

2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**LOS RADIOISÓTOPOS EN EL DIAGNÓSTICO Y
TRATAMIENTO DEL CÁNCER**

**TRABAJO MONOGRÁFICO DE ACTUALIZACION
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
QUÍMICA FARMACÉUTICA BIÓLOGA
P R E S E N T A
MIRELLA MUÑOZ FLORES**



**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUÍMICA**

MÉXICO, D.F.

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

276395



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO SEGÚN EL TEMA :

PRESIDENTE : JUAN LARTIGUE GORDILLO

VOCAL : S. GUILLERMINA BURILLO AMEZCUA

SECRETARIO : LUIS CABRERA MOSQUEDA

1er. SUPLENTE : RUBEN ORTEGA CARMONA

2do. SUPLENTE : TRINIDAD MARTÍNEZ CASTILLO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA :

BIBLIOTECA DEL INSTITUTO NACIONAL DE CANCEROLOGÍA,
FACULTAD DE QUIMICA EDIFICIO "D"

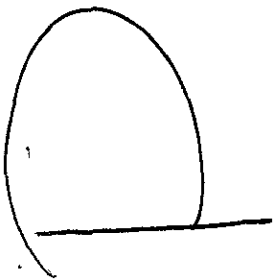
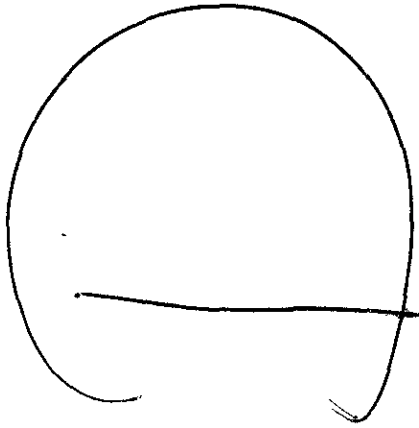
ASESOR DEL TEMA :

M. en C. LUIS CABRERA MOSQUEDA

SUSTENTANTE :



MIRELLA MUÑOZ FLORES



CON CARIÑO Y AGRADECIMIENTO
A MIS PADRES
MARGARITA Y ERASMO+

A MI ESPOSO E HIJOS
FERNANDO, CHRISTIAN Y DIEGO

A MIS HERMANOS
ERASMO Y HECTOR

CON INMENSA GRATITUD

AL M. en C. LUIS CABRERA MOSQUEDA
POR SU VALIOSO ASESORAMIENTO ENSEÑANZA Y
PACIENCIA.

INDICE

OBJETIVO E INTRODUCCIÓN.....	1
BREVE HISTORIA DE LA ONCOLOGIA	2
CAPÍTULO I ASPECTOS BÁSICOS DEL CÁNCER	3
I.1. DIFERENCIACIÓN CELULAR O MITOSIS.....	3
Interfase. Fig. Esquema del ciclo celular.....	4
Sincronización celular.	4
Regulación de la división celular.....	4
I.2. ¿QUE ES EL CÁNCER?	5
I.3 FRECUENCIA DE LAS DIFERENTES CLASES DE NEOPLASIA.....	5
CAPÍTULO II RADIATIVIDAD Y RADIONÚCLIDOS.....	7
II.1. EL ÁTOMO, MASA Y ENERGÍA.....	7
Fig. 2. Modelo atómico de Rutherford.....	7
TABLA 1. Partículas subatómicas	8
II.2. TABLA DE NÚCLIDOS.....	8
Diferentes formas de Energía :	9
Fig.3 Símbolo Internacional de radiación.....	9
II.3. DESINTEGRACION RADIATIVA.	9
II.4 FORMAS DE DESINTEGRACION. RADIACIONES ALFA, BETA Y GAMMA	9
A. Desintegración Alfa	10
B. Desintegración Beta	10
i) Desintegración β^-	10
ii) Desintegración β^+	11
EMISIÓN GAMMA	12

Ley del Decaimiento Raddiactivo.....	12
II. 5 UNIDADES DE ACTIVIDA, VIDAS MEDIAS, RADIATIVA BIOLOGICA Y EFECTIVA	13
Unidad de Actividad.....	13
Tabla 2. Tratamiento en Medicina Nuclear.....	14
Actividad específica	14
Vida media radiactiva.....	14
II.6 RADIATIVIDAD NATURAL.....	15
TABLA 3, RADIATIVIDAD NATURAL.....	15
RADIATIVIDAD NATURAL EN LA MATERIA.....	15
FIGURA 3, REPRESENTACION DEL APORTE RELATIVO DE RADIACION NATURAL Y ARTIFICIAL.....	16
II.7 RADIATIVIDAD ARTIFICIAL.....	16
II.8 GENERADORES DE RADIONÚCLIDOS.....	16
FIGURA 4.....	17
TABLA 4. RADIONUCLIDOS GENERADOS.....	16
CAPÍTULO III. MAGNITUDES Y UNIDADES USADAS EN PROTECCION RADIOLOGICA.....	18
III.1. EXPOSICIÓN.X.....	18
III 2. RAPIDEZ DE EXPOSICIÓN X.....	18
TABLA 5. ALGUNOS VALORES DE T	19
III.3. DOSIS ABSORBIDA D.....	19
III.4. RAPIDEZ DE DOSIS ABSORBIDA.....	20
III.5. DOSIS EQUIVALENTE H.....	20
TABLA 6.FACTORES DE CALIDAD (QF).....	20
III .6. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN	20
III.7. SISTEMA DEL LIMITACIÓN DE DOSIS	21
DOSIMÉTRIA.....	21

TABLA 7. RIESGOS ESTIMADOS.....	22
<i>Límites anuales de dosis</i>	23
TABLA 8. Límites de dosis equivalente efectiva por año	23
CAPÍTULO IV. TRATAMIENTO Y DIAGNÓSTICO DEL CÁNCER MEDIANTE	
EL USO DE RADIOISÓTOPOS.....	24
IV.1 DIAGNÓSTICO MEDIANTE EL EMPLEO DE RADIOFÁRMACOS.....	24
ALGUNOS EJEMPLOS EN LOS QUE SE UTILIZAN RADIOFÁRMACOS	
EN EL DIAGNÓSTICO DEL CÁNCER.....	25
MARCADORES TUMORALES	26
Fig. 5. Obtención de anticuerpos monoclonales.....	27
Fig.6.	28
Tabla 9, Indicaciones de algunas Marcadores Tumorales.....	29
IV 2. APLICACIONES TERÁPEUTICAS DE LOS RADIOFÁRMACOS.....	30
Ejemplos de sustancias radiactivas procedentes de fuentes abiertas	
(radiofármacos).....	30
IV 3. OBJETIVOS DE A RADIOTERAPIA ANTINEOPLASICA	31
IV 4. CONTROL DE CALIDAD DE LOS RADIOFÁRMACOS	
EMPLEADOS.....	31
CAPÍTULO V. CÁLCULO DE LA DOSIS EMPLEADA PARA EL TRATAMIENTO	
EN DIFERENTES TIPOS DE NEOPLASIAS	33
Fraccionamiento de la dosis en radioterapia. Antecedentes.	33
Fig. 7. Símbolo Internacional de Radiación.....	34
CAPÍTULO VI. INSTRUMENTACIÓN BÁSICA	
Aparatos para radioterapia profunda convencional	36
CAPÍTULO VII. NORMAS Y LEGISLACIONES EN SEGURIDAD RADIOLÓGICA	
OBLIGACIONES	37
DE LAS OBLIGACIONES DEL PERMISIONARIO	37
DEL ENCARGADO DE LA SEGURIDAD RADIOLÓGICA	39
DE LOS REQUISITOS Y OBLIGACIONES DEL PERSONAL OCUPACIONALMENTE	
EXPUESTO. (P.O.E.).....	40
BIBLIOGRAFIA	42

OBJETIVO E INTRODUCCION.

El objetivo del presente trabajo es recopilar información que realce la importancia del uso de los radioisótopos en el diagnóstico y tratamiento de los pacientes con alguna clase de tumoración.

El estudio de la **Radiología Clínica** en la carrera de Químico Farmacéutico Biólogo y de Medicina ha adquirido importancia creciente en los últimos años a la vez que aumenta su utilidad en la tecnificada Medicina Clínica actual.

La aportación de este trabajo a la Facultad de Química es la de presentar información concreta, que ayude a los estudiantes de la carrera de Químico Farmacéutico Biólogo, (que piensen dedicarse en su vida profesional al apoyo de la Medicina Clínica) a tener un panorama general de la materia de **Radiología Clínica** y sus aplicaciones en ésta profesión, como pueden ser : a) Encargado de Seguridad Radiológica en laboratorios donde se utilice material radiactivo para práctica de radioinmunoanálisis, b) Para poder ampliar los servicios de un Laboratorio de análisis clínicos de rutina, implementando el uso de material radiactivo en las técnicas de radioinmunoanálisis (RIA) y análisis inmunoradiométrico (IRMA) y/o el Diagnóstico por medio de los rayos X.

La **Radiología**, es la ciencia que estudia las radiaciones ionizantes y evidentemente la **Radiología Clínica** estudia el uso clínico, diagnóstico y terapéutico de las radiaciones ionizantes. La complejidad de su práctica ha hecho que en casi todos los países esté dividida en tres especialidades médicas bastante bien definidas :

Radiodiagnóstico o radiología diagnóstica que estudia el uso diagnóstico de los rayos X. Su importancia y extensión es tal que incluso se están consagrando subespecialidades que se dedican a parcelas concretas y específicas de la imagen radiológica.

Oncología radioterápica , hasta hace poco llamada radioterapia o radiología terapéutica. Trata del uso terapéutico de las radiaciones ionizantes ya provengan de aparatos productores de radiación, ya de isótopos radiactivos encapsulados. La razón de cambiar su nombre a Oncología radioterápica es porque en la práctica, la gran mayoría de pacientes que precisan tratamiento con radiación son pacientes tumorales, por lo que estos especialistas han de ser necesariamente oncólogos clínicos para poder tratar adecuadamente y de manera global a sus enfermos.

Medicina nuclear. Trata del uso diagnóstico y terapéutico de los isótopos radiactivos no encapsulados y su importancia, como la de las anteriores, la hace hoy día un pilar fundamental en cualquier rama de la Medicina moderna.

Breve historia de la Oncología radioterápica.

En el siglo XIX se sabía medir el peso atómico de los elementos y eso permitió hacer algunos intentos de clasificación por pesos atómicos crecientes pero sin gran éxito.

En 1869, Dimitri Ivanovich Mendeleiev (tabla 1) decide ordenarlos por peso atómico pero no de manera obsesiva; además los coloca por propiedades químicas y tiene la desfachatez de decir cuando quedaba algún hueco en su clasificación que era porque no se había descubierto todavía y que podían utilizarse las propiedades del de arriba y del de abajo para imaginar las del correspondiente al hueco.

La radiación X fue descubierta por Wilhelm Conrad Roentgen en 1895. Estudiando los rayos catódicos, Roentgen descubrió que en ciertas condiciones se producía una radiación que excitaba la fluorescencia del platinocianuro de bario. Al desconocer la naturaleza de esta radiación la llamó X. Algunos años después, los esposos Curie estudiaban las radiaciones todavía más penetrantes del radio. Pronto se empezaron a investigar los efectos de las nuevas radiaciones en los tejidos vivos.

Estos efectos eran esencialmente destructivos. Una fuerte dosis de radiación causaba enrojecimiento de la piel, lesiones en los tejidos, radionecrosis y esterilidad. Podía ser fatal para los animales pequeños.

Una acción tan nociva para la materia en crecimiento hacía pensar en la posibilidad de tratar el cáncer con la nueva radiación. Poco se sabía de la causa o mecanismo del cáncer pero su manifestación como "excrecencia" incontrolable se podía observar fácilmente y los cirujanos trataban el cáncer extirpando la parte del cuerpo afectada. (¿Podría la radiación sustituir a la cirugía?)

Experimentos realizados demostraron que aparentemente sí podía. No solo la radiación inhibía el crecimiento de las células malignas, sino que parecía causar mayor efecto en éstas que en los tejidos orgánicos normales. En este hecho afortunado se basa el tratamiento eficaz del cáncer por radiación. Ello constituye el fundamento de la radioterapia, nueva disciplina médica derivada del descubrimiento de Roentgen.

El método es más complicado de lo que aparece a primera vista. La radiación no es precisamente un cauterio que haga desaparecer el cáncer.

Si se aplica una dosis de radiación cuidadosamente determinada, es posible destruir las células cancerosas causando poco daño a las células normales circundantes, de manera que estas últimas se recuperen finalmente.

A medida que se destruyen, las células cancerosas son evacuadas por los procesos normales de restablecimiento del organismo, y se detiene hasta ese momento el rápido crecimiento del cáncer. Este deja de crecer, se reduce su tamaño y puede desaparecer completamente. Esto puede suceder aunque el cáncer sea invasivo y se extienda entre importantes elementos orgánicos o a través de ellos. En estos casos la radioterapia puede tener éxito, mientras que con la cirugía resultaría imposible.

CAPÍTULO I.
ASPECTOS BÁSICOS DEL CÁNCER.

CAPÍTULO I. ASPECTOS BÁSICOS DEL CÁNCER.

I.1. DIFERENCIACIÓN CELULAR O MITOSIS.

Todo el cuerpo humano está formado por células de una gran variedad de tipos, formas, tamaños y funciones. Esta diversidad en las células les permite responder a sus distintas responsabilidades con el organismo completo y con el órgano al que pertenece. Así las células de la piel serán distintas a las del hígado y éstas a las del corazón y las del corazón a las del cerebro, ya que sus funciones son diferentes y estos implican formas, tamaños y características diversas.

La mitosis (del griego mitos: filamento), es un proceso frecuente de división **NUCLEAR** en la mayoría de los seres vivos.

El ciclo celular comprende los procesos que ocurren desde la formación de una célula hasta su propia división en dos células hijas. El estudio clásico de la división celular estableció dos amplias etapas del ciclo celular, por una parte, aquella en que la célula se dividía (división celular) originando dos células descendientes, y que venía caracterizada por la división del núcleo o mitosis y la división del citoplasma o citocinesis, y aquella, en que la célula no tenía aparentes cambios morfológicos y comprendía el espacio entre dos divisiones celulares sucesivas, que fue denominada interfase.

Interfase y división celular corresponden a las dos grandes zonas del ciclo, que las podemos definir conforme sus dos cometidos: duplicación del contenido celular, por una parte, y duplicación del número de célula por otra.

Interfase. Aunque la mitosis constituye la etapa más espectacular morfológicamente, la interfase envuelve la mayor complicación fisiológica al suponer la "gestación celular" con la duplicación de los componentes de la célula madre. Este proceso puede ser estudiado mediante el empleo de precursores radiactivos, utilizando métodos bioquímicos o autorradiográficos, o bien mediante citofotometría en poblaciones sincrónicas.

El empleo de precursores radiactivos ha permitido demostrar que la duplicación del ADN en las células eucarióticas está situada en un periodo discreto de la interfase. Este descubrimiento clave ha permitido compartimentar la interfase en tres periodos llamados G₁, S y G₂. La secuencia de estas fases y su duración media están ilustradas en la figura 1.

Figura 1. Esquema del ciclo celular.

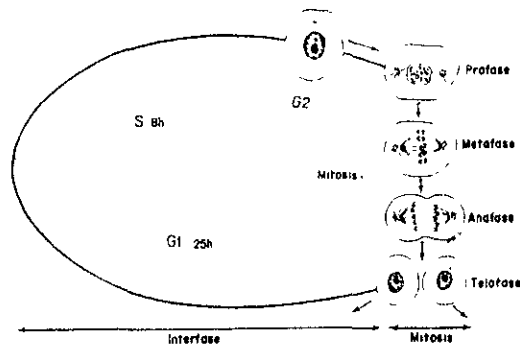


Fig. 1 A la izquierda, la interfase compuesta de los periodos G₁, S y G₂. A la derecha, se observa la mitosis con sus típicas etapas. La duración de la fase G₁ es muy variable y de ella depende la frecuencia con que las células de un tejido proliferan. La fase G₂ más la mitosis, ocupan pocas horas.

Durante el periodo S ocurre la síntesis de ADN, que conduce a su duplicación. El símbolo S fue usado como abreviatura para síntesis; Durante este periodo la célula se transforma de diploide en tetraploide, pues duplica ; del término inglés gap (intervalo). El periodo G₁ es el intervalo postmitótico y presintético, mientras el periodo G₂ es el otro intervalo carente de síntesis de ADN situado entre el periodo S y la próxima mitosis, es decir, postsintético y premitótico.

Sincronización celular. La posibilidad de sincronizar un cultivo in vitro de microorganismos o aun de células ha facilitado el estudio de los eventos moleculares que ocurren durante el ciclo celular. Esto fue conseguido colocando el cultivo a una temperatura tal, o en presencia de un tratamiento químico que bloqueara el ciclo celular en una determinada fase. Por medio de estos artificios es posible conseguir que un cultivo cuyas células se encuentran a lo largo de los diferentes periodos (G₁, S, G₂ o mitosis) prosiga en ciclo hasta acumular sus células en la fase bloqueada. Al eliminar las condiciones de inhibición restaurando las condiciones normales de cultivo, todas las células continúan el ciclo a partir de la misma fase. Por lo tanto, en estos cultivos es -posible estudiar los fenómenos bioquímicos que ocurren a cada periodo.

Regulación de la división celular.

La regulación de la división celular es un tema que está recibiendo mucha atención de los científicos biomédicos, en parte por su relación con el problema de la malignidad. Una célula maligna (cancerosa) no responde a los controles normales. A pesar de los avances realizados en el tratamiento del cáncer, mediante cirugía, radiaciones y drogas que eliminan a las células que se dividen en forma rápida, la mayoría de los especialistas en el campo piensan que probablemente podrían diseñarse terapéuticas mucho más efectivas si sólo se supiera qué causa la división de una célula cancerosa, porque entonces se podría encontrar una manera de detenerla. Lamentablemente, la regulación de la división celular no está bien aclarada, ni siquiera en células normales, y ése es un requisito previo para una comprensión total acerca de cuál es la diferencia que presentan las células cancerosas.

El ciclo celular depende esencialmente de los siguientes procesos:

1. Duplicación del material genético (ADN).

2. Síntesis de proteínas, necesarias para la duplicación citoplásmica. Este proceso depende, a su vez, de la síntesis de ARN.

3. Formación del huso mitótico que promueve la emigración cromosómica para los polos de las células hijas.

Por lo tanto, cualquier sustancia que afecte la síntesis de ADN y ARN o proteínas, así como la formación del huso, debe inhibir la proliferación, y a estas drogas se les aplica el nombre genérico de agentes cicloactivos.

I.2. ¿QUE ES EL CÁNCER?

El cáncer no es una enfermedad nueva, probablemente ha acompañado al ser humano desde siempre.

Las primeras descripciones de tumores malignos datan del antiguo Egipto, aproximadamente 3000 años A. C.

El padre de la medicina, Hipócrates lo bautiza 400 años antes de nuestra era. Karinoma, Karkinos, Cancrum Cangrejos. Según algunos autores por el aspecto de tenazas aprisionando al resto del órgano sano, según otros porque a semejanza de este animal, cuando muere o agarra es difícil desprenderse de él.

Hay varios tipos de cánceres causados por una gran cantidad de factores la mayoría desconocidos. El primer fenómeno en ocurrir es la división desordenada de células cuya información genética ha cambiado en comparación a las células normales, lo que se manifiesta como un tumor. Después y no necesariamente en este orden, este grupo de células utiliza mecanismos por medio de los cuales toma porciones variables de los nutrientes destinados para las células normales del organismo, debilitándolo.

Un buen número de tumores son capaces de producir sustancias químicas u hormonas que alteran al ya debilitado organismo.

Posteriormente las células malignas son transportadas a otros órganos por medio de la sangre y la linfa para infectar sus células; a este fenómeno se le conoce como metástasis.

I.3. FRECUENCIA DE LAS DIFERENTES CLASES DE NEOPLASIAS.

El cáncer es la segunda causa de mortalidad en México, de ahí la suma importancia que tiene su estudio. De acuerdo a la experiencia Mundial, aproximadamente uno de cada 4 de los que viajamos juntos en el vagón del metro, o de las personas que disfrutamos una comida en un restaurante, vamos , en algún momento de nuestras vidas a padecer esta enfermedad.

Existen diversos agentes en la atmósfera de una ciudad contaminada como la de México, que pueden ser potencialmente tóxicos y ponen en riesgo la salud de sus habitantes. Se ha observado una correlación entre residir en ambientes urbanos de grandes ciudades industrializadas y un aumento en el riesgo de desarrollar tumores del aparato respiratorio. Metales pesados como níquel, cromo y berilio entre otros, así como fibras minerales e hidrocarburos policíclicos aromáticos absorbidos en la superficie de partículas inorgánicas y de carbón, son algunos ejemplos de sustancias que pueden ser potencialmente carcinogénicas al aparato respiratorio.

El carcinoma broncogénico se ha incrementado actualmente en los países en desarrollo, debido probablemente al aumento de la práctica de tabaquismo y de los niveles de contaminación ambiental.

El cáncer del cuello del útero es una enfermedad que ataca a las mujeres relativamente jóvenes, a menudo mientras todavía tienen que cuidar a sus hijos en el hogar. Además del sufrimiento de las personas afectadas existe, pues un problema sociológico importante. En los países adelantados la tasa de mortalidad debida a esta enfermedad se encuentra en disminución, ya que la mayor conciencia de los riesgos entre las mujeres, y otras mejoras sociales permiten un diagnóstico más temprano, siempre importante en el tratamiento del cáncer. En cambio en los países menos adelantados estas innovaciones están aún por llegar y muchos casos de cáncer uterino no reciben tratamiento. Se plantea entonces la cuestión de si los métodos aplicados actualmente en los países adelantados se podrían transferir con éxito a los ambientes sociales y médicos tan diferentes de otras partes del mundo.

Mecanismo de la carcinogénesis

El mecanismo íntimo de la carcinogénesis no está del todo claro. Dado que las radiaciones ionizantes son potentes agentes mutagénicos, durante mucho tiempo se ha mantenido la teoría de que la carcinogénesis resulta de la mutación de una célula somática normal. Sin embargo, si la tasa de mutaciones somáticas se considera similar a la de las mutaciones genéticas, que han sido estudiadas con más intensidad, debería esperarse una incidencia de cáncer radioinducido mucho mayor que la existente. Hoy predomina la idea de que el cáncer radioinducido puede ser el resultado de una serie de fenómenos en los que la mutación radioinducida constituiría un eslabón más en la cadena.

El descubrimiento de los oncogenes ofrece una explicación simple e interesante. Las radiaciones ionizantes son particularmente eficaces en crear roturas cromosómicas. Si en la recombinación se produce un cromosoma dicéntrico la célula muere habitualmente, pero, si se produce una traslocación, la célula es viable. El desplazamiento de material genético hace concebible la idea de que un oncogen, suprimido en su situación previa, pueda expresarse en su nueva posición. Algunos cánceres humanos se asocian con una traslocación, como por ejemplo el linfoma de Burkitt, que se asocia con una traslocación entre los cromosomas 8 y 14 (en ocasiones 2 o 22), lo que contribuye a apoyar la teoría de los oncogenes y el movimiento de material cromosómico como causa de la carcinogénesis radioinducida.

CAPÍTULO II.
RADIOACTIVIDAD Y RADIONÚCLIDOS.

CAPÍTULO II. RADIATIVIDAD Y RADIONÚCLIDOS.

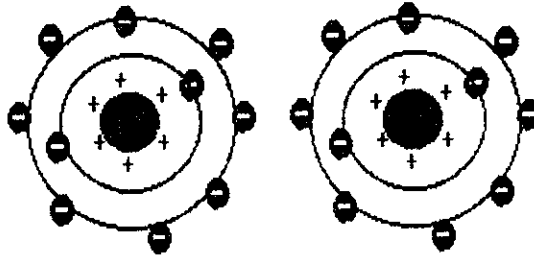
II.1. EL ÁTOMO, MASA Y ENERGÍA.

El conocimiento de la existencia del átomo data de los tiempos del filósofo griego Anaxágoras quien siglos antes de Cristo fue el primero en pensar en él. Pero la conversión del átomo en energía, es decir, la primera cadena nuclear de reacción, considerada por los hombres de ciencia de todo el mundo como el verdadero amanecer de la era atómica, no fue obtenida sino hasta el 2 de Diciembre de 1942, en un reactor experimental de la Universidad de Chicago.

Ciertos átomos son combinaciones estables de partículas subatómicas. Estos emiten radiaciones espontáneamente y en esa forma se transforman en átomos con una identidad diferente. Este proceso, llamado RADIATIVIDAD, fue descubierto por Henri Becquerel en 1896. En años posteriores, Ernest Rutherford explicó la naturaleza de los tres tipos de rayos emitidos por las sustancias radiactivas que se presentan en la naturaleza. Ver cuadro II.1.

Otros tipos de rayos han sido ahora identificados, pero estos resultan de la desintegración de átomos que no ocurren en la naturaleza, pero que se obtienen en reacciones nucleares.

Rutherford (1871-1937) dió a conocer los resultados de los experimentos en los cuales se utilizaron partículas alfa para investigar la estructura del ÁTOMO y explicó los resultados de sus experimentos sugiriendo la existencia de un NÚCLEO en el centro del átomo. La mayor parte de la masa y toda la carga positiva del átomo están concentradas en el núcleo. Los ELECTRONES se hallan en el exterior del núcleo moviéndose alrededor de éste. Fig. 2.

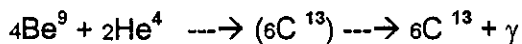


El protón fue descubierto por el físico Wilhelm Wien en 1898 con la primera reacción nuclear en la que se detectaron _protones_.

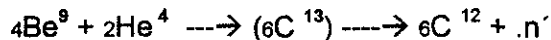


El protón tiene una carga igual en magnitud a la del electrón, pero de signo opuesto. La masa del protón es 1846 veces la masa del electrón.

James Chadwick en 1932 descubre el _neutrón_ cuando bombardeó el Be^9 con partículas alfa que ya se conocían :



Uno de los productos de la reacción _parecía ser_ una clase de radiación muy penetrante y no se detectaban fotones (rayos γ) como en la reacción anterior. Chadwick propuso la reacción nuclear siguiente :



Como la masa de un átomo está casi exclusivamente determinada por el número total de nucleones, se denomina número de masa y se representa por A.

Tabla 1. Partículas subatómicas.

PARTÍCULA	MASA	MASA	MASA	CARGA
	gramos	uma (a)	(Mev)	
electrón e	9.109535 E-28	5.485803 E-4	0.511	1-
protón p	1.672649 E-24	1.007276	938.256	1+
neutrón n	1.764954 E-24	1.008665	939.550	0

(a) La unidad de masa atómica unificada u, es de 1/12 de la masa de un átomo de carbono-12

(b) La unidad de carga 1.60219 E-19. Coulomb.

II.2. TABLA DE NÚCLIDOS.

Se conoce con el nombre de núclidos a cada especie de átomos, la cual se caracteriza por la composición de su núcleo. La composición se especifica mediante el número de protones (Z), el número de neutrones (N) y el contenido de energía o, alternativamente, por el número atómico y el número de masa $A=(N+Z)$.

La carta de los núclidos es una forma compacta de presentar las propiedades de los núclidos. Esta tabla consiste en un arreglo en coordenadas cartesianas, en cuyas abscisas se representa el número de neutrones N y en cuyas ordenadas se representa el número de protones Z, asociándole a cada valor entero un segmento unitario, de modo que a cada núclido ${}^A_Z\text{E}$ le corresponde un cuadro, dentro del cual se anota la información pertinente.

Los **isótopos**, caracterizados por tener $Z = \text{constante}$, quedan representados en un mismo renglón en la tabla nuclear.

Otras familias de núclidos de especial interés son las siguientes :

Los **isótonos** son núclidos con el mismo número de neutrones, $N = \text{constante}$, pero diferentes números atómicos, de modo que corresponden a diferentes elementos. En la tabla nuclear quedan representados sobre una misma columna vertical.

Ejemplo : ${}^7_3\text{Li}$, ${}^8_4\text{Be}$, ${}^9_5\text{B}$.

Los **isóbaros** son núclidos con el mismo número de masa $A = Z + N = \text{constante}$, y también corresponden a diferentes elementos. En la tabla nuclear quedan representados sobre rectas diagonales SE con inclinación de 135° . Ejemplos : $^{36}_{16}\text{S}$, $^{36}_{17}\text{Cl}$, $^{36}_{18}\text{Ar}$

Los **isodiáferos**, son núclidos con la misma diferencia entre los números de protones y de neutrones, $Z - N = \text{constante}$, y quedan representados sobre rectas diagonales con inclinación de 45°

Ejemplos : $^{101}_{44}\text{Ru}$, $^{103}_{45}\text{Rh}$, $^{99}_{43}\text{Tc}$, etc..

Diferentes formas de energía :

Defecto de masa. $\Delta M = Zm_h + (A - Z)m_n - M_ZA$

Pérdida de masa o de energía que en promedio sufren los nucleones, al pasar del estado libre al estado conglomerado.

Energía de amarre por nucleón. $\Delta E/A$

Es la energía necesaria para romper el amarre, o unión, de los nucleones.

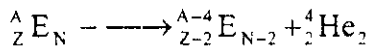
Fracción de empaque. F.E. = $M_{ZA} - A / A$

Determina la energía promedio que liga a un nucleón con su núcleo.

II.3. Desintegración radiactiva.

El fenómeno de la **desintegración radiactiva** consiste básicamente en la emisión de partículas en forma espontánea desde el núcleo, existiendo una transformación del núcleo.

Este fenómeno puede representarse simbólicamente con la siguiente ecuación:



En este caso, la desintegración del núclido E que se conoce como núclido padre, da como resultado la formación del núclido E_1 conocido como núclido hijo, más E_2 que es la emisión de radiación.

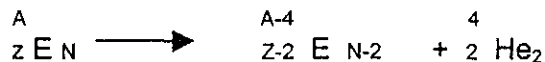
De los 1500 núclidos, un poco más de 300 existen en la naturaleza y los demás han sido producidos artificialmente. De los naturales, cerca de 275 son estables y el resto presentan el fenómeno de la desintegración radiactiva. Respecto a los artificiales, todos son radiactivos.

II.4. Formas de desintegración. Radiaciones alfa, beta y gamma.

La emisión de radiaciones por las sustancias radiactivas es solamente un aspecto de dicho proceso, que involucra el cambio o transmutación de los núcleos de la sustancia radiactiva al emitir las radiaciones. Obviamente, ambos aspectos son manifestaciones de un mismo fenómeno y, por lo tanto, el uno determina al otro.

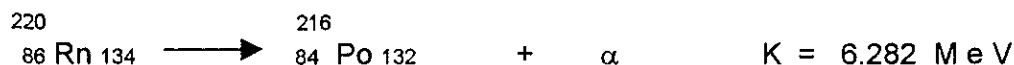
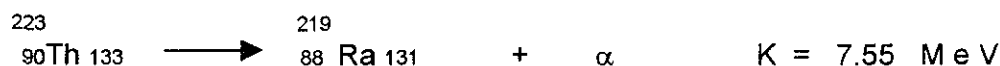
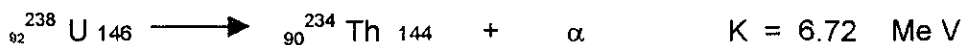
A. Desintegración Alfa.

Como la radiación alfa está formada por núcleos de ${}^4_2\text{He}$, los cuales tienen dos protones y dos neutrones, entonces el núcleo producto tiene dos protones y dos neutrones menos que el núcleo que sufre este tipo de desintegración. O sea,



Obviamente, el elemento producto de esta desintegración es diferente en sus propiedades de carga y masa que el elemento que la dio origen. Sin embargo, ambos tipos de núcleos tienen en común la misma diferencia entre sus números de protones y de neutrones, es decir, son *isodiáferos*. Esto implica que en la tabla nuclear el cuadro del núcleo producto se encuentra dos renglones abajo y dos columnas a la izquierda del cuadro del núcleo original. La mayoría de los emisores alfa son elementos pesados más allá del bismuto. ($Z = 83$)

Ejemplos :



K = Energía Cinética.

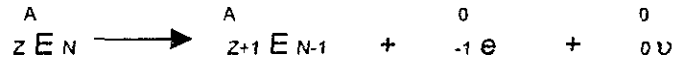
B. Desintegración Beta.

Existen tres modos diferentes de desintegración beta, el primero de los cuales se descubrió en las sustancias radiactivas naturales, y los otros dos se reconocieron por primera vez en sustancias radiactivas artificiales.

i.) Desintegración β^-

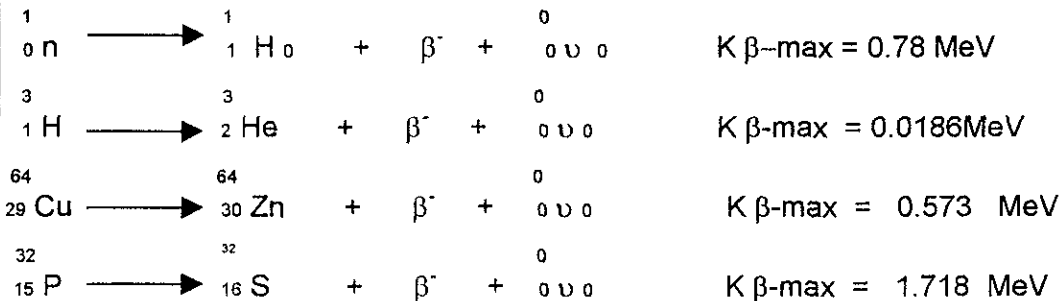
Como la radiación β^- está formada por electrones ordinarios cuya carga es $-e$ y cuya masa es mucho menor que la de los núcleos, resulta que el núcleo producto tiene un número de carga mayor en una unidad y un número de masa igual que el número correspondiente del núcleo que sufre este tipo de desintegración. Ambos núcleos corresponden a elementos diferentes, pero tienen el mismo número de masa, es decir, son *isóbaros*.

Cuando se tuvo conocimiento de que el espectro de rayos β es continuo, se pensó en la posibilidad de una violación del principio de conservación de masa - energía. De acuerdo con esta hipótesis, en la desintegración β , además del electrón, se emite una radiación neutra que se llamó neutrino, cuya carga eléctrica es cero, su masa en reposo es muy pequeña, y comparte la energía de desintegración con el electrón. Fermi demostró que esta hipótesis permitía reproducir cuantitativamente los espectros de rayos β , pero transcurrieron más de veinte años antes de que hubiera confirmación experimental independiente de la existencia del neutrino. De los espectros de rayos β se pudo determinar que la masa en reposo del neutrino es prácticamente nula. Entonces el esquema de desintegración es el siguiente:



Como el número de nucleones no cambia de un núcleo a otro, el núcleo producto tiene un protón más y un neutrón menos que el núcleo original. En otras palabras, el resultado de este tipo de desintegración es la transformación de un neutrón en protón dentro del núcleo. En la Tabla Nuclear, el cuadro del núcleo producto se encuentra un renglón arriba y una columna a la izquierda del cuadro del núcleo que se desintegra.

EJEMPLOS :

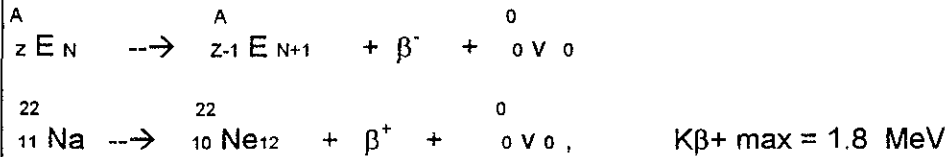


ii) Desintegración β^+

La radiación β^+ está formada por positrones, o electrones positivos, que son partículas con carga +e y masa y espín iguales a las de los electrones ordinarios.

En consecuencia, el núcleo producto de una desintegración β^+ tiene un número de carga una unidad menor y un número de masa igual que los números correspondientes del núcleo original. Nuevamente, ambos núcleos corresponden a elementos diferentes, pero son isóbaros. Al permanecer fijo el número de nucleones, el núcleo producto tiene un protón menos y un neutrón más que el núcleo resultante original; es decir, el resultado de este tipo de desintegración es la transformación de un protón en un neutrón del núcleo. En la Tabla Nuclear, el cuadro del núcleo producto se encuentra un renglón abajo y una columna a la derecha del cuadro del núcleo original. La radiación β^+ también tiene un espectro continuo, lo que sugiere que su emisión va acompañada de

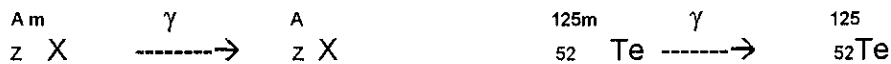
neutrinos. Por lo tanto, el esquema de desintegración es el siguiente :



C: Emisión gamma.

Los fotones gamma acompañan a la desintegración alfa y beta cuando estas partículas no llevan consigo toda la energía correspondiente a la transición entre dos estados fundamentales. Entonces dichos fotones son emitidos simultáneamente con las partículas correspondientes.

Sin embargo, hay estados "excitados" de los núcleos que tienen cierto tiempo de vida, el cual depende de su inestabilidad. Estos estados isoméricos o isómeros, pasan al estado fundamental por emisión de fotones :



La m simboliza el estado metaestable o de alta inestabilidad debido al exceso de energía del núcleo.

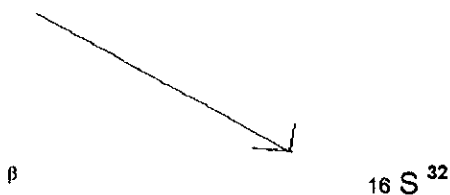
El período de semidesintegración y la energía de los fotones emitidos dependen de la energía de excitación de los isómeros. Los fotones gamma por no poseer masa ni carga, tienen muy bajo poder de ionización y, por consiguiente, un gran poder de penetración en la materia.

Ley del Decaimiento Radiactivo.

La **actividad** de una muestra radiactiva es el número de desintegraciones que ocurren en la misma por unidad de tiempo. En otras palabras, la actividad es la rapidez de desintegración de la muestra.

En esta definición de actividad no se ha especificado, ni es necesario, considerar la composición de la muestra radiactiva. Si la muestra contiene radionúclidos de diferentes tipos, la actividad total es simplemente la suma de las actividades de cada una de las componentes. Obviamente, la actividad de núclidos estables es nula, y su presencia o ausencia en la muestra no afecta a la actividad total de la misma.

Ejemplo : $^{32}_{15}\text{P}$



Una sustancia radiactiva con N átomos en un instante dado t , contiene un determinado número de átomos, dN que se desintegran en un intervalo de tiempo, dt .

Si se mide la actividad de una muestra a intervalos de tiempo iguales y sucesivos, se encuentra que sus valores disminuyen reduciéndose cada vez en la misma proporción. Esta variación de la actividad de una muestra con respecto al tiempo constituye lo que se llama la ley exponencial de decaimiento radiactivo.

El intervalo de tiempo que tiene que transcurrir para que la actividad se reduzca en una cierta proporción depende del radionúclido y es una característica del mismo.

La constante de proporcionalidad λ se llama constante de decaimiento, y corresponde a la fracción del número de átomos presente en la muestra en cualquier instante que se desintegren en la unidad de tiempo. Esta constante de decaimiento es característica para cada tipo de radionúclido y su valor no se ve afectado por el estado físico o químico de la muestra.

II. 5. UNIDADES DE ACTIVIDAD, VIDAS MEDIAS, RADIATIVA, BIOLÓGICA, Y EFECTIVA.

Unidades de Actividad.

Aunque la exposición y más aún, la dosis absorbida son importantes en la cuantificación de la radiación, no establecen una descripción completa de la cantidad de radiación que indique en la materia. La dosis absorbida por si misma, no proporciona alguna información acerca del tipo de radiación, del decaimiento o de la vida media de un radioisótopo determinado.

La cantidad de un radionúclido puede definirse por su actividad de la siguiente manera: la actividad de una cantidad de un radionúclido con un contenido energético particular, es el cociente del número de transiciones nucleares espontáneas en un intervalo de tiempo dado, es decir, el número de desintegraciones por unidad de tiempo.

La nueva unidad del Sistema Internacional desde 1985 es el Becquerel, Bq, que corresponde a 1 dps.

La unidad de actividad aceptada era el curie, cuya abreviatura es Ci. El curie se basaba en la medición de la velocidad de desintegración de un gramo de radio. La actividad del radio fue especificada en términos de miligramos, o algunas veces en términos de la unidad Maché la que es igual a 4×10^{-10} Ci.

En general, sobre todo en las aplicaciones de la Medicina Nuclear, la unidad convencional para la actividad es el curie, el que resulta ser una unidad demasiado grande, por lo que se utilizan submúltiplos del mismo: el milicurie (mCi) y el microcurie (μ Ci), $1 \text{ Ci} = 10^3 \text{ mCi} = 10^6 \mu\text{Ci}$. Esto es debido a que la administración de radiofármacos a pacientes, las cantidades necesarias para la obtención de imágenes y tratamiento en Medicina Nuclear oscilan entre 250 Ci y 20 mCi. Tabla 2.

Tabla 2. Tratamiento en Medicina Nuclear.

ÓRGANO CRÍTICO/ENFERMEDAD	RADIONÚCLIDO	DOSIS ADMINISTRADA
Hipertiroidismo	I-131	Desde 10 mCi (370 MBq)
Bocio multinodular tóxico	I-131	Hasta 25 mCi (925 MBq)
Feocromocitoma maligno y Neuroblastoma	I-131	Dosis variables con 131 MBq Una media de 350 mCi
Dolor óseo metastásico en pacientes con carcinoma prostático y mamario	Sr-89 (Metastrón)	4 mCi (150 MBq) si es necesario, repetir tres meses después.
Sinoviocartrosis por derrame de líquido sinovial	I-90	Varía entre 5 y 10 mCi (185 MBq y 379 MBq)

Actividad específica.

La actividad específica de una muestra radiactiva es la actividad del radionúclido por unidad de masa o de volumen del material correspondiente. Las unidades en que se expresa son : des/seg.g., Ci/g. ó Bq/g ó mCi/l, Ci/ml, etc.

La ecuación $A(t) = \lambda N(t)$ puede servir de base para determinar la actividad específica máxima que se puede tener de un radionúclido libre de acarreador una vez que se conocen la constante de decaimiento ó la vida media del radionúclido así, como su masa atómica.

Vida media radiactiva.

El intervalo de tiempo más usado se llama vida media radiactiva $t_{1/2}$, o período de semidesintegración y corresponde al tiempo necesario para que la actividad de un radioelemento se reduzca a la mitad de su valor inicial, o lo que es lo mismo, cuando $A=A_0/2$, ${}_zA=A_0$ que equivale también a que $A/A_0 = e^{-\lambda t}$ eliminando la exponencial

$$\ln A/A_0 = \ln 2 = \lambda t_{1/2}$$

Como $\ln 2 = 0.693$; $0.693 = \lambda t_{1/2}$. Despejando la λ

$$\lambda = 0.693/t_{1/2}; t_{1/2} = 0.693/\lambda; \lambda \times t_{1/2} = 0.693.$$

La vida media biológica, $t_{1/2} \text{ biol}$ o $t_{1/2} \text{ b}$, es el tiempo necesario para que el organismo elimine la mitad de la cantidad suministrada (dosis) de cualquier sustancia, por un proceso regular de su metabolismo. Este período de tiempo es aproximadamente igual para isótopos estables o radiactivos de un elemento.

La constante de decaimiento biológico, es $t_{1/2} \text{ b} = \lambda \text{ b}$

La vida media efectiva, $t_{1/2} \text{ ef}$, es el tiempo necesario para que la cantidad de un elemento radiactivo, fijado en el tejido del cuerpo, disminuya a la mitad de su actividad original como un resultado combinado de decaimiento radiactivo ($t_{1/2} \text{ rdva}$) y la eliminación biológica ($t_{1/2} \text{ b}$); por lo tanto...

$$t_{1/2} \text{ ef} = t_{1/2} \text{ rdva} \times t_{1/2} \text{ b} / t_{1/2} \text{ rdva} + t_{1/2} \text{ b};$$

$$\lambda \text{ ef} = \lambda \text{ r} + \lambda \text{ b}; 0.693/ T_{\text{ef}} = 0.693 / T_{\text{r}} + 0.693 / T_{\text{b}}$$

II.6. RADIATIVIDAD NATURAL.

En el año de 1900, W. Croockes observó que si una sal de uranio se precipitaba de una solución con carbonato de amonio y si se trataba de redisolver el precipitado formado con un exceso de reactivo, quedaba un residuo. Si este residuo se separaba de la solución por filtración, se encontraba que era altamente radiactivo, en cambio el líquido que contenía prácticamente todo el uranio, al evaporarlo a sequedad producía un residuo que tenía muy poca actividad. Al parecer la actividad observada no era causada por el uranio mismo, sino por otra sustancia que separaba de él. A la sustancia, altamente radiactiva se le dio el nombre de uranio equis, Ux, para distinguirlo del uranio original. La sustancia, resultó ser torio, Th-232.

Por esa misma fecha, H: Bequuerel observó que si el Ux y la solución o el residuo de ésta al evaporarla a sequedad se dejaban en reposo separadamente, por algún tiempo, la actividad del Ux disminuía, mientras que la del uranio aumentaba. Como dato complementario, el Th-232 tiene una $t_{1/2}$ radiactiva de 1.41×10^{10} años.

Tabla 3. Radiactividad natural

ALIMENTOS	pCi/Kg Ra-226	pCi/Kg K-40
Frijol seco	6.1	800 a 4640
Huevos	4.1	840
Pan	3.2	-----
Vegetal fresco	2.4	910 a 4450
Peces	1.2	925 a 4540
Leche	0.25	770 a 1510
Azucar-café	-----	1900

Radiactividad natural en la materia.

Cada ladrillo, cada bloque de concreto, cada silla, cada mueble, el cemento, la cal, el yeso, la pintura, etc., y muchos de los materiales empleados en la construcción de las casas y edificios y cada objeto que nos rodea, tiene alguna forma de isótopo radiactivo natural.

El hombre, al igual que todos los seres, tiene en su organismo microcantidades de elementos radiactivos naturales, entre ellos, C-14, K-40, Rb-87, Sr-87, Cd-111, Pb-204, y Ra-226.

Un hombre "típico" de 70 kilogramos de peso, emite alrededor de...
280,000 dpm por el contenido de k-40

140,000 dpm por el contenido de C-14

40,000 dpm por el contenido de Ra-226

Figura 3.

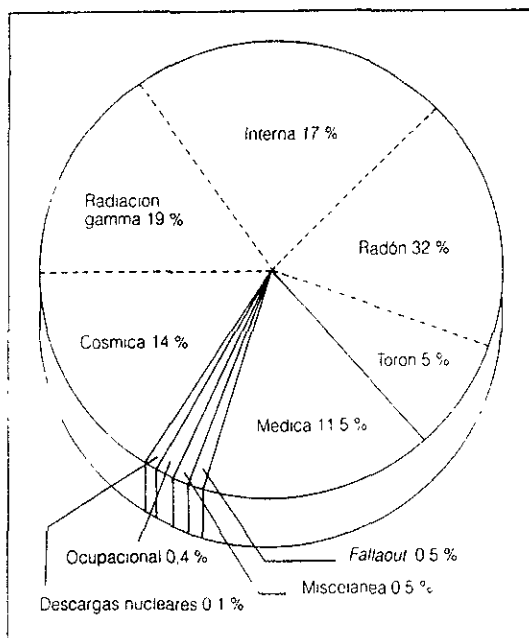
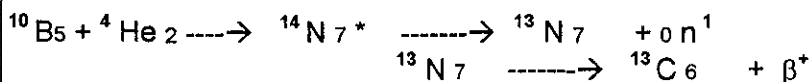


Fig. 3 Representación del aporte relativo de radiación natural y artificial.

II.7. RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

La radiactividad artificial fue descubierta por los científicos Curie-Joliot mientras estudiaban el efecto de las partículas alfa sobre núclidos de elementos ligeros.

Cuando elementos como el boro, magnesio y aluminio fueron bombardeados con partículas alfa del polonio, se produjeron protones o neutrones, tal como se esperaba de las reacciones nucleares alfa - protón y alfa neutrón. Además de esas partículas fueron observados los electrones positivos o positrones (β^+) en una reacción del tipo siguiente :



Se bombardeó nitrato de boro (BN) con partículas alfa durante varios minutos y se calentó con sosa cáustica para liberar todo el Nitrógeno como NH_3 gaseoso. Se encontró que el amoníaco contenía toda la actividad, por lo tanto, el boro había cambiado a un isótopo radiactivo del nitrógeno con la anterior reacción.

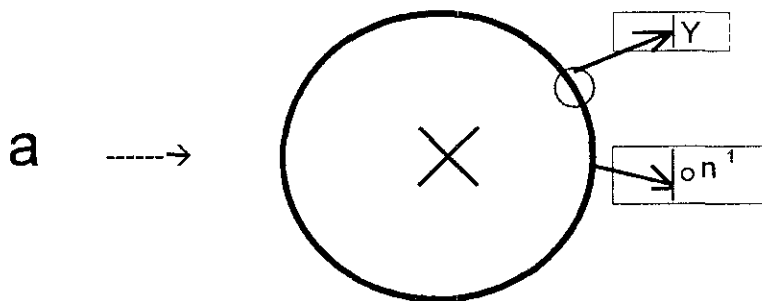
II.8. GENERADORES DE RADIONÚCLIDOS.

Para producir un radionúclido a partir de un isótopo estable, es necesario provocar en éste una alteración en la relación protón - neutrón, Z/N. En otras palabras, es necesario adicionar o extraer protones o neutrones del núcleo, de tal manera que éste se transforme en otra entidad física y en ocasiones sea químicamente diferente. Esto se logra mediante reacciones nucleares adecuadas, provocadas por el bombardeo del núcleo con un determinado tipo de partículas.

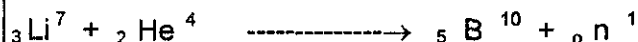
Al núcleo bombardeado se le llama blanco y a la partícula bombardeante, proyectil.

Las reacciones nucleares suelen representarse de la siguiente manera: $X(a,b) Y$, lo que significa que cuando se bombardea un núcleo X con una partícula a , se obtiene un núcleo Y más la partícula o radiación b . Fig. 4

Fig. 4



Ejemplo :



En algunas aplicaciones, especialmente en medicina nuclear es necesario trabajar con radionúclidos de vida corta para reducir al mínimo el tiempo durante el cual el paciente y quienes lo rodean se encuentren expuestos a la radiación correspondiente. Si la vida del radiosótomo de interés es demasiado corta, se tiene entonces el problema de la disponibilidad del mismo entre el momento de su producción y el momento de su utilización. Los generadores de radionúclidos proporcionan una solución a este problema.

En los generadores de radionúclidos se dispone del radionúclido de interés de vida media corta como producto del decaimiento de otro radionúclido de vida media apreciablemente mas larga. El funcionamiento del generador se basa en la separación del radionúclido hijo del radionúclido padre en el momento adecuado para la aplicación del primero. Como ejemplo de pares de radionúclidos y sus vidas medias que se utilizan en este tipo de generadores se puede mencionar :

Tabla 4. Radionúclidos generados.

RADIONUCLIDO PADRE	VIDA MEDIA ($T_{1/2}$)	RADIONUCLIDO HIJO	VIDA MEDIA ($T_{1/2}$)
${}^{99}\text{Mo}$	(66.0 h)	\longrightarrow ${}^{99m}\text{Tc}$	(6.02 h)
${}^{113}\text{Sn}$	(115 d)	\longrightarrow ${}^{113m}\text{In}$	(1.658 h)
${}^{68}\text{Ge}$	(287 d)	\longrightarrow ${}^{68}\text{Ga}$	(68.2 m)

El radionúclido Tc-99m puede ser separado de la columna en que coexiste con su padre, el radionúclido Mo-99 , por medio de elución con una solución salina. El Mo-99 permanece en la columna y seguirá generando mas Tc-99m que puede ser colectada a medida que se vaya necesitando. La siguiente gráfica muestra la actividad del Tc-99m en función del tiempo transcurrido desde la última elución a partir del momento en que solo había Mo-99 en el generador. Como se puede apreciar, la actividad de Tc-99m es máxima aproximadamente después de 23.0 horas.

CAPÍTULO III.
MAGNITUDES Y UNIDADES USADAS EN
PROTECCION RADIOLOGICA.

CAPÍTULO III. MAGNITUDES Y UNIDADES USADAS EN PROTECCION RADIOLOGICA.

III.1. EXPOSICIÓN X :

La exposición es una magnitud creada para medir la intensidad de radiación X o γ a través del efecto que ésta produce en el aire ¿Cual es el efecto?... La ionización. Cuando se producen pares de iones, cada uno de estos será una prueba medible de que ha ocurrido una interacción de un fotón X o γ con un átomo del aire, lo cual significa que si se mide la cantidad de pares de iones se podría conocer el número de fotones que los produjeron. La cantidad de pares de iones se mide a través de la cuantificación de la carga eléctrica acumulada por todos los iones de un solo signo.

La exposición es la cantidad de carga que la radiación electromagnética deposita en la unidad de masa de aire y sus unidades son el Röntgen denotado por R. El Röntgen se define como la cantidad de radiación gamma que en 1 cm^3 de aire seco a condiciones normales produce una unidad electrostática de carga; con estas condiciones la radiación gamma deposita $5.432 \times 10^{13} \text{ eV}$ en cada gramo de aire.

En esta forma la exposición X es el coeficiente de ΔQ entre Δm , donde Q es el valor absoluto de la carga total de los iones de un signo producidos en aire cuando todos los electrones liberados por fotones en una masa de aire m se frenan completamente en aire :

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

En unidades del MKS, X está dada en Coulombs / Kilogramo, y entonces el Röntgen es : $1R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg}$ y también equivale a $1 R = 87.7 \text{ erg / gramo}$.

La rapidez de exposición es el cociente de X entre Δt , es decir :

$$X = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad \text{en} \quad \frac{\text{C}}{\text{Kg}\cdot\text{s}} \quad \text{o} \quad \frac{\text{R}}{\text{s}} \quad \text{o} \quad \frac{\text{mR}}{\text{h}}$$

III.2. RAPIDEZ DE EXPOSICIÓN X.

Este término se entiende como la velocidad con la que la radiación gamma deposita su carga en el aire.

La rapidez de dosis de exposición X se relaciona fácilmente con la actividad de la fuente, si se conoce la constante específica de la radiación gamma, que se denota como Γ , es decir :

$$X = \frac{\Gamma A}{r^2}$$

donde A es la actividad de la fuente radiactiva y r es a la distancia entre la fuente y el punto de interés.

Tabla	5.	Algunos	valores	de	Γ
ACTINIO-227		2.2	IRIDIO-192		4.8
ANTIMONIO-122		2.4	FIERRO-59		6.4
ANTIMONIO-125		2.7	KRIPTON-85		0.04
ARSENICO-72		10.1	MANGANESO-52		18.6
ARSENICO-76		2.4	ESTRONCIO-85		3.0
BARIO-131		3.0	NIQUEL-65		3.1
BARIO-140		12.4	POTASIO-42		1.4
BERILIO-7		0.3	RADIO-226		8.25
BROMO-82		14.6	RADIO-228		5.1
CADMIO-115m		0.2	RENIO-186		0.2
CALCIO-47		5.7	RUTENIO-106		1.7
CERIO-144		0.4	ESCANDIO-47		0.56
CESIO-137		3.3	SELENIO-75		2.0
CROMO-51		0.16	SODIO-22		12.0
COBALTO-60		13.2	TELURIO-132		2.2
COBRE-64		1.2	URANIO - 234		0.1
GALIO-72		11.6	XENON-133		0.1
ORO-199		0.9	ZINC-65		2.7
ODO-125		0.7	ZIRCONIO-95		4.1
ODO-131		2.2			

Γ tiene unidades : (R /h Ci a 1 metro de distancia)

Γ CONSTANTE ESPECÍFICA DE LA RADIACIÓN GAMMA.

III.3. DOSIS ABSORBIDA D.

La dosis absorbida D es la cantidad de energía que absorbe un material al ser expuesto a la radiación. Matemáticamente, D, es el cociente de $\Delta\varepsilon$ entre Δm , donde $\Delta\varepsilon$ es la energía promedio depositada por la radiación ionizante en una porción de materia de masa Δm , es decir:

$$D = \Delta\varepsilon / \Delta m \quad \text{en Joules / Kilogramo}$$

La unidad especial para la dosis absorbida es el rad definido como la cantidad de cualquier radiación que deposita 100 erg de energía en un gramo de cualquier material: 1 rad = 100 erg/gramo.

La rapidez de dosis absorbida es la velocidad con la que la radiación de cualquier tipo deposita su energía en cualquier material expuesto a ella, es decir:

$$D = \Delta D / \Delta t \quad \text{en rad / s} \quad \text{o sus equivalentes.}$$

Actualmente se está empleando la unidad llamada "gray" cuyo simbolo es Gy equivalente a 100 rad.

III.4. RAPIDEZ DE DOSIS ABSORBIDA D.

La rapidez de dosis absorbida D es el cociente de dD entre dt, donde dD es el incremento de dosis absorbida en el intervalo de tiempo dt.

$$D = dD / dt \quad \text{Unidad : j (Kg.s)}^{-1} \text{ o bien } \text{Gys}^{-1}$$

Todavía se usa bastante el rad con otras unidades de tiempo rad h⁻¹, rad min⁻¹, pero está cayendo en desuso.

III. 5. DOSIS EQUIVALENTE H.

En protección radiológica es necesario contar con una relación numérica bien definida entre la dosis absorbida y el efecto biológico que produce. La dosis absorbida es insuficiente para predecir la severidad o la probabilidad del efecto bajo condiciones no especificadas; por ello se ha introducido otra cantidad que interrelaciona mejor con los efectos más importantes.

Esta cantidad se denomina equivalente de dosis H y se define como:

$$H = D (QF)$$

donde D es la dosis absorbida y QF es el factor de calidad que se explicará a continuación.

Si el equivalente de dosis nos sirve para estimar el daño biológico, debe tomarse en cuenta el hecho. Las partículas α producen una gran ionización comparada con la provocada por partículas β y rayos γ . Por ejemplo, en el cuerpo humano expuesto a 1 rad de radiación alfa se provoca tanto daño como 20 rad de ionización gamma. Con base en hechos experimentales se ha podido cuantificar en un llamado factor de calidad, el daño que cualquier tipo de radiación causa con relación a la radiación gamma.

En el Tabla 6, se indican los factores de calidad para diferentes tipos de radiación.

Tabla 6. Factores de calidad. (Tomados del ICRU 40).

RADIACIÓN	FACTOR DE CALIDAD (QF)
Fotones (rayos X y γ) con energías mayores a 30 KeV	1
Electrones con energías mayores a 30 KeV	1
Rayos beta del Tritio	2
Partículas Alfa	25
Neutrones	25
Protones e iones pesados	25

III .6. EFECTOS BIOLÓGICOS DE LA RADIACIÓN.

Los efectos de la radiación ionizante pueden clasificarse en dos grupos :

Efectos no estocásticos o determinísticos : Son aquellos que solo tienen probabilidad de producirse si la dosis de radiación supera un valor umbral, y cuya gravedad, una vez producido, aumenta con la dosis. Para dosis altas recibidas en un tiempo corto el efecto se agudiza.

Efectos estocásticos : Son aquellos que aparentemente no tienen una dosis de umbral a partir de la cual se manifiestan, la probabilidad de que ocurra el efecto independientemente de su severidad, se considera una función de la dosis.

Cuando los efectos se manifiestan en el individuo que se ha expuesto a la radiación ionizante, se denominan efectos somáticos, éstos pueden ser no estocásticos, como son por ejemplo : La esterilidad, cataratas, depleción de células en la médula ósea, o bien, estocásticos, por ejemplo, la inducción del cáncer.

Si los efectos no se presentan en el individuo expuesto, sino afectan a sus descendientes, se denominan efectos hereditarios o genéticos y son estocásticos (alteraciones genéticas, por ejemplo).

III.7. SISTEMA DE LIMITACION DE DOSIS.

DOSIMETRÍA.

La finalidad de la dosimetría es la de proporcionar los datos necesarios para estimar los equivalentes de las dosis recibidas en todo el cuerpo, en la piel o en las extremidades.

Aspectos importantes de los métodos de dosimetría.

1. Evaluación del equivalente de dosis. Para evaluar los equivalente de dosis recibidos se emplean uno o más Dosímetros individuales, que la persona lleva siempre puesto mientras esté trabajando.

En los lugares donde existe una tasa elevada de radiación conviene utilizar dosímetros suplementarios o secundarios, que permiten una lectura o advertencia inmediata.

2. Período de uso de los dosímetros. La duración del período para el que se entregue o use un dosímetro, dependerá de los equivalentes de dosis que se planeen recibir.

3. Colocación de los dosímetros. Colocación de los dosímetros. Los dosímetros deben colocarse en la posición correcta que represente el equivalente de dosis de las partes del cuerpo expuestas.

Para el cuerpo total se colocan generalmente en la cintura o en el pecho.

Cuando se efectúan pruebas de fuga o se repara algún equipo, se usan en la muñeca de la mano o anillo dosimétrico en los dedos.

Requisitos que deben satisfacer los dosímetros :

1. Deben ser pequeños, fáciles de llevar sobre la ropa de trabajo, mecánicamente resistentes y de bajo costo.

2. El intervalo de respuesta debe extenderse desde 0.1 mSv hasta 10 Sv.

3. La respuesta debe ser independiente de la energía de la radiación.

4. La respuesta debe ser, en lo posible, independiente de la orientación del dosímetro.

5. El dosímetro no debe perder información con el tiempo.

6. La respuesta del dosímetro no debe ser afectada por condiciones ambientales normales.

7. La lectura del dosímetro debe ser rápida, sencilla, económica y suficientemente exacta.

En la actualidad son tres los tipos de dosímetros que se utilizan comúnmente en dosimetría personal, éstos son **Dosímetros de Bolsillo**, **dosímetros de película** y **dosímetros termoluminiscentes**.

Objetivos de la Protección Radiológica.

1. Evitar los efectos no estocásticos.
2. Limitar la probabilidad de incidencia de efectos estocásticos hasta valores que se consideran aceptables.
3. Lograr y mantener condiciones apropiadas de seguridad para las actividades que involucren Este objetivo general, aplicado en la práctica médica, abarca tanto al personal encargado de proporcionar la asistencia sanitaria como a los pacientes y al público en general.

El empleo de las radiaciones ionizantes en la industria y la medicina presentan cada vez más interés tanto para los países industrializados como en desarrollo. La dosimetría de las radiaciones permite controlar la calidad de todos los tipos de radiotratamiento: la esterilización de productos médicos, la radioterapia en el tratamiento de cáncer, la conservación de alimentos, el tratamiento de aguas residuales y el de varios tipos de plásticos de muy extendida utilización en la sociedad moderna. Así la dosimetría de dosis altas, que fue una esfera bastante desatendida, se ha convertido en un medio importante de control industrial y médico de calidad.

Tabla 7

Riesgos estimados.		
TEJIDOS U ORGANOS	FACTORES DE RIESGO Sv^{-1} (100 rem^{-1})	EFECTO
Gónadas	10^{-2}	Daño genético grave en dos primeras generaciones
Médula ósea roja	2×10^{-3}	Leucemia
Hueso	5×10^{-4}	Cáncer
Pulmones	2×10^{-3}	Cáncer
Tiroides	5×10^{-4}	Mortalidad por cáncer
Mama	2.5×10^{-3}	Cáncer
Restos de tejido	5×10^{-3}	Cáncer
Un solo tejido del resto	10^{-3}	Cáncer
Cuerpo total, irradiación uniforme	10^{-3}	Cáncer

Teniendo en cuenta que con la gamma de voltajes que se usan en diagnóstico y en terapia normal, un rad es aproximadamente igual a un R, y el efecto biológico es también aproximadamente igual a uno, podemos suponer en estos casos que una exposición expresada en röntgens es numéricamente igual que la dosis biológica relativa expresada en sieverts.

Limites anuales de dosis

La experiencia en los últimos años indica que con el límite anual de 5 rem (50 mSv) se han obtenido valores medios anuales en los grupos de trabajadores ocupacionalmente expuestos inferiores a 500 mrem (5 mSv) esto implicaría un riesgo del orden de 10^{-4} para la mortalidad por cáncer. En consecuencia, se puede considerar que un límite de 5 rem (50mSv) permite un trabajo tan seguro como en las industrias con mayores estándares de seguridad.

En base a los estudios sobre dosis de umbral para los efectos no estocásticos, la COMISION INTERNACIONAL DE PROTECCION RADIOLOGICA (CIPR) considera que un valor límite de 50 rem (0.5 Sv) evitará la ocurrencia de ellos en cualquier órgano, excepto el cristalino de los ojos, para el cual se establece el límite de 30 rem (0.3 Sv). Estos límites se aplican independientemente de que si el órgano se irradia en forma aislada o conjuntamente con otros.

TABLA 8

Límites de dosis equivalente efectiva por año*

APLICACIÓN	LÍMITE DE DOSIS OCUPACIONAL (POE)	H PÚBLICO
DOSIS EFECTIVA	100 mSv en 5 años 50 mSv en un año cualquiera	1 mSv por año Promedio en 5 años consecutivos.
EQUIVALENTE DE DOSIS CRISTALINO	150 mSv por año	15 mSv por año
PIEL	500 mSv por año	50 mSv por año
MANOS	500 mSv por año	50 mSv por año.
EQUIVALENTE DE DOSIS MEDIA AL FETO	5 mSv después del diagnóstico	

- CIPR No. 20 (1990).

CAPÍTULO IV.
DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO DEL CÁNCER
MEDIANTE EL USO DE RADIOISÓTOPOS.

CAPÍTULO IV. DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO DEL CÁNCER MEDIANTE EL USO DE RADIOISÓTOPOS.

La radiactividad es utilizada en la medicina de dos maneras diferentes :

- a) Como agente de información en el diagnóstico. Se utiliza material marcado fácilmente detectable.
- b) En el campo de la terapéutica. Se utiliza la radiactividad como medio de tratamiento celular.

IV.1. DIAGNÓSTICO MEDIANTE EL EMPLEO DE RADIOFÁRMACOS.

Los radiofármacos son preparaciones farmacéuticas que contienen un radionúclido en su composición y que son utilizadas principalmente con fines de diagnóstico en la Medicina Nuclear.

Al administrar un radiofármaco a un ser humano, se puede estudiar la morfología de los órganos y poner en evidencia alguna región de ellos que se encuentre dañada o bien permite efectuar estudios dinámicos para evaluar el funcionamiento de los mismos. Lo anterior se logra por la radiación emitida por el radionúclido, la que puede ser medida desde el exterior del cuerpo por medio de equipos especiales.

La calidad del diagnóstico por medio de estas técnicas depende en gran medida de las propiedades físicas y químicas del radionúclido empleado en el radiofármaco.

Esencialmente son tres las propiedades que se consideran al seleccionar un radionúclido; su vida media física y biológica, el tipo y energía de sus radiaciones al desintegrarse y finalmente la posibilidad de que forme compuestos químicos que funcionen biológicamente.

La vida media debe ser corta o relativamente corta para que pueda detectarse en el organismo sin ocasionar una dosis de radiación excesiva.

Solamente los rayos X y los fotones gamma son susceptibles de ser detectados en la superficie del cuerpo. Las partículas beta, electrones de conversión y fotones de baja energía son absorbidos dentro de los tejidos y, por lo tanto, contribuyen a la dosis de radiación sin proporcionar información.

El radionúclido debe tener propiedades químicas adecuadas o sea, que es necesario que tome una forma química adecuada para que su función biológica sea la requerida. A este respecto se puede decir que debe permanecer en la circulación por un tiempo determinado, excretado de cierta manera, o localizarse en algún tipo de tejido. La excreción debe realizarse lo más rápidamente posible después de cumplir con su función de diagnóstico, con el fin de no incrementar la dosis de radiación de una manera innecesaria.

¹²³I. Emite rayos gamma de 159 kev, decae por captura electrónica y no emite partículas beta. Esto proporciona una penetración adecuada. Su vida media es de 13.3 h por lo que es apropiado para determinaciones en vivo y suficientemente larga para marcar compuestos tales como albúmina, rosa de bengala, aminoácidos etc.; compuestos en los que tradicionalmente se ha utilizado yodo-131.

Algunos ejemplos en los que se utilizan radiofármacos en el diagnóstico del cáncer

1. Seguimiento de pacientes con riesgo elevado, para tumores, que se sabe metastatizan a hueso para una apropiada estadificación de la enfermedad.
2. Tumores óseos benignos y malignos.
3. Diferenciación de tumores óseos primarios, monostáticos y polistáticos.
4. Seguimiento seriado de la respuesta ósea a regímenes terapéuticos (terapia con radiación, quimioterapia antitumor, u otras formas de terapia).
5. Gammagrafía hepato-esplénica.

A) Indicaciones :

a) Detección y evaluación de lesiones focales y ocupativas :

- Abscesos
- Quistes
- Masas abdominales palpables
- *Patología neoplásica primaria y metastásica*

b) Detección de lesiones parenquimatosas del bazo :

- Abscesos
- Infartos y necrosis
- Quistes
- Tumores

c) Para valorar la evolución del tamaño y función del bazo durante y después de un tratamiento.

B) Contraindicaciones :

Ninguna

C) Radiofármaco empleado :

Sulfuro coloidal marcado con Tc-99m.

D) Modo de localización del radiotrazador :

Fagocitosis

E) Sitio de localización :

En el hígado, en las células de Kupffer
En el bazo, en los macrófagos.

Marcadores Tumorales.

Desde 1965, año en que Gold y Frenman reportaron sus trabajos sobre antígenos carcinoembrionicos específicos del sistema digestivo humano, los estudios sobre la utilidad de la detección de ciertas moléculas en el suero humano como indicadores (marcadores tumorales) de la existencia de algun tipo de neoplasia y/o metástasis, han proliferado en forma abundante.

Los descubrimientos y avances en la inmunología y la aplicación de anticuerpos y antígenos radiomarcados ha tenido una rápida y extensa aplicación tanto en técnicas in vitro como in vivo para el diagnóstico de diversas neoplasias y aún más en la actualidad es posible aplicar estos complejos con fines terapéuticos en contra de algunos tumores malignos.

En la actualidad es posible obtener anticuerpos poli o monoclonales con técnicas químicas, de cromatografía y/o técnicas de absorción de tejidos después de la producción de anticuerpos obtenidos de líneas celulares híbridas mediante la inoculación de antígenos específicos (extraídos de tumores, micro-organismos o tejidos normales) en animales de experimentación.

Las técnicas modernas desarrolladas hasta el momento han logrado el fraccionamiento de inmunoglobulinas IgG por medio del empleo de sustancias como la papaína con el fin de obtener fragmentos antigénicos como el Fab y el Fab2 separando la fracción cristalizable del anticuerpo, lo que ha favorecido enormemente la aplicación de éstas técnicas aunado a su especificidad. Fig. 4.

En la preparación del anticuerpo se utiliza un adyuvante de Freund aplicado intradérmicamente en conejos, ratones u otros animales con el fin de obtener una respuesta favorable en la producción de anticuerpo. Los requerimientos iniciales de antígenos requeridos oscilan entre 100-300 ng de Ag. Posteriormente de 2 a 4 semanas se aplica una dosis similar ocasionalmente intraperitoneal con posibilidades de aumentar la dosis y una o dos semanas después se pueden obtener títulos altos de anticuerpos los cuales se obtienen en un tubo libre de pirógenos manteniéndose a una temperatura cercana a los 4° C. Después de la fragmentación.

La posibilidad de detectar productos tumorales ha desarrollado la producción de los denominados marcadores tumorales y hasta el momento podemos señalar algunos con aplicaciones clínicas específicas: Desde 1965 Gold y Freedman reportaron la utilidad del *antígeno carcinoembriogénico (CEA) como un marcador útil en el diagnóstico del cáncer del tracto gastrointestinal*. También Abelev demostró que el *antígeno oncofetal y la alfafetroproteína (AFP) se relacionan directamente con el hepatoma*.

Figura 5. Producción de fragmentos de anticuerpos.

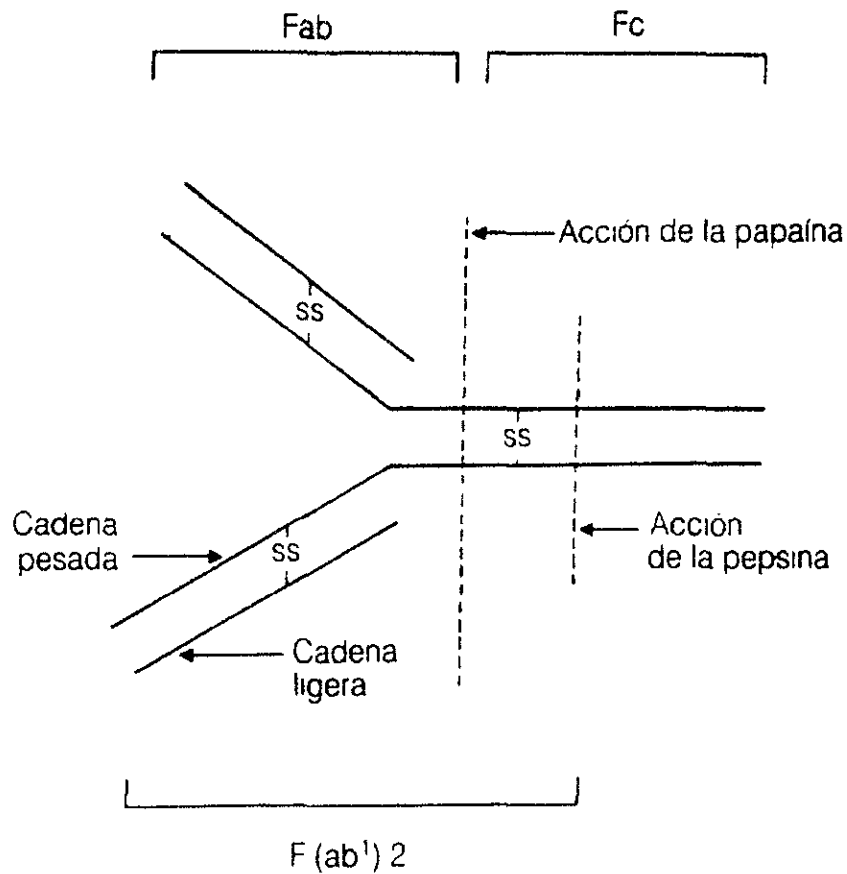


Fig. 5. La molécula de IgG puede dividirse en 3 fragmentos, de 50,000 daltons cada uno, por digestión enzimática con papaína (dos fragmentos Fab y un fragmento Fc). La digestión con pepsina produce un fragmento F(ab')₂ y un subfragmento Fc. Los fragmentos Fab pueden obtenerse también por rotura de la unión disulfuro del fragmento F(ab')₂.

En la actualidad es posible obtener anticuerpos poli o monoclonales con técnicas químicas, de cromatografía y/o técnicas de absorción de tejidos después de la producción de anticuerpos obtenidos de líneas celulares híbridas mediante la inoculación de antígenos específicos (extraídos de tumores, micro-organismos o tejidos normales) en animales de experimentación. Fig. 6.

Fig. 6.

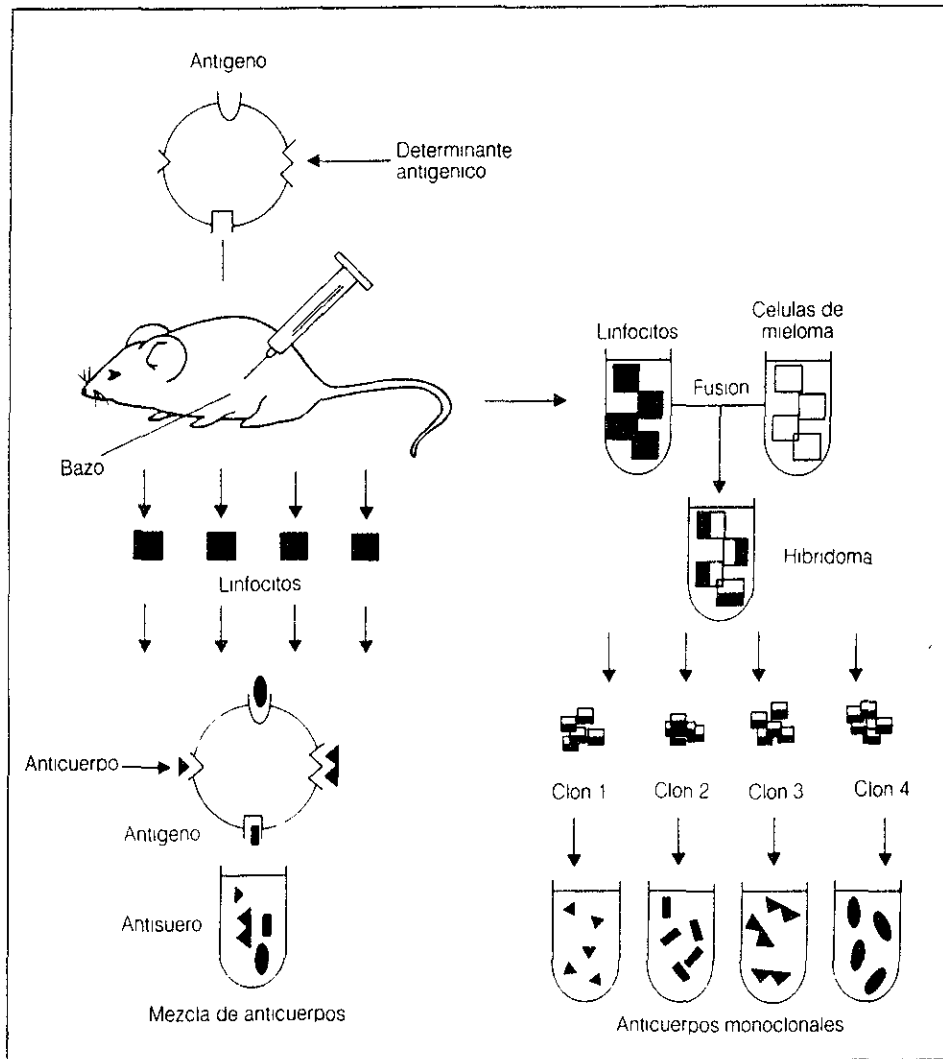


Fig. 6. Obtención de anticuerpos monoclonales. La respuesta inmune se inicia cuando una molécula de antígeno, portadora de varios determinantes antigénicos penetra en el cuerpo del animal. La respuesta del sistema inmune implica una proliferación de estirpes de linfocitos B. Cada estirpe segrega moléculas de inmunoglobulinas que se acoplan a un único determinante antigénico o a una parte de él. El antisuero convencional contiene una mezcla de estos anticuerpos. Los anticuerpos monoclonales proceden de linfocitos de bazo fusionados con células de mieloma maligno. Se clonan las células híbridas individuales; cada clon segrega un único determinante antigénico.

Es así como los marcadores tumorales se han definido como un conjunto de compuestos cuya presencia en el plasma o su aumento sobre una determinada concentración, puede relacionarse con la existencia de células cancerosas. Mantiene niveles normalmente bajos de forma que un incremento significativo es presuntivo de proliferación tumoral.

Para que un compuesto pueda aprovecharse como marcador tumoral es necesario que su concentración guarde una estrecha relación con la proliferación de las células tumorales, debiendo determinarse su concentración en fluidos biológicos mediante técnicas analíticas adecuadas y sensibles como RIA o IRMA. Tabla 10.

T A B L A 9. Indicaciones de algunos marcadores tumorales.

INDICACIONES	MARCADORES TUMORALES
Pulmón	NSE * CEA * CYFRA 21-A
Hígado	AFP * CEA
Estómago	CA 72-4 * CA 19-9 * CEA
Colon-Recto	CA 19-9 * CEA
Próstata	PAP * PSA
Cerebro	NSE
Tiroides	CT * TG
Mama	CA 15-3 * CEA
Ovario	CA 125 * CEA * CA 72-4
Endometrio	CEA * CA 19-9
Trofoblasto	fbeta hCG * CEA
Testículos	fbeta hCG * AFP

Subsecuentemente se demostró que estos marcadores tumorales no eran específicos para la detección de dichos tumores pero los niveles en plasma pueden relacionarse con la presencia y medida de dichos tumores.

La determinación de la AFP ha constituido un valioso apoyo como :

- Auxiliar en el diagnóstico del hepatocarcinoma, donde su sensibilidad va del 30 al 80 % de acuerdo al estadio.
- Auxiliar en el diagnóstico de tumores testiculares de células germinales. Su sensibilidad va del 60 al 80 % de acuerdo al estadio, excepto para el seminoma.
- Auxiliar en el monitoreo del período de post-tratamiento, así como en la presencia de recurrencias o metástasis.
- Auxiliar en el diagnóstico prenatal de defectos del tubo neural (determinación en líquido amniótico).
- Se han notado valores aumentados de carácter inespecífico principalmente en:
 - Hepatitis crónica o aguda y cirrosis.
 - Otros carcinomas metastásicos.
 - Embarazos múltiples.

CA-125 con valores por encima de 35 U/ml se asocia a cáncer de ovario con una sensibilidad del 90% para el tipo seroso y la asociación de éste con el CEA y el CA-72-4 nos ayuda en el diagnóstico de adenocarcinomas mucinosos.

IV.2. APLICACIONES TERAPÉUTICAS DE LOS RADIOFÁRMACOS.

Una vez que el radioterapeuta, conocidos los aspectos histopatológicos y clínicos del tumor, ha decidido un tratamiento raditerápico, lo podrá llevar a cabo con fines:

- Curativos.
- Paliativos.
- Profilácticos.

Se empleará con fines curativos cuando las características del tumor y el estado general del paciente hagan pensar que mediante su aplicación se podrá alcanzar la erradicación total del tumor. Como todo tratamiento radical, se acompañará de reacciones secundarias que desaparecerán en pocas semanas al finalizar el tratamiento.

Se empleará con fines paliativos cuando se pretenda únicamente disminuir la sintomatología del paciente, procurando una prolongación de su supervivencia más confortable, bien aliviando los síntomas angustiantes (hemorragia, dolor, obstrucción), aunque no se prolongue su supervivencia, o impidiendo que ocurran síntomas inminentes, como hemorragias, obstrucciones, perforaciones, fracturas óseas espontáneas, etc. La dosis en estos casos será baja (< 50 Gy), condición indispensable, ya que no debe contribuir a empeorar el estado general del paciente que es, en definitiva, lo que se pretende mejorar.

Ejemplo de sustancias radiactivas procedentes de fuentes abiertas (radiofármacos).

Au-198	Coloidal
I-131	de sodio
I-131	microesferas
P-32	sódico
P-32	polimetafosfato
P-32	coloide
Pd-103	suspensión
Y-90	microesferas
Yb-169	
Tc-99m	
Cs-137	
Ir-192	
Co-60	
I-135	

Ejemplos de sus usos :

El ion fosfato es un constituyente normal de la sangre. En muchas clases de tumores parece que los fosfatos están presente en los tejidos cancerosos en concentraciones varias veces mayores que en los tejidos sanos circundantes. Esto brinda un modo de usar el P-32 para diferenciar las células cancerosas de sus vecinas. Debido a que el P-32 emite rayos beta, pero no gammas el contador tiene que ser colocado muy próximo al tejido sospechoso, puesto que las partículas beta tienen muy poco poder de penetración. Este hecho limita el uso de la prueba a cánceres de la piel a los que han quedado expuestos por intervención quirúrgica.

Algunos tipos de tumores cerebrales, por ejemplo, son difíciles de diferenciar a simple vista del tejido cerebral sano. En tales casos puede darse al enfermo una

inyección intravenosa de fosfato marcado con P-32, algunas horas antes de intervenirlo. Luego es posible mover en derredor del sitio operatorio una diminuta sonda sensible a radiación beta para señalarle al cirujano los límites del área cancerosa.

IV.3. OBJETIVOS DE LA RADIOTERAPIA ANTINEOPLÁSICA.

El objetivo de la radioterapia antineoplásica consiste en la destrucción lo más amplia y completa posible del tumor con mínima lesión de las estructuras orgánicas sanas vecinas y sin consecuencias orgánicas generales.

Este objetivo se conseguirá tanto más cuanto más selectivamente se destruyan las células tumorales y cuanto menos se lesione el tejido sano circundante, que es donde se originará posteriormente el proceso reparador.

Como ejemplo :

Cesio-137 (¹³⁷ Cs)

Es el radionúclido más utilizado en la actualidad en braquiterapia. Se extrae de los productos de fisión del uranio utilizado en los reactores nucleares. Su período es largo, 27 años. Emite electrones y rayos γ de 0.66 MeV y su costo es reducido.

Las fuentes de ¹³⁷ Cs se utilizan en ocasiones en aparatos de teleterapia, las ventajas que presenta el ⁶⁰ Co respecto a ellas en esta modalidad de tratamiento han hecho que su utilización sea escasa. Presentan, como ventaja una débil tasa de pérdida de actividad, pero el poder de penetración de su radiación, por ser menos energética, es menor que el del ⁶⁰ Co y, además, su actividad específica es mucho más débil, sólo permite fabricar fuentes de pequeñas dimensiones exigiendo, por tanto, una menor protección.

En braquiterapia, sin embargo, sustituye con ventaja al ²²⁶ Ra, es menos costoso, no entraña riesgo de contaminación, y emite fotones de energía inferior.

Se presenta en forma de tubos o agujas o bien en forma de granos de pequeñas dimensiones que, colocados en sondas apropiada, permiten fabricar fuentes flexibles de diferentes longitudes.

IV.4. CONTROL DE CALIDAD DE LOS RADIOFÁRMACOS EMPLEADOS.

El control de calidad es el corazón de las operaciones en Radiofarmacia. Cada radiofármaco debe someterse a varias pruebas de control de calidad antes de su aplicación en humanos.

Controles Físicos y Físico-Químicos

- _ Características organolépticas.
- _ Tamaño y número de partículas.
- _ pH

_ Pureza radionucleídica. Se define como la proporción de actividad total debida al radionúclido especificado.

Controles Químicos.

_Pureza radioquímica. Es importante el control cromatográfico de la pureza radioquímica de los radiofármacos, para evitar errores en la interpretación de los fenómenos biológicos o fisiopatológicos a estudiar.

Controles Biológicos.

_ Esterilidad. Ausencia de microorganismos viables, siendo una condición fundamental de toda preparación para uso parenteral.

_ Apirogenicidad. Ausencia de pirógenos. Los pirógenos son en su gran mayoría endotoxinas, generalmente solubles y termoestables.

_ Distribución biológica. Permite estimar el comportamiento "in vivo" de un radiofármaco antes de ser suministrado al paciente.

Estabilidad.

Debido a la gran variedad estructural de los compuestos usados como radiofármacos, se pueden esperar varios tipos de descomposición, siendo los principales :

- _ Hidrólisis
 - _ Óxido-reducción
 - _ Autorradiólisis
- Almacenaje.

Todos los radiofármacos deben ser apropiadamente almacenados para evitar que se degraden por la acción de la luz o temperatura.

Distribución.

Este es el aspecto más importante de una de las operaciones de radiofarmacia. Comienza con la prescripción de la solicitud hecha por el médico para un estudio dado. Cada estudio debe ser registrado en una libreta de control.

Las dosis deben ser prescritas por los médicos nucleares, la dosis se pone en una jeringa y dentro de una barrera de plomo, se mide la dosis en un calibrador de dosis y se vuelve a su protector y se transporta al cuarto donde se administrará.

Todas las dosis dispensadas, su contenido y su cantidad, el nombre del paciente, tipo de estudio deben ser registrados en la libreta de control.

Eliminación de desechos.

Los desechos radiactivos deben disponerse de acuerdo a las normas establecidas por la Comisión de Energía Atómica. En México, Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias CNSNS.

En muchas instituciones, una área es designada para el almacenaje y disposición de los desechos radiactivos. Todos los desechos radiactivos deben tener la fecha y nombre del radionucleido.

CAPITULO V.
CÁLCULO DE LA DOSIS EMPLEADA PARA EL
TRATAMIENTO EN DIFERENTES TIPOS DE NEOPLASIAS.

CAPITULO V. CÁLCULO DE LA DOSIS EMPLEADA PARA EL TRATAMIENTO EN DIFERENTES TIPOS DE NEOPLASIAS.

Calibración de dosis.

La dosis se define como la energía de radiación absorbida por cualquier materia. En términos generales la cantidad de un radiofármaco administrado en GBq (Ci), MBq (mCi), KBq (uCi). Cada dosis individual debe ser determinada antes de administrarse a los pacientes. Estas determinaciones de medición son llevadas a cabo en un calibrador de dosis.

Después de calibrar la dosis, es puesta dentro de un contenedor de plomo en una charola y tenerla lista para su uso. Toda dosis debe estar membretada con el nombre del radiofármaco.

Los cuidados que debemos de tener al disparar una dosis, es hacerlo en una campana de flujo laminar y bajo condiciones asépticas, para evitar introducir contaminantes al radiofármaco.

El estado físico de los radiofármacos es muy importante, tanto en su manejo, como en la dosificación y el tipo de estudio a realizar. Fig. 7

Fraccionamiento de la dosis en radioterapia

Antecedentes

Los esquemas de irradiación utilizados habitualmente en el tratamiento del cáncer son esquemas multifraccionados definidos por una dosis/fracción comprendida entre 1,5 y 2,5 Gy, administrada 5-6 días por semana durante un período de 4-7 semanas. Su introducción en clínica humana proviene, en gran medida, de las experiencias llevadas a cabo por los radioterapeutas franceses Regaud y Coutard entre 1920 y 1930.

Básicamente, tales experiencias, realizadas irradiando testículos de carnero, se pueden resumir así:

1. La irradiación fraccionada puede conseguir la esterilización de los testículos del animal sin lesión excesiva para la piel del escroto.
2. La irradiación a dosis únicas, suficientemente elevadas como para producir la lesión cutánea grave, hace difícil conseguir la esterilización testicular.

Suponiendo que los testículos del animal representan un modelo aceptable del crecimiento tumoral y que la piel del escroto constituye un modelo, aceptable también, de tejido limitante de la dosis (hipótesis válidas de acuerdo con las ideas actuales), se puede generalizar el siguiente postulado: "En el tratamiento del cáncer, el fraccionamiento de la dosis conduce, en numerosas ocasiones, a mejores índices del control tumoral, para un cierto nivel de lesión en el tejido normal, que dosis únicas equivalentes en términos de isoefecto".

Hoy, 60 - 70 años después de que tuviesen lugar dichos experimentos, tenemos una idea bastante aproximada de los mecanismos radiobiológicos subyacentes al efecto ventajoso del fraccionamiento en el control tumoral. Tales mecanismos son, en síntesis, los siguientes:

- **Reparación de la lesión celular subletal.**
- **Redistribución celular.**
- **Reoxigenación tumoral.**
- **Regeneración (proliferación) celular clonogénica.**

En la práctica para obtener la curación de un cáncer en radioterapia es casi siempre necesaria la irradiación fraccionada.

Mediante un fraccionamiento clásico (5 sesiones por semana de 2 Gy).

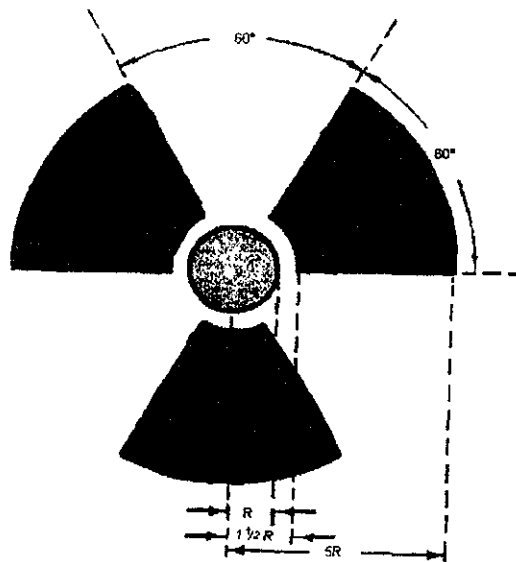


Fig. 7 En las características del *Símbolo Internacional de Radiación* las dimensiones son arbitrarias, pero no las proporciones

CAPITULO VI.
INSTRUMENTACIÓN BÁSICA.

VI. INSTRUMENTACIÓN BÁSICA.

Importancia de algunas construcciones modernas en aparatos de radioterapia. Para evitar dosificaciones excesivas es muy importante una construcción racional de los equipos.

Mandos de kV, miliamperios y tiempo.

Por regla general los kV se ajustan al valor requerido mediante un mando o conmutador de varias posiciones, y normalmente se cuenta con un kilovoltímetro que está conectado al primario del transformador de A.T., PERO CALIBRADO EN Kv DE TENSIÓN EN EL TUBO. Como ocurre en el equipo para diagnóstico, la carga del tubo hace que caiga la tensión en la red de alimentación y, por tanto la marcación en kV deberá corregirse haciendo uso de una tabla o mediante dispositivos automáticos en el circuito del aparato.

La intensidad en el tubo también se controla mediante un mando en el pupitre de control y puede leerse en uno o dos miliamperímetros. Hay algunos aparatos para radioterapia en los que la intensidad del tubo está estabilizada a un valor fijo.

Accesorios y aparatos.

Entre los accesorios de uso corriente, los primeros que han de mencionarse son los localizadores. Estos no solo dan una buena idea acerca del tamaño del campo que se irradia, sino también una indicación exacta de la distancia. Sin embargo con cada localizador habrá que asegurarse de que el tamaño del campo es en realidad totalmente irradiado por el haz que pasa por el diafragma (fig. VI.1). Para el tratamiento de grandes superficies son preferibles los localizadores rectangulares a los circulares, ya que permiten tratar campos diferentes haciendo que queden exactamente adyacentes unos a otros sin el peligro de dosis excesivas en las interacciones de los campos. Haciendo cuidadosamente una marca en la piel siguiendo el borde interior del localizador, el campo adyacente puede hacerse coincidir con toda exactitud sin que queden zonas libres. Digamos de paso que una estrecha banda solapada no entraña graves riesgos de exceso de dosis.

Igualmente es un medidor de distancias, usualmente en forma de indicador de centro, cuando no se usa localizador. La dificultad con varias distancias diferentes es que se pueden cometer fácilmente errores de dosificación debido a la constante necesidad de realizar cálculos de conversión. Por tanto, para evitar errores se deberá reducir a un mínimo el número de distancias y localizadores utilizados.

Si se utiliza un diafragma luminoso, es indispensable un medidor de distancias para evitar errores en la valoración de la D.F.P.

Habrà que disponer de láminas de plomo suficientes para circunscribir campos irregulares. Lámina de plomo de 0.2 a 0.5 mm de espesor es bastante adecuada para este fin y puede adaptarse a la forma requerida.

Aparatos para terapia superficial.

Por lo que se refiere a los aparatos normalmente se usan aparatos de media onda (sin válvulas o con 1 ó 2 válvulas), provistos algunas veces de condensadores. La selección de tensión y corriente debe ser libre y ajustable o, en el caso de aparatos mas o menos automáticos, deberán poseer pasos o posiciones fijas. Un

voltímetro de red y un mando de ajuste permiten escoger la tensión requerida. Si el aparato comprende un estabilizador de corriente de filamento, este accesorio compensará cualquier variación de la red; si se dispone además de una *compensación de tensión*, el *régimen de dosis* permanecerá automáticamente constante durante la irradiación haciendo innecesario todo reajuste. Para evitar dosificaciones erróneas a consecuencia de un defecto en el miliamperímetro se prescribe a veces (como ocurre en Alemania) el disponer de dos miliamperímetros conectados en serie.

El filtro extra aplicado influye no sólo sobre la calidad sino, principalmente, sobre la cantidad de radiación. Si, accidentalmente, se usa un filtro fino o se omite el filtro cuando el tratamiento requiere un filtro grueso, el resultado puede ser una seria lesión por radiación debida a dosis excesiva. Si no se ha colocado filtro alguno, un dispositivo de seguridad, incorporado de la ventanilla del tubo para evitar el paso de radiación no filtrada.

Aparatos para radioterapia profunda convencional.

Mientras que en los aparatos para diagnóstico se requieren elevadas energías durante cortos períodos de tiempo (lo que ha llevado a la construcción de aparatos con 4 y 6 válvulas), la exigencia esencial en los aparatos para radioterapia es el disponer de energías relativamente pequeñas durante largos períodos.

En muchos casos es satisfactorio un aparato sin rectificación (media onda). Esta clase de aparato se encuentra con frecuencia tanto en las secciones para radioterapia superficial como para profunda. Sin embargo, en radioterapia se aprecia mucho más el empleo de condensadores que en diagnóstico.

CAPITULO VII.
NORMAS Y LEGISLACIONES
EN SEGURIDAD RADIOLÓGICA.

CAPITULO VII. NORMAS Y LEGISLACIONES EN SEGURIDAD RADIOLÓGICA.

REGLAMENTO GENERAL DE SEGURIDAD RADIOLOGICA (PUBLICADO EN EL DIARIO OFICIAL EL 22 DE NOV. DE 1988.

La exposición a la radiación, involucra el riesgo de sufrir efectos perjudiciales; al reconocer la existencia de este riesgo los límites de dosis deben ser tales que el riesgo correspondiente supuesto sea aceptable para el individuo y para la sociedad en vista de los beneficios obtenidos de tal actividad. El riesgo "aceptable" es difícil de determinar, se requiere de buen juicio y de un análisis detallado del beneficio de la práctica contra el riesgo de la exposición dada.

OBLIGACIONES.

La Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear, publicada en el Diario Oficial de la Federación, el 4 de febrero de 1985, obliga al permisionario, al encargado de la seguridad radiológica y al personal ocupacionalmente expuesto, a seguir normas de seguridad física y radiológica establecidas en la misma Ley y en los reglamentos que expide la CNSNS. A la fecha, existe un proyecto de Reglamento General de Seguridad Radiológica que se encuentra en etapa de aprobación por la Cámara de Diputados. Mientras que se apruebe, el permisionario y el encargado de la seguridad radiológica se comprometen a cumplir lo indicado en la solicitud presentada a la CNSNS y en la licencia o autorización de adquisición, importación, exportación, posesión, uso, transferencia, transporte, almacenamiento, destino o disposición final de material radiactivo, en caso de serles otorgada. A continuación se indican las responsabilidades y funciones del permisionario, del encargado de la seguridad radiológica y del personal ocupacionalmente expuesto :

DE LAS OBLIGACIONES DEL PERMISIONARIO.

ARTICULO 147. El permisionario será responsable directo de la seguridad radiológica de la institución y/o empresa ante la COMISION NACIONAL DE SEGURIDAD NUCLEAR Y SALVAGUARDAS (CNSNS), y son sus obligaciones :

- I). Registrar ante la CNSNS al personal ocupacionalmente expuesto y a los integrantes del grupo de seguridad radiológica, documentando su nivel de estudios y capacitación, los cuales deberán ser consistentes con el trabajo y funciones que se le asignarán en la instalación.
- II). Apoyar al encargado de la seguridad radiológica en todos los aspectos relacionados con la elaboración, ejecución, supervisión y modificación del programa de Seguridad Radiológica.
- III) Proporcionar a todo el personal ocupacionalmente expuesto, el entrenamiento, información vestuario, equipo, accesorios y dispositivos de protección radiológica adecuados al trabajo que realicen y la atención médica necesaria en los casos de accidentes radiológicos.

- IV) Cumplir con el contenido del Informe de Seguridad y con las condiciones de la licencia.
- V) Dar aviso y entregar los informes a la CNSNS en caso de accidentes radiológicos, acorde a lo que se indica en el Artículo 23 de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear.
- VI) Notificar de inmediato a la CNSNS cualquier robo o extravío de fuentes de radiación ionizante.
- VII) Vigilar que el encargado de la seguridad radiológica cumpla con sus funciones, analizando y evaluando conjuntamente con él, los reportes e informes que sobre seguridad radiológica le sean presentados.
- VIII) Elaborar y mantener en condiciones operativas el Plan de Emergencias Radiológicas.
- IX) Dar a conocer a todo el personal ocupacionalmente expuesto el Manual de Seguridad.
- X) Expedir al personal ocupacionalmente expuesto, los certificados anuales y constancias al término de la relación laboral, de los equivalente de dosis individuales recibidos en las 52 semanas anteriores y de la dosis total acumulada a la fecha. Copia de estos documentos se enviarán a la CNSNS con la firma de recibido del trabajador.
- XI) Llevar registro de los exámenes médicos practicados al personal ocupacionalmente expuesto, mismos que se realizarán cada año y contendrán historia clínica completa y exámenes de laboratorio y gabinete.
- XII) Vigilar que en los locales de almacenamiento del material radiactivo se lleven registros de entrada y salida del material.
- XIII) Verificar periódicamente el inventario de material radiactivo de acuerdo a lo señalado en el Informe de Seguridad.
- XIV) Brindar las facilidades que se requieran durante las inspecciones que practique la Comisión.
- XV) Proporcionar la información que se le requiera durante las inspecciones.
- XVI) Presentar a los inspectores los manuales, registros o documentos relacionados con la seguridad radiológica, cuando los soliciten
- XVII) Efectuar las pruebas y operaciones que se requieran durante la inspección.
- XVIII) Permitir a los inspectores de la Comisión la toma de muestras suficientes para realizar los análisis y comprobaciones pertinentes.
- XIX) Corregir las anomalías detectadas en las inspecciones y remitir a la Comisión, en su oportunidad, el informe de corrección correspondiente.

XX) Firmar y rubricar toda la documentación que se remita o presente a la Comisión.

XXI) En su caso, cubrir todos los gastos derivados de los accidentes radiológicos incluyendo indemnizaciones a terceros.

XXII) Notificar a la Comisión, para su autorización, de la venta, préstamo, arrendamiento, donación o depósito de fuentes de radiación ionizante.

DEL ENCARGADO DE LA SEGURIDAD RADIOLÓGICA.

- I) Establecer las normas de seguridad radiológica y física aplicables al uso, transporte, almacenamiento, desecho y otras actividades con material radiactivo.
- II. Adiestrar y calificar al personal ocupacionalmente expuesto en la aplicación correcta de las normas de seguridad radiológica y física, así como vigilar su cumplimiento durante las operaciones que se realicen con las fuentes de radiación ionizante.
- III. Establecer el programa de vigilancia radiológica para la determinación, registro, análisis y evaluación de los equivalentes de dosis recibidos por el personal ocupacionalmente expuesto.
- IV. Vigilar que al personal ocupacionalmente se le proporcione el vestuario, equipo, accesorios y dispositivos de protección radiológica apropiados y asegurarse de que louse adecuadamente.
- V) Identificar las zonas, lugares, operaciones y condiciones potencialmente pueden causar exposición a la radiación.
- VI. Comunicar de inmediato al permisionario cualquier hecho que a su juicio pueda implicar un aumento en el riesgo de exposición a la radiación durante el manejo de las fuentes de radiación ionizante a fin de aplicar las medidas correctivas pertinentes.
- VII. Notificar de inmediato a la Comisión cualquier robo o extravío de fuentes de radiación ionizante.
- VIII. Desarrollar proyectos, procedimientos y métodos para mantener la exposición a la radiación del personal ocupacionalmente expuesto y del público, tan baja como razonablemente pueda lograrse, (concepto ALARA) pero inferior a los límites de equivalente de dosis establecidos en este reglamento.
- IX. Elaborar y supervisar el programa de pruebas de buen funcionamiento y calibración de todo el equipo detector y medidor de radiación.
- X. Elaborar, supervisar y participar en los programas de entrenamiento del personal ocupacionalmente expuesto.

**ESTA TESTS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

- XI. Llevar registro de los equivalentes de dosis recibidos por el personal ocupacionalmente expuesto, anexando el equivalente de dosis recibido en empleos anteriores cuando hayan sido presentadas las constancias respectivas.
- XII. Vigilar que el manejo y la eliminación de los desechos radiactivos se realicen conforme a las normas de seguridad radiológica aplicables.
- XIII. Efectuar levantamiento de niveles de radiación al final de cada jornada de trabajo y después de ocurrido algún incidente o accidente radiológico, sobre las superficies de trabajo, en pisos y paredes adyacentes a las áreas de manipulación de los materiales radiactivos. Efectuar frotis para detectar contaminación en ductos, filtros y/o ventiladores de aire y en alcantarillas de drenaje en su caso.
- XIV. Estar presente durante el desarrollo de las inspecciones que practique la Comisión al permisionario.
- XV. Proporcionar la información solicitada por los inspectores en el curso de la inspección.
- XVI. Corregir las anomalías detectadas en la inspección.
- XVII. Elaborar y recabar la documentación necesaria para la obtención y renovación oportuna de las licencias.
- XVIII. Elaborar, actualizar, controlar, archivar los planos, informes, registros y escritos relacionados con el Informe de Seguridad y con las inspecciones practicadas por la Comisión.
- XIX. Participar en la elaboración, actualización y aplicación del Plan de emergencias de la instalación.
- XX. Acudir de inmediato a la instalación en caso de accidente radiológico para coordinar y supervisar las operaciones que deban llevarse a cabo, avisando del hecho a la Comisión.
- XXI. Elaborar un programa de entrenamiento para casos de emergencia que comprenda tanto los accidentes radiológicos potenciales durante operaciones rutinarias, como aquellos que pudieran ocurrir como consecuencia de un incendio, explosión, inundación, derrumbe u otros siniestros que incluya simulacros periódicos con el personal ocupacionalmente expuesto.

DE LOS REQUISITOS Y OBLIGACIONES DEL PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO. (P.O.E.)

- Artículo 159.** El personal ocupacionalmente expuesto deberá:
- I). Estar registrado ante la Comisión;
 - II). Ser mayor de 18 años;

III). Poseer certificado de estudios profesionales, según lo estipulado por la norma técnica correspondiente. Este certificado deberá ser expedido por la autoridad correspondiente, y

IV). Contar con la autorización de la Comisión respecto a su capacitación y adiestramiento.

Artículo 160. Son obligaciones del personal ocupacionalmente expuesto:

- I. Conocer y aplicar correctamente los principios básicos de seguridad radiológica.
- II. Evitar toda exposición innecesaria a la radiación de su persona, de los trabajadores y del público.
- III. Cuidar y vigilar que cuando dejen de utilizarse las fuentes de radiación ionizante, se encuentren en condiciones adecuadas de seguridad radiológica y física, el material radiactivo en sus contenedores y el equipo que contiene las fuentes o el generador de radiación, en posición de apagado.
- IV. Comprobar cuando salga de una zona donde exista riesgo de contaminación radiactiva, que su persona o vestuario no estén contaminados
- V. Conocer y aplicar correctamente las normas, instrucciones y procedimientos contenidos en el Manual de Seguridad del permisionario.
- VI. Conocer el manejo y uso correcto de las fuentes de radiación ionizante, del equipo detector y medidor de radiación, de los accesorios y dispositivos de seguridad radiológica y, de los factores de blindaje, distancia y tiempo, en el grado que lo requieran sus funciones y responsabilidades.
- VII. Portar durante la jornada de trabajo los dosímetros personales que se requieran de acuerdo a lo estipulado en el Manual de seguridad.
- VIII. Enterarse de los equivalentes de dosis que ha recibido en el desempeño de sus labores con la periodicidad con que se anoten en el registro correspondiente.
- IX. Permitir la toma de muestras biológicas que se requieran para la vigilancia médica y para las pruebas de bio-ensayo.
- X. Proporcionar con veracidad los datos que le sean requeridos durante las inspecciones que realice la Comisión.
- XI. Remitir al permisionario toda la documentación relativa a las inspecciones de seguridad radiológica practicadas por la Comisión en las que intervenga en sustitución del encargado de la seguridad radiológica, y
- XII. Conocer la conducta a seguir en caso de accidente radiológico.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Gotta, H.
MEDICINA NUCLEAR. APLICACIONES CLÍNICAS.
Fondo Educativo Interamericano, S.A.
USA (1988)
2. Alfredo Cerdán Assad
COMO DERROTAR AL CANCER
Edamex, S.A.
MÉXICO (1992)
3. Junqueira, Carneiro, López Sáez.
BIOLOGIA CELULAR
Ediciones científicas
La Prensa Médica
Mexicana, S.A. de C.V.
6ª. Reimpresión, 1995.
4. A. Biete Solá
MONOGRAFÍAS CLÍNICAS EN ONCOLOGÍA
RADIOTERAPIA EN EL TRATAMIENTO DEL CÁNCER
Ediciones Doyma S.A.
BARCELONA España 1990.
5. Gil Gayarre, Delgado Macias, Martínez Morillo
MANUAL DE RADIOLOGIA CLINICA
Harcourt Brace de Españ, S.A.
Harcourt Brace International
División Iberoamericana
Segunda reimpresión 1997.
6. Dena Espinoza, Nava Rodríguez, Pérez Díaz
MANUAL DE TÉCNICAS EN RADIOLOGÍA E
IMAGEN
EDITORIAL TRILLAS
Primera edición, enero 1998
7. Mohamed Notal
LA MEDICINA NUCLEAR EN LOS PAISES EN DESARROLLO
OIEA BOLETIN Vol. 27, No. 1
Primavera de 1985
8. M. EN C. GERARDO RODRIGUEZ ARANDA
DRA. MARIA DEL CARMEN ACEVES PADILLA
ING. RODOLFO MENDEZ MATA
MANUAL DEL CURSO DE PROTECCION RADIOLOGICA PARA
CANDIDATOS A PERSONAL OCUPACIONALMENTE EXPUESTO.
Septiembre de 1999.

9. Hendee, W.R.
HEALTH EFFECTS OF LOW-LEVEL RADATION
Apleton-Century-CROFTS.
USA (1984)
10. Pchin, E.
NUCLEAR RADIATION. RISKS AND BENEFITS
Clarendon Press
USA (1985)
11. Prasad, K.N.
HANDBOOK OF RADIOBIOLOGY
CRC Press, Inc.
USA (1984)
12. Kathren, R.L.
RADIATION PROTECTION
J.W. Arrowsmith Ltd.
Great Britain (1985)
13. National Council on Radiation Protection and Measurements
SI UNITS IN RADIATION AND MEASUREMENTS
Report Num. 82
National Council on Radiation Protection and Measurements
USA (1985)
14. UNITED STATES PHARMACOPEIA XXIII/ NATIONAL FORMULARY XVII
United States Pharmacopeial Convention, Inc.
USA (1990)
15. Martindale
THE EXTRAPHARMACOPEIA
Twenty-ninth ed.
The Pharmaceutical Press
UK (1988)
16. British Pharmacopeia Commissions
BRITISH PHARMACOPEIA 1988
Adendum 1989
Her Majesty's Stationery Office
UK (1989)
17. Helman, J.
FARMACOTÉCNICA TEÓRICA Y PRÁCTICA
Tomo VII
Cia. Editorial Continental, S.A. de C.V.
México (1984)
18. Manuel Navarrete, Luis Cabrera
INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LOS RADIOISÓTOPOS
Porcia Editores, S.A. de C.V.
México (1993)

19. Navarrete T:M. y Cabrera M: L.
Módulos I y IV del Diplomado de Actualización a
Profundidad en Seguridad Radiológica
Facultad de Química, Edificio "D".
México (1988).

20. Manuel Navarrete, Luis Cabrera
INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS RADIOISÓTOPOS
Porcia Editores, S.A de C.V.
México (1993)