “hijo”. A continuación, se definen las formas que tienen importancia en la desintegración del radiocesio:

- a. Partículas beta ( $\beta^-/\beta^+$ ): En los primeros estudios del decaimiento beta se observó que estos corresponden a la emisión de un electrón por un núcleo padre, donde las partículas emitidas poseen un espectro continuo. Esto quiere decir que para que se conserve la energía y momento lineal durante el proceso es necesaria la emisión de otra partícula junto al electrón. Pauli sugirió que esta partícula debía poseer una masa casi nula, un espín  $\frac{1}{2}$  y su interacción con la materia debía ser muy pequeña, y esta recibió el nombre de neutrino ( $\nu_e$ ). La partícula que se emite junto con el electrón es el antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ) de electrón, por lo tanto, un decaimiento  $\beta^-$  en el que el núcleo hijo se forma en el estado fundamental se puede indicar como:



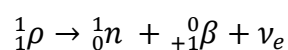
A nivel nuclear lo que ocurre es:



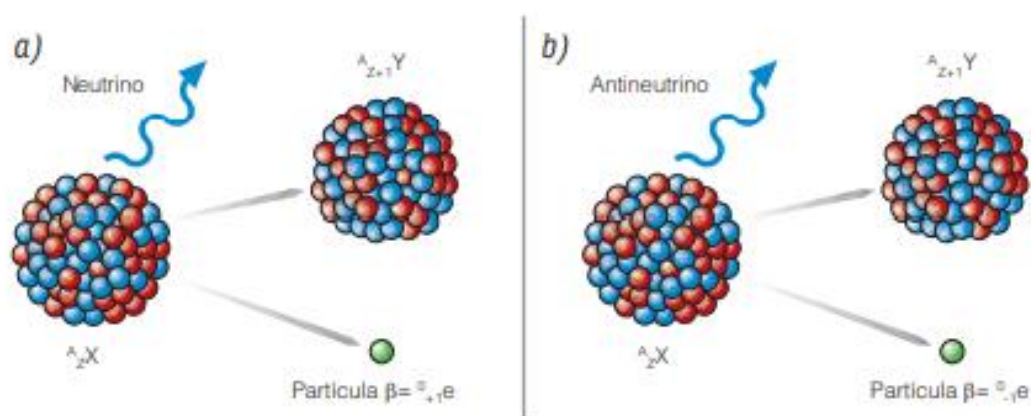
Las partículas  $\beta$  son desviadas por campos magnéticos y eléctricos, pero en dirección opuesta a las partículas  $\alpha$ , al poseer menos masa son más fácilmente

desviadas que estas últimas. Además, tienen mayor poder de penetración, por lo que se necesita una placa de aluminio o la piel para detenerlas.

De manera análoga, en algunos procesos de desintegración, un protón dentro del núcleo se convierte en neutrón y son emitidos como  $\beta^+$  y su respectivo neutrino. La partícula  $\beta^+$  o positrón, tiene propiedades similares a las de la partícula  $\beta^-$  exceptuando la carga, que es positiva. Esta partícula también llamada electrón positivo, se designa como  ${}_{+1}^0\beta$  en las ecuaciones nucleares. A nivel nuclear este tipo de decaimiento lo podemos indicar como:

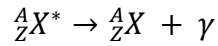


**Figura 5.3:** Desintegración beta. a) positiva, b) negativa



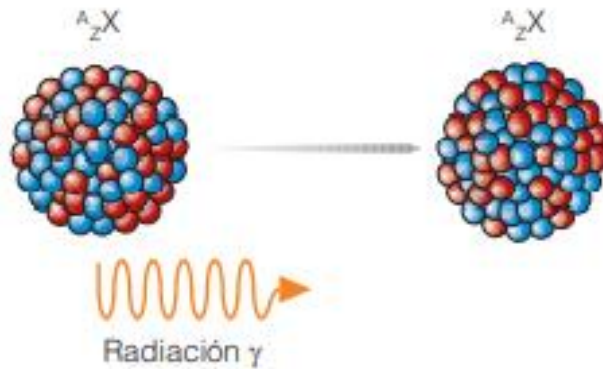
*Figura 5.3: a) Esquema de la desintegración beta positiva, liberándose un electrón y una partícula llamada antineutrino. b) Esquema de la desintegración beta negativa, liberándose un positrón y una partícula llamada neutrino. (Fuente: Petrucci, R. Química General. 10ma ed. Pearson educación S.A. Madrid, España. 2011. [Citado el 30 de agosto de 2020])*

- b. Rayos gamma ( $\gamma$ ): Los procesos de desintegración  $\alpha$  o  $\beta$  en algunos casos dejan al núcleo en un estado excitado, perdiendo energía en forma de radiación electromagnética llamada rayos gamma. En este proceso el núcleo pasa del estado excitado ( $X^*$ ) al estado fundamental ( $X$ ), por lo tanto, no cambia el número másico ni el atómico, se representa de la siguiente forma:



Los rayos gamma son una forma de radiación muy penetrante y no son desviados por los campos magnéticos ni eléctricos, son necesarias varias láminas de plomo de bastantes centímetros para poder atenuarlos.

**Figura 5.4:** Desintegración gamma



*Figura 5.4: Representación de la liberación de radiación gamma al existir un proceso de desintegración gamma. (Fuente: Petrucci, R. Química General. 10ma ed. Pearson educación S.A. Madrid, España. 2011. [Citado el 30 de agosto de 2020])*

*Velocidad de desintegración radiactiva.* No es posible predecir cuándo se desintegran todos los núcleos atómicos de un radioisótopo en particular. Sin embargo, es posible predecir su desintegración mediante un método estadístico para un colectivo de átomos, conocido como Ley de desintegración radiactiva. Esta ley se define como: la velocidad de desintegración de un material radiactivo, denominada actividad (A) o velocidad de desintegración, y es directamente proporcional al número de átomos. En términos matemáticos,

$$A = -\lambda N$$

donde A es la actividad de la muestra expresada en átomos por unidad de tiempo, N es el número de átomos de una muestra observada y  $\lambda$  es la constante de desintegración expresada en unidades de *tiempo*<sup>-1</sup>.

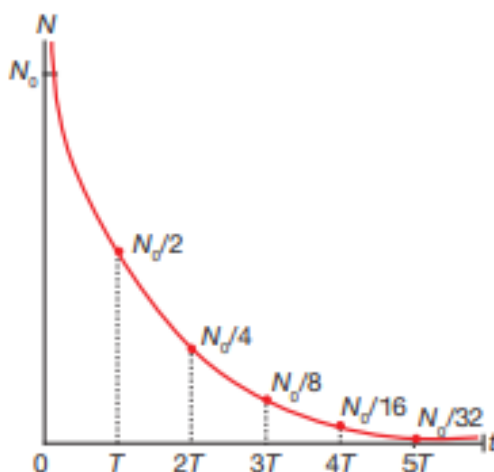
Este proceso de desintegración no se ve afectado por las condiciones externas, tales como presión, temperatura y composición química de la muestra.

Si una muestra de un radioisótopo está formada por  $N_0$  núcleos y, después de un tiempo  $t$ , queda  $N$  núcleos sin desintegrar, se puede demostrar que se cumple

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Por otro lado, se tiene el periodo de semidesintegración  $T_{1/2}$ , que es el tiempo que tarda la mitad de los núcleos de una muestra en desintegrarse, para ello se cumple que  $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ .

**Figura 5.5:** Gráfico de desintegración exponencial



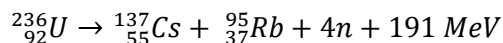
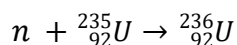
*Figura 5.5: Se observa que los núcleos radiactivos se desintegran siguiendo una ley exponencial, que se puede interpretar que al pasar un tiempo igual al periodo de semidesintegración quedan la mitad de los núcleos. (Fuente: Petrucci, R. Química General. 10ma ed. Pearson educación S.A. Madrid, España. 2011. [Citado el 30 de agosto de 2020])*

*Reacciones nucleares, Fisión Nuclear:* Es un tipo de transmutación nuclear en la que núcleos pesados se dividen dando lugar a otros núcleos más ligeros. Los núcleos como el uranio y el plutonio, situados a la derecha de los más estables (Fig. 5.2), pueden transformarse en núcleos menos pesados y más estables, liberando una gran cantidad de energía.

El cesio natural consiste en el isótopo estable  $^{133}\text{Cs}$  y tiene alrededor de 40 radioisótopos artificiales que van desde el  $^{111}\text{Cs}$  al  $^{152}\text{Cs}$ . De todos ellos, el  $^{137}\text{Cs}$  es el más conocido y utilizado. (Tabla 5.2)

Cuando el  $^{235}\text{U}$  se somete a fisión, ya sea dentro de un reactor nuclear o en una ojiva de armamento nuclear, se genera una gran variedad de subproductos donde sus masas varían entre 95 y 137 (56). Dentro de los fragmentos más comunes encontramos al  $^{137}\text{Cs}$ , el cual es considerado peligroso debido a su largo período de semidesintegración, de alrededor de 30 años, permaneciendo varios cientos de años en la biósfera. Además, en términos ambientales puede generar diversos efectos a largo plazo, ya que su alta solubilidad le permite una fácil movilidad y extensión en la naturaleza (13).

Como se ha descrito antes, cuando el  $^{235}\text{U}$  se somete a fisión produce una gran cantidad de energía debido a que los fragmentos de la misma poseen menos masa total que el núcleo de uranio. Entonces, explicando la reacción nuclear involucrada en la producción del subproducto  $^{137}\text{Cs}$  tenemos:



La fisión produce fragmentos de masa intermedia, un promedio de 2,4 neutrones y una energía promedio de alrededor de 215 MeV. El  $^{137}\text{Cs}$  intenta estabilizarse mediante un decaimiento  $\beta$  a  $^{137}\text{Ba}$ , de estos el 94.6% se produce a través de un estado excitado metaestable del Bario,  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , el cual emite radiación  $\gamma$  de 661,6 keV con un periodo de semidesintegración de 156 segundos, pasando así a su estado fundamental. El restante 5.4% pasa directamente al estado fundamental del Bario, como se muestra en la figura 5.6. Los electrones emitidos poseen una energía máxima de 513,97 keV y 1175,6 keV (13).

**Figura 5.6:** Decaimiento del  $^{137}\text{Cs}$

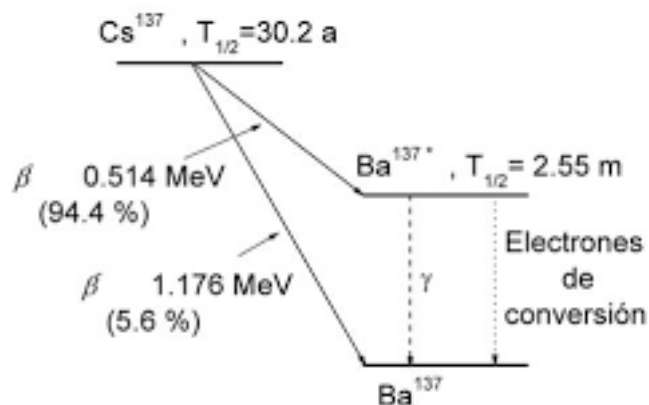


Figura 5.6 Curva de decaimiento del  $^{137}\text{Cs}$ , resultado en  $^{137}\text{Ba}$ . (Fuente: Petrucci, R. *Química General*. 10ma ed. Pearson educación S.A. Madrid, España. 2011. [Citado el 30 de agosto de 2020])

**TABLA 5.2:** Isótopos de Cesio

ISÓTOPO	$T_{1/2}$	Tipo de Decaimiento	Energía de las partículas de desintegración MeV (intensidades relativas)	Creación o formación
$^{133}\text{Cs}$	Estable		100% abundancia	
$^{134m}\text{Cs}$	3,1 h	IT 99% $\beta^- \sim 1\%$	$\beta^- \sim 0.55$ $\gamma$ 0.0105 (98%), 0.127 (98%), 0.137 (0.8%)	$^{133}\text{Cs}$ (n, $\gamma$ ) $^{133}\text{Cs}$ (d, p)
$^{134}\text{Cs}$	2,2 h	$\beta^-$	$\beta^-$ 0.083 (32%), 0.31(5%), 0.665 (50%), 0.683(13%) $\gamma$ 0.473 (1.8), 0.563(9), 0.569(13), 0.605 (100),	$^{133}\text{Cs}$ (n, $\gamma$ ) $^{133}\text{Cs}$ (d, p) $^{136}\text{Ba}$ (d, $\alpha$ )

			0.795(91), 0.801(18), 1.038(0.9), 1.168(3.0), 1.367(4.6)	
$^{137}\text{Cs}$	30 a	$\beta^-$	$\beta^-$ 0.514 (92.4%), 1.18(7.6%) $\gamma$ 0.662 (con $^{137m}\text{Ba}$ )	Hijo $^{137}\text{Ba}$  U (n, f)

Tabla 5.2: Se definen las características, como el tiempo de vida media o el tipo de decaimiento, de los radioisótopos más comunes de Cs. (Fuente: Finston, H. L.; Kinsley, M. T. *The radiochemistry of Cesium*. 1<sup>nd</sup> ed. Washington D.C: The National Academies Press; 1961.)

## 5.2 ORIGEN DEL $^{137}\text{Cs}$ , SU MOVIMIENTO A TRAVÉS DEL PLANETA Y SU BIODISPONIBILIDAD AMBIENTAL

Para comenzar a explicar el inicio del desarrollo nuclear, se pueden distinguir 3 grandes periodos: el estudio de la física y la química de los elementos, el desarrollo de la bomba nuclear durante la segunda guerra mundial y la utilización de la energía nuclear en el ámbito civil.

Los estudios científicos que permitieron el desarrollo de la era nuclear engloban desde que los primeros filósofos en la antigua Grecia comenzaron a describir el átomo, hasta la construcción de la primera bomba nuclear. En este periodo, diferentes científicos realizaron sus aportes a la ciencia mediante el descubrimiento de las distintas partículas subatómicas del átomo, como son los electrones, los neutrones y los protones. Es en esta etapa donde se establecen las primeras teorías atómicas y se descubre la radiactividad.

Durante la segunda guerra mundial, Estados Unidos (EE.UU) desarrolló la primera bomba nuclear y, con esto, se dio inicio al uso de la tecnología nuclear fuera del contexto de investigación. Posteriormente, al evidenciarse la peligrosidad de las armas de este tipo, se comenzaron a establecer los primeros tratados para lograr regular su desarrollo y, al mismo tiempo, impulsar el uso de la energía nuclear en el ámbito civil. Desde esta época aparecen las primeras centrales nucleares para la producción de electricidad (14).

### **5.2.1 ORIGEN DEL $^{137}\text{Cs}$ AMBIENTAL**

Para comprender como el  $^{137}\text{Cs}$  se propago por el mundo, se debe entender su origen. Este radioisótopo proviene de fuentes antropogénicas que tuvieron un gran auge durante la 2da guerra mundial y posteriormente en la guerra fría, donde las principales potencias mundiales comenzaron un desarrollo nuclear con el propósito de demostrar su hegemonía con sus pares. Debido a ello, realizaron varias pruebas de armas nucleares que liberaron gran cantidad de fragmentos radiactivos al entorno, además, paralelamente comenzó el crecimiento de la energía nuclear con la construcción y masificación de los reactores nucleares como fuente de energía que, en algunos casos, errores de diferentes índoles, derivaron en accidentes que llevaron al aumento de este material particulado radiactivo al ecosistema (14).

#### **5.2.1.1 ENSAYOS DE ARMAMENTO NUCLEAR**

Una prueba o ensayo nuclear es la explosión parcial o total de una ojiva nuclear, con distintos propósitos, pudiendo ser “político-disuasivo”, que buscan mostrar las capacidades tecnológicas propias a un adversario; o “técnico”, con el objetivo de modernizar una clase de ojiva, es decir, verificar la seguridad de que un arma no se acciona por motivos no programados o la confiabilidad que el sistema nuclear militar va a funcionar cuando se necesite (14). Entendiéndose por ojiva nuclear a un proyectil con una figura geométrica compuesta por arcos circulares iguales, que en su interior contiene sustancias explosivas que le permiten estallar cuando son arrojadas, gracias a la acción de un detonador (46).

Los ensayos o pruebas nucleares se clasifican en 3 tipos según el lugar de detonación, estos suelen ser: atmosféricos, submarinos o subterráneos. Normalmente están asociados a una explosión nuclear única, aunque ha habido ocasiones en que se han realizado más de una al mismo tiempo. Estos incidentes ocurridos a lo largo de la historia han aportado a la incorporación de radioisótopos antropogénicos al medio ambiente, cabe destacar que si estos tuvieron lugar en el hemisferio sur, poseen mayor relevancia para la presente investigación.

A continuación, se detallarán algunos de los ensayos nucleares que han sido de gran importancia a nivel mundial, tanto para el conocimiento de los mismos para la contribución de radioisótopos antropogénicos a la biosfera:

El 16 de Julio de 1945, Estados Unidos inauguró la era nuclear al realizar la primera prueba llamada “TRINITY” en Alamogordo, Nuevo México. Esta demostró los resultados de la explosión, pero no consiguió aportar información acerca de la lluvia nuclear radiactiva, ya que no fue comprendida por los científicos del proyecto hasta años posteriores (15).

A fines de la segunda guerra mundial, EE. UU. dejó caer 2 bombas sobre las ciudades japonesas Hiroshima y Nagasaki, dejando una cifra de 220.000 ciudadanos muertos en el acto y más de 200.000 que fallecieron a consecuencia de la sobredosis letal de radiación (15).

Al finalizar la segunda guerra mundial, se inició una carrera técnica e industrial entre las superpotencias EE. UU. y la Unión Soviética dando el inicio de la “Guerra Fría” entre ambas. A mediados de los años cincuenta, a nivel internacional creció la preocupación por las lluvias ácidas derivadas de los ensayos atmosféricos (15).

Francia y China se convirtieron en estados de armas nucleares en 1960 y 1964 respectivamente. Francia realizó en sus comienzos ensayos en Argelia y posteriormente en el pacífico sur; por su parte, China realizó todos sus ensayos en la provincia de Xinjiang (15).

A comienzos de los sesenta, se introdujo el único esfuerzo para limitar los ensayos nucleares durante la guerra fría. En 1963 se estableció el tratado de prohibición parcial de ensayos, con el cual lograron impedir que se continuaran ejecutando dichas pruebas. EEUU, la URSS y el Reino Unido firmaron, mientras que Francia y China no lo hicieron hasta inicios de 1980. Finalmente, los ensayos subterráneos se prohibieron bajo el tratado de prohibición completa de los ensayos nucleares (TPCEN) en 1996. Durante años se ha mantenido en secreto el real impacto causados por los ensayos realizados en la polinesia francesa (15).

Entre 1966 y 1996 Francia realizó alrededor de 190 ensayos nucleares bajo la dirección del Centro de Experimentación del Pacífico (CEP), en el entonces llamado territorio de Ultramar de la polinesia francesa. De la totalidad de estos ensayos, 56 de ellos fueron atmosféricos. Estos ensayos formaron nubes radiactivas que, al ser arrastradas por los vientos, depositaron radioisótopos exponiendo al entorno a niveles anormales de radiación (15).

La ejecución de los ensayos atmosféricos se relaciona con las condiciones meteorológicas que influyen en el movimiento de la nube radiactiva, por ejemplo, el viento y/o la lluvia son incompatibles para la realización de pruebas, tanto como para retrasarlas (15).

La lucha contra los riesgos derivados de ejercicios con armas nucleares comenzó en la década de 1960, en principio liderada por funcionarios locales de la polinesia francesa, que lograron el cese de las pruebas atmosféricas en 1974, sin embargo, CEP continuó con sus experimentos mediante pruebas subterráneas en 1975. A nivel internacional, con la fundación de la ONG “Greenpeace”, se logra que CEP termine sus ensayos el 27 de enero de 1996. Para 1998, Francia ratifica el Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares dando fin a sus pruebas (15).

#### **5.2.1.2 ACCIDENTES**

Un accidente nuclear se puede definir como una falla o error en un reactor nuclear, ya sea de origen humano o técnico. Estos pueden causar una liberación de cantidades monumentales de radiación al ambiente, haciendo necesaria la evacuación de personas desde sectores cercanos hasta múltiples ciudades aledañas, dependiendo de su extensión, para disminuir la posible exposición a altas dosis. Un evento nuclear es un término más amplio que comprende tanto a accidentes nucleares, como a las consecuencias de eventos externos que puedan afectar a una instalación nuclear, como por ejemplo el terremoto y posterior tsunami que afectó a la central Daiichi Fukushima (Tohoku-Japón) en el año 2011 (16).

Los reactores nucleares son dispositivos que pueden iniciar, mantener y controlar una serie autosuficiente de fisiones, bajo estrictas normas de seguridad nuclear y

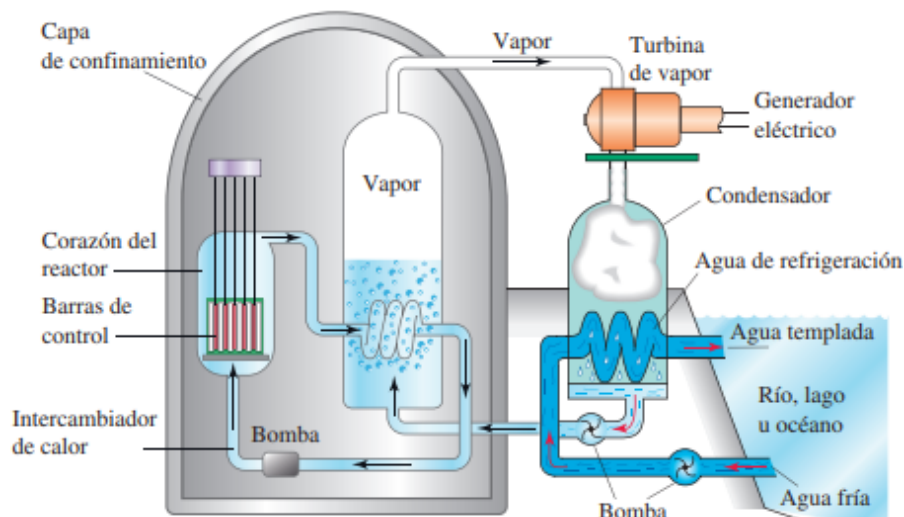
de protección radiológica; son utilizados como herramientas de investigación, sistema productor de radioisótopos y/o fuente de energía, y están diseñados para mantener controladas estas reacciones en cadena, para evitar así una explosión. Sin embargo, existe la posibilidad de que esta reacción lleve a una explosión incontrolada solamente si la cantidad del combustible nuclear supera la masa crítica, este último es el fundamento de las **armas nucleares** (14).

Los reactores nucleares se clasifican principalmente en dos tipos: de investigación y de potencia. Dentro de esta última categoría, entran la mayoría de los reactores que operan en las distintas centrales actualmente, cuyo objetivo es la generación comercial de electricidad. A continuación, se nombran los reactores más comunes:

Reactores de agua ligera

- Reactores de agua hirviendo o BWR (Boiling Water Reactor)
- Reactores de agua a presión o PWR (Pressurized Water Reactor) (Fig. 5.7)
- Reactores de alta temperatura enfriados con gas (HTGR)
- Reactores de agua pesada (HWR)
- Reactor de metal líquido o Reactor reproductor rápido o FBR, Fast Breeder Reactor
- Reactor avanzado refrigerado por gas (AGR)

**Figura. 5.7:** Reactor de agua a presión



*Figura. 5.7: Descripción gráfica de los elementos que constituyen un reactor de agua a presión. (Fuente: Godoy, L. et al. Revisión Crítica de algunas teorías de accidentes asociadas a la estructura. Universidad Nacional del Comahue, Argentina. 2014 [Internet]. [Citado el 2 de octubre de 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Federico\\_Pinto/publication/255654058\\_REVISION\\_CRITICA\\_DE\\_ALGUNAS\\_TEORIAS\\_DE\\_ACCIDENTES\\_ASOCIADAS\\_A\\_LA\\_INFRAESTRUCTURA/links/0c96053b41ca46b439000000/REVISION-CRITICA-DE-ALGUNAS-TEORIAS-DE-ACCIDENTES-ASOCIADAS-A-LA-INFRAESTRUCTURA.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Federico_Pinto/publication/255654058_REVISION_CRITICA_DE_ALGUNAS_TEORIAS_DE_ACCIDENTES_ASOCIADAS_A_LA_INFRAESTRUCTURA/links/0c96053b41ca46b439000000/REVISION-CRITICA-DE-ALGUNAS-TEORIAS-DE-ACCIDENTES-ASOCIADAS-A-LA-INFRAESTRUCTURA.pdf))*

Dentro de los accidentes y eventos nucleares más importantes de la historia podemos encontrar:

*Chernobyl.* El 26 de abril de 1986 en las cercanías de la localidad de Prípiat, Ucrania, ocurrió uno de los accidentes nucleares más grandes de los que se tenga registro en la historia que, debido a errores humanos, llevaron a la explosión del reactor número 4. Ocurrieron 2 explosiones que levantaron el blindaje de la parte superior, lanzando fragmentos de combustible y grafito en llamas, que cayeron en otras turbinas generando varios incendios. La consecuencia de la explosión fue la muerte inmediata de 31 integrantes del personal de la planta, además, considerando la gran dosis liberada en el área, hectáreas de campo quedaron inutilizables por la deposición de material particulado radiactivo, lo que trajo como consecuencia un aumento en la tasa de decesos por desarrollo de cáncer entre los pobladores de la zona (17).

*Fukushima.* El accidente ocurrido en marzo de 2011 en la central nuclear de Fukushima Daiichi en la región de Tohoku, Japón, fue causado por un tsunami provocado por un terremoto de magnitud 9,1 en la escala de Richter. Esto gatilló explosiones de hidrógeno y fusiones nucleares, además de la liberación de material particulado radiactivo al medio ambiente, especialmente al océano (18, 19).

Se estimaba que: las concentraciones máximas de  $^{137}\text{Cs}$  en la superficie del océano pacífico serían de  $20 \text{ Bq/m}^3$ , que el penacho llegaría a las costas de EE. UU aproximadamente 4 a 5 años con una concentración no mayor a  $3 \text{ Bq/m}^3$ , y que todo el norte del océano Pacífico equilibraría sus niveles de  $^{137}\text{Cs}$  con Fukushima alrededor de 10 años después del accidente, con niveles menores a  $1 \text{ Bq/m}^3$ . A pesar de las cantidades de radiación emitidas al ambiente,

aún no son comparables a las cantidades liberadas por Chernobyl (18, 19). A la fecha de la realización de esta revisión no se encontraron estudios que acrediten que estas estimaciones sean ciertas.

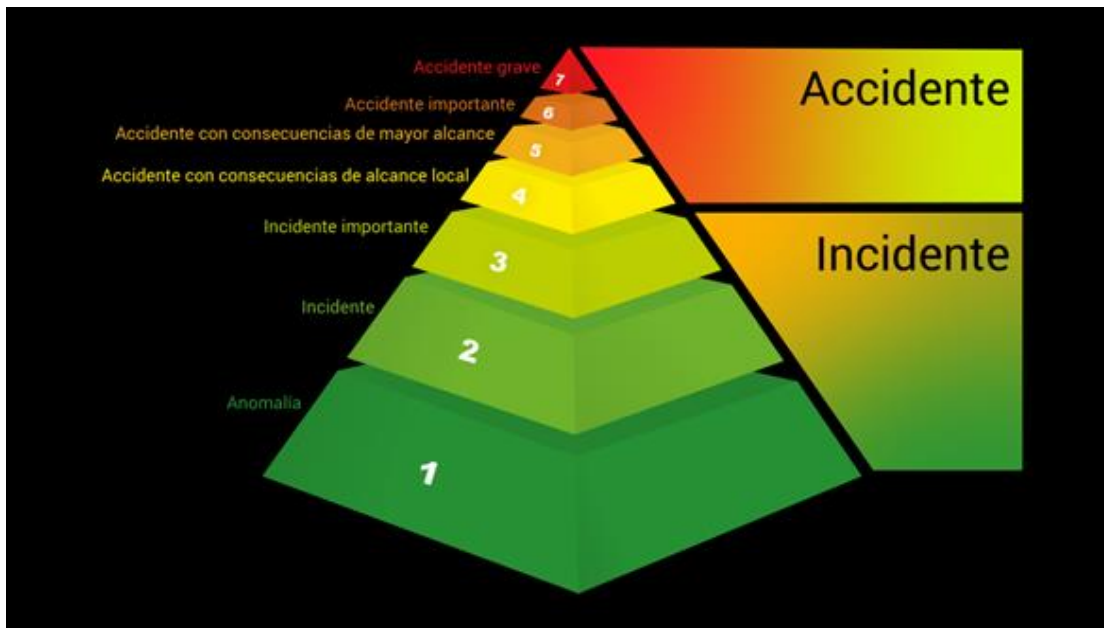
*Goiânia.* El 13 de septiembre de 1987 en la ciudad de Goiânia, Brasil, dos chatarreros robaron un equipo de teleterapia desde una clínica de radioterapia abandonada y parcialmente demolida que se estimaba que contenía 50,9 TBq de  $^{137}\text{Cs}$  en forma de cloruro de cesio altamente soluble. Este fue desmantelado después de unos días y fue comprada por el dueño de un vertedero quien se percató que el material de la fuente despedía un brillo azul en la oscuridad. Varias personas acudieron a verlo y quedaron fascinadas frente a este fenómeno, distribuyéndose fragmentos de la fuente de tamaño similar a un grano de arroz entre varias familias, lo que al paso de unos días provocó que las personas comenzaran a manifestar síntomas gastrointestinales que fueron asociados por ellos mismos a estas “piezas metálicas”. La Unidad de Control de Higiene Pública, con un detector de centelleo, evidenció la presencia de radiación en algunos pacientes contaminados, en sus casas y alrededor de las piezas. Se determinó la evacuación de las zonas afectadas y posteriormente el día 23 de septiembre se notificó a la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN), comenzando ese mismo día las medidas de mitigación (20, 21, 22, 24).

Para catalogar todos estos eventos, la OIEA (23) creó una escala que ayuda a comprender su magnitud e importancia en la radiactividad liberada, conocida como la Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES). Esta se define como un instrumento para informar sobre la severidad de diferentes eventos nucleares y radiológicos, posterior a haber ocurrido, desde el punto de vista de la seguridad de estos, por lo que no es una escala de emergencia ni de notificación de estos. Esta escala abarca sucesos en instalaciones y actividades con presencia de fuentes de radiación, se usa para calificar los sucesos que provocan una emisión de material particulado radiactivo al medio ambiente y la exposición a la radiación de trabajadores y el público y, además, se usa en sucesos que no tengan consecuencias reales, pero que pudieron haberlas tenido (23).

Esta escala posee 8 niveles (0-7) y es de tipo logarítmica, es decir, la gravedad de cada suceso aumenta 10 veces en cada nivel. Si un suceso no representa ninguna relevancia desde el punto de vista de la seguridad, se le clasifica como “nivel 0” o que está

por “debajo de la escala”. Por otra parte, si un suceso no es posible de analizar desde el punto de vista de la seguridad radiológica o nuclear, éste no se clasifica en la escala (23).

**Figura 5.8:** Escala INES



*Figura 5.8: Descripción gráfica de los niveles de la Escala INES, donde se evidencia la severidad de diferentes eventos nucleares y radiológicos, posterior a haber ocurrido. (Fuente: IAEA. Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos. [Internet] [Citado el 30 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/recursos/escala-internacional-de-sucesos-nucleares-y-radiologicos-ines>)*

### 5.2.2 MOVIMIENTO DEL $^{137}\text{Cs}$ A TRAVÉS DEL PLANETA

Por medio de los eventos descritos en los puntos anteriores, todo el material liberado al ambiente ya sea de los ensayos nucleares y/o de los accidentes nucleares, contribuyeron a la formación de una gran “nube” o “concentrado” de partículas radiactivas conocida como fallout o lluvia radiactiva, que es lo que se distribuye alrededor del planeta.

Tenemos que entender que el ecosistema es una comunidad de seres vivos cuyos procesos vitales se relacionan entre sí y se desarrollan en función de los factores físicos de un mismo ambiente (48), es decir, la conformación de sistemas complejos

integrados por agentes bióticos (seres vivos) y abióticos (elementos no vivos, como suelo o aire) interactuando entre sí en un espacio y tiempo determinado. Es por esto la importancia de entender los procesos funcionales del propio ecosistema a diferentes escalas de tiempo y espacio, mediante el estudio y análisis de los flujos de agua, aire, energía, nutrientes, entre otros (49).

Si consideramos al planeta entero como un único ecosistema y acotamos como sus principales agentes abióticos a la atmósfera, el viento y los ciclos biogeoquímicos (el ciclo del agua), podremos comprender cómo es que el radiocésio, al involucrarse con cada uno de ellos, se distribuye y asienta en diversos lugares y cómo es que termina dentro de la cadena trófica. Por lo que es importante para el desarrollo del capítulo entender la estructura y funcionamiento de cada uno de estos.

#### **5.2.2.1 FALLOUT**

El Fallout radiactivo o también llamada lluvia radiactiva, se refiere a la deposición de partículas radiactivas sobre la superficie de la Tierra como resultado de una explosión nuclear, es decir, todo el material elevado por sobre esta, la cual mediante las corrientes ascendentes forman una nube característica en forma de hongo. Consiste en restos de armas, productos de fisión y, en el caso de una explosión subterránea, el suelo irradiado. Estas partículas radiactivas pueden ser de múltiples tamaños, las que van desde micrómetros hasta varios milímetros (25).

Podemos clasificar este proceso de dos formas diferentes:

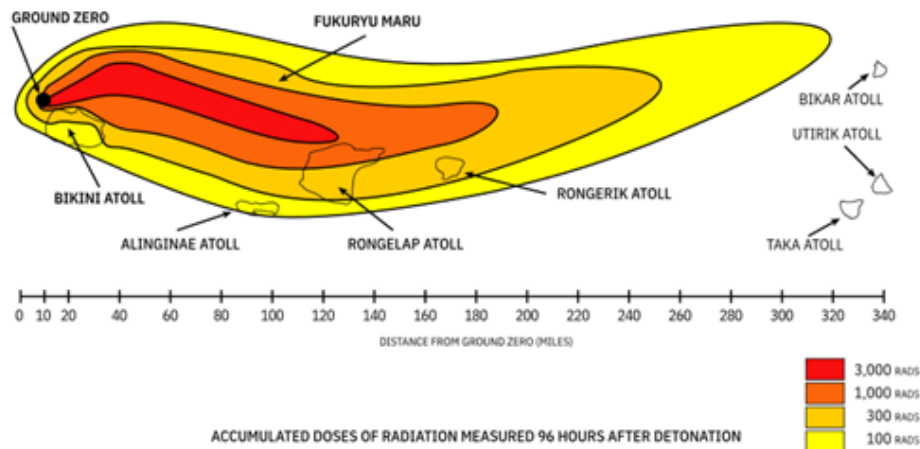
Primero, de acuerdo con el tiempo en que ocurre la precipitación: Temprana, si ocurre dentro de las 24 horas posteriores a la explosión, o Tardía, si ocurre días, meses o incluso años después.

Otra forma es de acuerdo con el territorio al que puede afectar: Local, Troposférica o Estratosférica. La lluvia radiactiva local es un residuo radiactivo que se deposita a unas pocas millas del lugar de la prueba y está compuesta principalmente por grandes partículas de ensayos superficiales o subterráneos, la precipitación troposférica se refiere al residuo nuclear que se limita a la atmósfera inferior, es decir, bajo la tropopausa y, por último, la precipitación estratosférica es el componente de la lluvia radiactiva

mundial que deriva de las nubes que inicialmente se elevan sobre la tropopausa. Para las pruebas nucleares de superficies o cercanas a ella, la penetración de la tropopausa se produce cuando el rendimiento energético es superior a los 200 kilotones, para la tropopausa ecuatorial, y de 100 kilotones, para la tropopausa polar (25).

Es difícil de determinar los niveles y cantidad de lluvia radiactiva, debido a que influyen diversos factores como: el diseño y el rendimiento del arma detonada, la altitud de la explosión, la composición del terreno bajo la explosión y las condiciones meteorológicas, tales como, la velocidad y la dirección del viento, siendo estas 2 últimas capaces de afectar de gran manera el patrón de caída del fallout. En general, las partículas más grandes caerán a una corta distancia de la zona cero, mientras que las más pequeñas requerirán de una mayor cantidad de tiempo para asentarse en la superficie, ya que por su tamaño pueden ser transportadas cientos de kilómetros (Fig. 5.9) (26, 27).

**Figura 5.9:** Distribución de la pluma



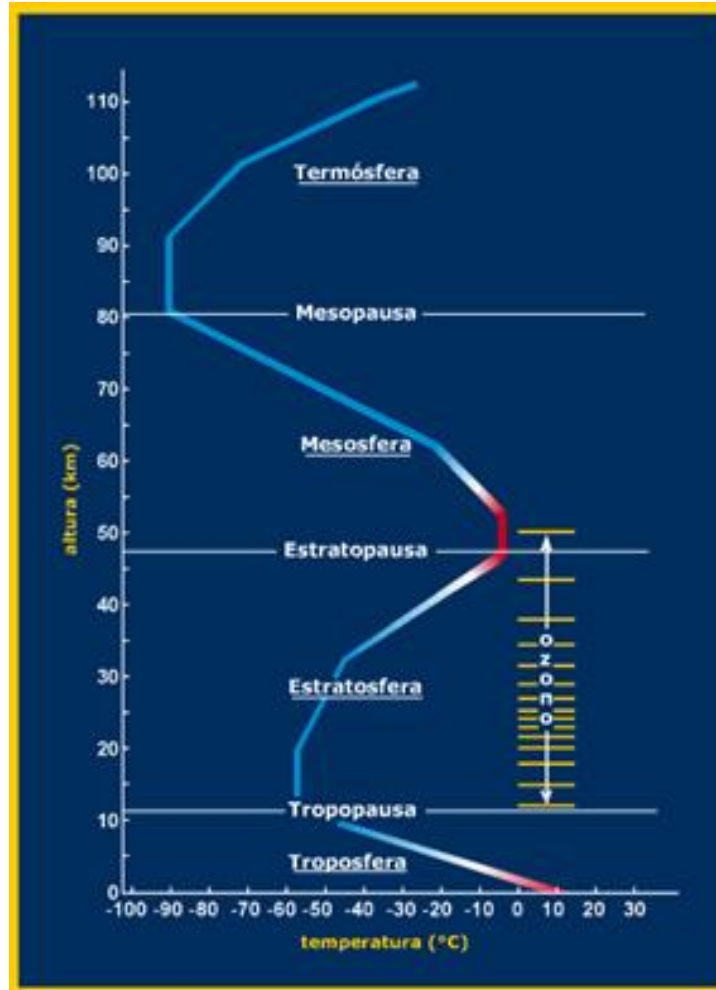
*Figura 5.9 Distribución del particulado en suspensión según su tamaño con relación a la corriente, dirección del viento y el terreno (Fuente: Centro internacional para la investigación del Fenómeno del Niño. Conceptos Generales Atmósfera y Océano. [Internet]. 2010. [Consultado el 10 de noviembre de 2020]. Disponible en: [http://www.ciifen.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=98&Itemid=131&lang=es](http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=98&Itemid=131&lang=es))*

Como se ha mencionado, este particulado puede ser transportado tanto por las corrientes de aire como por los cuerpos de agua, pudiendo ser dispersado a lo largo de todo el globo, dependiendo de las características del evento detonante.

#### **5.2.2.2 DINÁMICA DE LA ATMÓSFERA**

La atmósfera es una de las capas principales de la biosfera y se define como la capa gaseosa que rodea a la Tierra, que a la vez se divide en varias subcapas consecutivas. Se considera un componente importante, ya que es el presupuesto energético que determina el clima. El transporte atmosférico suele ser la vía más rápida en que los radioisótopos liberados se pueden distribuir dentro del planeta Tierra y está determinado, en gran medida, por el fenómeno de la “pluma de dispersión” la cual, por sus características, proporciona una mezcla horizontal y vertical que es propagada por acción de un viento turbulento en la atmósfera (29).

**Figura 5.10:** Capas de la atmósfera



*Figura 5.10: Esquema representativo del comportamiento de las capas de la atmósfera según altura y temperatura. (Fuente: Centro internacional para la investigación del Fenómeno del Niño. Conceptos Generales Atmósfera y Océano. [Internet]. 2010. [Consultado el 10 de noviembre de 2020]. Disponible en: [http://www.ciifen.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=98&Itemid=131&lang=es](http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=98&Itemid=131&lang=es))*

Como se puede observar en la figura 5.10 existen 4 capas que poseen límites entre cada una de ellas (3 límites en total), para el interés de esta revisión las 2 capas más cercanas a la superficie terrestre, en conjunto con su límite entre ellas, son las que cumplen un rol importante en el movimiento del particulado nuclear. Siendo estas:

*Tropósfera o baja atmósfera.* Es la capa que se extiende 11 km por sobre la superficie terrestre, siendo los primeros 500 metros, donde se concentra la mayor parte del polvo en suspensión. Esta es la capa en la que ocurren la gran mayoría de los fenómenos climáticos, especialmente por los gases superficiales que, al expandirse y ascender a los niveles más altos de la tropósfera, se enfrían para descender nuevamente. Además, se destaca la formación de nubes y las precipitaciones, las cuales distribuyen el fallout.

*Tropopausa.* Es el límite superior de la tropósfera, que se extiende aproximadamente hasta los 20 km.

*Estratósfera.* Es la capa por sobre la tropopausa, que se extiende hasta los 50 km desde la superficie terrestre. El movimiento de aire de forma vertical, visto anteriormente en la tropósfera, es casi inexistente. El movimiento horizontal, por otro lado, puede alcanzar velocidades de hasta 200 km/h, por lo que las sustancias que se encuentren en esta capa pueden difundirse por todo el globo con gran rapidez. Un ejemplo de esto son los clorofluorocarbonos (CFC) que, al llegar a esta capa, se distribuyen rápidamente, destruyendo aún más la capa de ozono a nivel mundial.

La temperatura aquí sigue aumentando desde la tropopausa, llegando hasta los 15°C aproximadamente. En esta capa existen cantidades muy pequeñas de Ozono (O<sub>3</sub>), que filtran el 99% de los rayos UV. Gracias a esto es que la temperatura puede ascender, por lo que se considera una capa muy estable y casi sin turbulencias, lo que lo hace una región perfecta para los vuelos (28, 29).

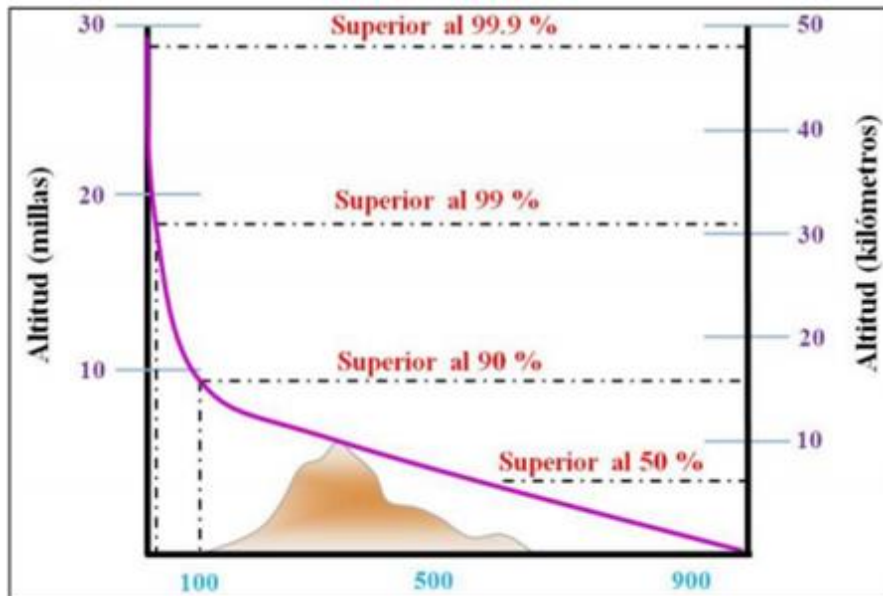
#### **5.2.2.2.1 CINÉTICA DEL VIENTO**

Debido a la rotación de la Tierra, todo lo que se mueve en su superficie no sigue una línea recta. El movimiento del aire es causado por el calentamiento solar diferencial de la superficie terrestre y la atmósfera, el que impulsa los vientos produciendo las olas y las corrientes en el océano, además de mover partículas como las generadas en detonaciones nucleares. Cuando se habla de viento, se refiere específicamente al movimiento horizontal de las parcelas de aire, mientras que los movimientos verticales están limitados por el espesor de la Capa Límite Planetaria (CLP o PBL).

Este movimiento es una magnitud vectorial caracterizada por tener velocidad y dirección variable, con un desplazamiento determinado por diferentes fuerzas sobre una partícula de aire. El origen de este movimiento está determinado, al igual que en cualquier otro cuerpo, como resultado de la acción de una fuerza sobre su masa, que genera una aceleración y se representa en un sistema de coordenadas. Fundamentalmente se reconocen las fuerzas del gradiente de presión y el efecto Coriolis, la cual se define como el efecto que tiene la rotación de la Tierra sobre las mareas y los vientos; que influyen en el viento (30).

Una de las fuerzas que actúa sobre los cuerpos es la presión atmosférica, la cual está determinada por el peso de una columna de aire sobre un objeto o la superficie y será mayor cuando el peso del aire aumente sobre el objeto. El calentamiento térmico diferencial en la atmósfera, definido como las diferencias de temperatura que se experimentan en los distintos puntos de la atmósfera, es el generador de las variaciones en la densidad de las partículas de aire y, por lo tanto, de la presión atmosférica. Entonces, si el número de moléculas de aire aumenta por encima de la superficie, habrá más moléculas que ejerzan una fuerza sobre la superficie y, en consecuencia, la presión aumenta. Por el contrario, cuando el número de moléculas por encima de la superficie se reduce, se obtiene una reducción en la presión. Como es sabido, gracias a la gravedad, la mayor parte de las moléculas de la atmósfera se mantiene cerca de la superficie, por ende, la presión atmosférica va disminuyendo conforme se avanza en altura (Fig. 5.11).

**Figura 5.11:** Perfil vertical de la presión atmosférica



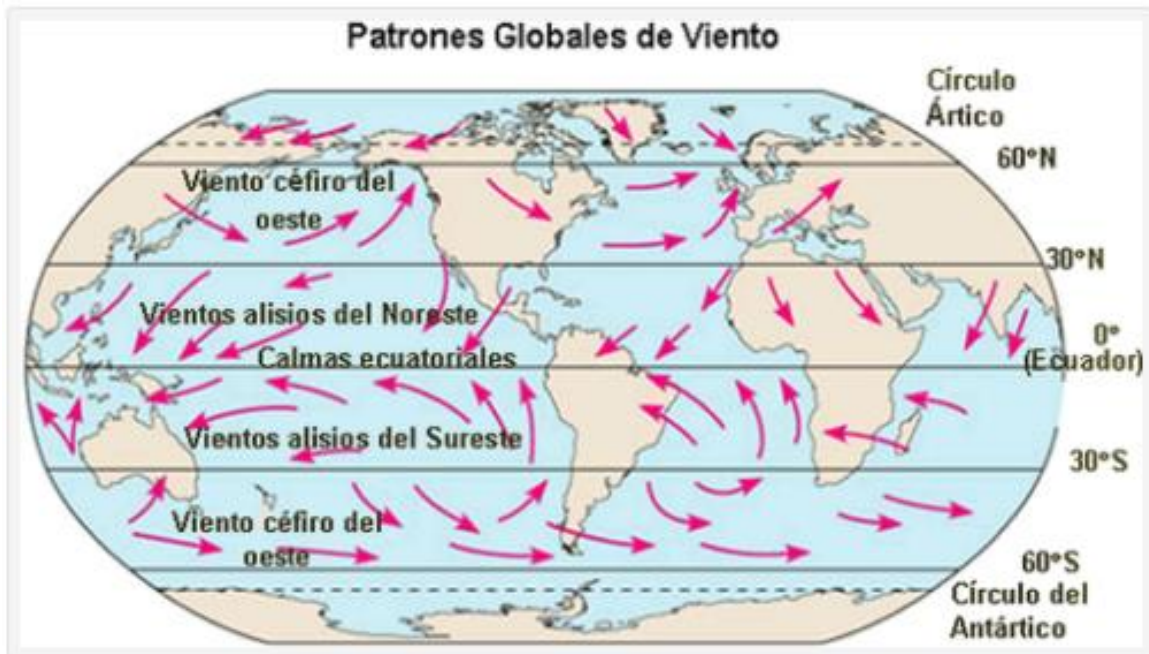
*Figura 5.11: Esquema que demuestra que el precipitado de las partículas causa una variación en la presión atmosférica en relación a su altitud. (Fuente: Mulligan, Joseph F., Física práctica: producción y conservación de energía, McGraw-Hill, 1980)*

Ahora se definirán diferentes elementos que son importantes para la comprensión de la influencia del comportamiento del viento en el movimiento del fallout.

*Circulación General De La Atmósfera.* Se llama circulación general de la atmósfera al sistema de vientos de escala planetaria, cuyo conocimiento está basado en dos fuentes: por valores de presión y viento observados en todo el mundo y por estudios teóricos de la dinámica de fluidos geofísicos. Aquí se destacan las corrientes de vientos advectivos o movimientos horizontales de aire (Fig. 5.12).

La curvatura de la Tierra permite que la zona tropical reciba mayor cantidad de energía solar en comparación con las zonas polares. este calentamiento desigual en la superficie terrestre y la atmósfera establece el desarrollo de sistemas a diferentes escalas que permiten redistribuir la energía.

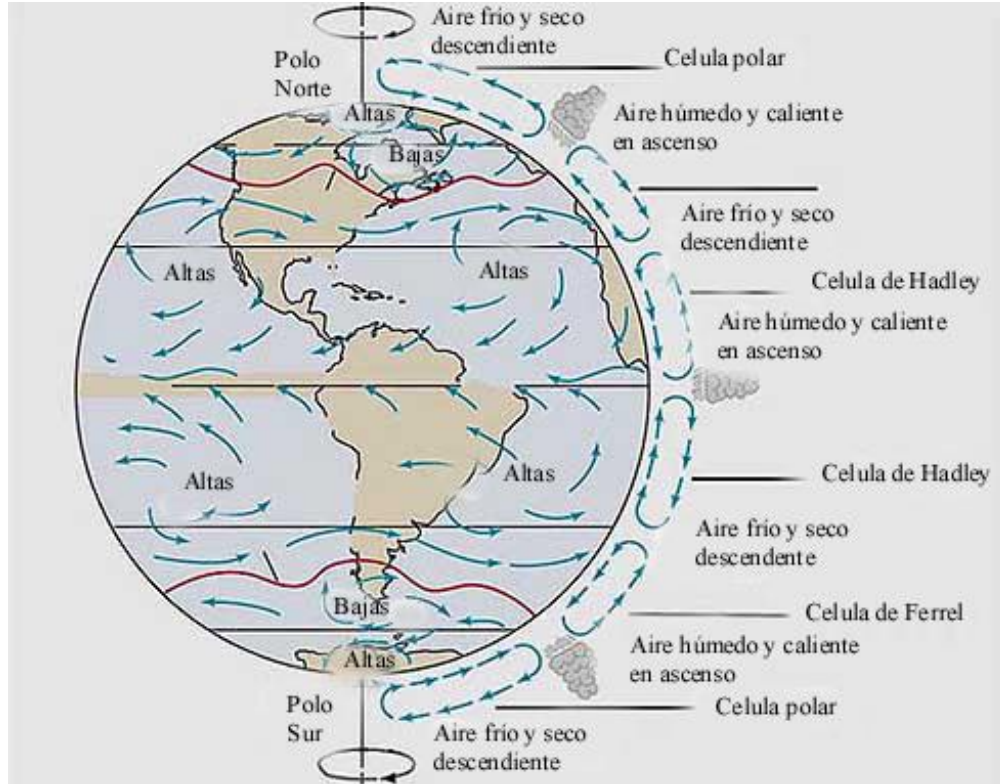
**Figura 5.12:** Patrones Globales de Viento



*Figura 5.12: Representación esquemática de la dirección de los patrones de viento advectivos que recorren el globo. (Fuente: Aula Náutica. “La Atmósfera”. Aula Náutica. EscolaPort. Barcelona, España. [Internet]. [Citado el 14 de jul. de 2021]. Disponible en: <https://aulanautica.org/unit/meteorologia-capitan-yate/>)*

*Circulación Meridional.* Está dominada a escala global por las celdas de Hadley, Ferrer y Polares, que son corrientes convectivas o movimientos verticales de aire (Fig. 5.13).

**Figura 5.13:** Celdas del planeta



*Figura 5.13: Representación esquemática de las celdas que se demuestran en el planeta: Celdas de Hadley, Ferrel y Polar. (Fuente: Ministerio de Educación de España. “La circulación general atmosférica”. España. [Internet]. [Citado el 14 de jul. de 2021]. Disponible en: [http://blog.intef.es/leer.es/WEB\\_MemoriadelosVientos/16circulacion.html](http://blog.intef.es/leer.es/WEB_MemoriadelosVientos/16circulacion.html))*

*Patrones De Viento Según Fuente Emisora.* Dentro de La Tierra existen diferentes partículas a las cuales nos podemos referir como contaminantes, que se definen como partículas que no corresponden de manera natural a la biósfera, siendo un ejemplo de ellas los productos formados en procesos que involucran a la energía nuclear. Existen 3 componentes que influyen en la distribución del particulado: las fuentes de emisión, la atmósfera y los receptores.

Para dar una idea de cómo sucede esta distribución, las fuentes emisoras de radiación emiten partículas que no son naturales para la atmósfera, la cual actúa como medio de transporte, removedor, acumulador, diluyente, incorporador y transformador fisicoquímico

de ellos. Por último, los seres vivos y materiales son los receptores finales de estas sustancias.

Al proceso de transporte y mezcla de los contaminantes en el aire se le denomina “dispersión atmosférica” y esto depende del viento, de la elevación de la “pluma” y de la turbulencia del aire. Los contaminantes en la atmósfera suelen diluirse por la presencia de aire limpio, lo que genera plumas que casi siempre son horizontales.

El viento es capaz de influenciar de gran manera la dirección y desplazamiento de la dispersión atmosférica. Como ejemplo, si el viento es constante en una misma dirección, una misma área tendrá mayores niveles de contaminación; mientras que, si el viento es cambiante con respecto a su dirección, los contaminantes serán dispersados por distintas áreas, teniendo cada una de ellas un nivel menor de partículas.

Otra característica importante del viento es la velocidad, si ésta aumenta, como consecuencia el volumen de aire desplazado en un determinado tiempo será mayor, por lo que la concentración del contaminante en cierta área es menor. Si una fuente de emisión de contaminantes se encuentra ubicada en la superficie de la Tierra, a nivel del suelo veremos las mayores concentraciones cuando la velocidad del viento es baja y la atmósfera se encuentra estable. Si una fuente de emisión se encuentra elevada, los contaminantes suelen ser emitidos de forma vertical y con un empuje térmico, por lo que sus niveles de concentración en la atmósfera pueden ser determinados mediante distintos modelos de dispersión atmosférica (30).

### **5.2.2.3 CICLOS BIOGEOQUÍMICOS**

Se denomina “Ciclo Biogeoquímico” a la conexión y movimientos que existen entre los elementos vivos y los no vivos, con el propósito de que la energía fluya a través de los ecosistemas. La palabra biogeoquímico proviene del griego *bio* que significa “vida” y *geo* que indica “tierra”, por lo tanto, el término señala el movimiento cíclico de los elementos que forman los organismos biológicos y el ambiente geológico, en el que ocurre un cambio químico, constituyendo el sistema regulador de la hidrosfera y la biosfera.

Dentro de la naturaleza hay recursos como el agua que son limitados, las sustancias utilizadas por un organismo no se pierden, casi siempre la materia se recicla para

evitar que se agoten. Gracias a estos ciclos biogeoquímicos, los elementos más importantes (carbono, hidrógeno, oxígeno, entre otros) se encuentran disponibles para ser usados una y otra vez por otros organismos (31, 32).

Se identifican tres ciclos primordiales:

*Ciclos gaseosos.* Los elementos circulan principalmente por la atmósfera y por los organismos vivos. En la mayoría de estos ciclos los elementos son reciclados rápidamente, en horas o días. Los principales ciclos gaseosos son los del carbono, oxígeno y nitrógeno.

*Ciclos sedimentarios.* Los elementos circulan principalmente en la corteza terrestre, la hidrosfera y los organismos vivos. Estos elementos son reciclados más lentamente, aquí se encuentran los ciclos del fósforo y el azufre.

*Ciclo hidrológico.* Se refiere principalmente al proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrosfera. Se trata de un ciclo biogeoquímico donde hay una mínima intervención de reacciones químicas, el agua solamente se traslada de un lugar a otro o cambia de estado físico y se define como el "proceso integrante de los flujos de agua, energía y algunas sustancias químicas" (32) correspondiendo a la sucesión de estados que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera.

**Figura 5.14:** El ciclo del Agua



*Figura 5.14: La imagen presenta las diferentes etapas del ciclo del Agua. (Fuente: USGS. El ciclo del Agua. [Internet]. 2017. [Consultado el 4 de noviembre de 2020]. Disponible en: [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects))*

El ciclo del agua no posee un punto de partida, pero para efectos de esta revisión comenzaremos en los océanos, ya que es el mayor reservorio de agua de la Tierra. El sol calienta el agua en los océanos y parte de ella se evapora, luego las corrientes ascendentes llevan el vapor a la atmósfera, junto con el agua de la evapotranspiración, que corresponde al agua transpirada desde las plantas y la evaporada del suelo. El vapor se eleva al aire donde las temperaturas más frías hacen que se condense en nubes.

Las corrientes de aire mueven las nubes por todo el mundo, cuyas partículas al chocar, se producen precipitaciones en forma de gotas de agua o nieve. Esta última se acumula en los casquetes polares y glaciares, que pueden almacenar agua congelada durante miles de años. Los casquetes a menudo se descongelan cuando llega el clima más cálido y el agua derretida fluye por la tierra.

La mayor cantidad de la precipitación vuelve a caer en los océanos o en la tierra, donde fluye sobre el suelo como escorrentía superficial. Parte de la escorrentía ingresa a los ríos y el flujo de los arroyos mueve el agua hacia los océanos. La escorrentía y la filtración de agua subterránea se acumulan y se almacenan como agua dulce en los lagos, sin embargo, no toda la escorrentía desemboca en los ríos, gran parte de ella penetra en el suelo como infiltración. Parte del agua se infiltra profundamente en el suelo y repone los acuíferos que almacenan grandes cantidades de agua dulce, otra parte permanece cerca de la superficie terrestre pudiendo volver a filtrarse a los cuerpos de agua superficial y/o a los océanos como descarga de agua subterránea. En tanto el agua subterránea puede encontrar aberturas en la superficie terrestre y emerge como manantiales. Con el tiempo, toda esta agua seguirá moviéndose, parte de ella para volver al océano y así volver a comenzar el ciclo (Fig. 5.14).

Mediante la dinámica encontrada en estos ciclos, el fallout es capaz de ser transportado a lo largo de todo el globo, principalmente mediante transporte aéreo, se ha tratado de determinar de manera predictiva cuáles serán los patrones de movimiento de estas nubes radiactivas mediante modelos de dispersión.

#### **5.2.2.4 COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DEL FALLOUT**

Los procesos de transporte atmosférico de los radioisótopos no solo se rigen por los ciclos naturales ya descritos, sino que también son influenciados por el clima. Se han determinado modelos de dispersión atmosférica para predecir de forma matemática el comportamiento que tendrá el transporte de partículas en el ambiente, en este caso, de la lluvia radiactiva, siendo necesario obtener datos meteorológicos para ello. En el caso de una simulación simple a escala local, se utilizan observaciones meteorológicas del sitio de vigilancia del lugar, sin embargo, la representatividad espacial de una sola medición es muy limitada y la estructura tridimensional de los parámetros meteorológicos sólo puede describirse mediante modelos de predicción numérica del tiempo (PNT), estos últimos son modelos físico-matemáticos que se utilizan para predecir el estado futuro de la atmósfera, partiendo del estado actual que estimamos por medio de las observaciones atmosféricas y un proceso que se conoce como asimilación de datos (34). Estos se unen con los modelos

de dispersión atmosférica, los cuales pueden variar entre los diferentes programas informáticos.

Existen diferentes modelos de dispersión atmosférica, como las Simulaciones de dinámica de fluidos computacionales, el modelo Euleriano, el Langergiano o el Gaussiano, siendo este último el más utilizado dado su rápido tiempo de ejecución y mínimos requisitos de datos de entrada.

La validación de los modelos de dispersión atmosférica es una tarea difícil, ya que la comparación de los modelos de medición requiere una tasa de liberación conocida de lo que se medirá, en este caso el particulado radiactivo, y las observaciones de varios sitios de vigilancia, así como una relación directa fuente-receptor. El rendimiento del modelo se puede abordar desde varios puntos, por ejemplo, la extensión de la pluma, el tiempo de llegada a lugares específicos, los valores de concentración máxima, la cantidad de actividad depositada o la dosis a lo largo del período de contaminación. Las emisiones radiactivas constituyen un recurso importante para la validación de los modelos y, a diferencia de otros contaminantes atmosféricos, los radioisótopos derivados de la fisión como  $^{131}\text{I}$  o  $^{137}\text{Cs}$ , tienen una concentración de fondo nula o muy baja, pero se miden regularmente en muchos sitios de vigilancia sensibles (35).

Ya es sabido que la radiactividad antropogénica puede producirse a través de la fisión de elementos pesados, pudiendo alcanzar la atmósfera de distintas maneras. Los productos de desecho gaseoso o aéreos pueden llegar a la atmósfera desde las chimeneas de reactores y/o plantas de procesamiento y su dispersión en el aire se rige por la altura a la que la chimenea se encuentre sobre el suelo, la velocidad y dirección del viento y el grado de turbulencia de este. Mientras que, en las detonaciones atmosféricas, el material más pequeño que se eleva hacia la tropósfera y la estratósfera es el que se acumulará, transformándose en fallout troposférico y estratosférico, respectivamente.

La composición de las partículas radiactivas formadas en las detonaciones depende de la ubicación de la explosión, si la detonación es en la atmósfera se formarán principalmente pequeñas partículas, mientras que aquellas cercanas al suelo predominarán las partículas más grandes, pesadas e insolubles. La altura a la que se lanzan estas partículas

depende del tamaño y energía de la explosión. Las explosiones de alta energía (megatones) detonadas en la atmósfera lanzarán la mayor parte de los escombros a la estratosfera.

De lo anteriormente mencionado, el conocer la dinámica del viento toma gran importancia al momento de analizar la conducta de desplazamiento de las masas de aire, ya que permite orientar en primera instancia una probable ruta de alejamiento de la dispersión, debido a que este tenderá a seguir los patrones de viento. Además, la utilización de los modelos anteriormente mencionados permite obtener una conducta más realista de esta dispersión. La importancia de realizar este análisis de la predicción del movimiento del fallout se debe principalmente a su alta liberación atmosférica, ya sea por la gran cantidad de ensayos nucleares detonados o por los diversos accidentes en plantas nucleares que han llevado desechos radiactivos al medioambiente.

Para que sea depositado, el  $^{137}\text{Cs}$  contenido en el fallout es transferido de la estratosfera a la troposfera, principalmente por las corrientes horizontales de la tropopausa, una vez que llega a esta capa, los nuevos responsables de su distribución son los vientos advectivos y las celdas presentes (corriente de aire vertical o convectiva), provocando un movimiento en remolino. Otro mecanismo de transferencia importante a destacar es la gravedad, ya que esta causa la deposición del particulado basado en su tamaño y peso, debido a la baja densidad de aire estratosférico.

Las celdas de circulación más débiles existen en latitudes más altas, donde el aire sube entre  $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$  y desciende cerca de  $40^{\circ}$  de latitud y la convergencia de las corrientes de aire cerca del Ecuador inhiben el intercambio de masas de aire a través de esta zona (36). Además de los movimientos de aire antes descritos, los vientos locales también influirán en el movimiento previo a la deposición del  $^{137}\text{Cs}$  sobre la corteza terrestre (Ver figuras 5.12 y 5.13).

### **5.2.3. BIODISPONIBILIDAD Y COMPORTAMIENTO DEL $^{137}\text{Cs}$ DENTRO DE LA CADENA TRÓFICA**

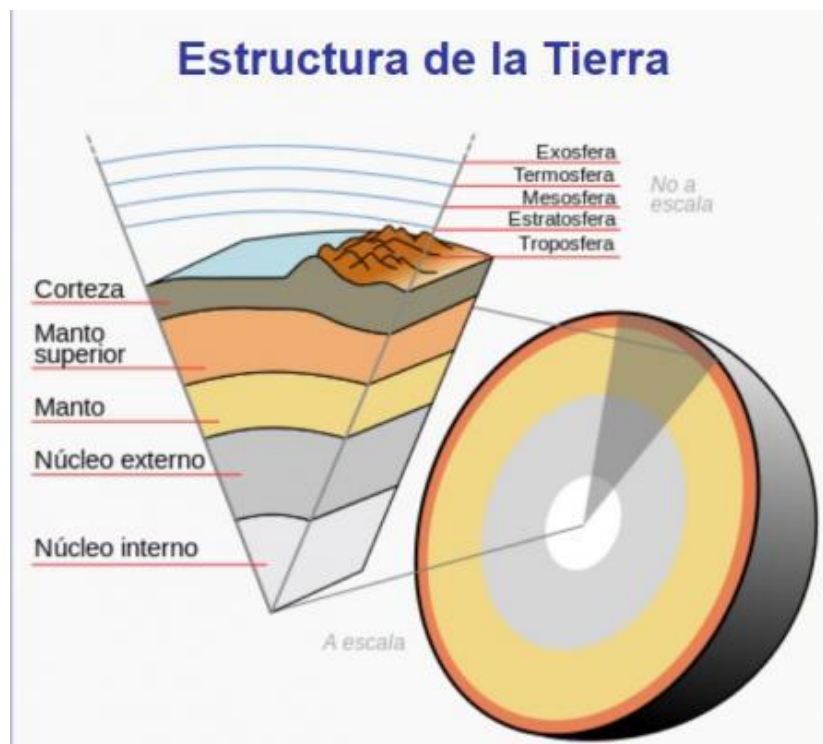
Luego de haber sido arrastrada y transportada, la lluvia radiactiva o “fallout” termina por depositarse en los diferentes suelos, asentándose a diversas profundidades,

principalmente de forma más superficial, lo que es capaz de afectar a los seres vivos de habitan dichas localidades.

### 5.2.3.1. SUELO

Para entender qué ocurre cuando el  $^{137}\text{Cs}$  toca tierra firme, se debe conocer la composición el suelo terrestre. Como ya se mencionó en capítulos anteriores, el planeta Tierra está compuesta por tres grandes capas: la atmosfera, la hidrosfera y la geosfera, esta última es la parte estructural de la tierra y se caracteriza por ser la capa que posee la mayor presión, densidad, volumen y espesor en contraste a las demás. Esta comprende desde la superficie hasta el centro del planeta, la que a su vez se subdivide en otras 3 capas: la corteza terrestre, (capa más superficial y en la que se diferencia la corteza continental y la corteza oceánica), el manto ubicado bajo ella y, por último, el núcleo, que se subdivide en núcleo externo e interno (37).

**Figura 5.15:** Capas de la corteza de La Tierra

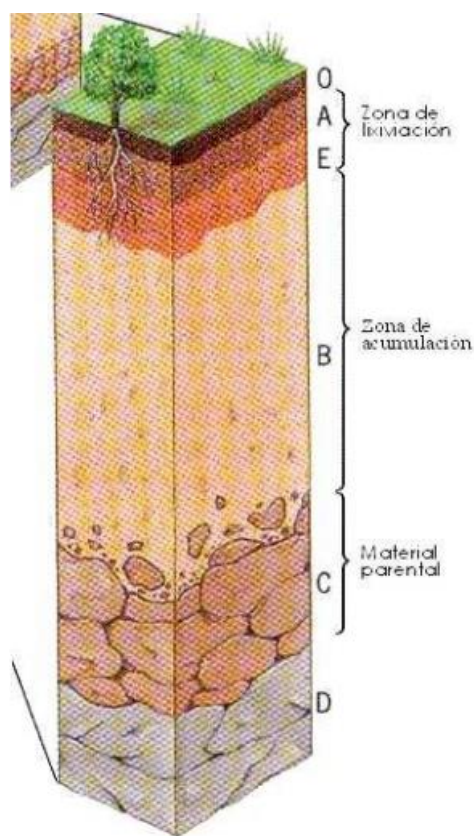


*Figura 5.15: Corte representativo de modelo estático de las capas de la Tierra. (Fuente: Elcacho, J. “Detectan evidencias de una estructura oculta dentro del núcleo de la Tierra”. La Vanguardia. España. [Internet]. 2021. [Citado el 14 de julio de 2021]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/natural/20210305/6264158/detectan-signos-estructura-oculta-nucleo-tierra.html>)*

El suelo es la capa más superficial de la corteza y se caracteriza por ser dinámico y de escaso grosor, en la que se asienta la vida y actúa como interfase entre la atmósfera, la hidrosfera, la geosfera y la biosfera, ya que contiene elementos provenientes de todas ellas. Su composición puede ser: sólida, líquida o gaseosa (38).

Tanto la textura como la estructura en el tamaño del poro (espacios) en el suelo influyen en la permeabilidad del mismo. En texturas arcillosas, las partículas son tan pequeñas que no dejan huecos y dan como resultado una compactación del terreno. En texturas arenosas, existen muchos huecos, por lo que este tipo de suelo es muy permeable al paso de agua. Por tanto, los mejores suelos, en cuanto a porosidad y permeabilidad, son aquellos con una estructura que deje suficientes espacios y con una textura franca que equilibrada con poros de todos los tamaños permita el paso del agua y el aire (38).

**Figura 5.16:** Horizontes del suelo terrestre



*Figura 5.16: Corte transversal de suelo en donde se diferencian los distintos horizontes. (Fuente: Universidad de Murcia. Tema 6: La edafosfera [internet]. 2015 [consultado el 01 de enero de 2021]. Disponible en: [https://www.um.es/sabio/docs-cmsweb/materias-may25-45/tema\\_6.pdf](https://www.um.es/sabio/docs-cmsweb/materias-may25-45/tema_6.pdf))*

Se llama perfil al corte vertical del suelo que aparece caracterizado por una serie de capas denominadas “horizontes”, encontrando 4 definidos según su composición y densidad, siendo el horizonte A el menos denso y con mayores compuestos, hasta el horizonte D, como el más denso y sin alteraciones (38). Tanto la porosidad del suelo como el “horizonte” pueden influir en la distribución terrestre del  $^{137}\text{Cs}$ .

### **5.2.3.2 DEPOSICIÓN DE $^{137}\text{Cs}$ EN EL SUELO**

Los radioisótopos pueden ser transferidos de la atmosfera a la superficie terrestre por medio de la deposición húmeda o seca, principalmente mediante la

interceptación por vegetación, la deposición en el suelo o en el agua. La deposición seca se rige por la difusión turbulenta y/o el asentamiento producto de la gravedad, mientras que la deposición húmeda se produce mediante la recogida de residuos, ya sea dentro de las nubes, en forma de lluvia y/o nieve, o bajo las nubes, cuando ya se ha producido el lavado o arrastre del agua. Estos mecanismos aumentan la contaminación del suelo y la exposición a radiación de los mismos y reducen la cantidad de material en suspensión en el aire (42).

La recogida de residuos en las nubes o en el agua de la lluvia, más los radioisótopos depositados, se acumulan en los ecosistemas terrestres y marítimos, en donde la cantidad de actividad depositada es un dato clave para la estimación de dosis, tanto por su efecto en exposición directa como en la indirecta por ingestión de radioisótopos acumulados en la cadena alimenticia.

Los procesos de deposición, tanto húmeda como seca, poseen una gran variabilidad especial y temporal (Fig. 5.17). La deposición seca de gases y partículas se caracteriza principalmente por la velocidad de deposición, la relación entre el flujo de deposición superficial y la concentración atmosférica. La velocidad de deposición puede describirse mediante parametrizaciones detalladas tanto para los gases como para las partículas en aerosol, pero estos métodos requieren datos que se encuentran raramente disponibles. Por otro lado, la deposición húmeda mediante la formación de lluvia y nieve ocurre a través de varias etapas en las que se condensa y se vuelven a evaporar cíclicamente las partículas; durante cada etapa de condensación se pueden añadir nuevas partículas de aerosol, lo que lleva a que se formen partículas de mayor tamaño. Además, si durante este proceso las partículas arrastradas son radiactivas, la actividad específica de las gotas aumenta.

Como se ha dicho anteriormente, la concentración del particulado radiactivo en el aire troposférico varía según la latitud y, además, las precipitaciones también muestran variaciones latitudinales. Estos factores conducen a que la distribución del fallout depositado se caracterice por mostrar valores bajos en las regiones ecuatoriales y polares, mientras que, en el hemisferio sur tiene un máximo presente entre los 40°N y 50°N (42).

**Figura 5.17:** Simulación de depósitos del fallout sobre Fukushima

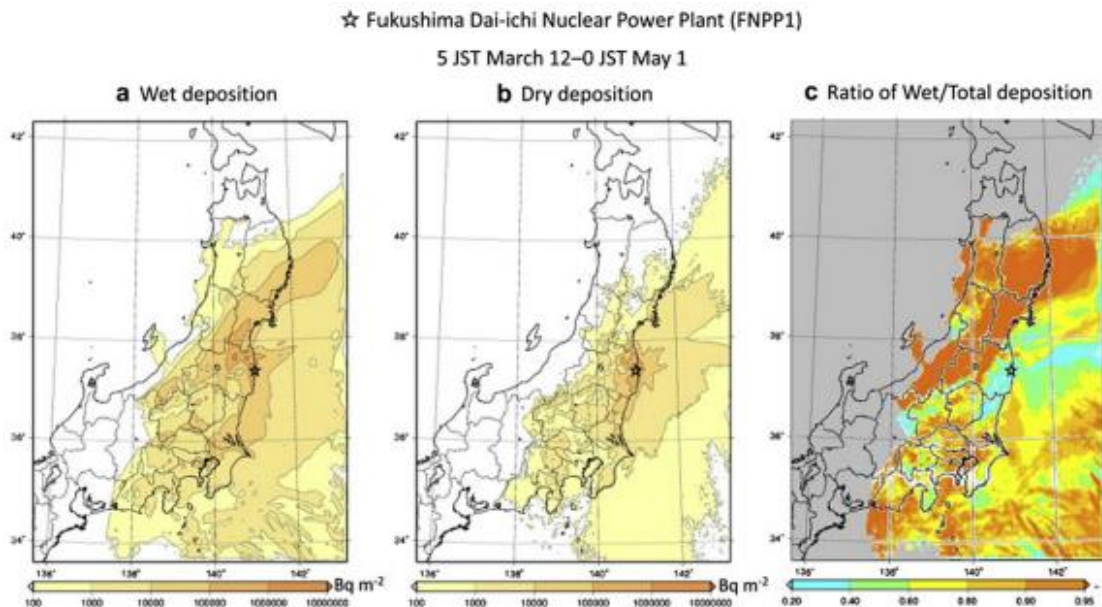


Figura 5.17: Depósito simulado húmedo (a) y seco (b) de los derivados de Fukushima  $^{137}\text{Cs}$ . La deposición húmeda está determinada en gran medida por el patrón de precipitación, mientras que la deposición seca depende de factores tanto atmosféricos como de superficie. El proceso de eliminación más eficiente fue el de la lluvia y el lavado en zonas con una alta tasa de precipitación; sin embargo, la deposición seca fue igual o más importante que la deposición húmeda en algunas partes de la región. (Fuente: Leelossy A, et al. A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*. [Internet]. 2018. [Consultado el 11 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X1730646X>)

### 5.2.3.3 TRANSFERENCIA DE $^{137}\text{Cs}$ ENTRE SERES VIVOS

Tal como se ha mencionado, partículas provenientes del fallout son capaces de depositarse en la tierra. Sin embargo, el particulado es capaz de ingresar a la cadena trófica que tiene la biosfera por medio del consumo de seres vivos, iniciando con las plantas. El  $^{137}\text{Cs}$  generalmente queda en la superficie o en las capas más superficiales del suelo y, por consiguiente, no se encuentra fácilmente disponible para ser absorbido por las raíces de las plantas como si fuesen nutrientes. Sin embargo, existen otros mecanismos por los cuales las

plantas pueden recibir partículas de este radioisótopo de manera externa, entre las que se destaca el levantamiento de partículas, principalmente por brisas, salpicaduras por las gotas de lluvia y la perturbación por equipos mecánicos. Todas ellas contribuyen a la transferencia de  $^{137}\text{Cs}$  a partes externas de las plantas como las hojas y/o tallo, principalmente al pasto que es consumido por animales de pastoreo.

Esta adhesión de tierra contaminada a las plantas se puede ver influenciada por diversos factores, por ejemplo, la estación en la que se encuentre dicha zona (siendo mayor en otoño e invierno), el clima, el tipo de suelo con su tasa de almacenamiento, el tipo de vegetación que se encuentre, etc. Los principales consumidores de plantas son animales, cuyas carnes y/o productos como la leche o los huevos son consumidos por los seres humanos. Se conoce que, de la ingesta del ganado, entre un 18 a 30% es tierra adherida al pasto por los mecanismos antes mencionados, existiendo estudios que demuestran que, en sectores cercanos a accidentes nucleares, más del 90% del  $^{137}\text{Cs}$  encontrado en el ganado proviene del suelo consumido por ellos al pastar (39).

Productos como las carnes o los huevos suelen contaminarse al provenir de animales cercanos a zonas de accidentes nucleares (39, 40). En el caso del huevo, se ha demostrado que la mayoría de la concentración del  $^{137}\text{Cs}$  se encuentra en la yema, mas la mayor actividad se encuentra en la albúmina, alrededor de un 80%, mientras que la yema es menor al 20% y la cáscara menor al 3%. Con respecto a las carnes, los estudios son más difíciles de realizar, ya que la vida media en el cuerpo del animal suele ser muy corta, a pesar de ello se ha encontrado que la vida media puede llegar a ser hasta 2 veces más alta en partes más centrales como el pecho, en comparación a las patas. Todo esto puede variar dependiendo del tamaño, sexo, peso y edad del animal (41).

### **5.3 RELACIÓN ENTRE EL $^{137}\text{Cs}$ Y LA SALUD HUMANA Y SUS IMPLICANCIAS**

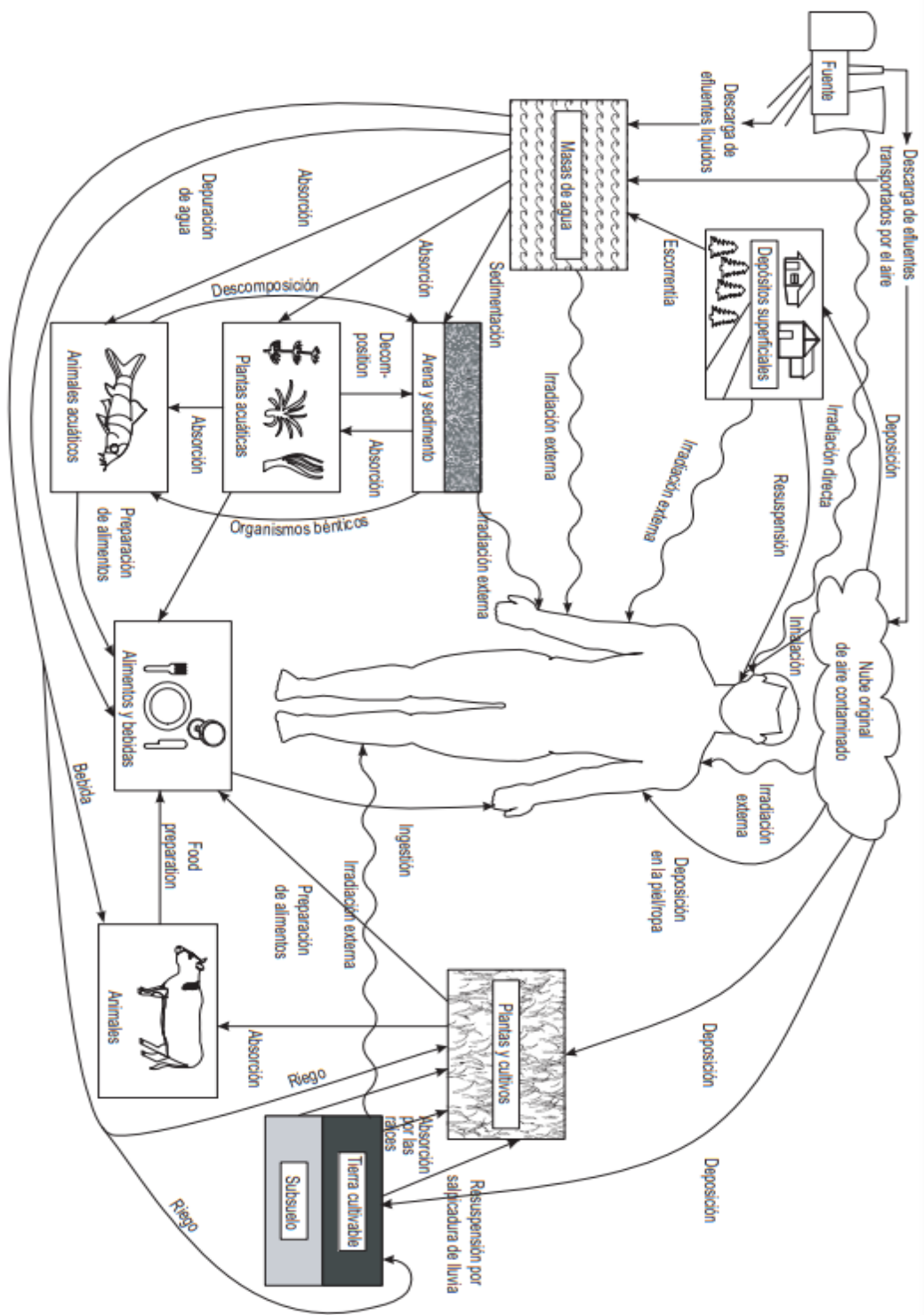
El  $^{137}\text{Cs}$  es capaz de interactuar con el organismo humano, de tal forma que puede significar un importante cambio en los elementos que se encuentran en las células, pudiendo ser incluso dañino. Para efectos de esta revisión se va a enfocar en los posibles efectos colaterales que puede traer la ingesta de este radioisótopo.

### **5.3.1 MODELOS BIOCINÉTICOS**

Debido a la contaminación ambiental de radioisótopos provocada posterior a las pruebas nucleares que tuvieron lugar en la polinesia francesa, en conjunto con los ciclos biogeoquímicos, parte de este particulado se deposita en la tierra, en específico en zonas del hemisferio sur, pudiendo encontrarse radiocesio en aguas superficiales y en muchos tipos de alimentos.

De esta forma los seres humanos podemos estar en contacto con el radioisótopo de diferentes formas, ya sea de manera directa o mediante la inhalación o ingestión de alimentos contaminados con radiocesio (Fig. 5.18) (42).

Figura 5.18: Modelos biocinéticos



*Figura 5.18 Posibles vías de exposición de miembros de la población como resultado de descargas de materiales radiactivos en el medio ambiente. (Fuente: Monitorización del Medio Ambiente y de las Fuentes de Radiación con fines de Protección Radiológica. OIEA. Viena. [Internet]. 2010. [Citado el 1 de marzo de 2021]. Disponible en: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216s\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216s_web.pdf))*

Para describir el comportamiento de los radioisótopos en el cuerpo, encontramos los Modelos Biocinéticos, que se encargan de evidenciar la absorción, retención, distribución en los órganos y su posterior excreción. Estos modelos dependen de las características fisicoquímicas del isótopo y de la vía de entrada de al organismo, además, son de tipo compartimental, esto quiere decir que se componen de compartimientos que representan los órganos y tejidos, rutas de transferencia entre los compartimientos y las tasas de transferencias de dichas rutas (44).

La relación fisiológica entre el Cesio (Cs) y el Potasio (K) ha sido estudiada durante bastante tiempo. Se ha podido demostrar que el Cs compite con el K, debido a sus similitudes en las propiedades periódicas, siendo ambos metales alcalinos, por lo que son capaces de distribuirse por todo el cuerpo como cationes e incorporarse a los fluidos intracelulares mediante los canales de potasio en el transporte activo y pasivo de membrana, aunque generalmente el Cs es transportado con menor facilidad que los otros elementos de su familia. También el Cs es capaz de sustituir al K en la activación de bomba sodio/potasio y, al ser transportado más lento que el potasio, es posible que este permanezca más tiempo en las células musculares y, por ende, en todo el cuerpo, ya que el musculo esquelético contiene la mayor parte del potasio en el cuerpo o en este caso ser reemplazado por el cesio en equilibrio (43).

El Modelo Biocinético del Cs se basa en la tasa de transferencia de radiocesio del plasma en cada uno de los tejidos (45), sobre todo teniendo en cuenta que el Cs no posee un órgano blanco definido, por lo que una vez que este entra en contacto con la sangre se puede distribuir de manera uniforme por todo el cuerpo. Aproximadamente el 10% del radiocesio es eliminado de manera rápida, con una vida media biológica de 2 días, mientras que el 90% restante se elimina de manera más lenta con una vida media biológica

de 110 días aproximadamente y, por último, menos del 1% del cesio es retenido con una vida media biológica mayor de alrededor de 500 días.

El movimiento del cesio dentro del cuerpo se modela como un sistema matemático, en donde, el plasma sanguíneo se trata como una mezcla homogénea y se utiliza como un compartimiento central que intercambia cesio con los tejidos y con el contenido gastrointestinal, en el cual va disminuyendo su contenido de cesio a lo largo de las vías de excreción (44). El esqueleto humano se divide en cuatro grupos que se cree contienen casi todo el cesio esquelético ingerido: medula roja, cartílago, superficie ósea trabecular y superficie ósea cortical. Para la zona gastrointestinal (GI) se utiliza el modelo del tracto alimentario humano de la publicación 100 del International Commission on Radiological Protection (ICRP), Human Alimentary Tract Model (HATM), el cual está constituido por varias regiones: cavidad oral, esófago, estómago, intestino delgado, colon derecho, colon izquierdo y rectosigmoide, en donde podemos encontrar diversos factores de biodistribución del Cesio, como el tipo de ingesta, su absorción en el intestino delgado y otras regiones, la retención de este en diferentes partes del tracto GI y su excreción (46).

La mayor parte de este material es transportado desde el tracto gastrointestinal hacia el sistema circulatorio de forma instantánea. Normalmente, la absorción en sangre se produce en el intestino delgado sin retención en las paredes, pero para el caso del Cs se produce una secreción desde los compartimientos del organismo hacia el tracto alimentario, donde ocurre una reabsorción. Como se nombró anteriormente, la distribución del cesio a los órganos y tejidos es uniforme, y su eliminación se realiza por la vía urinaria y excreción fecal, 80% y 20% respectivamente (44).

**Figura 5.19:** Modelo sistemático del Cesio

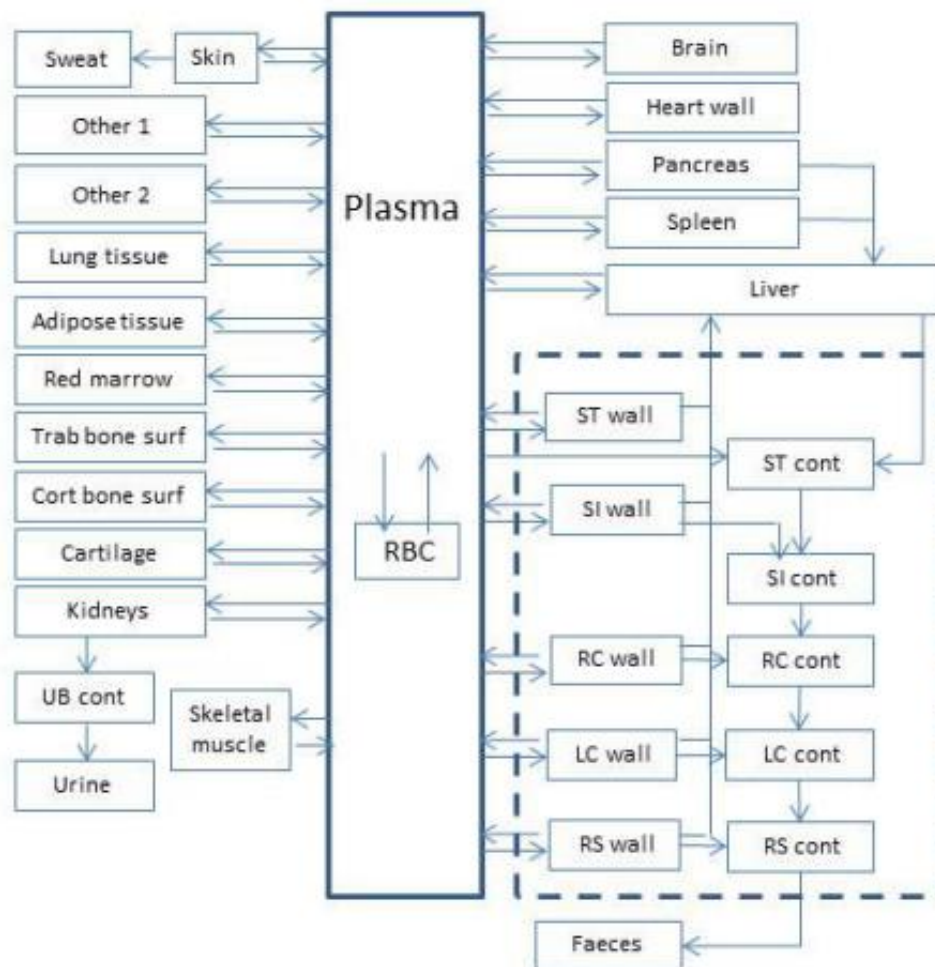


Figura 5.19 Modelo sistémico del cesio y su conexión con el tracto alimentario según ICRP-137. Trab, Cort: hueso trabecular y cortical; surf: parte superficial del hueso; UB: vejiga urinaria; RBC: glóbulos rojos. (Fuente: Leggett, R. Williams, L. Melo, D. Y Lipsztein, J. Un modelo biocinético de base fisiológica para el cesio en el cuerpo humano. *Science of The Total Environment*, 317 (1-3), 235-255. doi: 10.1016 / s0048-9697 (03) 00333-4. 2003. [Citado el 29 de marzo de 2021])

### 5.3.2 POSIBLES IMPLICANCIAS CLÍNICAS

El  $^{137}\text{Cs}$  (soluble) que ha sido ingerido se absorbe en grandes cantidades en el tracto gastrointestinal, siendo el duodeno, yeyuno, íleon y colon, respectivamente, las zonas con mayores tasas de absorción, según estudios realizados en animales (43). Luego de ello,

es transportado por el torrente sanguíneo hacia los todos tejidos del organismo, siendo las concentraciones encontradas en los músculos levemente mayores que en otros tejidos, ya que estos son el mayor reservorio de potasio en el cuerpo.

Hoy en día existen estudios bastante limitados respecto a los efectos que el organismo puede tener a la exposición del radiocesio, debido a las consideraciones éticas que se deben tener para realizarlos en seres humanos. Por ello, es importante destacar que la mayoría de los estudios existentes se han realizado en animales, siendo sus resultados extrapolados según sus similitudes fisiológicas con los seres humanos, sumado a que no existen estudios que demuestren diferencias significativas entre las diferentes especies. A pesar de ello, existen ciertos estudios de personas que han estado expuestas a  $^{137}\text{Cs}$ , principalmente de cercanías de zonas de accidentes, o por exposición laboral (43).

La preocupación a la hora de estudiar los efectos del  $^{137}\text{Cs}$  en el organismo recae en sí, en la radiación emitida por este radioisótopo, más no tanto en los efectos que podría tener el consumo del Cs como elemento sobre el organismo humano. Para efectos de esta revisión, se describirán tanto los efectos del elemento cesio sobre el organismo (animal y humano) y, luego, los efectos de la radiación de su radioisótopo,  $^{137}\text{Cs}$ . Además, se hará un enfoque a los efectos que trae la exposición oral (consumo) de  $^{137}\text{Cs}$ .

#### **5.3.2.1 EFECTOS EVIDENCIADOS DEL CESIO EN EL ORGANISMO**

Al momento de estudiar los daños del  $^{137}\text{Cs}$  proveniente del fallout estratosférico, no se suele hacer énfasis en los efectos que produce el Cs como elemento. A pesar de ello, existen ciertos estudios que han determinado que existen ciertos daños provocados por el Cs como elemento, pero no por la radiación que es capaz de emitir, en su forma de radioisótopo.

##### Efectos neurológicos

Existen diferentes estudios, principalmente en roedores, donde se observaron propiedades depresivas y antidepresivas, afectando respuestas condicionadas y reduciendo la actividad motora. En otros estudios en los mismos animales a los cuales se les inyectó cloruro de cesio, se demostró una serie de cambios bioquímicos que aumentaron significativamente la actividad de la tirosina hidroxilasa, teniendo como consecuencia un

leve aumento de niveles de tirosina, un aumento mayor en los niveles de norepinefrina y dopamina. Además, se bloquearía la captación de norepinefrina por sinaptosomas (43).

#### Efectos cardíacos

Estudios realizados en perros demostraron que el cesio es capaz de alterar el ritmo cardíaco normal, provocando reacciones de corta duración tempranas posteriores a la despolarización, incluso hasta taquiarritmias ventriculares polimórficas en las fibras musculares cardíacas y células de Purkinje. Estos efectos son similares a los que se observan en una persona con síndrome QT largo congénito y adquirido. Además, cabe agregar que se ha evidenciado síndrome QT prolongado y arritmias cardíacas en personas que consumieron remedios homeopáticos que contenían un componente de cloruro de cesio.

Se sostiene que estos efectos pueden ser provocados por un desequilibrio iónico, ya que, con la competencia con el cesio, la permeabilidad al potasio baja y, con ello, las concentraciones de sodio y potasio intra y extracelulares se desequilibran (43).

#### **5.3.2.2 EFECTOS EVIDENCIADOS DE LA RADIACIÓN DEL $^{137}\text{Cs}$ EN EL ORGANISMO**

El principal peligro del consumo de  $^{137}\text{Cs}$  radica en la emisión de radiación desde el mismo, causando daños a tejidos y órganos si existe una exposición prolongada a ellos. Al ser internalizado por las células, el  $^{137}\text{Cs}$  puede provocar daño en las células vecinas por emisión beta, que de ser mal reparado puede dañar de forma permanente a estas, causando una apoptosis y/o carcinogénesis (50). Además, dosis altas de radiación pueden provocar los efectos determinísticos, los cuales se asocian a un umbral de dosis. También es posible que estas altas dosis puedan dañar o, incluso, destruir células, afectando a los diferentes tejidos, lo que desencadena el llamado síndrome de radiación aguda.

Entre los diferentes daños por sobreexposición demostrados por estudios en animales y humanos se encuentran:

### Efectos Neurológicos

Si la emisión de partículas beta y radiación gamma, que son capaces de ionizar células, supera los 30 Gy de dosis, se esperaría que en seres humanos afecten de manera importante el sistema nervioso central, apareciendo como síntomas náuseas, vómitos, diarrea, comportamiento irracional, colapso del sistema circulatorio e incoordinación neuromuscular. A pesar de ello, no se han encontrado estudios que afirmen que el  $^{137}\text{Cs}$  por consumo oral haya afectado de manera neurológica (43).

### Efectos Inmunológicos y Linforeticulares

Existen estudios que demuestran efectos de este tipo cuando seres humanos se vieron expuestos accidentalmente a radiación interna y externa de  $^{137}\text{Cs}$ , resultando en dosis absorbidas estimadas de 1-7Gy, los cuales presentaron depresiones severas de la médula ósea.

Ahora, en cuanto a los efectos relacionados a la exposición oral de este radioisótopo, no se encontraron estudios que asociaran efectos a humanos con exposición oral de duración crónica o intermedia. En cuanto al consumo de forma aguda, se documentó en 14 pacientes hospitalizados una depresión grave en la médula ósea, principalmente un bajo recuento de glóbulos blancos y, por consecuencia, una inmunodeficiencia; lo que ocurrió en 1991 después de una exposición dérmica y oral por una fuente abierta de  $^{137}\text{Cs}$ , la cual provocó dosis en dichas personas de 1 a 7 Gy (43).

### Efectos Gastrointestinales

En la misma exposición antes descrita en 1991, se observaron 8 personas que presentaron náuseas, vómitos y diarrea luego de la exposición oral aguda de  $^{137}\text{Cs}$  de una fuente abierta, dichos síntomas fueron relacionados al síndrome de radiación aguda. No se encontraron estudios sobre estos efectos en humanos ligados a la exposición oral intermedia o crónica (43).

### Efectos hepáticos

No existen estudios que informaran de efectos hepáticos en humanos a la exposición oral aguda, intermedia o crónica al  $^{137}\text{Cs}$ . La única documentación se encontró en algunos pacientes hospitalizados tras la exposición a una fuente abierta de Cloruro de  $^{137}\text{Cs}$  ( $^{137}\text{CsCl}$ ) en 1991, que provocó elevaciones muy leves de aminotransferasas, lo cual no se define como efectos dañinos al organismo (43).

### Efectos Hematológicos

Al igual que en los efectos gastrointestinales, no se han encontrado estudios que indiquen los efectos hematológicos en humanos tras una exposición oral intermedia o crónica. En cuanto a la exposición aguda, en un incidente ocurrido en 1987, una fuente de radiación de 50,9 TBq (1.375Ci) de  $^{137}\text{CsCl}$  que contaminó todas las zonas aledañas, provocó que alrededor de 250 personas fueran irradiadas externamente, de las cuáles un gran número fue contaminado internamente por exposición oral. En total 20 personas fueron las que desarrollaron el síndrome de radiación aguda, definida como la sintomatología que aparece después de una exposición a altas dosis de radiación (43), 14 de ellas presentaron insuficiencia en la médula ósea al recibir dosis en todo el cuerpo de 1 a 7 Gy, 4 de estos 14 murieron al ser gravemente contaminados. Dentro de los síntomas relacionados al síndrome hematopoyético presentado por estas 14 personas, se aprecia la eliminación de células que forman la sangre en la médula ósea, esto implica la disminución de todas las células sanguíneas y, en consecuencia, un deterioro del sistema inmune y anemia (43).

### Efectos Cutáneos

Los informes que describen estos efectos se limitan a la exposición externa, dérmica y oral, a una fuente abierta de  $^{137}\text{CsCl}$  en 1991, ya antes mencionada. En 21 individuos, expuestos de forma aguda a dosis de 1 a 7 Gy, esta provocó lesiones orofaciales, incluyendo sangrado y erupción oral asociada, úlceras bucales, candidiasis oral aguda, dermatitis por radiación y despigmentación. Otros individuos expuestos en el mismo incidente presentaron lesiones cutáneas por radiación, llegando incluso en uno de ellos a la

amputación de una de sus extremidades superiores por radiación grave. No se encontraron estudios que asocien efectos cutáneos a la exposición oral intermedia o crónica a  $^{137}\text{Cs}$  (43).

#### Efectos Oculares

En el mismo incidente con exposición aguda a una fuente abierta de  $^{137}\text{CsCl}$  se registró en 20 pacientes hospitalizados lagrimeo, hiperemia y edema de la conjuntiva, así como dolor ocular. Se notificaron además algunos casos de reducción de la capacidad visual de forma prolongada, entre los cuales se evidenció lesión en la retina. No se encontraron otros estudios que asocien efectos oculares a la exposición oral de tipo intermedia o crónica a  $^{137}\text{Cs}$  (43).

#### Efectos Reproductivos

Estudios realizados en ratones macho evidenciaron que la exposición a  $^{137}\text{Cs}$  en forma de cloruro de Cs, con dosis de aproximadamente 3 Gy, presentaron una reducción en su fertilidad, evidenciando una reducción en su concentración de espermatozoides. En el caso de dosis de 0,1 a 1 Gy, también en ratones macho, no se observó una reducción significativa de la fertilidad masculina (43).

En el caso de los seres humanos, no se encontraron estudios que asocien efectos reproductivos a la exposición oral intermedia o crónica al  $^{137}\text{Cs}$ . Dentro del mismo estudio de los individuos contaminados por exposición oral aguda con la fuente abierta de  $^{137}\text{CsCl}$  de 1991 ya descrita, se documentó a 9 hombres que, examinados 1 mes después de dicha exposición, presentaron una reducción e incluso ausencia de espermatozoides en el recuento (43).

#### Efectos en el desarrollo

En el caso de menores de edad, considerando el feto, la vulnerabilidad dependerá de la etapa del desarrollo en la que se encuentre, ya que existen períodos más críticos tanto en período en prenatal y postnatal, y el daño provocado podría ser evidente en etapas más tardías del desarrollo. Además, hay que considerar que los menores de edad

tienen un organismo diferente al de personas adultas por lo que los efectos que podría tener serían distintos (43).

La mayoría de la información acerca de los efectos de salud que se relaciona con la edad viene de la sobre exposición del Cesio desde el útero en fetos animales y humanos. De estudios realizados en sobrevivientes a las bombas de Japón, se observó un daño neurológico, relacionado a una función cognitiva deteriorada. Mientras que estudios en ratas irradiadas durante el día 14 de la gestación, se evidenció que las ratas mostraban alteración de la actividad motora, cambios morfológicos en el cerebro, reducción del tamaño de la cabeza y odontogénesis retrasada. A pesar de ello, en cuanto a la exposición oral, ya sea aguda, intermedia o crónica, no se encontraron estudios que indiquen efectos asociados a ella (43).

### Cáncer

Cabe destacar que los estudios que evalúan el riesgo de cáncer, solo lo indican como un riesgo asociado al Cs radiactivo, no al estable, por la emisión de radiación asociada al primero. No existen estudios en los que se asocia de forma específica al cáncer con algún tipo de exposición al  $^{137}\text{Cs}$ . Pero, al conocer el tipo de radiación que este emite, se pueden esperar efectos carcinógenos similares a los que se encontraron en los sobrevivientes de las bombas nucleares que impactaron en Japón. Además, es poco probable que los individuos expuestos a los niveles más altos de radiación hayan sido sobrevivientes. Hay estudios en curso a individuos expuestos en Goiânia (Brasil) en 1987, pero aún se consideran muy recientes como para dar resultados reales sobre la carcinogenicidad. De igual forma, la Oficina de Radiación y Aire Interior de la EPA (ORIA) ha clasificado a todos los radioisótopos, incluyendo los radioisótopos de cesio, como conocido carcinógeno humano (43).

## CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Cuando ocurre una liberación de material particulado, ya sea accidental o premeditada, la fuente se encuentra a una temperatura muy elevada, lo que ocasiona que los subproductos del núcleo salgan expulsados en múltiples direcciones. Debido a la convección este material particulado radiactivo emitido presenta un movimiento ascendente vertical, lo que provoca una acumulación de este en las 2 capas más bajas de la atmósfera.

En el caso del hemisferio sur y especialmente para Chile, los principales eventos que influyen en el transporte del fallout a nuestro continente son los ensayos de la polinesia francesa que se realizaron entre los años 1966 y 1996, los que causaron una gran liberación de material particulado radiactivo hacia la atmósfera; además, se debe considerar la dinámica del viento del hemisferio sur, que trae consigo el material particulado desde la atmósfera. En este hemisferio se forman una serie de condiciones atmosféricas debido al efecto Coriolis, relacionadas con la dinámica del viento. Entre el ecuador (paralelo 0°) y el paralelo 60° S se forman 2 grandes corrientes advectivas, que son movimientos horizontales de aire, conocidas como vientos alisios del sureste en dirección este-oeste, que van desde el ecuador hasta el paralelo 30° S; y desde el paralelo 30° S al paralelo 60° S, los denominados vientos céfiros del oeste en dirección oeste-este, tomando como referencias las costas de Chile continental para ambas corrientes. Al mismo tiempo, se instauran corrientes convectivas las cuales son movimientos verticales de aire, también conocidas como celdas, ubicadas al igual que los vientos alisios de sureste y los vientos céfiros de oeste, las celdas de Haley y Ferrel respectivamente.

Si hablamos desde un punto de vista geográfico, los únicos países latino americanos afectados por ambos vientos horizontales, alisios y céfiros, son Chile y Argentina, viéndose envueltos en una recirculación constante de las mismas masas de aire, debido a las celdas de Haley y Ferrel, por lo que existe la posibilidad de que este sea el motivo por lo que estos países son afectados mayormente por la lluvia radiactiva. Una parte importante de la polinesia francesa se ubica entre los mismos paralelos de Chile (el paralelo 17°29'57 Sur hasta 56°32'12 Sur), por lo que ambos comparten la misma dinámica del viento, trayendo como consecuencia material particulado de los ensayos nucleares que se depositará en dichos territorios.

Chile es una franja en la costa occidental pacífico sur, que se extiende desde el paralelo 17°29'57 Sur hasta 56°32'12 Sur (51) por lo que las condiciones atmosféricas de viento antes mencionadas son compartidas con las de la polinesia francesa, trayendo como consecuencia que exista un desplazamiento de particulado radiactivo/fallout de <sup>137</sup>Cs, utilizando como medio de dispersión los vientos alisios de sureste y el viento céfiro del oeste desde la polinesia hacia nuestra región del pacifico. Por otra parte, las celdas de Haley y Ferrel generan una recirculación de las corrientes de aire presentes desde el ecuador al paralelo 60° sur, resultando una redistribución del fallout sobre todo nuestro país.

Como se mencionó, para estudiar el movimiento del particulado, existen modelos predictivos sobre el comportamiento aéreo que este podría llegar a tener, pero estos modelos no pueden determinar con certeza el desplazamiento vertical y/u horizontal exacto que puede tener realmente el fallout atmosférico, por lo que estos modelos sólo sirven como una base intuitiva de la posible trayectoria de esta lluvia radiactiva.

Además de la ruta aérea de esparcimiento del fallout atmosférico, debemos tomar en cuenta los cuerpos de agua existentes; como bien se sabe, la superficie del planeta Tierra es aproximadamente 70% agua (52), esto toma gran importancia al evaluar al agua como una posible ruta de distribución de este particulado. El agua se mantiene constantemente en movimiento a través de su ciclo, por lo que en distintas etapas ésta pasa por la atmósfera interactuando directamente con el particulado en suspensión. Condiciones climáticas como las variaciones de presión y descensos en la temperatura ambiental, ayudan en la precipitación de este reservorio de agua atmosférica, permitiendo que este particulado también caiga junto a las lluvias y se incorpore a este ciclo hídrico.

En el año 2011, luego del terremoto ocurrido en las costas de Tohoku en Japón, ocurrió uno de los accidentes nucleares más importantes de los últimos años, lo que resultó en la liberación de material radiactivo del núcleo del reactor hacia el océano pacífico, principalmente <sup>137</sup>Cs, catalogado como INES 7, es decir, un evento grave debido a su gran magnitud (53). Gran parte de estos radioisótopos fueron arrastrados por las corrientes oceánicas, pudiendo terminar en las costas chilenas por medio de bioconcentradores y, a su vez, integradas a las masas de aire atmosféricas a través de la evaporación como parte del ciclo del agua; por lo que fueron trasportadas por el fallout atmosférico.

Nuestro país se caracteriza por poseer diversos climas a lo largo del continente y se puede establecer una relación entre la cantidad de precipitaciones y la deposición del  $^{137}\text{Cs}$ . Chile hacia el sur posee climas más húmedos comparados con el norte, que tiene un clima desértico, lo que nos lleva a pensar que, si se hiciera una comparación de la disposición entre ambas locaciones, el sur tendría una mayor concentración de particulado debido a las lluvias que contienen material radiactivo del fallout atmosférico y de la evaporación de la superficie del océano pacífico.

El tipo de suelo también tiene gran importancia cuando se refiere a la dinámica de dispersión-absorción del fallout, ya que, dependiendo de la porosidad de este, el  $^{137}\text{Cs}$  será arrastrado una distancia determinada hacia el interior de la tierra. En donde este puede ser absorbido por las raíces que allí se encuentren o continuar descendiendo para llegar a depositarse en el subsuelo o en alguna fuente de agua subterránea. El suelo que se encuentra en la región de Los Lagos (X región) es una mezcla entre arcilla y material volcánico (54), que entrega un aumento moderado de porosidad a la tierra; debido a la característica de este tipo de suelo, la profundidad a la que llega el  $^{137}\text{Cs}$  no es demasiada por lo que la mayoría de este queda depositado sobre el horizonte 0 (ras de suelo) y a través de la recirculación del viento este se eleva y se impregna en las follaje de las plantas causando que su absorción sea mayormente foliar.

Chile es un país que consume gran cantidad de carnes: ave, vacuno o cerdo, siendo su origen principal la zona sur de nuestro país; además, de importar carnes extranjeras, siendo Argentina una de sus mayores fuentes de procedencia. La leche es otro producto de muy alto consumo en este país, ya que pasa a ser una de las bases fundamentales de la dieta, incluso siendo parte de programas de nutrición del gobierno en las primeras etapas de crecimiento infantil. Por otra parte, existen empresas nacionales de leche encargadas de la producción y distribución de la misma, la cual se ubican en el sur de Chile, en la misma zona que se ve mayormente afectada por el fallout. Todo esto nos lleva a reflexionar sobre la cantidad de  $^{137}\text{Cs}$  que puedan tener estos alimentos de alto consumo nacional.

Además de los alimentos ya mencionados, Chile es un alto consumidor de productos marinos, pescados y mariscos principalmente, provenientes de las costas de

nuestro país. El accidente nuclear de Fukushima provocó que se vertieran importantes cantidades de productos radiactivos al océano Pacífico (y en menor grado hacia la atmósfera), entre ellos  $^{137}\text{Cs}$ , teniendo como consecuencia la contaminación de la vida marina por el arrastre de estos radioisótopos a través de las corrientes oceánicas. Por ello es importante establecer una relación entre los niveles de radiación que puedan ser encontrados en la fauna del Pacífico y el consumo humano de dichos productos, por lo que creemos sería importante realizar investigaciones sobre este tema.

Dentro de las interrogantes de esta revisión se encuentra la falta de estudios realizados en alimentos consumidos por la población, cabe destacar que en esta revisión se recabó la mayor cantidad de información sobre los niveles de  $^{137}\text{Cs}$  presente en la comida, aunque esta es casi inexistente en nuestro país, ya que en Chile existen muy pocas investigaciones (realizadas principalmente por la CCHEN) y la mayoría de estas fueron solicitadas por empresas privadas, por lo que están sujetas a acuerdos de confidencialidad, además de estar enfocadas exclusivamente a productos propios distribuidos por dichas empresas.

Al ser el mismo elemento, los efectos que pueda provocar el Cesio en los seres vivos pueden extrapolarse a los que pueda provocar el  $^{137}\text{Cs}$ , por lo que se establece una relación directa en el comportamiento que tiene este radioisótopo en el organismo y los efectos que produce la radiación que emite. El Cesio pertenece al grupo A1 de la tabla periódica, por lo que comparte tanto propiedades periódicas como características fisicoquímicas con todos los elementos pertenecientes a este grupo (metales alcalinos), como por ejemplo con el elemento Potasio (K).

Al ingresar al organismo, el  $^{137}\text{Cs}$  es absorbido por el Tracto gastrointestinal, principalmente por el intestino delgado y grueso, para luego pasar al torrente sanguíneo, llegando de esta manera a todas las células del cuerpo. Estudios describen que el átomo de Cesio tiende a ser un competidor activo del K en la bomba Na/K, pudiendo alojarse en el músculo; lo que podría resultar en efectos dañinos a la salud (hipopotasemia) teniendo en consideración su vida media biológica (43). Cabe destacar que a pesar de “influir” de cierta manera, los estudios se enfocan hacia los daños causados por la emisión de radiación del  $^{137}\text{Cs}$  más que hacia los efectos que podría traer el paso del átomo de Cesio en el cuerpo.

Como se vio en el capítulo 5.1.3, el  $^{137}\text{Cs}$  emite partículas  $\beta^-$ , mientras que al decaer a  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  este emite radiación Gamma para decaer a  $^{137}\text{Ba}$ , siendo la primera la que tiene un mayor índice de ionización. Actualmente y, como es sabido, múltiples estudios han hecho hincapié en lo dañina que es la radiación para el organismo y, principalmente, para el material genético de las células (ADN).

El accidente de Goiânia involucró a varias familias de Brasil, las que se vieron expuestas a un elemento metálico de  $^{137}\text{Cs}$  que emitía radiación gamma en forma de una luz azul brillante, esto provocó que muchas personas terminaran hospitalizadas por diferentes efectos derivados de lo que se conoce como el síndrome de radiación aguda. Los efectos que más se evidenciaron entre los pacientes fueron (43):

-*Efectos Inmunológicos*, como bajo recuento de glóbulos blancos que incluso pasaron a inmunodeficiencias.

-*Efectos Gastrointestinales*, como náuseas, diarrea y vómito.

-*Efectos Hematológicos*, como disminución de las células sanguíneas, llevando a anemias y deterioros del sistema inmune.

-*Efectos Cutáneos*, como lesiones bucales y orofaciales.

-*Efectos reproductivos*, como reducción en la fertilidad, especialmente masculina por una disminución en el conteo de espermatozoides.

La relevancia que toma el estudio del accidente de Goiânia para esta revisión es que es el acontecimiento más destacable del que se tiene registro sobre las consecuencias directas que tiene la exposición al  $^{137}\text{Cs}$  en humanos, siendo hoy en día el único precedente del que se tiene conocimiento.

Como bien se sabe, los efectos determinísticos son aquellos que su gravedad depende de la dosis de radiación recibida y, considerando que toda radiación que recibe el cuerpo se acumula en sus tejidos, al verse a una exposición aguda solo aumenta las posibilidades de desarrollar este tipo de efectos no deseados. Debido a principios éticos, los únicos estudios de este tipo sobre efectos adversos en los humanos expuestos a altos niveles de radiación son los que se han realizado después de accidentes, por lo que no se pueden

realizar más investigaciones de manera experimental en humanos para determinar el real peligro que conlleva la exposición a este radioisótopo. Esto implica la necesidad de regular o implementar nuevos estudios que apunten al análisis de la radiación presente en los alimentos, ya que aún no se tiene total conocimiento de las consecuencias que podría traer esta radiación alimentaria a largo plazo en esta generación y las próximas.

El estudio “Determinación del fallout atmosférico en la República Argentina”, publicado en 1998 en Argentina, es la publicación más actual que puede relacionarse al panorama que existe en Chile, el cual concluye que los valores de  $^{137}\text{Cs}$  en aire fueron menores que el límite de detección variando entre 5,3 y 0,7  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ . A pesar de ello, esta investigación presenta datos de hace más de 20 años, y solo alude únicamente al  $^{137}\text{Cs}$  en suspensión y no al contenido en los océanos. Por ende, no es un estudio representativo sobre la condición actual de Chile, ya que no toma en cuenta eventos recientes como Fukushima, en el que podrían haber variado los niveles de contaminación de las costas, provenientes del océano Pacífico, entre otros.

A la fecha de la realización de esta revisión, autoridades japonesas anunciaron que se verterán desechos radiactivos de la accidentada central de Fukushima al Océano Pacífico. Esto podría resultar en contaminación con radioisótopos (como el  $^{137}\text{Cs}$ ) de los productos marinos que son consumidos Chile, lo que aumentaría la concentración de radioisótopos. Por ello, creemos que es importante ahondar más en la influencia que pueda tener este radioisótopo sobre la salud de la población en general (55).

Otro punto importante es que, si bien Chile no se conoce mundialmente como una potencia nuclear, existen reactores nucleares en el país que dan apoyo a la salud, la industria y el ámbito científico, brindando radioisótopos para fines diagnósticos y terapéuticos, además de realizar investigaciones respecto a los radioisótopos. Al ya existir precedentes históricos de accidentes nucleares, no estamos exentos que en algún momento se pueda desencadenar un evento catastrófico que cause una liberación descontrolada de radioisótopos al medio ambiente de forma local, principalmente en la región Metropolitana que es donde se encuentra el reactor, por lo que el país debiese estar preparado preventiva y legislativamente para poder actuar conforme a la situación.

Con todo lo anterior, consideramos que es importante que en Chile se realicen más investigaciones referentes a la temática de la influencia del consumo de alimentos con  $^{137}\text{Cs}$  y sus posibles efectos biológicos sobre la salud humana, ya que es un radioisótopo con una vida media bastante prolongada, emitiendo radiación por años; además de que existen diversas formas de una posible contaminación radiactiva hacia los seres humanos (por liberación no controlada o consumo de alimentos contaminados). Teniendo en cuenta que existe una regulación incluida en el reglamento sanitario de los alimentos en el artículo 166 (57) que, en conjunto con la ley de Creación de la CCHEN, pueden colaborar en la actualización de las mediciones de la contaminación radiactiva, que se establezcan como base para determinar las concentraciones de  $^{137}\text{Cs}$  presentes en los alimentos que consume la población chilena.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Radiactividad | Definición de radiactividad de la Real Academia Española [Internet]. [Citado el 19 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://dle.rae.es/radiactividad#DCVtL8o>
2. Osores. J. Contaminación Radiactiva Ambiental En el Neotrópico. Biologist [Internet]. 2008. [Citado el 19 de Abril de 2020]. 6(2):155-165. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3989371>
3. Cámara. P. Distribución de radioisótopos naturales ( $^7\text{Be}$  y  $^{210}\text{Pb}$ ) y antropogénicos ( $^{137}\text{Cs}$  y  $^{239,240}\text{Pu}$ ) en el Océano Ártico [Internet]. 2006. [Citado el 19 de Abril de 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Jordi\\_Garcia-Orellana/publication/36730352\\_Distribucion\\_de\\_radionuclidos\\_naturales\\_7Be\\_y\\_210Pb\\_y\\_antropogénicos\\_137Cs\\_y\\_239240Pu\\_en\\_el\\_Oceano\\_Artico/links/0fcfd50edebd271692000000/Distribucion-de-radionuclidos-naturales-7Be-y-210Pb-y-antropogénicos-137Cs-y-239-240Pu-en-el-Oceano-Artico.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jordi_Garcia-Orellana/publication/36730352_Distribucion_de_radionuclidos_naturales_7Be_y_210Pb_y_antropogénicos_137Cs_y_239240Pu_en_el_Oceano_Artico/links/0fcfd50edebd271692000000/Distribucion-de-radionuclidos-naturales-7Be-y-210Pb-y-antropogénicos-137Cs-y-239-240Pu-en-el-Oceano-Artico.pdf)
4. ONU. El final de los ensayos nucleares [Internet]. [Citado el 19 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.un.org/es/events/againstnucleartestsday/history.shtml>
5. AEMet. Disposición Atmosférica [Internet]. 2018. [Citado el 19 de Abril de 2020]. Disponible en: [https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/374\\_deposicion-atmosferica](https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/374_deposicion-atmosferica)
6. Cisternas, M. Araneda, A. Variaciones isotópicas ( $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) antropogénicas en registro estratigráfico de un largo de la cordillera de Nahuelbuta, Chile. Rev. geol. Chile. [Internet] 2011 [Citado el 20 de Abril de 2020]; 28(1): 105-115. Disponible en: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0716-02082001000100006&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-02082001000100006&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
7. ATSDR. Toxicological profile for cesium [Internet].2001.[Citado el 20 de Abril de 2020]. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp157.pdf>
8. CSN. Aspectos Generales de la Interacción de la Radiación con el Medio Biológico [Internet]. 2013 [Citado el 21 de Abril de 2020] Disponible en: [http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros\\_md/1581136598\\_1572009112950.pdf](http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/1581136598_1572009112950.pdf)

9. Olszyna-Marzys. A. La radiactividad y los alimentos. Bol.Of Sanit Param. [Internet]. 1990.[Citado el 22 de abril de 2020]; 108(3). Disponible en: <https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/16784/v108n3p198.pdf?sequence=1>
10. Da Silva L. Abreu L. Los desastres radioactivos y sus efectos a largo plazo: el caso Cesio-137. LA RED. [internet] 1997 Dic; 8(3): 59-68 [Citado el 22 de abril de 2020]. Disponible en: <http://ns.desastres.hn/docum/lared/dys-8-1.0-may-2-2002-TODO.pdf#page=62>
11. Rayner G. Química Inorgánica Descriptiva. 2da ed. Pearson educación. México. 2000. [Citado el 20 de agosto de 2020].
12. López et al. Química orgánica. Aprende Haciendo...; 2da ed. Pearson educación S.A. México. 2010. [Citado el 27 agosto del 2020].
13. Petrucci, R. Química General. 10ma ed. Pearson educación S.A. Madrid, España. 2011. [Citado el 30 de agosto de 2020].
14. Vergara, J. Las explosiones nucleares en la polinesia francesa. [Internet]. [Citado el 30 de septiembre del 2020] disponible en: <https://revistamarina.cl/revistas/1999/4/jvergaraa.pdf>
15. Lemans, C. Le centre d' experimentation du Pacifique (1963-1974). [Internet]. [Citado el 01 de octubre de 2020]. Disponible en: [http://archives.ecpad.fr/wp-content/uploads/2013/08/2013\\_CEP\\_Dossier.pdf](http://archives.ecpad.fr/wp-content/uploads/2013/08/2013_CEP_Dossier.pdf)
16. Montenegro, A. Plan Ciudadano para actuar en caso de accidente nuclear. 1era ed. Facultad de Psicología, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 2011 [Internet]. [Citado el 30 de septiembre de 2020]. Disponible en: [https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/images/3/3a/Plan accidente nuclear FUNAM.pdf](https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/images/3/3a/Plan_accidente_nuclear_FUNAM.pdf)
17. Godoy, L. et al. Revisión Crítica de algunas teorías de accidentes asociadas a la estructura. Universidad Nacional del Comahue, Argentina. 2014 [Internet]. [Citado el 2 de octubre de 2020]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Federico\\_Pinto/publication/255654058\\_REVISION\\_CRITICA\\_DE\\_ALGUNAS\\_TEORIAS\\_DE\\_ACCIDENTES\\_ASOCIADAS\\_A\\_LA\\_INFRAESTRUCTURA/links/0c96053b41ca46b439000000/REVISION-CRITICA-](https://www.researchgate.net/profile/Federico_Pinto/publication/255654058_REVISION_CRITICA_DE_ALGUNAS_TEORIAS_DE_ACCIDENTES_ASOCIADAS_A_LA_INFRAESTRUCTURA/links/0c96053b41ca46b439000000/REVISION-CRITICA-)

[DE-ALGUNAS-TEORIAS-DE-ACCIDENTES-ASOCIADAS-A-LA-INFRAESTRUCTURA.pdf](#)

18. Nagatani, K. et al. Emergency Response to the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using Mobile Rescue Robots. Journal of Field Robotics. Wiley Periodicals, Inc, Japón. 2012. [Citado el 3 de octubre de 2020]
19. Gera, M. et al. Dispersion of Fukushima radionuclides in the global atmosphere and the ocean. Elsevier. 2013. [Citado el 3 de octubre de 2020]
20. IAEA. Fuentes radiactivas: Enseñanzas extraídas de Goiania. 1988 [Internet] [citado el 30 de septiembre de 2020]. Disponible en: [https://www.iaea.org/sites/default/files/30402781017\\_es.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/30402781017_es.pdf)
21. IAEA. SECURITY OF RADIOACTIVE SOURCES. 2003 [Internet] [Citado el 05 de octubre de 2020]. Disponible en: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1165\\_web.pdf#page=334](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1165_web.pdf#page=334)
22. IAEA. THE RADIOLOGICAL ACCIDENT IN GOIANIA. 1988 [Internet] [Citado el 05 de octubre de 2020]. Disponible en: [https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub815\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub815_web.pdf)
23. IAEA. Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos. [Internet] [Citado el 30 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/recursos/escala-internacional-de-sucesos-nucleares-y-radiologicos-ines>
24. Kermisch, C. Questioning the INES Scale after the Fukushima Daiichi Accident. Vol 14. Nro 3. Fonds de la Recherche Scientifique, Université Libre de Bruxelles, Bélgica. Octubre 2011. [Citado el 1 de octubre de 2020]
25. Martell, E. Drevinsky, P. Atmospheric Transport of Artificial Radioactivity. Science [Internet]. 1960 [consultado el 06 de octubre de 2020]. 132(3439), 1523–1531. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13767266/>
26. AJ Software & Multimedia. Radioactive Fallout [Internet]. Atomicarchive: Rossenfeld. C [Revisado; Consultado el 07 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://www.atomicarchive.com/science/effects/radioactive-fallout.html>
27. Hynes, M. Nuclear weapon effects. [Internet]. 2018. [Citado el 07 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://nuclearweaponsedproj.mit.edu/technology-science/effects->

- nuclear-weapons <https://nuclearweaponsedproj.mit.edu/technology-science/effects-nuclear-weapons>
28. Centro internacional para la investigación del Fenómeno del Niño. Conceptos Generales Atmósfera y Océano. [Internet]. 2010. [Consultado el 10 de noviembre de 2020]. Disponible en: [http://www.ciifen.org/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=98&Itemid=131&lang=es](http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=98&Itemid=131&lang=es)
  29. Atmósfera y clima. Origen y composición de la protoatmósfera. [Consultado del 10 de noviembre de 2020]
  30. Venegas, L; Mazzeo, N. La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Consejo Nacional de investigaciones científicas y técnicas. [Internet]. 2013. [Consultado el 20 de noviembre de 2020]. Disponible en: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/cliv2/public/actas%20congreso/15.Venegas.CLIV2.pdf>
  31. Centro internacional para la investigación del Fenómeno del Niño. Ciclos Biogeoquímicos. [Internet]. 2010. [Consultado el 3 de noviembre de 2020]. Disponible en: [http://www.ciifen.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=580:ciclos-biogeoquimicos&catid=98&Itemid=131&lang=es](http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=article&id=580:ciclos-biogeoquimicos&catid=98&Itemid=131&lang=es)
  32. Ciclos biogeoquímicos. [Internet]. 2017. [Consultado el 3 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www.significados.com/ciclos-biogeoquimicos/>
  33. USGS. El ciclo del Agua. [Internet]. 2017. [Consultado el 4 de noviembre de 2020]. Disponible en: [https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science\\_center\\_objects=0#qt-science\\_center\\_objects](https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects)
  34. Salado, J. La predicción numérica del tiempo. [Internet]. [Citado el 9 de Junio de 2021]. Disponible en: <https://blog.meteoclim.com/la-prediccion-numerica-del-tiempo>
  35. Leelossy A, et al. A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. Journal of Environmental Radioactivity. [Internet]. 2018. [Consultado el 11 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X1730646X>

36. Universidad de Chile. [Internet]. 2017. [Consultado el 20 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://www-sciencedirect-com.pucdechile.idm.oclc.org/science/article/pii/S0265931X1730646X#bib73> .
37. Universidad de Murcia. Tema 5: Dinámica de la geosfera [internet]. 2015 [consultado el 31 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://www.um.es/sabio/docs-cmsweb/materias-pau-bachillerato/tema 5. dinamica de la geosfera .pdf>
38. Universidad de Murcia. Tema 6: La edafosfera [internet]. 2015 [consultado el 01 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.um.es/sabio/docs-cmsweb/materias-may25-45/tema 6.pdf>
39. Belli M., et al. Ingested soil as a source of <sup>137</sup>Cs to ruminants. Elsevier. [Internet]. 1993. [Citado el 31 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004896979390312T?via%3Dihub>
40. Beresford N., Howard B. The importance of soil adhered to vegetation as a source of radionuclides ingested by grazing animals. Elsevier. [Internet]. 2021. [Citado el 31 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004896979190261C>
41. Amaral E., et al. Transfer of <sup>137</sup>Cs from soil to chicken meat and eggs. Elsevier. [Internet]. 2021. [Citado el 31 de enero de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0265931X95000245>
42. Monitorización del Medio Ambiente y de las Fuentes de Radiación con fines de Protección Radiológica. OIEA. Viena. [Internet]. 2010. [Citado el 1 de marzo de 2021]. Disponible en: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216s\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216s_web.pdf)
43. U.S. Department Of Health And Human Services. Toxicological Profile For Cesium. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta, Georgia, USA. [Internet]. 2001. [Citado el 15 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp157.pdf>
44. Moraleda, M. Sánchez, J. López, M. Modelización del Comportamiento Biocinético del Cesio de acuerdo a las Nuevas Recomendaciones OIR de ICRP para su uso en

- Dosimetría Interna. Departamento de medio ambiente, Universidad de Salamanca. Editorial CIEMAT. España. 2020. [Citado el 29 de marzo de 2021].
45. Leggett, R. Williams, L. Melo, D. Y Lipsztein, J. Un modelo biocinético de base fisiológica para el cesio en el cuerpo humano. *Science of The Total Environment*, 317 (1-3), 235-255. doi: 10.1016 / s0048-9697 (03) 00333-4. 2003. [Citado el 29 de marzo de 2021].
  46. Leggett, RW. *Modelos biocinéticos para radiocaesio y su progenie. Revista de Protección Radiológica*, 33 (1), 123-140. doi: 10.1088 / 0952-4746 / 33/1/123 y Publicación 100 de ICRP. 2013. [Citado el 29 de marzo de 2021].
  47. Ojiva | Definición de ojiva de la real academia española. [Internet]. [citado el 29 de abril de 2021]. Disponible en internet en: <https://dle.rae.es/ojiva>
  48. Ecosistema | Definición de ecosistema de la real academia española. [Internet]. [Citado el 12 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://dle.rae.es/ecosistema>
  49. Mat3nez, A., 3lvarez, J., Maass, M. *An3lisis y perspectivas del estudio de los ecosistemas terrestres de M3xico: din3mica hidrol3gica y flujos de nitr3geno y f3sforo*. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. Scielo. [Internet]. 2017. [Citado el 12 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1870345317301823>
  50. Tafurt Y, Marin MA. *Principales mecanismos de reparaci3n de da3os en la mol3cula de ADN*. *Revista Biosalud*. [internet]. 2014. [Citado el 1 de junio de 2021]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/biosa/v13n2/v13n2a08.pdf>
  51. Gobierno de Chile. “Nuestro Pa3s”. Chile. [Internet]. [Citado el 1 de junio de 2021]. Disponible en: <https://www.gob.cl/nuestro-pais/>
  52. USGS. “¿Cu3nta agua hay sobre (y dentro) de la Tierra?”. [Internet]. [Citado el 1 de junio de 2021]. Disponible en: <https://water.usgs.gov/gotita/earthhowmuch.html>
  53. IAEA. “The International Nuclear And Radiological Event Scale”. [Internet]. [Citado el 2 de junio de 2021]. Disponible en: [https://www-ns.iaea.org/downloads/iec/ines\\_flyer.pdf](https://www-ns.iaea.org/downloads/iec/ines_flyer.pdf)
  54. Besoain, E. Sep3lveda, G. “Caracter3sticas y propiedades de algunos Dystrandeps de la Regi3n de Los Lagos, sur de Chile. I. Mineralog3a, g3nesis y propiedades de los suelos”. Ministerio de Agricultura. Chile. [Internet]. 1981. [Citado del 2 de junio de

2021].

Disponible

en:

<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/30121/NR10721.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

55. La Tercera. “¿Es posible que el agua de la planta nuclear de Fukushima que será vertida al mar alcance las costas de Chile?”. Chile. [Internet]. 13 de abril 2021. [Citado el 2 de junio de 2021]. Disponible en: <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/es-posible-que-el-agua-de-la-planta-nuclear-de-fukushima-que-sera-vertida-al-mar-alcance-las-costas-de-chile/OEEGCXSRRFCZ5PVTEU2OUFRZHQ/>
56. Mulligan, Joseph F., Física práctica: producción y conservación de energía, McGraw-Hill, 1980
57. Ministerio de Salud. “Reglamento Sanitario de los Alimentos”. Santiago, Chile. [Internet]. 1997, actualizado 2018. [Citado el 26 de julio de 2021]. Disponible en: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/chi9315.pdf>