

3 2e1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DOSIMETRIA DE CAMPOS DE RADIACION ALTOS
CON SALES DE Fe(II).

T E S I S

Que para obtener el Titulo de

Q U I M I C O

p r e s e n t a

Alma Delia Cervantes Martinez

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



México, D. F.

1990



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 está 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.

INDICE

CAPITULO I

INTRODUCCION	1
--------------	---

CAPITULO II

GENERALIDADES

2.1 Radiación Ionizante	3
2.2 Interacción de la Radiación y con la Materia	6
2.3 Cantidades y Unidades	10
2.4 Dosimetría	14
2.4.1 Métodos Absolutos	15
2.4.1.1 Calorimetría	15
2.4.1.2 Cámara de Ionización	16
2.4.2 Métodos Relativos	18
2.4.2.1 Dosimetría Acuosa	18
a) Dosímetro de Fricke	18
b) Dosímetro Cérico	20
c) Dosímetro Ferrroso - Cúprico	21
2.4.2.2 Dosimetría de Estado Sólido	24
2.5 Ventajas y Desventajas de los Dosímetros Acuosa	26

CAPITULO III

INSTRUMENTACIÓN ASOCIADA

3.1 Fuente de Radiación	28
3.2 Purificación	30
3.3 Espectrofotometría	31
3.3.1 Fuentes de Radiación	31
3.3.2 Parte óptica (Dispositivos de dispersión)	32
3.3.3 Detectores	33
3.3.4 Métodos de Absorción Ultravioleta y Visible	33

3.3.5 Leyes fundamentales	34
3.3.6 Características estructurales.	35
CAPÍTULO IV	
PARTE EXPERIMENTAL	
4.1 Material	37
4.2 Desarrollo experimental	37
4.2.1 Dosimetría	37
4.2.2 Procedimiento	37
4.2.3 Análisis	39
CAPÍTULO V	
RESULTADOS	
5.1 Espectros de Absorción	41
5.2 Curvas de Calibración	42
5.3 Gráficas	44
5.4 Dosimetría	45
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	
Calibración	50
Dosimetría	51
i) Irradiación en aire	51
ii) irradiación en atmósfera de N ₂ .	52
iii) irradiación en atmósfera de O ₂	53
iv) irradiación en atmósfera de Ar	53
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	60

CAPITULO I

INTRODUCCION

Debido a la incapacidad que tiene el cuerpo humano para poder detectar de manera inmediata la radiación que le llega; el hombre ha tenido la necesidad de desarrollar técnicas, dispositivos e instrumentos que le permitan sentir esta deficiencia.

Con el descubrimiento de la radiación γ y rayos X a fines del siglo pasado, surge un campo de aplicación de uso médico. Muchos trabajadores dedicados al estudio de fuentes de radiación, sólo pudieron demostrar que el uso irracional, sin control produce desde pequeños daños hasta trastornos graves, como cáncer, esterilidad e incluso la muerte.

Así surge la dosimetría como una necesidad de cuantificar y controlar la dosis de radiación.

Los primeros intentos por cuantificar las intensidades de los rayos X se llevaron a cabo con métodos fotográficos o con fluorescentes, pero tuvo que pasar algún tiempo para que se aceptara internacionalmente un método capaz de definir y cuantificar la dosis de los rayos X, como:

El hecho de que los efectos producidos por la radiación en el organismo sean básicamente de dos tipos, físicos y biológicos, determinó la dificultad para establecer las unidades de radiación, ya que mientras las magnitudes físicas se pueden determinar con precisión, para los factores biológicos no es tan fácil. Por lo

tanto estas unidades representan un compromiso entre precisión y sencillez por un lado y utilidad práctica por otro.

Dado el gran auge y aplicación de las fuentes de radiación en los procesos industriales, es necesario mantener un control de la dosis de radiación para evitar que el personal empleado sea afectado por las radiaciones de estas fuentes artificiales, o que se asocien hechos de los daños ecológicos y de salud pública con la industria nuclear.

La dosimetría es de suma necesidad en cualquier disciplina en la que sea utilizada la radiación ionizante, si ésta se desea aplicar en forma adecuada y segura.

Debido a la diversidad de fuentes de radiación ionizante utilizadas, se requiere que la dosimetría cubra un amplio intervalo de detección de radiación con alta precisión y reproducibilidad.

La dosimetría primaria es uno de los métodos más usados para medidas de rutina, en los cuales se han establecido los intervalos de dosis en los que son válidos estos dosímetros.

En la actualidad se requiere realizar dosimetría para niveles altos de radiación, muchas veces no es posible responder a estos requerimientos, ya que la dosimetría en altos campos de radiación presenta problemas con todos los dosímetros clásicos, basados en termoluminiscencia, propiedades eléctricas, propiedades químicas, porque se presentan problemas de saturación, en los cuales a altos

El objetivo principal del presente trabajo es determinar si las sales de Fe(II), presentan características que permiten emplearlas como dosímetros, es decir, conocer la respuesta de estos sistemas sólidos frente a la radiación γ , así como el intervalo de dosis en el cual se comportan linealmente.

También hacer determinaciones con la sal de $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ en diferentes atmósferas como: oxígeno, nitrógeno, argón, para ampliar el intervalo de dosis del dosímetro.

Las sales de Fe (II) utilizadas en este estudio son: sulfato de amonio y hierro hexahidratado $[\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$; sulfato ferroso heptahidratado $[\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$; cloruro ferroso tetrahidratado $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; la propiedad que se aprovecha es la oxidación que puede sufrir el Fe (II) a Fe (III) por efecto de la radiación, lo novedoso del método es que la irradiación de estas sales se produce en estado sólido. γ

Se espera que el daño producido en el sólido por la radiación sea menor que el comparado con el producido en los dosímetros acuosos, con lo cual tendremos un intervalo de mayor sensibilidad.

En este trabajo, se presenta en el capítulo II, una exposición de conceptos básicos de la radiación ionizante, como interacción la radiación (en especial gamma) con la materia, las unidades utilizadas en radiaciones y los tipos de dosimetría y una breve descripción de ellos. En el capítulo III se da una descripción de

la fuente de radiación y un pequeño esbozo de su funcionamiento; el fundamento de la espectrofotometría y las leyes en que se basa

la determinación de una especie por este método de análisis, así como, el sistema utilizado para obtener una agua de alta pureza que pueda ser utilizada en dosimetría. El capítulo IV indica el método experimental que se llevó a cabo, presenta la calibración, las dosimetrías realizadas y un diagrama de bloques del método de análisis de las muestras irradiadas. En el capítulo V se presentan los resultados obtenidos experimentalmente: se incluye el espectro de absorción del Fe(III), las curvas de calibración para cada una de las sales de [Fe] empleadas; las gráficas concentración de Fe(III) formada por efecto de la radiación vs. dosis, y se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos.

Finalmente en el capítulo VI se presentan las conclusiones a las que se llegó en el estudio realizado; como es la respuesta total de los dosímetros, intervalos de dosis y se presenta también una comparación de la dosis de las sales sólidas empleadas como dosímetros con otros sistemas acuosos. Así como, los valores de G(rendimiento radiolítico) de cada uno de los sistemas empleados.

CAPITULO II

GENERALIDADES

2.1 Radiación Ionizante

La vida en la Tierra ha evolucionado inmersa en la radiación, se recibe del espacio exterior y de los núclidos radiactivos naturales que existen en la Tierra.

La Radiación es energía que proviene de los núcleos de los átomos con exceso de energía y que al liberarla provocan transformaciones en sus propios átomos o moléculas.

El espectro de radiación electromagnética se divide en varios segmentos según la energía contenida: el segmento del espectro de interés en este caso es la radiación ionizante; que se caracteriza por su capacidad de excitar e ionizar átomos del material a través del cual pasa. (1,2,3)

Las partículas que producen ionización pueden dividirse en dos clases, partículas que ionizan directamente y radiaciones que lo hacen indirectamente.

Partículas Ionizantes Directas.- Son partículas cargadas con energía cinética muy grande que produce ionización por colisión, dentro de estas partículas se cuentan a las partículas α, β, e^- .

Radiaciones Ionizantes Indirectas.- Es radiación sin carga y por esto no son atraídas por otras partículas, pero transfieren su energía a partículas cargadas dentro del material a través del cual pasa resultando partículas altamente cargadas; (4,5). (6,7)

La radiación γ fue explicada en este estudio, es producida por un átomo en estado excitado con muy poca energía y al volver ha su estado basal, emite uno o más fotones según la mecánica cuántica. La energía de cualquier fotón es:

$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad 2.1$$

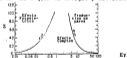
donde: $h = 4.136 \times 10^{-14} \text{ eV s}$, es la constante de Planck;
 $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ la velocidad de la luz en el vacío. (c.s.g.)

2.2 Interacción de la Radiación y con la Materia

Los fotones se absorben en un material a través de su paso por él, depositando su energía por medio de los siguientes mecanismos: efecto Compton, efecto fotoeléctrico, producción de pares de iones, como procesos más importantes, dispersión Rayleigh, radiación fluorescente, radiación de aniquilación, considerados procesos menores. Por último las interacciones foto nucleares y dispersión nuclear resonante son procesos despreciables.

El que se lleve a cabo cierto proceso depende de la energía del rayo y el número atómico del material absorbente.

En un diagrama de Z y E_γ , es posible determinar la importancia de cada efecto en una región de energía y diferentes materiales.



En estos procesos es importante conocer dos aspectos, el cinético, que nos indica las energías y ángulos de dispersión de las partículas presentes en cada fenómeno y el aspecto probabilístico que permite determinar la factibilidad del proceso por medio del valor de la sección eficaz. (c.s.g.)



La sección eficaz del efecto Compton depende del número de electrones presentes en el material, por lo que aumenta linealmente con el número atómico Z ; su dependencia con la energía del rayo γ es inversa ya que la probabilidad de que ocurra disminuye al aumentar la energía. (S.A.S.M.17)

b) Efecto Fotoeléctrico

En uno de los mecanismos más importantes que suceden con bajas energías de radiación, el electrón absorbe totalmente la energía del fotón y escapa del átomo con energía cinética T que describe la siguiente ecuación:

$$T = h\nu - E_b \quad (2.7)$$

$h\nu$ es la energía del fotón incidente, E_b es la energía de enlace del electrón.

El electrón adquiere un ángulo θ respecto al fotón inicial y momento p ; como el fotón es absorbido totalmente no hay dispersión alguna del fotón.



El proceso es más probable cuanto más fuerte está ligado el electrón, así en un mismo átomo es más factible que el efecto suceda con electrones de la capa K que con electrones de capas externas.

La sección eficaz para el efecto fotoeléctrico es proporcional a Z (número atómico del material absorbente) y a E_γ (energía del rayo): en una aproximación tenemos que, la probabilidad del efecto fotoeléctrico es aproximadamente igual a:

$$\text{constante} \times \frac{Z^5}{E_\gamma^{3.5}}$$

El efecto llega a ser despreciable a $E_\gamma > 100 \text{ keV}$. 0,1,0,5,1,0

c) Producción de Pares

En este proceso, la energía de la radiación gamma debe ser mayor a 1.02MeV, debido a que la masa total del electrón y el positrón contienen esta cantidad de energía equivalente.

El fotón desaparece dando lugar a un electrón y a un positrón; es decir, se lleva a cabo una transformación de energía en materia. Dicha transformación debe ocurrir necesariamente en presencia de otra partícula, la cual puede ser el núcleo atómico o bien un electrón externo, con lo cual, se cumple la conservación del momento.

Si la energía del fotón es superior a 1.02MeV y el núcleo atómico está presente, el exceso de energía se transfiere prácticamente al electrón y al positrón en forma de energía cinética, ya que el núcleo no recibe dicha energía. Lo cual se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} h\nu &= 2m_0c^2 + T^- + T^+ & 1.5 \\ &= 1.02 \text{ MeV} + T^- + T^+ & 1.5 \end{aligned}$$

La dirección que adquiere el positrón respecto al fotón original

es aproximadamente:

$$\mu = \frac{N_A \rho}{A} \quad 2.10$$

Si la partícula presente en la creación de pares es un electrón externo, el exceso de energía además de ser transferido al electrón y al positrón en forma de energía cinética, también el electrón externo recibe parte de dicha energía.

La expresión que permite relacionar la probabilidad de que se lleve a cabo la creación de pares, con el número atómico (Z) y la energía del fotón incidente es:

$$\text{Probabilidad de creación de Pares} = \text{constante} \cdot Z^2 (E - 1.02)$$



Como los positrones son partículas inestables, interactúan con electrones para aniquilarse, dando lugar a la formación de un par de rayos γ , con energía de 0.51MeV cada uno y según la ley de conservación de momento salen en direcciones opuestas. n.a.t.a.a.

2.3 Cantidades y Unidades

La radiación γ consiste de un número finito de partículas discretas y en general se describe como distribuciones de probabilidad continuas. Así la mayoría de conceptos desinétricos son cantidades estocásticas; pero se han definido tres cantidades no estocásticas que nos permiten la descripción de la radiación que son la dosis absorbida, Norma y exposición. n.a.t.a.a.)

Las cantidades usadas en física de radiaciones se dividen en cuatro categorías: 1era. cantidades de radiometría; 2a. cantidades coeficientes de interacción; 3a. cantidades dosimétricas y 4a. cantidades de radiactividad. (1)

Dado este trabajo las cantidades dosimétricas se describen a continuación:

Cantidades dosimétricas.

Las cantidades dosimétricas son derivadas de las cantidades de las primeras dos categorías, para proporcionar una medida física que esté correlacionada con efectos en los materiales. (1,2)

a) La energía impartida (ϵ) definida como: la diferencia de energías cinéticas de las partículas que entran y que salen de un volumen considerado, más la masa en reposo de el núcleo y de partículas elementales que se relacionan en los procesos básicos:

$$\epsilon = T_0 - T_1 + \sum T_{a_i} + Q$$

T_0 es la energía cinética de las partículas ionizantes inmediatamente antes de la interacción;

$$T_1 = E - mc^2$$

esta energía excluye a la energía en reposo. En el proceso de decaimiento $T_0 = 0$; $\sum T_{a_i}$ describe la suma de todas las energías cinéticas de las partículas creadas en el proceso, incluyendo la energía cinética residual de la partícula original si esta aún es partícula ionizante después de la interacción. La unidad de esta cantidad es el Joule. (1,2,3)

ϵ es una cantidad estocástica el valor promedio es una cantidad no estocástica.

b) La energía específica ($\bar{\epsilon}$), se define como el cociente de la energía impartida por la radiación ionizante (ϵ) a la materia de

masa (m): $x = \frac{C}{m}$, la unidad de esta cantidad es $J\ Kg^{-1}$, el nombre especial de esta unidad es el gray (Gy): x es una cantidad estocástica pero igual que en el caso anterior el valor promedio \bar{x} es una cantidad no estocástica. (1.11.20)

I Dosis Absorbida

Ahora es posible definir la cantidad de Dosis Absorbida (D) que es el cociente de $d\bar{E}$ por dm : donde $d\bar{E}$ es el valor promedio de la energía impartida por la radiación a la materia de masa dm .

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} :$$

se puede ver que la Dosis Absorbida es el limite de la energía específica promedio cuando la masa en la región considerada se aproxima a cero: esto es:

$$D = \lim_{dm \rightarrow 0} \left[\frac{d\bar{E}}{dm} \right].$$

esta ecuación es una alternativa para definir (D). (1.11.21)

II Kerma

Para partículas no cargadas como los fotones, se define una cantidad física K llamada Kerma cuyas unidades estas dadas con las dimensiones de energía por unidad de masa.

El Kerma, es el cociente de dE_k sobre dm , dE_k es la suma de las energías cinéticas inicial de todas las partículas cargadas liberadas por radiación ionizante indirecta en un material de masa dm :

$$K = \frac{dE_k}{dm} \quad \text{donde:}$$

$$E_k = (R_{in})_k - (R_{out})_k + I Q$$

$(R_{in})_k$ =Energía radiante de partículas no cargadas que entran en V

$(R_{out})_k$ =Energía radiante de partículas no cargadas que salen de V ,

excepto aquellas cuyo origen sea de pérdidas radiactivas de energía cinética por partículas cargadas.

IQ = Energía neta derivada de la masa en reposo en un volumen V .

El kerma es el valor esperado de la energía transferida a partículas cargadas por unidad de masa en un punto de interés, incluyendo energía por pérdidas radiactivas y excluyendo energía que pasa de una partícula cargada a otra. (1,2,3,4,5)

El concepto de kerma se introduce para enfatizar una de las dos etapas de transferencia de energía cuando interactúa la radiación ionizante con la materia. En la primera etapa las partículas ionizantes indirectas transforman parte de su energía a energía cinética de partículas ionizantes secundarias, que a su turno impartirán energía al material a través del cual se paran lentamente. La unidad de Kerma es: $J\ Kg^{-1}$ "Gray" (Gy). (1,2,3,4,5)

III Exposición

Es la tercera de las cantidades no estadísticas, es la cantidad más antigua de las tres. La exposición es un punto p sólo se define para fotones y neutrones y contrario al Kerma, está restringido a un material de referencia, aire. La exposición se representa por X y se define como el cociente de Q por dm donde Q es el valor absoluto de la carga total de iones de un signo producidos en aire cuando todos los electrones son liberados por los fotones en un elemento de aire, así:

$$X = \frac{Q}{dm}$$

La unidad es: $C\ Kg^{-1}$, descomulgado Roentgen (R); $1R = 2.58 \times 10^{-4} C/Kg$ (1,2,3,4,5)

Dosis Equivalente

Los daños en tejidos producidos por la radiación dependen de la dosis absorbida y, del tipo de radiación absorbida. Al relacionar riesgo de una operación con dosis, es útil expresar la dosis independiente del tipo de radiación usada. Así se define la Dosis

Equivalente(H); el factor de calidad(Q), representa la Efectividad Biológica Relativa (EBR), que da idea de la capacidad de daño al cuerpo por diferentes tipos y energías de radiación ionizante. Q es un valor adimensional, H entonces es el producto de D, Q, y N en un punto de interés de un tejido :

$$H = DQH$$

donde D es la dosis absorbida, Q es el factor de calidad y N es el producto de otras modificaciones.

La unidad de H es $J\ kg^{-1}$ cuyo nombre especial es el Sievert(Sv). El sievert es sinónimo de $J\ kg^{-1}$ pero sólo es usado como unidad de Dosis Equivalente. (S.I.C.M.)

1.4 Dosimetría

La dosimetría se relaciona principalmente con la determinación de dosis absorbida, intensidad de dosis, cantidades derivadas del cambio producido en un material por efecto de la radiación; dicho cambio puede ser físico o químico. Para lo cual es necesario un dispositivo capaz de aportar una lectura "r" que es una medida de la dosis absorbida D_d depositada en un volumen sensible V, si la dosis no es homogénea en todo el volumen, r es un valor medio de D_d , en general se desea que r sea proporcional a D_d y que cada elemento del volumen V tenga igual influencia en el valor de r y D_d sea la dosis promedio.

En general podemos dividir la Dosimetría en dos tipos: Dosimetría Absoluta y Dosimetría Relativa. La primera es aquella que nos permite hacer determinaciones de dosis absorbida u otras cantidades sin necesidad de calibrar el dosímetro, los métodos que miden algunas propiedades físicas como: la calorimetría y la cámara de ionización caben en esta clasificación.

La dosimetría pasiva es aquella que se realiza con dosímetros que deben ser calibrados para utilizarlos, algunos métodos se basan en propiedades químicas y otros en propiedades físicas como emisión de luz en termoluminiscencia. (1)

2.4.1 Métodos Absolutos

2.4.1.1 Calorimetría. - Es un método que mide cantidades de calor resultantes de la disipación de energía causada por la radiación gamma absorbida en un material y que proporciona una medida directa del tamaño de la energía impartida.

Un dosímetro de este tipo debe caracterizarse por: a) que el material absorbente convierte toda la energía disipada en calor, b) que las dimensiones geométricas y arreglo del material absorban toda la radiación.

El método permite determinar la dosis de esta forma si no se presenta cambio químico y toda la energía impartida aparece como calor.

DETERMINACION DE LA TEMPERATURA

El aumento de temperatura en el volumen sensible del calorímetro por unidad de dosis depende de su calor específico que se expresa en Cal $g^{-1}C^{-1}$ ó J $Kg^{-1}C^{-1}$.

$$1 \text{ Cal} = 4.1853 = 4.185 \times 10^7 \text{ erg.}$$

$$1 \text{ cal } g^{-1}C^{-1} = 4185 \text{ J } Kg^{-1}C^{-1}.$$

Si un material con un volumen sensible tiene una capacidad térmica h (J $Kg^{-1}C^{-1}$), masa M (Kg) y defecto térmico δ y que absorbe E Joules de energía, el aumento de la temperatura es:

$$\Delta T = \frac{E(1-\delta)}{hM} = \frac{E(1-\delta)}{h} \quad (C)$$

E es dosis absorbida promedio; δ defecto térmico (fracción de E

que no se transforma en calor, debido a la competencia de las reacciones químicas). (1,3,10)

2.4.1.2 Cámara de Ionización .- Este método permite evaluar la dosis absorbida midiendo la ionización que se produce en el volumen de gas debido a la radiación. Es el método más empleado para determinar dosis absorbidas de generadores de rayos X y unidades de ^{60}Co usadas en terapia: son detectores fáciles de usar y simples para la determinación, son precisos y reproducibles y utilizados para estandarizar; como son los detectores más viejos su teoría de la cámara de ionización está bien fundamentada, y con los avances en las técnicas de amplificación electrónica, una señal muy pequeña puede detectarse con muy buena precisión y reproducibilidad, lo que permite que el tamaño de la cavidad sea reducido a una fracción de un cm^3 se detecte desde 1mGy hasta 10Gy o un poco más. (1,10)

La teoría permite determinar la dosis absorbida en una cámara de ionización con cavidades pequeñas.

Las correcciones a las lecturas son principalmente debidas a los siguientes aspectos: a) atenuación y dispersión por las paredes de la cámara, b) dispersión por el tubo de la cámara, c) no uniformidad de los rayos; las correcciones para energías y de ^{60}Co son muy pequeñas, aproximadamente del 1%. (1)

2.4.2 Métodos Relativos

Debido a las dificultades prácticas que presenta el uso de métodos absolutos para determinar la dosis, se han desarrollado métodos secundarios: dosímetros acuosos y de estado sólido. (1,10)

2.4.2.1 Dosimetría Acuosa.- Se basa en cuantificar el cambio químico producido por la radiación en un sistema adecuado: la

dosimetría química contra su interés en dosímetros acuosos: que generalmente son soluciones diluidas, es los que se considera que la interacción de la radiación con el agua producirá especies primarias químicamente activas, dichas especies son: radicales libres $H\cdot$ y $OH\cdot$, electrón hidratado y productos moleculares como H_2 y H_2O_2 ; estas especies interactúan con los solutos presentes.

La producción del cambio químico se expresa en términos del valor $G(X)$ denominado rendimiento radioquímico respecto al producto X, se expresa como el número de entidades químicas de una sustancia X que son destruidas, producidas o cambiadas por la energía promedio impartida:

$$G(X) = \frac{n(X)}{E}$$

$n(X)$ es la cantidad de sustancia específica X.

El número específico de entidades transformadas por cada 100 eV es un valor de G escogido para estandarizar todas las medidas,

$$G(X) = \frac{[X]N_A 100}{E} = \text{moléculas } [100\text{eV}]^{-1}$$

así: $[X]$ concentración de especies, $l \text{ mol}^{-3}$; N_A 6.023×10^{23} moléculas mol^{-1} ; E energía absorbida en eV.; para relacionar estas cantidades:

$$1 \text{ mol } l^{-1} = 6.02 \times 10^{23} \text{ moléculas } [100\text{eV}]$$

En principio cualquier cambio químico es una cantidad dosimétrica, en la práctica el sistema elegido como dosímetro de rutina debe satisfacer ciertas condiciones:

- a) El cambio químico debe ser proporcional a la dosis absorbida.
- b) Condiciones experimentales en las que la acumulación de productos radiolíticos o cambio del pH no afecten la reproducibilidad de las curvas de Scovis.
- c) La cantidad de cambio químico debe ser independiente del LET de radiación dentro de un amplio intervalo de dosis y temperatura. Si

no es el caso, se debe poder establecer la dependencia.

d) Los dosímetros químicos deben ser manufacturados con sustancias de alta pureza, sin necesidad de purificaciones adicionales, para mediciones en reactores nucleares, la composición debe ser tal que la radiactividad inducida sea despreciable.

e) Se debe usar un método preciso y simple para determinar el cambio químico, que es el que sirve como medida de la energía absorbida. En caso de que la relación entre dosis y cambio químico no sea lineal, el cálculo de la dosis debe ser simple. U.S.N.R.

A continuación se describen algunos dosímetros químicos de los más empleados.

a) Dosímetro de *Fricker*.—También llamado dosímetro de sulfato ferroso de amonio, es un dosímetro muy cercano a todos los requerimientos de un dosímetro ideal y se usa principalmente en el intervalo de dosis de 40 a 400 Gy, solo en este intervalo funciona linealmente. Su límite superior se puede extender disminuyendo el oxígeno y las concentraciones de iones $Fe(II)$.

Este dosímetro se basa en la oxidación de iones $Fe(II)$ a iones $Fe(III)$ como resultado de la radiación; posteriormente se cuantifica la cantidad de iones $Fe(III)$ producido, ya sea por espectrofotometría o por titulación de iones ferroso residuales.

Este sistema dosimétrico consiste de una solución de 0.001 M de $FeSO_4 \cdot (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 7H_2O$ en 0.8 M de H_2SO_4 , se le adiciona 0.001 M de H_2O_2 . La densidad que se logra de esta solución es de 1.024g/ml. En presencia de oxígeno el rendimiento radiolítico, $G[Fe^{3+}] = 15.6$.

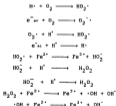
Algunos estudios recientes describen que la presencia de un gran espacio de aire en la solución dosimétrica puede proporcionar

un dato de dosis mayor que el verdadero: por ejemplo: si se irradian 10cl de la solución en presencia de un litro de aire sujeto a una irradiación similar de flujo, la dosis de la solución puede ser aproximadamente 10% mayor que la dosis real. Se sugirió que el aumento de oxidación fue causado por el ozono y el HO_2 formado por la irradiación del aire y que la presencia de O_2 u oxigenación de la solución presenta un aumento en el valor de $G(\text{Fe}^{2+})$ de 15.6 a 16.1 aproximadamente, debido a la competencia entre iones ferroso y oxígeno por átomos de H. (1,15,16,20)

La oxidación de los iones Fe(II) puede explicarse a partir de los productos radiolíticos del agua del sistema acuoso, así que la ecuación que nos representa la radiólisis del agua es:



Estos son los productos primarios; entonces la oxidación de los iones Fe(II) en presencia de oxígeno se puede decir que ocurre de la siguiente forma:



Cada radical hidroxil oxida un ión ferroso, cada radical hidroperoxi oxida tres iones ferroso y cada molécula de peróxido de hidrógeno oxida dos iones ferroso por lo que se puede escribir

que el balance de material para el dosímetro de Fricke es:

$$a \text{ (Fe}^{2+}\text{)}_0 = a \text{ (OH}^-) + 20 \text{ (H}_2\text{O}_2) + 3(a_{\text{H}^+} + a_{\text{O}_2}^-)$$

Sustituyendo los valores de δ para cada especie tenemos:

$$a \text{ (Fe}^{2+}\text{)}_0 = 2.8 + 3(0.78) + 3(3.57) = 15.5$$

El cálculo de dosis se puede obtener por el método de titulación, se realiza la titulación de una muestra irradiada y una no irradiada, obteniéndose una diferencia de concentraciones ΔH del ión ferroso y por medio de la expresión de dosis:

$$D = \frac{M}{\rho V(X)} \text{ obtenemos la dosis}$$

Si se analiza por el método espectrofotométrico se obtiene el delta de densidad óptica ΔOD y por medio de la relación entre ΔOD y la dosis podremos obtener la dosis absorbida:

$$D = \frac{\Delta OD}{\epsilon \rho d} \text{ (Fe}^{2+}\text{)}$$

$\epsilon = 2187 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ a $\lambda = 10288$ aproximadamente; $l = 1\text{cm}$ de ancho de la celda de cuarzo; $\rho = 1.034\text{g/cm}^3$ para una solución estándar de Fricke a 25°C ; $\text{(Fe}^{2+}\text{)} = 1.697 \times 10^{-4} \text{ mol/l}$ para un LET de radiación gama de ^{60}Co .

$$D = 278 \text{ (}\Delta OD\text{) Gy.}$$

Este dosímetro se ha estandarizado cuidadosamente por calorimetría y otros métodos físicos y por lo tanto se usa como dosímetro absoluto con una precisión del 1-2%, y con frecuencia se usa para calibrar otros dosímetros. (1,2,3,4,5)

b) Dosímetro de Sulfato Cérico .- El sistema de sulfato Cérico es espial en el intervalo de dosis 10^1 a 10^5 Gy, dando uno de los intervalos más amplios. Este sistema es particularmente útil de 1 a 400Gy que son las dosis más empleadas para la preservación de alimentos y esterilización de materiales o productos

farmacéuticos.

La dosis se deriva de la concentración de ion Ce(III) después de la irradiación; por lo que su funcionamiento se basa en la reducción de iones cericos (Ce^{IV}) en soluciones acuosas, la relación entre aumento de dosis y concentración de cerio (III) inducido en la radiación sigue una respuesta lineal (17,18)

El dosímetro consiste en disolver sulfato cerico en ácido sulfúrico 0.4M y se lleva a un litro de solución con agua tridestilada, la concentración del sulfato cerico es generalmente entre 10⁻⁴ a 10⁻¹ mol/l, de acuerdo al intervalo de dosis al cual estará expuesto el sistema, ver tabla:

Intervalo de Dosis en NGy	0.1 - 0.5	0.5 - 5	5 - 40	40 - 200
Concentración de Ce(SO ₄) ₂ M	2x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻³	1x10 ⁻²	5x10 ⁻²

Su desventaja, es la variación de los valores del rendimiento radiolítico de un laboratorio a otro, entre valores de G(Ce^{III}) = 3.04 a 3.48; estas variaciones se deben a trazas de impurezas, lo que requiere reactivos muy puros y una exhaustiva limpieza de los aparatos usados, estos efectos se pueden inhibir incorporando ión cerio (III) en el dosímetro, esto además permite usar agua destilada (una sola vez).

Algunas veces la irradiación del ión cerio(III) también es fuente de impurezas y por tanto fuente de error; entonces se ha propuesto generar el ión cerio(IV) dentro del mismo dosímetro; la adición de peróxido de hidrógeno puro es un método conveniente para reducir Cerio(IV) a Cerio (III) antes de la irradiación.

El proceso de óxido reducción del sistema, se puede explicar mediante las siguientes reacciones. Como se mencionó anteriormente los productos primarios de la radiólisis del agua, son:



y por efecto del oxígeno presente en la solución se forma el radical hidroperoxi:



este radical entonces puede reducir iones cerico:



Por otra parte el ión cerico también puede ser reducido por el H_2O_2 , con lo que tenemos:



otras reacciones que se realizan son :



lo cual nos da: $G(Ce^{3+}) = 2G_{H_2O_2} + G_{e^{-}_{aq}} + G_H + G_{OH} + G_{HO_2}$
 sustituyendo los valores de G para cada especie tenemos:

$$G(Ce^{3+}) = 2(0.78) + 3.6 + 2.9 + 0.08 + 2.24$$

en ausencia de oxígeno, la 1a. reacción es reemplazada por:



lo cual no afecta el mecanismo (4.11)

Se puede cuantificar el cambio del sistema, por espectrofotometría del ión $Ce(III)$ a $\lambda = 308nm$, con coeficiente de extinción de $8410 M^{-1}cm^{-1}$; se aconseja determinar ϵ para cada condición experimental. Por otra parte la determinación puede ser potenciométrica del sistema cerio(IV)-cerio(III). El cálculo de la

doxia puede realizarse por medio de la siguiente expresion:

$$D = \frac{\Delta(DO) \times d}{C} \times 1.67 \times 10^3 Gy$$

donde:

d es el factor de dilucion; C es el rendimiento radiolitico del ion Ce(IV) que varía entre 2.04 y 2.45 segun la concentracion de la muestra irradiada; $\Delta(DO)$ es el cambio en la densidad optica.

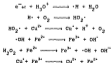
CONCLUSIONES

c) Dosimetro Ferroso Cúprico .-También llamado Fricke modificado, se emplea principalmente en un intervalo de dosis de de 10^{10} - 10^{12} Gy; se comporta en forma parecida al dosimetro de Fricke ya que se basa en la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} ; pero en este dosimetro se logró aumentar el intervalo de medición, por la presencia del ion Cu^{2+} . (M.A.M)

Este dosimetro está constituido por una solución de $1.0 \times 10^{-2} M$ de $Fe(NH_4)_2(SO_4) \cdot 6H_2O$ a $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ y $1.0 \times 10^{-1} M$ de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$.

Ciertas modificaciones del sistema sulfato ferroso se han introducido para establecer mecanismos y rendimientos radioliticos, y se propuso el sistema Fricke modificado, que tiene la ventaja de no depender de la presencia de oxígeno así que el intervalo del dosimetro es mucho mayor.

Las reacciones que ocurren en presencia de oxígeno son:



Para estas reacciones el rendimiento radiolítico de los iones hierro (III) en presencia de iones cobre(II), está dado por:

$$G(\text{Fe}^{3+})_{\text{Cu}^{2+}} = 2G_{\text{H}_2\text{O}_2} + G_{\text{OH}} - (G_{\text{H}} + G_{\text{e}^-}) = G_{\text{H}_2\text{O}_2}$$

Sustituyendo los valores de G para cada especie tamente:

$$G(\text{Fe}^{3+})_{\text{Cu}^{2+}} = 2(0.78) + 1.9 - 1.6 - 0.08 = 2.72$$

Si no hay oxígeno, ocurre directamente la siguiente reacción:



La cantidad de Fe^{2+} formado se determina espectrofotométricamente, para lo cual se utilizan soluciones no irradiadas como referencia a una longitud de onda de: $\lambda = 304\text{m}\mu$.

El coeficiente de la Dosis se puede obtener por medio de la siguiente expresión:

$$D = \frac{A \cdot 0.024 \times 10^{23} \cdot 11800 \cdot 400}{2 \times 10^3 \cdot \epsilon \cdot (\text{Cu}^{2+}) \cdot l \cdot \rho}$$

en donde:

ϵ coeficiente de extinción del $\text{Fe}^{2+} = 2187\text{cm}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

l factor de transformación de eV a Gy = 6.245×10^{11}

ρ densidad de la solución dosimétrica = 1.051gcm^{-3}

l longitud de la celda = $1\text{cm}(10^6) = 1.73$

por lo que la expresión para obtener la Dosis

puede reducirse a :

$$D = 4.6678000 \times 10^3 \cdot 400 \cdot (\text{Gy}) .$$

III.4.18.2.27

3.4.2.2 Dosimetría de Estado Sólido

La termoluminiscencia es el fenómeno por el cual se produce una emisión de luz inducida por medio de calor dentro de un sólido, pero sin llegar a la temperatura de incandescencia; el aumento de la temperatura estimula la liberación de energía que se almacenó en un sólido al exponerlo a la radiación ionizante. (26)

El material de un dosímetro TLD es de tipo dieléctrico o

semiconductor, además este tipo de dosímetro contiene activadores apropiados que le permite funcionar como un fosforo (material que presente el fenómeno de termoluminiscencia).

Los sólidos cristalinos poseen imperfecciones en su estructura por falta de iones o átomos en puntos donde debían estar presentes, también se debe átomos o iones en lugares indebidos de la red cristalina: estas imperfecciones son llamadas trampas o pozos: considerados como regiones donde existe carga positiva o negativa que pueden atrapar cargas de signo opuesto.

Una característica importante de estas trampas es su profundidad, pues es un indicador de la fuerza para atrapar cargas de signo contrario.

Al exponer un sólido luminescente a radiación ionizante hay una liberación de electrones y producción de huecos que la mayor parte se recombinan nuevamente emitiendo luz. Así, la energía absorbida por el material luminescente se emite como luz a una longitud de onda mayor de la que la absorbió, la longitud de onda a la que se emite la luz es característica de la sustancia, no de la radiación incidente, pero también puede suceder que algunos electrones sean atrapados por los pozos y ahí permanezcan hasta que reciben energía que les permita salir, una forma de proporcionar dicha energía es elevando la temperatura del sólido irradiado; entonces la temperatura será proporcional al escape de los electrones según la profundidad de los pozos. Así que las cargas liberadas térmicamente de los pozos se recombinan con cargas de signo contrario presentes en todo el cristal, lo que produce emisión de luz.

Por lo tanto la termoluminiscencia de un sólido puede

proporcionar una medida de la dosis de radiación. (1,2)

Algunos de los dosímetros de tipo termoluminiscente se presentan a continuación con su respectivo intervalo de dosis, en el cual pueden ser usados.

DOSIMETRO	LiF:Mg,Ti	$\text{CaF}_2:\text{Mn}$	$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$	$\text{CaSO}_4:\text{Mn}$
INTERVALO UTIL	$0.1-10^3\text{Gy}$	$0.1-3 \times 10^3\text{Gy}$	$0.1-10^4\text{Gy}$	$1 \times 10^{-1}-10^2\text{Gy}$

2.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DOSIMETROS QUÍMICOS.

Los dosímetros químicos son particularmente utilizados como dosímetros de rutina; sus principales ventajas es que son:

1)Económicos y más fáciles de usar que muchos de los dosímetros físicos. Además las soluciones acuosas diluidas tienen un μ efectivo y un coeficiente de absorción muy parecidos al del agua, lo cual también es similar al tejido muscular y las densidades de estas soluciones diluidas son aproximadamente a $\rho = 1.00\text{g cm}^{-3}$, parecida al agua; así que estos dosímetros no requieren corrección por efecto de polarización como en el caso de la aplicación de la teoría de la cavidad en cámaras de ionización de gas a energías altas mayores de 1(MeV).

2)Otra ventaja de los dosímetros acuosos es que se pueden irradiar en envases similares en forma y volumen al del objeto en estudio; en general la cantidad de producto dosimétrico de radiación de una medida de la dosis promedio a través de su volumen sensible, que proporciona una respuesta lineal entre el volumen y la dosis.

3)Además hay la posibilidad de un dosímetro absoluto; al menos el dosímetro de Fricke lo es.

4) Por otra parte como existen diferentes dosímetros químicos se pueden cubrir varios intervalos de dosis. Los dosímetros químicos presentan respuesta lineal por lo menos en un intervalo de dosis.

0.3.10

Las principales desventajas de los Dosímetros químicos son que:
1) se debe tener extremo cuidado con el almacenamiento de reactivos a partir de los cuales se preparan los sistemas dosimétricos, ya que deben ser almacenados a temperatura y humedad adecuadas.

2) Los intervalos de dosis que muchas veces es necesario medir son mucho más altas o más pequeñas de las que se pueden medir.

3) Los dosímetros químicos muestran cierto grado de dependencia con la tasa de dosis y el LET, así como dependencia a la temperatura de la solución durante la irradiación y durante los procedimientos de lectura. 0.3

INSTRUMENTACIÓN ASOCIADA

3.1 Fuente de Radiación

El Instituto de Ciencias Nucleares cuenta con un irradiador gámo de ^{60}Co construido en 1951-PT tipo alberca con una cavidad para irradiar a dosis variable. Contiene 9 fuentes de irradiación, las cuales, se operan individualmente, pues pueden ser elevadas a la posición de irradiación por medio de motores neumáticos.

La variación de la dosis en la cavidad de la fuente se puede obtener seleccionando el diámetro de las fuentes y/o el número de fuentes activas expuestas.

La carga nominal de las fuentes fue de 90 μCi de ^{60}Co .

Las principales partes del irradiador son:

- 1.- Un cuarto de irradiación. En este cuarto las muestras son irradiadas en una cámara central la cual está construida con paredes de concreto, especialmente diseñadas para prevenir el escape de la radiación, esta construcción cuenta con servicios de: energía eléctrica, aire acondicionado, agua, drenaje.
- 2.- Fuentes de Radiación gámo de ^{60}Co . Las fuentes radiactivas están contenidas en nueve lapiceros los cuales están doblemente encapsulados de acero inoxidable, cada uno con una longitud de 48.18cm y un diámetro de 1.10cm; las muestras son expuestas a estas fuentes cuando son levantadas de su posición de almacenamiento.

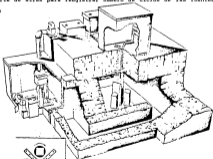
La posición de almacenamiento de las fuentes, se produce cuando las fuentes son sumergidas en una alberca llena de agua, la cual está situada en el piso de el cuarto de irradiación, cuando las

Fuentes están abajo o en posición de almacenamiento, la radiación incidente en el cuarto de irradiación no excede 0.25 mR/h. El campo en el cuarto de irradiación es continuamente monitoreado cuando las fuentes están abajo. El agua en la alberca es continuamente circulada a través de un desionizador, y hay un suministro de agua que siempre mantiene el nivel en la alberca.

3.- Control de la consola. El irradiador se opera a control remoto por medio de una consola de control situada fuera del cuarto de irradiación, la cual contiene los siguientes mecanismos:

una llave de operación del interruptor maestro para suministro de energía al sistema; un timer para seleccionar el tiempo de irradiación; indicadores de la posición de las fuentes; indicadores luminosos para determinar inmediatamente el tipo de falla, botón para parada de emergencia; un contador numérico en la parte de atrás para registrar número de ciclos de las fuentes.

001



3.2 Purificación

La pureza de los reactivos y limpieza del material usado en los estudios de química de radiaciones es muy importante, ya que pequeñas impurezas pueden provocar interferencia por competición de las especies, o por reacciones de transferencia por las cuales pasa energía o carga de una molécula a otra, hasta que es imposible determinar cual fue la reacción inicial o provocar modificación en los valores de los rendimientos radiolíticos (G x) lo que conduce a errores en la determinación de las cantidades desimetrías.

Una de estas fuentes de impurezas es el agua utilizada como disolvente de los reactivos usados para sistemas desimetrías; en general el agua destilada es comúnmente purificada por redistilación de una solución alcalina de permanganato de potasio y después de una solución de dicromato de potasio, lo que permite la reducción de impurezas orgánicas presentes en el agua; el producto es agua triplemente destilada.

El sistema utilizado en la purificación del agua para química de radiaciones se presenta a continuación. (a.m.)



3.3 Espectrofotometría

El análisis de las soluciones densimétricas se pueden realizar por el método espectrofotométrico: esto es, por medio de un instrumento en el cual se mide la absorción de una sustancia por energía radiante en la zona del ultravioleta y el visible, este aparato es un espectrofotómetro.

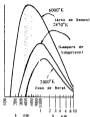
El espectrofotómetro es un espectrómetro el cual proporciona una relación de la potencia radiante de dos haces como función del espectro de longitud de onda; sus componentes principales son: a) una fuente de energía radiante, b) un sistema de dispersión, c) un sistema químico, d) detector, e) medida.



3.3.1 Fuentes de Radiación.

La función de la fuente de luz es la de proporcionar luz incidente de suficiente intensidad para la medición. Las fuentes de radiación son lámparas de materiales incandescentes. Según el tipo de material será la luz emitida en el espectro y en consecuencia la región donde se llevará a cabo el análisis y entonces el tipo de sustancia que se puede analizar.

En la zona del visible-infrarrojo pueden usarse lámparas de tungsteno, de arco de Xenón y lámparas de Werra (óxidos de circonio e itrio).



Se ve que el poder radiante de la lámpara de tungsteno es menor que el poder radiante de la lámpara de xenón.

En general en la región del ultravioleta se utilizan lámparas de hidrógeno, deuterio y mercurio; el estado radiante de estas fuentes se logra por medio de arcos eléctricos, las lámparas de hidrógeno y deuterio requieren menor potencia para emitir energía.

Las fuentes deben tener las siguientes características: una emisión constante, uniforme y sobre una región del espectro definida. Las lámparas de xenón y mercurio cumplen con estas condiciones pero requieren de mayor energía para lograrlo por lo que las más usadas son las de tungsteno e hidrógeno.

1.3.3 Parte óptica. (Dispositivos de Dispersión)

Para el análisis fotométrico es necesario radiación monocromática, para lo cual es necesario usar fuentes monocromáticas o fuentes policromáticas con equipo especial para dispersar longitudes de onda en haces monocromáticos, lo que es

más fácil que lo primero: este proceso se logra por medio de monocromadores y filtros. Estos filtros están cubiertos con una película de gel de cierto color, y entonces los filtros absorben todas las longitudes de onda menos aquella que tiene el color de la película del gel.

Los monocromadores son dispositivos que pueden producir un haz de radiación de gran pureza espectral y cuya longitud de onda se puede seleccionar.

Sus principales componentes son: rejilla de entrada de un haz luminoso, un elemento dispersivo (prisma de difracción o rejilla de difracción) y una rejilla de salida. u,x

3.3.3 Detectores

Después del paso de la energía radiante a través de la muestra la luz transmitida es detectada y procesada. Los detectores más empleados según su complejidad eficiencia y costo son: Celdas fotoeléctricas, tubo fotomisor, fotomultiplicadores. u,x

3.3.4 Métodos de Absorción Ultravioleta y Visible.

Cuando un haz de energía radiante choca contra una sustancia puede suceder: 1) que la radiación pase a través de la materia absorbiéndose una pequeña cantidad de la energía radiante, por lo tanto una pequeña pérdida de la misma. 2) que la dirección del haz pueda ser desviado por reflexión, difracción o refracción; o también dispersión por materia suspendida especialmente, 3) también puede suceder una absorción total: la absorción está relacionada a una transferencia de energía al medio y este fenómeno tiene que ver con las características de las estructuras moleculares. u,x

3.3.3 Leyes Fundamentales.

La fotometría se basa en la ley llamada de Lambert la cual establece que cuando un haz de luz monocromática, colocado en un plano paralelo, entra en un sistema de especies absorbentes, la velocidad de absorción del fotón a una cierta distancia es directamente proporcional al poder del fotón, I (intensidad), y la reducción de la intensidad será $-dI$, significa

que la luz se disminuirá. Por lo que podemos establecer:

$$- \frac{dI}{I} = K dx$$

K es una constante de proporcionalidad característica de la naturaleza de las especies absorbentes y la energía de los fotones, I representa la energía radiante a una distancia x en un medio absorbente y separando variables y realizando la integral tenemos:

$$- \int \frac{dI}{I} = \int K dx$$

Esto es un modelo matemático del hecho de que la fracción de energía radiante absorbido es proporcional al grosor del sistema, si estipulamos que I_0 es la energía radiante a $x = 0$, entonces I representa la energía radiante transmitida que sale del material absorbente a $x = b$ lo que se integra en estos límites:

$$- \int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = K \int_{x=0}^{x=b} dx$$

Esta es la ley de Lambert, que establece que para una concentración de absorbente, la intensidad de luz transmitida, disminuye logaritmicamente como la longitud de la trayectoria aumenta logaritmicamente.

Por otro lado esta ley es completa con el enunciado hecho por Beer, que establece que la intensidad de energía transmitida depende de la concentración del material absorbente. Se encontró que al aumentar la concentración del absorbente se presentaba un efecto similar al establecido en la ley de Lambert, con lo que la constante de proporcionalidad de la ecuación anterior es proporcional a la concentración del material absorbente o :

$$K = aC$$

El uso de los logaritmos de base diez requiere que el valor de K o a sea cambiado, así las dos leyes combinadas establecen que:

$$\log \frac{I_0}{I} = abc$$

a es el factor de conversión del log de base 10. La ecuación más familiar de la ley de Lambert-Beer, y expresando la trayectoria de la muestra en cm y la concentración en g/l de solución, la constante a designada como coeficiente de absorptividad o coeficiente de absorción específica tiene unidades de $l \cdot g^{-1} \cdot cm^{-1}$. Y se puede escribir : $\log \frac{I_0}{I} = abc$.

el log anterior representa la absorción producida por el paso del fotón en el material absorbente, por lo que se puede relacionar absorbancia y concentración: $\log \frac{I_0}{I} = A$ por lo tanto

$$\boxed{abc = A}$$

1988.07.20

3.3.4 Características Estructurales.

La absorción es característica y propiedad específica de la estructura molecular, ya que la frecuencia de energía a la cual se absorbe depende de ésta; entre más móviles o débiles están unidos los electrones, menor será la frecuencia de energía absorbida. El

análisis estará limitado a aquellas moléculas capaces de absorber en la región de longitudes de onda de 180 a 260 nm. Los compuestos que contienen ligaduras sencillas las cuales involucren electrones de valencia σ , exhiben espectros de absorción abajo de los 180nm, con lo que no se puede determinar la interacción. Para compuestos inorgánicos puede haber grupos oxidáforos que contienen varios átomos como es el permanganato y dicromato, o solo átomos sencillos con electrones de la capas d incompletas en las que se encuentran niveles de energía no ocupados, como sucede en muchos elementos de las tierras raras y de los elementos de transición .

Se puede proponer que la absorción que se presenta es resultado de un proceso de transferencia de carga, es la que, un electrón se transfiere de una parte del ión a otra, así:

PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Material

El equipo empleado en este estudio, fue una fuente de radiación de ^{60}Co Comstock 491 - RT, las lecturas de las muestras para analizar se realizaron en un espectrofotómetro de ultravioleta (Perkin-Elmer 552, Fast-scan UV-VIS).

Las sustancias utilizadas como dosímetros en estado sólido fueron sales de Fe II, tales como: $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; las cuales son de grado analítico (Sigma Chemical Co. y Baker Analyzed).

4.2 Desarrollo Experimental

4.2.1 Dosimetría

Se realizó una primera dosimetría de la fuente en los lugares donde se llevó a cabo la irradiación de las muestras en estudio, posteriormente se realizaron dosimetrías a diferentes períodos durante el tiempo en que se llevó a cabo el presente estudio, el dosímetro empleado fue el de Fricke modificado, descrito anteriormente.

4.2.2 Procedimiento.

Primero se realizaron curvas de calibración espectrofotométrica de cada una de las sales de Fe III, para lo cual se prepararon soluciones a diferentes concentraciones para conocer el intervalo en el cual se cumple perfectamente la ley de Lambert-Beer.

Además se determinaron los espectros de absorción de cada una de las sales de Fe II sin irradiar, determinando la longitud de

onda a la que se observa su mayor absorción, y se pueden llevar a cabo la cuantificación de Fe II.

Las soluciones preparadas para realizar las curvas de calibración, contienen ácido clorhídrico 0.1N.

En todas las determinaciones espectrofotométricas, el aparato se ajusta a cero de absorbancia con blancos preparados a la misma concentración que las soluciones a analizar.

Para la dosimetría con las sales de Fe II en estado sólido, se coloca aproximadamente unos 3g de las diferentes sales en tubos de vidrio y estas son las muestras que se llevan a exposición de la radiación ionizante, los tiempos de radiación recibidos por las muestras se eligen dependiendo de la dosis deseada, así se retiraba un cantidad de muestra de (aproximadamente 0.35g para realizar el análisis por espectrofotometría) al cumplirse el tiempo de radiación elegido; en los tubos sigue quedando muestra y se irradia a otro tiempo para obtener una dosis mayor, el conteo de tiempo de radiación se acumula, al cumplirse el siguiente tiempo se vuelve a tomar otra muestra para analizarla y así sucesivamente.

Las soluciones preparadas a partir de estas sales irradiadas, contienen la siguiente composición

sal irradiada	gramos	ml de HCl
$Fe(SO_4)_2(SO_4)_2 \cdot 8H_2O$	0.125g	10
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0.125g	10
$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	0.125 g	10

Nota: el HCl es 0.1N.

El intervalo de dosis en el que se realizó este estudio de Simetría es de 250 Rdy a 3200 Rdy.

También la sal de: $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ se expuso a la radiación ionizante en diferentes atmósferas de oxígeno, nitrógeno y argón; para lo cual, se saturaron las muestras con estos gases en frascos sellados, efectuándose el análisis en la misma forma descrita anteriormente.

4.2.3 Análisis

Para el análisis de las muestras irradiadas, se procedió a preparar soluciones de dichas sales, las cuales se leyeron en el espectrofotómetro a una longitud de onda $\lambda = 508m\mu$.

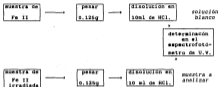
El sulfato amónico de hierro II, el sulfato de hierro II, el cloruro de hierro II irradiados, se disolvieron en ácido clorhídrico 0.1N.

Se pesaron 0.135g de alguna de las sales a analizar y se preparó una solución con 10 ml del ácido clorhídrico en un matraz aforado.

En caso necesario, se realizaron diluciones para poder determinar la densidad óptica de la solución adecuadamente, ya que si la formación de Fe III es muy alta el aparato se satura.

La determinación de la densidad óptica de las muestras irradiadas se llevó a cabo contra blancos de soluciones de Fe II sin irradiar en solución de ácido clorhídrico 0.1N a la misma concentración que las soluciones preparadas con las sales irradiadas.

A continuación se presenta un esquema general del método de análisis realizado con las muestras irradiadas.



CAPITULO V

5. RESULTADOS

5.1 Espectro de Absorción

Para determinar absorbancias, es importante hacerlo en la zona adecuada del espectro, es decir, escoger la longitud de onda a la cual la absorbancia es máxima; para lo cual se realizó un barrido del espectro de: 200 a 400 nm, de una muestra de $\text{FeH}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ irradiada para determinar la longitud de onda del hierro III.

Determinación de λ máxima para Fe(III)

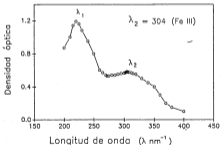


Fig 5.1 Espectro de absorción de una muestra irradiada de sal de Mohr.

El primer pico que se obtiene, representa al Fe (III) a una $\lambda = 120\text{nm}$, el siguiente pico en la curva representa la longitud de onda a la cual absorbe el Fe(III), $\lambda = 104\text{ nm}$.

3.2 Curvas de Calibración

La calibración nos permite determinar las mejores condiciones para las cuales un evento ocurre, por esto fue necesario realizar curvas de calibración. Dichas curvas se construyeron para las sales de Fe(III), ya que a partir de ellas podremos obtener los valores de los coeficientes de absorptividad molar (ϵ) para cada sal; pues dicho valor permite calcular primero la concentración de hierro(III) y determinar así la cantidad de hierro producido por efecto de la radiación gamma.

Además estas curvas permitan determinar el intervalo de concentraciones en las que la determinación del hierro cumple con la ley de Lambert- Beer, haciendo que las determinaciones sean lo más precisas posibles.

El intervalo de concentraciones en que se realizaron las curvas de calibración son de: $2 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-3}$ (M) para las sales de $\text{FeNH}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ y $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; para el sulfato de hierro $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ el intervalo de concentración es de 2×10^{-3} a 1.5×10^{-3} (M).

5.3 Gráficas

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran las curvas de calibración obtenidas para la determinación de Fe(II) en distintas sales de hierro.

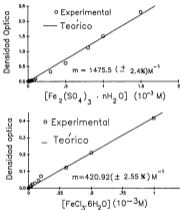


Fig 5.2 Curvas de calibración del hierro (II) ; A) sulfato de hierro, B) cloruro de hierro hexahidratado.

Curva de calibración de Fe (III)

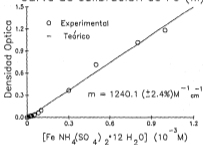


Fig 3.3 Sulfato de amonio de hierro(III) dodecahidratado.

La tabla 5.4 resume los valores de los coeficientes de extinción solar para cada sal, se obtuvieron de la pendiente de cada una de las gráficas; a continuación se presentan los resultados:

sal de Hierro	valor de ϵ ($\text{m}^{-1}\text{cm}^{-1}$)	% de error
$\text{FeSO}_4 \cdot (\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1240.2	± 2.1
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$	1475.5	± 2.1
$\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	420.8	± 2.5

5.4 Dosimetría

La siguiente etapa del estudio es la dosimetría en campos altos de radiación con sales de hierro II; a continuación se presenta el comportamiento de dichas sales.

La construcción de estas gráficas son de concentración de hierro (III) versus dosis de radiación gamma a la que fueron expuestas las sales; calculada a partir de los valores de absorbancia obtenidas experimentalmente y el coeficiente de extinción solar.

El intervalo de dosis estudiado para estas sales se muestra en la tabla 5.5.

Tabla 5.5

Sal de hierro	Intervalo de Dosis Estudiado (Gr)
$\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.5×10^4 — 1.7×10^5
$\text{FeSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	3×10^4 — 5×10^5
$\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	1×10^4 — 1.5×10^5

En las primeras tres gráficas se muestra la respuesta de las sales utilizadas como detectores en atmósfera de aire en condiciones ambientales.

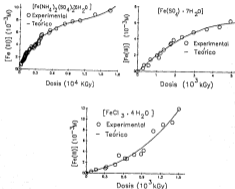


Fig. 3.4 Determinación de Fe(III) en muestras sólidas irradiadas en función de la dosis de radiación.

La figura 3.5 muestra, respuesta total del dosímetro (sal de Mohr), y el recuadro inferior derecho incluye los datos experimentales obtenidos en el intervalo de 0 — 1500 KGy.

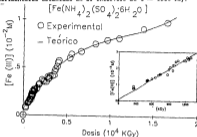


Fig 3.5 Curva de concentración de Fe(III) en función de la Dosis para el sistema sólido de sal de Mohr.

El intervalo de dosis estudiado de la sal de Mohr en diferentes atmósferas se muestra en la tabla 3.6.

Atmósfera	Intervalo de Dosis Estudiado (Gy)
O ₂	1×10^4 — 3×10^4
N ₂	1×10^4 — 3×10^4
Ar	1×10^4 — 1.5×10^4

Tabla 3.6

La figura 3.4 muestra la respuesta de la sal de Mohr en estado sólido expuesta como dosímetro en atmósferas de oxígeno, nitrógeno y argón.

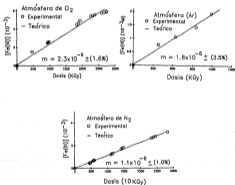


Fig. 3.4 Determinación de $r_{Fe(III)}$ en el sistema sólido de la sal de Mohr en función de la dosis de radiación, saturada con WF_4r, O_2 .

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

8) Calibración

En la tabla 5.7 se resumen los valores de los coeficientes de extinción mejor obtenidos para las diferentes sales de hierro(III), comparándose con el dosímetro de Frické.

Dosímetro	valor de ϵ	% de diferencia con el Frické
Fricke	$2164 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$	—
Nitr	$1248 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$	74.54
Sulfato	$1475 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$	44.44
Cloruro	$421 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$	81.44

8.7 Comparación de los valores de $\epsilon(\text{Fe}^{+2})$ con respecto al dosímetro de Frické

En el dosímetro de Frické, los valores de $\epsilon(\text{Fe}^{+2})$ se encuentra en grandes controversias; de acuerdo a ciertos estudios Eggmont et al a 1, el hecho de que los valores difieran y entre ellos exista un error del 13% se debe a diferencias instrumentales; otros estudios (2), revelan que una variación en la concentración de la solución ácida del dosímetro, así como la variación de concentración del sulfato de hierro conduce a diferentes valores de $\epsilon(\text{Fe}^{2+})$.

De aquí la importancia de determinar el valor del coeficiente de extinción molar, debido a que por medio de este parámetro se puede realizar la cuantificación del hierro producido durante la irradiación: a partir de la absorbancia determinada experimentalmente para diferentes concentraciones de sal, calculando la pendiente en cada caso.

B) Dosimetría

i) Irradiación en Aire

De la dosimetría realizada en atmósfera de aire de acuerdo con la fig. 3.3, se puede observar que existe una parte lineal en el intervalo de dosis que se extiende a los 11000Gy y aunque la respuesta del sistema no es lineal, en todo el intervalo de dosis en que se realizaron las mediciones; la expresión que describe el comportamiento, en la parte lineal para el sistema de sulfato de amonio de hierro (II) hexahidratado, está dada por la pendiente:

$$m = 2.2 \times 10^{-8} \text{ M Gy}^{-1} \pm 1.4\%$$

Para el sulfato de hierro se puede observar de la fig 3.4b que su comportamiento es parecido al sistema anterior, aunque los valores de hierro producido por la radiación son algo mayores al compararlos a las mismas dosis. También es posible determinar una zona lineal que se prolonga hasta los 18000Gy. La pendiente de esta recta: $m = 3 \times 10^{-8} \text{ MGy}^{-1} \pm 2.6\%$.

En el caso del cloruro de Fe(II) se produjo mayor cantidad de hierro que en los dos sistemas anteriores, como se aprecia en la fig 5.5c; esto es, si comparamos el valor máximo de dosis en este sistema de aproximadamente 168000y al hierro producido es de aproximadamente $1.2 \times 10^{-8} M$, mientras que para sulfato de amonio y el sulfato de hierro a aproximadamente la misma dosis la producción de hierro es 2.7×10^{-9} y $2 \times 10^{-9} M$ respectivamente.

También en este sistema se presenta una parte lineal que se extiende a los 600 Kgy. La pendiente de esta línea es:

$$m = 3.4 \times 10^{-8} M Kgy^{-1} = 3.2\%$$

d) Irradiación en Atmósfera de N_2

El comportamiento de la sal de cobalto en atmósfera de N_2 , presenta una menor oxidación del hierro (II) que para el caso en que se irradió este sistema en aire: si se recurre a la fig 5.6a, observamos que la producción de Fe (III) por efecto de la radiación es de aproximadamente $1 \times 10^{-8} M$ a la dosis de aproximadamente 300000y mientras que en el sistema irradiado en aire es de $4.1 \times 10^{-8} M$ y al comparar otros puntos tenemos valores de hierro menores en atmósfera de N_2 que cuando el sistema fue irradiado en aire.

III) Irradiación en Atmósfera de O_2

En este caso la sal de Mohr empleada como dosímetro, presenta un gasto mayor, es decir, que a las diferentes dosis de irradiación, los valores de hierro (III) formado fueron ligeramente mayores que para el caso de aire y aún mayores al compararla la sal irradiada en atmósfera de N_2 . Fig 3.4.b

IV) Irradiación en Atmósfera de Ar

La irradiación de la sal de Mohr en estas condiciones presenta un comportamiento muy parecido al presentado en atmósfera de N_2 ; sin embargo la cantidad de hierro producido fue ligeramente mayor; al comparar este sistema con las condiciones de irradiación bajo atmósfera de O_2 , se encontró que la producción de hierro(III) por efecto de la radiación siempre alcanzó valores menores.

Comparando el sistema saturado con argón y el sistema irradiado sólo en presencia de aire, se encuentra que la producción de hierro(III) también fue menor dentro del intervalo estudiado.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

I. La sal de Mohr, el sulfato de Fe(II) y el cloruro de Fe(II) en estado sólido, pueden ser empleados como dosímetros de rutina para niveles altos de radiación.

El sistema sólido de sulfato de selenio (II) es potencialmente útil para medir dosis absorbidas en el intervalo que se extiende de 150 R Gy a 17000 R Gy en aire. La respuesta de este dosímetro es lineal en el intervalo de 150 a 1300 R Gy. Arriba de 1300 R Gy la respuesta del dosímetro cambia.

La siguiente tabla muestra el intervalo de dosis determinado experimentalmente, donde estos sistemas sólidos se comportan linealmente y se comparan con otros sistemas dosimétricos aqueosos, que se utilizan en forma habitual.

Sistema Dosimétrico	Intervalo en el que Funciona linealmente
ACUOSOS	RGY
Friche	0.04 a 0.4
Friche Modificado	0.5 a 10
Sulfato Oxico	1 a 40
SOLIDO	AIRE
Sulfato de Fe (III)	200 a 1000 RGY
Nohr	250 a 1100 RGY
Cloruro de Fe (III)	80 a 500 RGY

Tabla 4.1

Comparando la pendiente de cada una de las curvas de concentración vs. dosis, de los tres dosímetros irradiados en aire, en la región lineal tenemos:

Sistema dosimétrico	Valor de la Pendiente
Sulfato de Fe (II)	$1.0 \times 10^{-8} \text{ M RGY}^{-1} \pm 2.6\%$
Nohr	$1.2 \times 10^{-8} \text{ M RGY}^{-1} \pm 1.6\%$
Cloruro de Fe (II)	$1.4 \times 10^{-8} \text{ M RGY}^{-1} \pm 3.2\%$

Tabla 4.2

Por lo tanto, para un mismo valor de dosis, la cantidad de Fe(III) producido por el efecto de la radiación en cada caso resulta ser menor para el sulfato de Fe(II), luego para la sal de

Mohr y el valor más grande para el cloruro de Fe(II). De lo que se puede concluir, que el sulfato de Fe(II) es el dosímetro de mayor duración.

La siguiente tabla presenta un ejemplo de comparación en la región lineal de cada sistema sólido en aire.

Sistema	Dosis mg/y	Concentración de Fe(III) M.
sulfato de Fe(II)	600	1.3×10^{-3}
Mohr	600	1.3×10^{-3}
Cloruro de Fe(II)	600	1.4×10^{-3}

Tabla 4.3

II. Al hacer el estudio del comportamiento del sistema sólido de la sal de Mohr en distintas atmósferas, se observa que la atmósfera de nitrógeno, es la más adecuada para medir dosis altas.

Esto se muestra a través del cálculo de la pendiente de las gráficas de concentración vs. dosis, se determina que la durabilidad de este dosímetro varía de mayor a menor si se utiliza atmósfera de N_2 , luego Ar y por último O_2 .

Se podría realizar el mismo estudio en los otros sistemas empleados como dosímetros.

La tabla 6.4 resume los valores de pendiente, de las curvas de la respuesta de la sal de Mohr irradiada en diferentes atmósferas.

Atmósfera	Valor de Pendiente
O ₂	$2.2 \times 10^{-10} \text{ M K Gy}^{-1} \pm 1.0\%$
Aire	$2.2 \times 10^{-10} \text{ M K Gy}^{-1} \pm 1.4\%$
Ar	$1.8 \times 10^{-10} \text{ M K Gy}^{-1} \pm 3.6\%$
N ₂	$1.1 \times 10^{-10} \text{ M K Gy}^{-1} \pm 1.0\%$

Tabla 6.4

Por lo tanto, para un mismo valor de dosis, tenemos:

Atmósfera	Dosis K Gy	Concentración de Fe(III) M.
O ₂	500	2.1×10^{-3}
Aire	500	2.5×10^{-3}
Ar	500	1.4×10^{-3}
N ₂	500	1.0×10^{-3}

Tabla 6.5

Es decir, para medir niveles altos de radiación el decimetro sal de Mohr es recomendable utilizarlo saturado con nitrógeno.

III. El rendimiento radioquímico de Fe (III) determinado para las diferentes sales aumentan de:

Sulfato de Fe (II) < Mohr < cloruro de Fe (II), cuyos valores

cuantitativos se muestran en la tabla 6.6

SISTEMA	VALOR DE $G_{(Fe^{3+})}$
Sulfato de Fe(II)	19
MoBr	21
Cloruro de Fe(II)	22-5

tabla 6.6

IV. El rendimiento radioquímico de Fe (III), determinado para la sal de MoBr saturada con distintos gases aumenta en atmósfera de: Nitrógeno < argón < aire < oxígeno, cuyos valores cuantitativos se muestran en la tabla 6.7

GAS	VALOR de $G_{(Fe^{3+})}$
N_2	10.5
Ar	15.1
Air	21
O_2	22

tabla 6.7

V. Para los sistemas sólidos de $Fe(NH_4)(SO_4) \cdot 2H_2O$ y $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, los mecanismos de reacción producidos durante la irradiación,

parezcan ser similares: dado que las respuestas de los dosímetros en el intervalo de estudio son semejantes.

En cambio, la respuesta del dosímetro de $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ es absolutamente diferente, lo que conduce a suponer un mecanismo de reacción distinto durante la irradiación.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

BIBLIOGRAFIA

1. Martin, F.E., Introduction to radiological physics and radiation dosimetry: John Wiley & Sons, Inc, New York: 1988.
2. Balian P., et. al.: Applicate Radiation Isotopes: High α Temperature Absorbed Dose Measurements in the Mammary: IR: pp 1117 - 1120; (1988).
3. Collin G. C.: Radiation Dosimetry, Physical and Biological Aspects: Plenum press: New York: 1986.
4. Currie G. A. and Quaranta H.O.: International Journal Applicate Radiation Isotopes: Calculated and Measured Dosis in a ^{60}Co irradiation unit: 22, pp 1-3; (1989).
5. Draganic G. I. and Draganic B. Z.: The radiation chemistry of water: Academic press,inc: New York: 1970.
6. Esperment G., Eyresse J., Janssens A., Thielens G. and Jacobs R.: National and international standardization of radiation Dosimetry, Vol II, pp 313, IAEA -SM- 233 / 43;(International Atomic Energy Agency, Vienna, 1978).
7. Fitzgerald J.S., Brownell G. L. and Mahoney F.J.: Mathematical Theory of radiation: Gordon and Breach science publishers, Inc.: New york: 1967: pag. 1-7.
8. Glasstone S.: Ingenieria de reactores nucleares Editorial Reverté: España: 1975.
9. Nickman C., Lorrain S., Barthe J. H. and Portal G.: Radiation protection dosimetry: use of Mohr 's salt for high level gamma dosimetry (up to 10^6Gy): 11: pag. 255-257; (1986).

10. Hine Gerald J. and Brownell Gordon L.: Radiation Dosimetry: Academic press, Inc. publishers: New York: 1956.
11. Holm, W.S. and Berry, R. J.: Manual on radiation dosimetry: Marcel dakker, Inc: New York, 1970.
12. ICRU report 14: Radiation dosimetry: Radiation dosimetry: X RAYS AND GAMMA RAYS WITH MAXIMUM PHOTON ENERGIES BETWEEN 0.5 AND 50 MeV.
13. ICRO report 33: Radiation quantities and units.
14. Informe de seguridad (Irradiador tipo alfileres gumboscan 831 = ET); Anexos: Centro de Estudios Nucleares - UNAM, Agosto 1983.
15. Jayson G.G. and Senere A.B.: Fundamentals of radiation chemistry: van nober science publishers inc.: 1972.
16. Kenneth K. E., Bjarngard Bengt E. and Attix F. H.: The dosimetry of ionizing radiation: academic press, Inc.: Orlando, Florida: 1985; vol 1; pag. 4-31, 18-19, 36-39.
17. Loyola Vargas, V.M. etc: Revista de la sociedad Quimica de México: 18, pag 242-245: (1974).
18. Matthews R. W.: international journal applied radiation isotopes: aqueous chemical dosimetry: 13; pag 1159-1170: (1982).
19. Matthews R. W.: International journal of applied radiation isotopes: use of pre-irradiated solutions in ceric dosimetry: 22; pag 53 - 55: (1981).
20. Matthews R. W., Barker M. T. and Sangster D. F.: international journal applied radiation and isotopes: Ferrrous sulphate dosimetry by the dicromate method: 23; pag 181- 187: (1978).

21. Matthews R. W.: International journal of applied radiation and isotopes: Radiochemical estimation of required dose with the Geiger counter system: 12: pag. 175-185: (1972).
22. Matthews R. W., Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions I: Effect of sulphuric acid on the cobalt 60 γ ray induced oxidation of ferrous sulphate solutions, vol.73, 1971.
23. NCRP report No. 82: SI units in radiation protection and measurements.
24. O'Donnell J. H. and Sangster D. F., Principles of Radiation Chemistry: American Elsevier publishing company, Inc.: New York, 1970.
25. Fale Guy: Ionizing Radiation protection and Dosimetry: CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida:1980.
26. Skopov D. A. and West D. M.: Introducción a la química analítica: Centro regional de ayuda Técnica, agencia para el desarrollo internacional: Buenos aires Argentina: 1969.
27. Strobel H. A.: Instrumentación Química: Editorial Limusa Wiley,S.A.: México: 1968.
28. Spiess J.M.P. and Woods R.J.: An introduction to radiation chemistry: John Wiley & sons: New York: 1976: pag. 101-109.
29. Tansero S. A. Instrumentación Nuclear: Servicio de Publicaciones de la J. E. N.: Madrid 1970.
30. H. Willard H. H.: Instrumental Methods of Analysis: G. Van Nostrand Company: sixth edition: New York: 1961.