



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TIEMPO DE ESTABILIZACION DEL COLOR EN PELICULAS DE TINTE RADIOCROMICO HD-810 Y MD-55-2

T E S I S

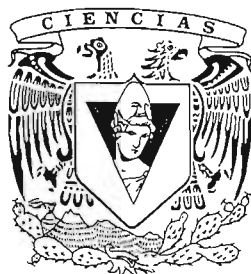
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

F I S I C O

P R E S E N T A :

LUIS MANUEL COLIN VARGAS

DIRECTORA DE TESIS: M. EN C. ANA ELENA BUENFIL BURGOS



MEXICO, D. F.



2005

FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR

m. 347695



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Tiempo de estabilización del color en películas de tinte radiocrómico HD-810 y MD-55-2"

realizado por Colín Vargas Luis Manuel

con número de cuenta 09355109-2, quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis  
 Propietario M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos  
 Propietario Dra. María Ester Brandan Siqués  
 Propietario M. en C. Adolfo Zárate Morales  
 Suplente Dra. María Isabel Gamboa de Buen  
 Suplente Dra. Olga Leticia Avila Aguirre

*Olga E. Brandan Siqués*  
*María Ester Brandan Siqués*  
*Adolfo Zárate Morales*  
*E. Gamboa de Buen*  
*Olga Leticia Avila Aguirre*

Consejo Departamental de Física

*Alicia Zarzosa Pérez*

M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ

FACULTAD DE CIENCIAS  
 DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Codin Vargas  
Luis Manuel

FECHA: 07/09/2005

FIRMA: [Firma]

*Gracias Papá y Mamá,  
Por sostener mi sueño*

*Gracias, hermanos,  
por su tolerancia*

*A ustedes dedico este trabajo*

*Gracias Yara  
Por el ánimo  
Que me has dado*

*A mis más grandes amigo, Alberto, Erasto y Julio*

*A cuatro personas por demás especiales, Jorge, Donovan, Luz y Rafael*

*A los mediocres, que creen que la existencia, la sabiduría y la virtud se proclaman con títulos.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco de forma especial a la Dra. María Ester Brandan Siqués, por haberme permitido ingresar al grupo de trabajo de Dosimetría del Instituto de Física, por dedicar parte de su tiempo a la revisión de la tesis, por aceptar ser parte del Comité Sinodal y por todo el apoyo que me ha brindado.

Mi mas sincero agradecimiento a la M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos, por su paciencia, dedicación, apoyo, conocimiento, por aceptar ser mi tutora de tesis, y por su infinita capacidad de respeto.

A los integrantes del Comité Sinodal Dra. María Ester Brandan Siqués, Dra. Isabel Gamboa de Buen, Dra. Olga Leticia Avila Aguirre, M. en C. Adolfo Zárate Morales, M. en C. Ana Elena Buenfil Burgos, por aceptar ser parte de comité, por haber revisado y contribuido al mejoramiento de la tesis.

Al Grupo de Dosimetría por enseñarme la dinámica del trabajo que se debe llevar como grupo de investigación experimental.

Al M. en C. Cesar Ruis Trejo por apoyarme en la realización de este trabajo y por sus consejos académicos.

A la M. en C. Patricia Aviles Mandujano, por haberme facilitado el acceso al Taller de Radiaciones del la Fac. de Ciencias y por haberme asesorado en el uso de los equipos del Taller.

A Karina Concha Santos, por haberme enseñado a usar de manera correcta los equipos del Laboratorio de Dosimetría del IFUNAM, por haber realizado las medidas iniciales del trabajo de tesis y por su amistad.

A Hector Galvan por habernos apoyado en la realización de las primeras medidas.

A Margarito Vázquez Rodríguez por toda su ayuda técnica.

Al Instituto de Física de la UNAM, por permitirme trabajar y usar los equipos para la realización de esta tesis.

Al Instituto de Ciencia Nucleares por haberme facilitado el irradiador Gammacell para la irradiación de las películas que se usaron en este trabajo.

A la Facultad de Ciencias por haberme permitido trabajar en el Taller de Radiaciones ubicado en el Edificio Tlahuizcalpan y sobre todo por haberme formado académicamente.

Al proyecto PAPIIT IN-109302 DGAPA por la beca que me otorgó durante el Servicio Social.

# INDICE

---

Introducción	i
<b>Capítulo 1. Interacción de la radiación ionizante con la materia</b>	
1.1. Conceptos básicos de estructura de la materia	1
1.2. Decaimiento radiactivo	2
1.2.1. Tipo de emisión	3
1.2.2. Rapidez de decaimiento	6
1.3. Interacción de la radiación electromagnética con la materia	
1.3.1. Atenuación de fotones	7
1.3.2. Efecto fotoeléctrico	10
1.3.3. Efecto Compton	11
1.3.4. Producción de pares	13
1.3.5. Transferencia y absorción de energía	14
<b>Capítulo 2. Conceptos básicos de la dosimetría</b>	
2.1 La fluencia, el kerma y la dosis	15
2.1.1. La fluencia	15
2.1.2. El kerma	16
2.1.3. La dosis	18
2.2 Equilibrio de partícula cargada (EPC)	18
2.3 Conceptos de dosimetría y dosímetros	21



## Capítulo 3. Películas de tintes radiocrómicos tipo Gafchromic modelo

### MD-55-2 y HD-810

3.1. Antecedentes	24
3.2. Descripción	26
3.3. Efecto de la radiación ionizante sobre las películas MD-55-2 y HD-810	28
3.4. Proceso de lectura	29
3.5. Factores que influyen en la densidad óptica de las películas de tinte radiocrómico	31
3.5.1. La densidad óptica en función de la longitud de onda de la lectura	31
3.5.2. La densidad óptica en función de la temperatura de irradiación	32
3.5.3. La densidad óptica en función de la energía de los fotones incidentes	32
3.5.4. La densidad óptica en función del tiempo de lectura	34
3.5.5. Dependencia de la densidad óptica con la temperatura y humedad relativa durante el almacenamiento y lectura de las PTR	35
3.5.6. Sensibilidad de la densidad óptica a la luz ultravioleta	35
3.5.7. Calibración de las películas de tinte radiocrómico	36
3.6. Procedimiento para el manejo de las películas de tinte radiocrómico que reporta la American Association of Physicists in Medicine, Committee Task Group 55, 1998	37

## Capítulo 4. Descripción del experimento

4.1 Descripción de los instrumentos y materiales utilizados	38
4.1.1. Irradiador Gammacell	38
4.1.2. Termohigrógrafo	40
4.1.3. Densitómetro	40
4.1.4. Espectrofotómetros	41
4.1.5. Escáner	45
4.1.6. Películas de tinte radiocrómico	47
4.2 Procedimiento experimental	47

## Capítulo 5. Resultados

5.1. Parte I	50
5.1.1. Películas MD-55-2 sin irradiar. Experimento del 2 de abril al 2 de julio del 2003	51
5.1.2. Películas MD-55-2 irradiadas a 2 Gy	53
5.1.3. Películas MD-55-2 irradiadas a 20 Gy	55
5.1.4. Películas MD-55-2 irradiadas a 60 Gy	57
5.1.5. Películas HD-810 sin irradiar	59
5.1.6. Películas HD-810 irradiadas a 30 Gy	61
5.1.7. Películas HD-810 irradiadas a 600 Gy. Experimento del 25 de agosto al 25 de octubre del 2003	63
5.1.8. Películas HD-810 irradiadas a 600 Gy. Experimento del 5 de noviembre al 5 de diciembre del 2003	65
5.2. Parte II	67
5.2.1. Densidad óptica como función de la humedad relativa	67
5.2.2. Densidad óptica como función de la temperatura	68

## Capítulo 6. Análisis del experimento

6.1. Estabilización del color en el tiempo posterior a la irradiación	70
6.2. La densidad óptica en función del número de lecturas y del tiempo de almacenamiento	78
6.3. Cambios en la densidad óptica de las películas en función de la temperatura y la humedad relativa	79

**Capítulo 7. Conclusiones**

**81**

**Referencias**

**83**

## Introducción

---

En 1895 el alemán Roentgen, en una serie de experimentos, descubrió de forma fortuita los rayos X, iniciando así, junto con otros investigadores, como Henri Becquerel en 1886 y los esposos Pierre y Marie Curie, el largo y fascinante camino hacia el entendimiento de las radiaciones. Posteriormente Ernest Rutherford explicó el proceso de la transformación de los elementos, que Marie Curie llamó radiactividad. La causa por la que la radiactividad tardó mucho en descubrirse es, que a diferencia de otros fenómenos físicos, ésta no puede ser detectada directamente por los sentidos del ser humano. Las radiaciones sólo pueden notarse a partir de los efectos que producen en la materia, por lo cual fue necesario inventar diferentes instrumentos para poder detectar su presencia. Uno de los primeros métodos que se emplearon para la detección de las radiaciones fue el del oscurecimiento de las placas fotográficas o la excitación de pantallas fluorescentes por la radiación. Fue por este último método que Roentgen descubrió los rayos X.

En la actualidad se han desarrollado muchos tipos de detectores de radiación, algunos de los cuales se usan para medir la energía impartida al medio irradiado. Estos se llaman dosímetros. El diseño de los dosímetros está basado en el conocimiento de la interacción de la radiación con la materia. Existen diversos tipos de dosímetros como son: las cámaras de ionización, los calorímetros, los dosímetros termoluminiscentes, las emulsiones fotográficas y las películas de tinte radiocrómico, entre otros. Cada clase de dosímetro puede ser preferencialmente sensible a un cierto tipo de radiación y a un cierto intervalo de energía. Así, es de primordial importancia seleccionar el dosímetro adecuado para medir la energía impartida por la radiación de interés.

Entre los dosímetros desarrollados en las dos últimas décadas se encuentran las películas de tinte radiocrómico (PTR), comercializados bajo el nombre de GafChromic MD-55-2 y HD-810. En general este tipo de películas consiste en un tinte precursor, el cual, al ser expuesto a un campo de radiación ionizante, desarrolla en la película una coloración cuya intensidad está relacionada con la cantidad de radiación que recibió la película.

La formación del color se debe a un proceso químico de polimerización, del cual se hablará más adelante. Diversos investigadores [McL, 1995; Roa, 2003; Ali, 2003] han observado que a las películas les toma cierto tiempo terminar el proceso químico del desarrollo del color y que éste no llega por completo a estabilizarse. Así existen discrepancias entre los investigadores acerca del tiempo que debe dejarse transcurrir, después del término de la exposición de las PTR a la radiación, para leer la densidad óptica de la película. La solución de tales discrepancias es el principal objetivo de este trabajo de tesis.

Otros investigadores [Nir, 1998; But, 2003] han reportado que la densidad óptica aumenta debido a la luz que reciben del equipo lector con el que se analizan las películas de tinte radiocrómico. También se ha investigado [Nir, 1998] que la humedad relativa y la temperatura ambientales, pueden afectar el desarrollo del color en las películas de tinte radiocrómico. Por todas estas observaciones el Grupo de Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM, decidió llevar a cabo un estudio sobre algunos factores que posiblemente afectan el desarrollo del color de las películas de tinte radiocrómico GafChromic HD-810 y MD-55-2, expuestas a un campo de radiación ionizante.

Con el presente estudio se pretenden analizar los siguientes factores: A) tiempo de estabilización del color de las películas de tinte radiocrómico GafChromic HD-810 y MD-55-2, expuestas a un campo de radiación de rayos gamma de  $^{60}\text{Co}$ , éste tiempo de estabilización se abreviará como TE. B) comportamiento de la densidad óptica en función del tiempo transcurrido entre la irradiación y la lectura, el tiempo de lectura se abreviara como T. C) determinación de posibles cambios en la sensibilidad de las películas GafChromic con el número de veces que se leen y con el tiempo de almacenamiento (TA), esto es, determinar los efectos de la luz de los instrumentos lectores (con los que se analizan las películas) y del estrés mecánico sobre la densidad óptica. D) análisis cualitativo sobre la influencia de la temperatura y humedad relativa ambientales en la densidad óptica de las películas. Para llevar a cabo el estudio mencionado arriba, la tesis se ha dividido en seis capítulos.

En el primer capítulo se mencionan conceptos importantes sobre la materia, la radiactividad, los tipos de decaimiento radiactivo que existen y la interacción de la radiación electromagnética con la materia.

En el segundo capítulo se definen conceptos fundamentales para el estudio y la medición de la dosis impartida por las radiaciones. En este capítulo se define el concepto de equilibrio de partícula cargada, que es importante para la irradiación de películas, así mismo, se exponen las características básicas que deben tener los materiales para poder ser considerados como dosímetros.

En el capítulo tres, se presenta la descripción de las películas de tinte radiocromico MD-55-2 y HD-810: cómo están constituidas, cómo les afecta la radiación electromagnética, cómo se produce la coloración, cómo influyen algunos factores sobre la densidad óptica y, por último, un pequeño resumen sobre cómo utilizar y manejar este tipo de películas.

En el cuarto capítulo se da una descripción de los materiales e instrumentos utilizados para llevar a cabo el proceso experimental y se detalla cómo se realizó éste.

En el quinto capítulo se muestran, en forma de gráficas, los resultados experimentales.

En el capítulos 6 se realiza el análisis de los resultados experimentales en relación con los objetivos de la tesis, los cuales fueron: determinación del tiempo de estabilización del color en películas expuestas a la irradiación, dependencia de la densidad óptica con el número de lecturas y el tiempo de almacenamiento.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones del trabajo, llevado a cabo en la presente tesis.

# Capítulo 1

## Interacción de la radiación ionizante con la materia

---

### 1.1 Conceptos básicos de estructura de la materia

Según la teoría atómica de Dalton, 1810, la materia estaría formada de moléculas y éstas de átomos, entidades que no pueden descomponerse en otras más sencillas por procesos químicos. Los átomos, de acuerdo con la teoría de Rutherford, 1911, están constituidos por un núcleo rodeado por una nube de electrones que giran alrededor de éste a grandes velocidades. El núcleo está compuesto de protones y neutrones. Los protones tienen carga eléctrica positiva de  $+e = 1.602 \times 10^{-19}$  Coulomb, y los neutrones no tienen carga eléctrica. La suma de la carga eléctrica de los electrones atómicos es de igual magnitud que la de los protones del núcleo, pero de signo opuesto.

Las masas de los átomos son extremadamente pequeñas. La masa del átomo más pesado que se conoce hasta hoy es de  $4 \times 10^{-22}$  g. Para trabajar cómodamente con las masas de los átomos se define la unidad de masa atómica  $1 \text{ uma} = 1.66054 \times 10^{-24}$  g. Un protón tiene una masa de 1.0073 uma, un neutrón de 1.0087 uma y el electrón de  $5.486 \times 10^{-4}$  uma, lo que indica que la masa de los átomos se encuentra básicamente concentrada en el núcleo.

El tamaño de los átomos es del orden de  $1 \times 10^{-10}$  m. Una unidad muy empleada es el angstrom, que es igual a  $1 \times 10^{-10}$  m. Los átomos tienen diámetros del orden de 1-5 angstroms. Los diámetros de los núcleos son del orden de  $6 \times 10^{-5}$  angstrom, por lo cual existe mucho espacio vacío en los átomos y son los electrones los que ocupan casi todo el volumen del mismo [Bro, 1998].

El núcleo está formado por  $Z$  protones y  $N$  neutrones. El número atómico  $Z$  distingue a los elementos químicos entre sí. El número de masa se define como  $A = Z + N$ . El término núclido se introduce para designar a los núcleos atómicos, definidos por su número  $A$ , su número atómico y su energía nuclear. Los isótopos son núclidos que tienen el mismo número de protones pero diferente número de neutrones. Como un elemento químico queda identificado por su número

atómico Z, todos los isótopos pertenecen al mismo elemento. Para identificar sin ambigüedad a los núclidos, se usa la siguiente notación:



donde X representa el símbolo químico (H, He, Li, etc). Al indicar A y Z, queda definido N. Además se puede prescindir de escribir Z, pues ya se tiene el símbolo químico, que es equivalente. En esta notación los isótopos del hidrógeno son  ${}^1\text{H}$ ,  ${}^2\text{H}$  y  ${}^3\text{H}$ . Los del oxígeno serán  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{O}$  y  ${}^{18}\text{O}$ .

Los avances del Siglo XX en el conocimiento de la estructura de la materia en relación al núcleo atómico se debieron a los estudios del proceso de desintegración que presentan algunos elementos. Este proceso fue llamado radiactividad. Ernest Rutherford y su colaborador, el químico Frederick Soddy, propusieron una teoría que describía el fenómeno de la radiactividad. A este proceso se le conoce ahora como decaimiento radiactivo. En 1902, Ernest Rutherford y Frederick Soddy explicaron en términos generales la naturaleza de la radiactividad y encontraron que el átomo ya no podía considerarse como una partícula indivisible; estudiaron los productos del decaimiento de un material radiactivo, separado químicamente del resto de los elementos de donde provenía, y descubrieron que los materiales radiactivos, al emitir radiación se transforman en otros materiales, ya sea del mismo elemento o de otro [Ric, 2001].

## 1.2 Decaimiento radiactivo

Como se mencionó anteriormente los núcleos pueden transformarse unos en otros, o pasar de un estado energético a otro, mediante la emisión de radiación. Esta transformación sucede de manera espontánea. Además, cada decaimiento va acompañado de la emisión de al menos un tipo particular de radiación. La energía que se lleva la radiación es perdida por el núcleo. Esta energía es la que le da a las radiaciones sus dos características importantes: poder penetrar la materia y poder depositar su energía en ella [Ric, 2001].

Muchos de los fenómenos asociados con los decaimientos radiactivos y sus aplicaciones se pueden comprender con unas cuantas reglas esenciales de la mecánica cuántica. Algunas de estas reglas son:



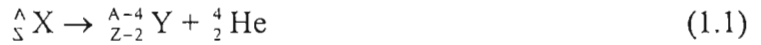
- Los sistemas físicos (átomos, núcleos o moléculas) se encuentran en ciertos estados bien definidos. Estos estados se distinguen entre sí por su energía y por su números cuánticos. Cada sistema tiene su propio diagrama de niveles, es decir la representación, sobre una escala de energía, de los niveles en que se puede encontrar.
- El estado de energía mas baja de un sistema se llama estado base o estado fundamental. Los estados de energía más altas se denominan estados excitados, y sus energías de excitación se miden con respecto a la del estado base. Los sistemas tienden a estar normalmente en su estado base.
- Un sistema puede pasar del estado base a un estado excitado (excitarse) si absorbe la energía necesaria. Inversamente, puede pasar de un estado excitado al estado base (desexcitarse) si disipa la energía sobrante.
- La desexcitación (del estado excitado al base, o entre estados excitados) puede suceder mediante la emisión de un fotón, cuya energía es  $E = h\nu$ , que es precisamente la diferencia de energía de los dos estados en cuestión.

El decaimiento nuclear sólo sucede cuando hay un exceso de masa-energía en el núcleo. La emisión le ayuda a éste a lograr una mayor estabilidad. Los decaimientos radiactivos de los diferentes núcleos se caracterizan por: el tipo de emisión, su energía y la rapidez de decaimiento.

### 1.2.1. Tipo de emisión

La primera propiedad que caracteriza al decaimiento radiactivo es el tipo de emisión, es decir, la forma como los núcleos decaen. Sólo existen unas cuantas formas en la que los núcleos pueden decaer. A continuación se describen las más importantes [Ric, 2001].

**a). Decaimiento alfa ( $\alpha$ ).** Un grupo importante de elementos pesados puede decaer emitiendo partículas alfa, que consisten en un agregado de dos protones y dos neutrones. Estas partículas alfa son idénticas a los núcleos de helio ( ${}^4\text{He}$ ), por lo que su carga es  $+2e$  y su número de masa es 4. Cuando un núcleo emite una partícula alfa, pierde 2 unidades de carga y 4 de masa, transformándose en otro núcleo, como se indica a continuación:



b) **Decaimiento beta ( $\beta$ )**. Existen dos tipos principales de decaimiento beta, el de partícula negativa y el de positiva. La partícula beta negativa que se emite es un electrón, con sus correspondientes masa y carga, indistinguible de los electrones de las capas atómicas. En vista de que los núcleos no contienen electrones, la explicación de esta emisión es que un neutrón del núcleo se convierte en un protón y en un electrón; el protón permanece dentro del núcleo en virtud de la fuerza nuclear y el electrón escapa como partícula beta. El número de masa A del núcleo resultante es el mismo que el del núcleo original, pero su número atómico Z se ve aumentado en uno conservándose así la carga. En este decaimiento también existe la emisión de un antineutrino  $\bar{\nu}$  que se lleva parte de la energía total disponible en el proceso. El proceso se expresa de la siguiente manera:



Por otro lado, algunos núcleos emiten partículas beta positivas (positrones), que tienen la misma masa que los electrones y carga +e. Se crean en el núcleo cuando un protón se convierte en un neutrón. El nuevo neutrón permanece en el núcleo y el positrón es emitido junto con un neutrino. En consecuencia el núcleo pierde una carga positiva, como se indica a continuación:



c) **Decaimiento gamma ( $\gamma$ )**. Los rayos gamma son simplemente fotones, es decir, ondas de radiación electromagnética. No tienen masa ni carga y constituyen energía emitida en forma de onda. Cuando un núcleo se encuentra en un estado excitado de energía, éste emite un rayo gamma para pasar a un estado de menor energía, es decir, más estable. En consecuencia, cuando un núcleo emite un rayo gamma, se mantiene con la misma identidad, pero en un estado de menor energía. La ecuación que describe su comportamiento es la siguiente:



donde  ${}^A_Z X^*$  representa un estado excitado del núcleo  ${}^A_Z X$ .

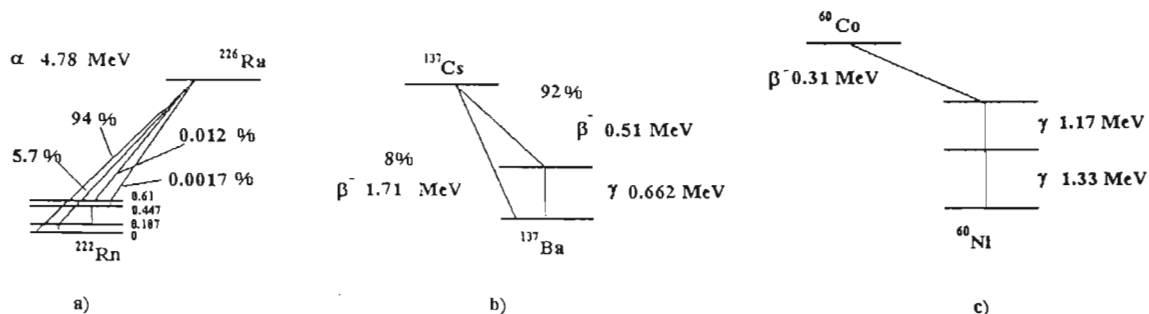
**d) Captura electrónica.** En este caso el núcleo atrapa un electrón orbital. En consecuencia uno de sus protones se transforma en un neutrón, disminuyendo así su número atómico. El electrón atrapado por el núcleo generalmente proviene de la capa interna K, y deja una vacancia. Para llenar esta vacancia, cae un electrón de la capa exterior (L, M, etc) emitiendo de manera simultánea un fotón de rayos X. El proceso total se identifica por estos rayos X emitidos al final y que son característicos del nuevo átomo. La ecuación que describe el comportamiento es:



**e) Conversión interna.** En este proceso un núcleo excitado en vez de emitir un rayo gamma de energía  $h\nu$  imparte esta cantidad de energía directamente a uno de los electrones que lo rodean, el cual escapa del átomo con energía cinética  $T = h\nu - E_b$ , donde  $E_b$  es la energía de amarre del electrón. Por lo que el núcleo pasa de un estado excitado  $X^*$  a uno no excitado  $X$ , pero el átomo, que designaremos como  $Y$ , pierde un electrón, la ecuación es la siguiente:



Todas las características hasta aquí descritas sobre la desintegración radiactiva de cada núclido se pueden representar en un esquema llamado esquema de decaimiento, como el ejemplo mostrado en la figura 1.1 para varios núclidos. En estos esquemas, las líneas horizontales representan los estados energéticos en los que pueden estar los núcleos, y los distintos núcleos se encuentran desplazados horizontalmente, creciendo  $Z$  hacia la derecha. Las líneas inclinadas indican transiciones por emisión radiactiva. La escala vertical es una escala de energías (los esquemas de la figura no están a escala); la energía disponible para cada decaimiento está indicada por la separación entre los estados correspondientes. De esta manera un decaimiento por partícula cargada implica una flecha diagonal, y una emisión de rayo gamma una flecha vertical.



**Figura 1.1 Esquema de decaimiento de algunos isótopos a) decaimiento del  $^{226}\text{Ra}$ , alfa con gammas; b) decaimiento del  $^{137}\text{Cs}$ , beta con gammas c) decaimiento del  $^{60}\text{Co}$ , beta con gammas**

Al observar detalladamente estos esquemas, se ve que un núclido puede decaer de varios modos distintos; los porcentajes en que se presenta cada uno suelen indicarse en el esquema (ver incisos a y b de la figura 1.1). Además, puede haber decaimientos secuenciales en varios pasos hasta llegar al estado de menor energía (estado base), inciso c. La emisión de rayos gamma puede suceder en varios pasos (llamados transiciones) hasta el estado base.

Es importante tener presente el caso del  $^{60}\text{Co}$ , puesto que este tipo de decaimiento es el que se utilizó para la irradiación de las películas Gafchromic, de las cuales se hablará más adelante. En este decaimiento se emite una partícula beta con su neutrino y luego dos rayos gamma secuenciales de 1.17 y 1.33 MeV.

### 1.2.2. Rapidez de decaimiento

La tercera propiedad característica de la desintegración radiactiva es su rapidez. Un núclido al desintegrarse se transforma en otro núclido y por lo tanto desaparece. Si el proceso es rápido, el núclido original dura poco y se agota pronto. Si el proceso es lento, puede durar mucho tiempo (hasta miles de años). Se ha observado que todos los procesos radiactivos siguen una ley exponencial. Por lo tanto, si  $N_0$  es el número inicial de núcleos inestables, el número de núcleos que queda después de un tiempo  $t$  está dado por:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.7)$$

donde  $\lambda$  es una característica del núcleo, llamada constante de desintegración, que representa la probabilidad de desintegración en un tiempo dado y se expresa en  $s^{-1}$ . Para representar la duración de las fuentes radiactivas se ha definido el concepto de vida media y se representa como  $t_{1/2}$ . La vida media es el tiempo que tarda en reducirse una cantidad de núcleos radiactivos a la mitad de la cantidad inicial de ellos, esto es,  $N/N_0 = 0.5$ . La vida media se expresa de la siguiente forma:

$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.8)$$

Cada núcleo tiene su propia vida media, y ésta es una cantidad que no puede ser alterada por ningún factor externo. Las vidas medias pueden valer desde fracciones de segundos hasta miles de millones de años [Ric, 2001].

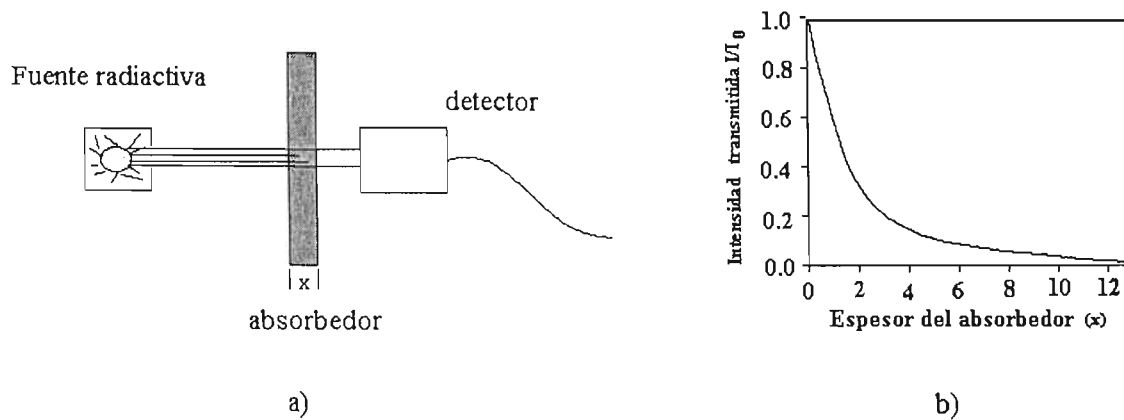
### 1.3 Interacción de la radiación electromagnética con la materia

#### 1.3.1. Atenuación de fotones

Supongamos que se envía un haz angosto de fotones de intensidad  $I_0$  sobre un material de espesor  $x$  y se coloca detrás de éste un detector, como se muestra en el inciso a) de la figura 1.2. Se observará que el material impide el paso de algunos de los fotones, reduciéndose la intensidad  $I$  de éstos que llega al detector. No se ve afectada la energía de los fotones que atraviesan el material lo que se reduce es la cantidad que es registrada en el detector [Ric, 2001].

Si se aumenta el espesor  $x$  del material absorbedor, la fracción de la radiación transmitida va disminuyendo de acuerdo con la siguiente ecuación (ver inciso b de la figura 1.2):

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx \quad (1.9)$$



**Figura 1.2. a) Experimento de transmisión de fotones a través de un material absorbedor. b) Curva de transmisión de fotones a través de un absorbedor, como función de su espesor.**

El coeficiente  $\mu$  se llama coeficiente lineal de atenuación. Comprende todos los efectos de dispersión o absorción que impiden que algunos fotones lleguen al detector. Su magnitud depende de la energía de los fotones y del tipo de material absorbedor. Las unidades de  $\mu$  son de  $\text{cm}^{-1}$ . La solución de la ecuación 1.9 es una función exponencial negativa

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1.10)$$

$I_0$  es el valor de  $I$  cuando  $x = 0$ ; el valor de  $\mu$  determina la pendiente de la curva de atenuación.

Al dividir el coeficiente de atenuación lineal entre la densidad  $\rho$  del material absorbedor resulta una cantidad atómica importante llamada coeficiente másico de atenuación:

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (1.11)$$

En términos del coeficiente másico de atenuación, la ley de decaimiento se escribe:

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x} \quad (1.12)$$

$\mu_m$  se relaciona con la sección eficaz total atómica de atenuación  $\sigma_{\text{tot}}$  de la siguiente manera:

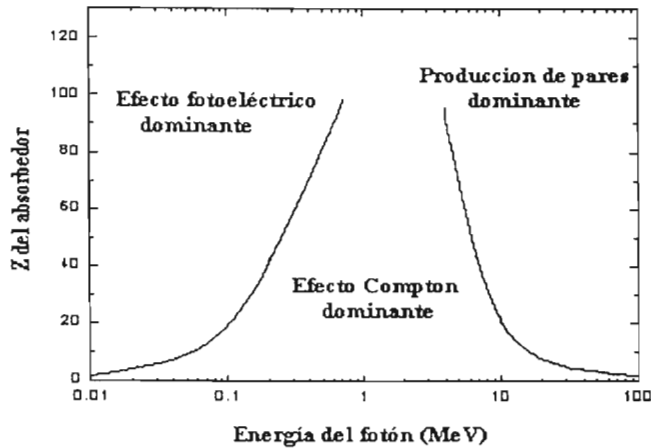
$$\mu_m = \sigma_{\text{tot}} \frac{N_0}{M} \quad (1.13)$$

La sección eficaz total de atenuación  $\sigma_{\text{tot}}$  es la probabilidad, por cada átomo del absorbedor, de que un fotón sufra un proceso atenuador, es decir, que deje de ser parte del haz original de fotones. Las unidades de  $\sigma_{\text{tot}}$  son [ $\text{cm}^2/\text{átomo}$ ], las del número de Avogadro  $N_0$  son [átomos/mol], y las del peso molecular  $M$ , son [g/mol]. Las magnitudes de  $\mu$  y  $\sigma_{\text{tot}}$  (y por lo tanto de la rapidez con la que cae la curva de atenuación) dependen del material absorbedor y de la energía de los fotones. Existen varios mecanismos mediante los cuales los fotones son dispersados o absorbidos por el material colocado como absorbedor. Estos mecanismos son: dispersión Thomson, dispersión Rayleigh, efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares. Cada uno de estos procesos tiene su propia sección eficaz, esto es, hay una sección eficaz para dispersión Thomson  $\sigma_T$ , una para dispersión Rayleigh  $\sigma_R$ , una para efecto Compton  $\sigma_C$  etc. La sección eficaz total es la suma de las secciones eficaces parciales [Ric, 2001], esto es:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_T + \sigma_R + \sigma_C + \sigma_{\text{ef}} + \sigma_{\text{pp}} \quad (1.14)$$

Para el propósito de este trabajo las dos primeras interacciones son muy poco probables a las energías a las que se trabajó (del orden de 1.25 MeV), por lo que sólo se describirán las últimas tres interacciones. En estas interacciones los fotones imparten mucha de su energía (en ocasiones toda) a los electrones atómicos del medio en el que inciden, los que después imparten esa energía al medio.

La probabilidad de que ocurra alguna de las tres formas de interacción antes mencionadas, depende de la energía del fotón incidente  $E_\gamma = h\nu$  y del número  $Z$  del medio absorbente. La figura 1.3 indica las regiones de  $Z$  y  $E$  en las que predomina cada tipo de



**Figura 1.3. Importancia, relativa a la energía y al número atómico Z, de los tres tipos de interacción más importantes de los rayos X y fotones con la materia. Efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares. [Att, 1986, pag. 125]**

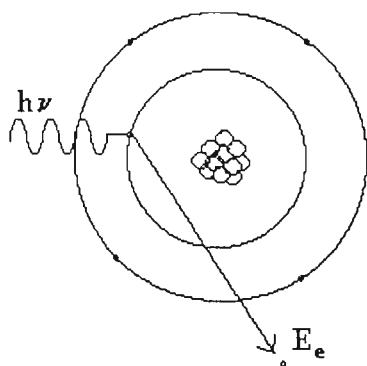
interacción. Las curvas corresponden a aquellas regiones en las que dos tipos de interacción son igualmente probables [Att, 1986].

### 1.3.2. Efecto fotoeléctrico

Ocurre cuando un fotón (generalmente de baja energía) le transfiere toda su energía a un electrón atómico del medio absorbedor. Como resultado de la interacción, el electrón sale del átomo con una determinada energía cinética. El efecto fotoeléctrico es el tipo de interacción más importante entre la radiación y la materia, para fotones con energías en el intervalo de 0.01 a 0.1 MeV aproximadamente; también es importante a energías medias y para materiales con Z alta. En la figura 1.4 se muestra un esquema simplificado del efecto fotoeléctrico.

En ésta se observa como un fotón de energía  $h\nu$  interacciona con un electrón atómico, cuya energía de ligadura es  $E_b$ . Generalmente, la interacción entre fotón y electrón ocurre en las capas internas del átomo. El efecto fotoeléctrico sólo ocurre cuando  $h\nu > E_b$ , pues de lo contrario el electrón no recibiría la energía suficiente para escapar del átomo. La energía cinética con la que sale el electrón, del átomo al que está ligado, es:





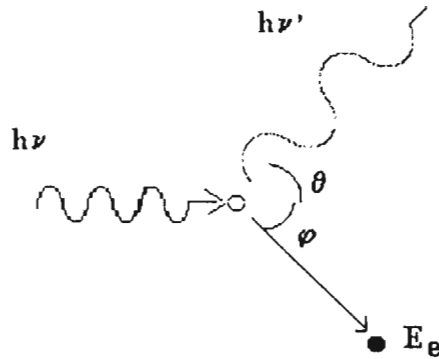
**Figura 1.4. Esquema del efecto fotoeléctrico. Un fotón de energía  $h\nu$  incide en una de las capas internas del átomo e imparte la energía suficiente para que un electrón de esta capa escape del átomo.**

$$E_e = h\nu - E_b - E_a \quad (1.15)$$

donde  $E_a$  es la energía cinética de retroceso del átomo, que es muy cercana a cero y a menudo llega ser despreciable. Sin embargo el momento del átomo no puede ser despreciado, por conservación de momento, y es suficiente con decir que el átomo retrocede en la dirección apropiada para la conservación del momento [Att, 1986]

### 1.3.3. Efecto Compton

El efecto Compton ocurre cuando un fotón de energía  $h\nu$  choca con un electrón del medio en el que incide. El fotón lleva momento  $h\nu/c$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío. Para describir matemáticamente el efecto Compton se supone que el electrón que es golpeado por el fotón no tiene energía cinética o momento inicial, es decir que se encuentra en reposo y libre del átomo en el momento de la interacción, por lo que la interacción por efecto Compton es más probable en las capas externas del átomo. Después de la colisión, el electrón es dispersado a un ángulo  $\phi$ , con respecto de la dirección original del fotón, con energía cinética  $E_e$  y momento  $p$ . En la figura 1.5 se muestra este proceso.



**Figura 1.5** Esquema del efecto Compton. Un fotón de energía  $h\nu$  incide sobre un electrón libre y transfiere parte de su energía a éste. Como resultado, el electrón sale disparado con una cierta energía  $E_e$  y a un cierto ángulo  $\varphi$ , y aparece un nuevo fotón de energía  $h\nu'$ , cuya dirección forma un ángulo  $\theta$  con la dirección del primer fotón.

Por conservación de momento y de energía y utilizando expresiones relativistas, se encuentran tres ecuaciones que proveen en forma conveniente una solución completa de la cinemática de las interacciones Compton en términos de los siguientes parámetros: energía cinética con la que es dispersado el electrón  $E_e$ , energía del fotón dispersado  $h\nu'$ , ángulo de dispersión del fotón  $\theta$  y ángulo de dispersión del electrón  $\varphi$ .

$$h\nu' = h\nu / [1 + (h\nu/m_0c^2)(1-\cos\theta)] \quad (1.16)$$

$$E_e = h\nu - h\nu' \quad (1.17)$$

$$\cot \theta = (1 + h\nu/m_0c^2)\tan(\theta/2) \quad (1.18)$$

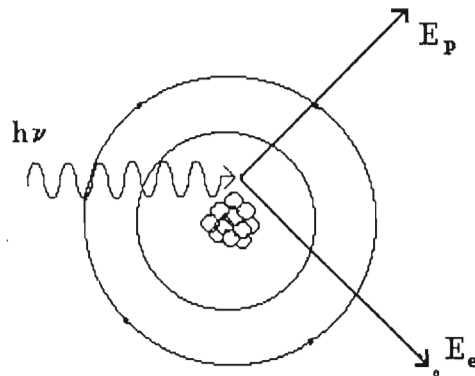
donde  $m_0$  es la masa del electrón en reposo y  $m_0c^2 = 0.511 \text{ MeV}$  es la energía de la masa en reposo del electrón.

La energía máxima  $E_{\max}$  que es cedida al electrón en una colisión frontal ( $\varphi = 0$ ) por un fotón de energía  $h\nu$  es [Att, 1986]:

$$E_{\max} = \frac{2(h\nu)^2}{2h\nu + 0.511\text{MeV}} \quad (1.19)$$

### 1.3.4. Producción de pares

La producción de pares se presenta cuando la energía del fotón incidente es mayor que 1.022 MeV, que es el doble de la masa del electrón en reposo, 0.511 MeV; la interacción ocurre entre el fotón y el campo electromagnético de un núcleo atómico, donde sucede la transformación de energía en materia. El fotón desaparece y se producen un electrón y un positrón, ver figura 1.6, con energías cinéticas  $E_e$  y  $E_p$ , respectivamente.



**Figura 1.6 Esquema del efecto de producción de pares. Un fotón de energía  $h\nu$ , mayor que 1.022 MeV, incide cerca del núcleo del átomo y, por interacción con el campo electromagnético, se producen un electrón y un positrón.**

La energía del fotón se distribuye de la siguiente manera:

$$h\nu = 1.022 \text{ MeV} + E_e + E_p \quad (1.20)$$

Generalmente  $E_e$  y  $E_p$  no son iguales, sin embargo, su energía promedio está determinada por:

$$E = \frac{h\nu - 1.022 \text{ MeV}}{2} \quad (1.21)$$

El electrón y el positrón emitidos imparten su energía en el material a través de interacciones eléctricas. Al final de su recorrido, el positrón se combina con un electrón del medio, y da lugar a una aniquilación, en la que se generan dos fotones de 0.511 MeV que salen en direcciones opuestas. La probabilidad de que ocurra la producción de pares crece rápidamente con la energía de los fotones [Att, 1986; Ric, 2001].

### 1.3.5. Transferencia y absorción de energía

Una de las cantidades de mayor interés en la descripción de la interacción de la radiación con la materia es qué fracción de la energía del fotón que incide se transfiere como energía cinética a los electrones del material, en la vecindad de cada interacción. Se define [Ric, 2001] como el coeficiente másico de transferencia de energía y se expresa mediante la ecuación:

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{N_0}{M} (f_{ef}\sigma_{ef} + f_C\sigma_C + f_{pp}\sigma_{pp}) \quad (1.22)$$

donde  $f_{ef}$ ,  $f_C$  y  $f_{pp}$  son las fracciones de energía transferida a través de los efectos fotoeléctrico, Compton y producción de pares, respectivamente. Las unidades de  $\mu_{tr}/\rho$  son [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ].

Para precisar mejor la energía depositada en forma de energía cinética de los electrones, hay que restar la energía de procesos secundarios que son radiativos, como el brehmsstrahlung (que es producido por electrones y positrones) y la radiación de aniquilación de positrones. Considerando estos procesos se corrige el coeficiente másico de transferencia de energía  $\mu_{tr}/\rho$  para dar lugar al coeficiente másico de absorción de energía:

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = (1-g) \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad (1.23)$$

siendo  $g$  la fracción de energía perdida en los fenómenos secundarios mencionados. La fracción  $g$  se conoce para diferentes materiales absorbedores y se encuentra en forma de tablas. Las unidades de  $\mu_{en}/\rho$  son también de [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ].

La energía depositada en el absorbedor en forma de energía cinética de los electrones se asocia al daño o transformación producido por la radiación en organismos vivos o en materia inorgánica. Por esta razón, en estudios de dosimetría cobra especial importancia el coeficiente másico de absorción de energía  $\mu_{en}/\rho$  [Ric, 2001].

## Capítulo 2

### Conceptos básicos de la dosimetría

---

Desde su descubrimiento, las radiaciones han sido utilizadas para beneficio de la sociedad. En la actualidad son usadas en muchísimas áreas tales como la agricultura, la industria, la biología y la medicina. La utilidad que brindan los materiales radiactivos depende del tipo de radiación que emiten, su energía y su vida media. Algunos ejemplos de sus aplicaciones son: esterilización de material químico, biológico y quirúrgico; trazadores en usos físicos, químicos, biológicos y médicos; usos industriales como el control de espesores de láminas y hojas de papel, generación de energía eléctrica, uso médico en técnicas de radiodiagnóstico y radioterapia, etc.

Para poder utilizar las radiaciones en las diversas aplicaciones que existen, es importante tener el máximo control de ellas, por lo que es útil medir y comparar las energías absorbidas por los diferentes materiales, para lo cual ha sido necesario definir ciertos conceptos. Estos, con sus respectivas unidades, han evolucionado a medida que se ha tenido mayor conocimiento de la radiación. La Comisión Internacional de Unidades de Radiación (ICRU, por sus siglas en inglés), se ha abocado a la tarea de definir un sistema de unidades aceptado internacionalmente y de empleo rutinario. Las definiciones y unidades están basadas en el sistema MKS. Algunas de estas definiciones se presentan en este capítulo [Att, 1986].

#### 2.1 La fluencia, el kerma y la dosis

##### 2.1.1. La fluencia

La fluencia es la cantidad de fotones (o cualquier otra partícula)  $N_f$  que cruzan un área diferencial  $da$ , de una esfera finita imaginaria que rodea a un punto  $p$  de interés ( $da$  es perpendicular al flujo de fotones). Las unidades son  $[m^{-2}]$  y se representa por:

$$\Phi = dN_f / da \quad (2.1)$$

la fluencia de energía se define por:

$$\Psi = \frac{dR}{da} \quad (2.2a)$$

donde R es el valor esperado de la energía total que cruza la sección transversal (da) de la esfera imaginaria que rodea al punto p. La fluencia de energía para un haz monoenergético se define por:

$$\Psi = \frac{dN_f}{da} h\nu \quad (2.2b)$$

### 2.1.2. El kerma

La Comisión Internacional de Unidades de Radiación (ICRU), define con sumo rigor lo siguiente:

- Radiación directamente ionizante: son partículas cargadas veloces, que inciden sobre los materiales y distribuyen su energía a través de interacciones de Coulomb, a lo largo de su trayectoria.
- Radiación indirectamente ionizante: son partículas no cargadas (como rayos X, gamma o neutrones) que transfieren su energía a las partículas cargadas de los materiales, y éstas distribuyen después la energía que les fue suministrada por medio de interacciones de Coulomb.
- Pérdida radiativa: se considera como pérdida radiativa a la conversión de energía cinética de las partículas cargadas, en energía en forma de fotones (bremsstrahlung y aniquilación de un electrón con un positrón ).

El concepto del kerma se define para el caso de radiación indirectamente ionizante. El kerma es el valor esperado de la energía transferida por la radiación indirectamente ionizante a las partículas cargadas del medio, por unidad de masa, en un punto de interés p, incluyendo las pérdidas radiativas de energía y excluyendo la energía transferida de una partícula cargada a otra. La unidad es el gray [Gy] (1 Gy = 1 J/kg). El kerma se define por:

$$K = \frac{d\bar{E}_tr}{dm} \quad (2.3)$$

y la energía transferida,  $E_{tr}$ , en un volumen  $V$  se define como:

$$E_{tr} = (R_{in})_u - (R_{out})_{u}^{nonr} + \Sigma Q \quad (2.4)$$

donde:

$(R_{in})_u$  = energía radiante de partículas no cargadas que entran el volumen  $V$ .

$(R_{out})_{u}^{nonr}$  = energía radiante de las partículas no cargadas que salen de  $V$ , exceptuando la originada por las pérdidas radiativas de energía cinética de las partículas cargadas, mientras éstas permanecen dentro del volumen  $V$ .

$\Sigma Q$  = energía neta que se transforma en masa-energía o energía-masa dentro de  $V$  (si  $m \rightarrow E$  es positiva y si  $E \rightarrow m$  es negativa).

El kerma está relacionado con la fluencia de energía y con el coeficiente másico de transferencia de energía, mediante la ecuación:

$$K = \Psi \frac{\mu_{tr}}{\rho} \quad (2.5)$$

El kerma se puede dividir en dos partes, de acuerdo con el tipo de interacción que tienen los electrones secundarios con el medio:

$$K = K_c + K_r \quad (2.6)$$

Kerma de colisión ( $K_c$ ): los electrones secundarios pierden su energía por medio de interacciones coulombianas con los electrones atómicos del material irradiado; esto produce ionización o excitación de los átomos vecinos a las trayectorias de los electrones.

Kerma radiativo ( $K_r$ ): los electrones secundarios disipan su energía cinética por interacciones radiativas con el campo de fuerza coulombiana del núcleo atómico, debido a lo cual se producen rayos X, emitidos al desacelerarse los electrones. Además un positrón puede perder su energía cinética por medio de aniquilación con un electrón, la que aparece en forma de fotones.

### 2.1.3. La dosis

La dosis absorbida es relevante para todos los campos de radiación ionizante, sean directa o indirectamente ionizantes, así como para las fuentes de radiación distribuidas dentro de un medio absorbente. La dosis absorbida es el valor esperado de la energía impartida al material por unidad de masa en un punto. La dosis para un punto de interés  $p$ , en un volumen  $V$ , se define como:

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.7)$$

donde  $E$  se define como la energía impartida por la radiación ionizante en un material de masa  $dm$  y volumen  $V$  finito. Se expresa por:

$$E = (R_{in})_u - (R_{out})_u + (R_{in})_c - (R_{out})_c + \Sigma Q \quad (2.8)$$

$(R_{out})_u$  = energía radiante de todas las partículas no cargadas que salen de  $V$ ;

$(R_{in})_c$  = energía radiante de partículas cargadas que entran a  $V$ ;

$(R_{out})_c$  = energía radiante de partículas cargadas saliendo de  $V$ ;

$(R_{in})_u$  y  $\Sigma Q$  ya fueron definidos antes (ec. 2.4).

La unidad de la dosis en el Sistema Internacional de Unidades es el gray (Gy). Se tiene que  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ . La tasa de dosis absorbida se define como:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (2.9)$$

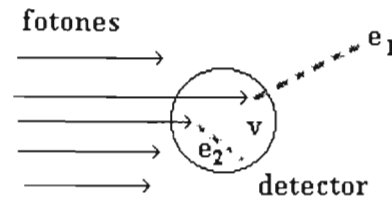
la unidad de la tasa de dosis en el Sistema Internacional es el Gy/s.

## 2.2 Equilibrio de partícula cargada (EPC)

El equilibrio de partícula cargada guarda un papel fundamental en la medida de la dosis. Supóngase que se desea medir la dosis en un volumen  $v$  dado, donde existe un campo de radiación, y se coloca un medidor (el medidor o detector tiene volumen  $v$ ) de radiación en dicho campo, como se muestra en la figura 2.1. Dependiendo de la forma en la que esté construido el detector algunos fotones del campo actuarán dentro de él por medio de alguna de las tres interacciones mencionadas en el capítulo 1. Las partículas cargadas que se generen por estas



interacciones ( $e_2$  de la figura 2.1) depositarán su energía en el medidor. Sin embargo, algunas partículas cargadas ( $e_1$  de la figura 2.1) tendrán la probabilidad de salir del detector, por lo que

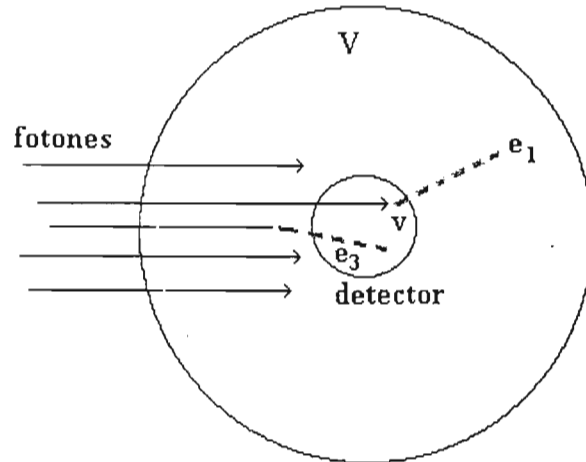


**Figura 2.1** Detector de radiación de volumen  $v$  en un campo de radiación.

impartirán su energía fuera de éste, de tal forma que esta energía no quedará registrada en el detector a pesar de que fue ahí donde actuaron inicialmente los fotones. La dosis que registre el detector estará por lo tanto subestimada. Para que este fenómeno no ocurra, se rodea al “detector” de volumen  $v$  con un volumen  $V$  de un material con las mismas propiedades que las del detector. El grosor de  $V$  debe ser de tal forma que sea igual al alcance de las partículas secundarias de energía máxima generadas en  $v$ . El objetivo de colocar un material de volumen  $V$  rodeando a  $v$ , es lograr un equilibrio en el volumen  $v$  del detector, de tal forma que, parte de las partículas secundarias cargadas ( $e_3$  de la figura 2.2) que ahora se generan en  $V$  se introduzcan en  $v$ , e impartan su energía ahí, y así sustituyan a las partículas cargadas  $e_1$  que salen de éste y que no son registradas. Con esto se establece un balance estadístico, entre partículas que entran y partículas que salen y por lo tanto también un balance estadístico de la energía total que es depositada en  $v$ . Esta situación es conocida como equilibrio de partícula cargada, EPC.

El volumen  $V$  debe satisfacer ciertas condiciones, para que se pueda garantizar el equilibrio de partícula cargada en  $v$ :

- La composición atómica del medio  $V$  es homogénea.
- La densidad del medio es homogénea.
- Existe un campo uniforme de radiación indirectamente ionizante (los rayos sufren una atenuación despreciable al pasar a través del medio  $V$ ).
- No hay campos eléctricos o magnéticos inhomogéneos que actúen sobre  $v$ .



**Figura 2.2** Detector envuelto en un volumen  $V$  para garantizar el equilibrio de partícula cargada. La densidad de  $V$  tiene que ser aproximadamente igual a la del detector.

La definición precisa es la siguiente: Existe equilibrio de partícula cargada (EPC) en un volumen  $v$  si cada tipo de partícula con cierta carga y energía que sale de  $v$  es remplazada por un tipo idéntico de partícula con la misma carga y la misma energía, en términos de valores esperados.

Si dentro de un volumen dado se cumple estrictamente el EPC, entonces se tiene la siguiente igualdad:

$$E \stackrel{\text{EPC}}{=} E_{\text{tr}} \quad (2.10)$$

Con lo cual:

$$D \stackrel{\text{EPC}}{=} K_c \quad (2.11)$$

Puesto que el kerma está relacionado con la fluencia de energía, la ecuación 2.11 puede escribirse como:

$$D \stackrel{\text{EPC}}{=} K_c = \Psi \left[ \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right] \quad (2.12)$$

Esta relación permite calcular la dosis en un medio A, a partir de conocer la dosis en otro medio B. Si los medios A y B se irradian en condiciones de EPC y además la fluencia de energía  $\Psi_A$  en

el medio A es aproximadamente la misma que en el medio B,  $\Psi_B$ , se puede escribir la ecuación 2.11 para cada medio, con lo cual:

$$\frac{D_A}{D_B} = \frac{(K_c)_A}{(K_c)_B} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_A}{(\mu_{en}/\rho)_B} \quad (2.13)$$

se debe tener presente que la energía por unidad de área en el medio A es muy parecida a la energía por unidad de área del medio B.

### 2.3 Conceptos de dosimetría y dosímetros

Puesto que la radiación ionizante en general no es perceptible por nuestros sentidos, es necesario valerse de instrumentos apropiados para detectar su presencia. Asimismo interesan su intensidad, su energía o cualquier otra propiedad que ayude a evaluar sus efectos. La dosimetría es la determinación de las diferentes cantidades que son el resultado de la interacción de la radiación con la materia. Existen muchos métodos y dispositivos para medir dichas cantidades. Generalmente la dosimetría trata de la determinación de cantidades tales como: exposición, kerma, fluencia, dosis equivalente, energía impartida, etc.

Los dispositivos para medir la dosis son llamados dosímetros, los cuales son capaces de dar una respuesta  $r$ , a partir de una dosis  $D_g$  absorbida en el volumen  $V$  del dosímetro. Cuando la dosis no se deposita de manera homogénea a través del volumen sensible del dosímetro entonces  $r$  es una medida de la dosis promedio depositada,  $D_g$ .

En general resulta cómodo que la respuesta  $r$  tenga una relación lineal con la dosis absorbida  $D_g$ , aunque esto no siempre ocurre o puede ocurrir sólo para un cierto intervalo de dosis. Las características generales de los dosímetros son:

- Capacidad para ser absolutos: un dosímetro absoluto puede medir dosis absorbida en su volumen sensible de manera autónoma, es decir, no requiere ninguna comparación radiológica con un patrón. Se conocen tres tipos de dosímetros absolutos: calorímetro, cámara

de ionización y solución de sulfato ferroso, Fricke. Los demás dosímetros son no absolutos o secundarios y requieren ser comparados con uno absoluto para poder utilizarse.

- Precisión y exactitud: la precisión o reproducibilidad en las medidas hechas con un dosímetro tiene que ver con fluctuaciones estadísticas asociadas a las características del instrumento con el que se realiza la medición, condiciones ambientales, etc, y con la naturaleza estocástica del campo de radiación. La precisión puede estimarse a partir de repetir una medida  $n$  veces y calcular su desviación normal respecto del promedio. Mientras menor sea está, mayor será la precisión del dosímetro. Por otra parte, la exactitud mide la proximidad del valor esperado de una medida con el valor real de la cantidad medida.
- Intervalo de dosis: es el intervalo de dosis en el que un dosímetro puede usarse para medir dosis. Depende de tres características:
  - a) Sensibilidad a la dosis, definida como:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{dr}{d\overline{D}_g} \quad (2.14)$$

donde  $r$  es la respuesta del dosímetro a la radiación y  $\overline{D}_g$  es la dosis promedio absorbida por el mismo. Resulta conveniente que la sensibilidad tenga un valor constante en todo el intervalo de dosis en el que se desea utilizar el dosímetro, lo que garantiza una respuesta lineal del dosímetro con la dosis.

- b) Límite inferior útil: es el valor mínimo de dosis que el dosímetro puede leer confiablemente y puede depender de la capacidad mínima del instrumento utilizado, de la radiación de fondo y del límite de sensibilidad del dosímetro.
  - c) Límite superior útil: es el valor máximo de dosis que un dosímetro puede leer confiablemente, y tiene que ver con fenómenos de saturación o de daño en el dosímetro o en el instrumento de lectura. Generalmente el límite superior se manifiesta por el decrecimiento en la sensibilidad a un valor no aceptable.
- Independencia de la respuesta con la tasa de dosis: es conveniente que no haya dependencia de la respuesta de un dosímetro con la tasa de dosis en la que pueda usarse. En caso de existir, esta característica puede limitar su funcionamiento.
  - Estabilidad: el comportamiento de los dosímetros debe ser estable antes, durante y después de la irradiación. Si esto no ocurre, hay que regresarlos a su estado inicial, o estimar los cambios

ocurridos no ocasionados por la radiación. Los efectos de la temperatura, la luz, oxígeno o humedad atmosférica, pueden causar cambios graduales en la sensibilidad del dosímetro.

- Dependencia con la energía: la lectura  $r$  del dosímetro puede depender de la energía de la radiación. Esta dependencia es fundamental y representa la eficiencia en energía del dosímetro, es decir, su capacidad para dar la misma lectura para la misma cantidad de energía absorbida en su volumen sensible, independientemente del tipo o calidad de la radiación que incida.
- Geometría: Es deseable o conveniente que la geometría del dosímetro sea parecida a la del volumen de interés del material cuya dosis se desea medir.

Los dosímetros secundarios requieren ser comparados o calibrados radiológicamente con uno absoluto para poder utilizarse, pero generalmente son más fáciles de manejar. Como ejemplo de dosímetros secundarios están los dosímetros termoluminiscentes y las películas de tinte radiocrómico (PTR). Las PTR son actualmente uno de los dosímetros más utilizados tanto a nivel industrial como en hospitales y centros de investigación. En el siguiente capítulo se describen las propiedades de un tipo especial de dosímetros, las películas tipo Gafchromic MD-55-2 y HD-810.

## Capítulo 3

### **Películas de tinte radiocrómico tipo Gafchromic, modelo MD-55-2 y HD-810.**

---

#### 3.1. Antecedentes

Dado que, por lo general, la radiación ionizante no es perceptible por nuestros sentidos, es necesario valerse de instrumentos apropiados para detectar su presencia. De igual forma nos interesa su intensidad, su energía o cualquier otra propiedad que facilite evaluar sus efectos. Se han desarrollado muchos tipos de detectores de radiación, cada uno de los cuales es sensible a cierto tipo de radiación y de intervalo de energía, por lo que es de suma importancia seleccionar el detector adecuado para medir la radiación que se desea estudiar.

El diseño de los detectores está basado en el conocimiento de la interacción de la radiación con la materia. Como ya sabemos, las radiaciones depositan energía en los materiales, principalmente a través de la ionización y excitación de sus átomos. La respuesta de los materiales a la irradiación puede ser emisión de luz, cambios de temperatura o efectos químicos. Esta última propiedad es la que se ha explotado para el desarrollo de dosímetros (medidores de energía depositada) basados en el uso de películas.

Uno de los descubrimientos importantes para el desarrollo de éstos dosímetros, fue el cambio químico que presentan algunas sustancias cuando son expuestas a un campo de radiación ionizante. Esta propiedad se ha empleado, por ejemplo, para el desarrollo de películas radiográficas, en las cuales existen granos de bromuro de plata (abr) dispersos en un gel que se adhiere a una lámina de plástico. Los iones de  $\text{Ag}^+$  de los granos de bromuro de plata, al interaccionar con un campo de radiación específico, se descomponen y forman gránulos muy pequeños de plata. Cuando la película se trata con un agente reductor suave (el revelador), los iones de  $\text{Ag}^+$  del  $\text{AgBr}$  próximos a los gránulos de plata se reducen y forman una imagen de plata metálica negra. Por último la película se trata con una solución de tiosulfato de sodio para eliminar el  $\text{AgBr}$  no expuesto. Sin embargo, la evaluación de un haz de fotones es difícil usando este tipo de película radiográfica, debido a la diferencia que presenta en su sensibilidad para

fotones con energías entre 10 y 20 keV, además, tienen el inconveniente de ser sensible a luz ambiental y de requerir de un tratamiento químico para su estudio [Bro, 1998].

Por los muchos inconvenientes que presentaban los dosímetros comunes, en los años 60 W. L. McLaughlin y L. Chalkley desarrollaron e investigaron un tipo especial de películas que utilizaron como dosímetros. Muchos investigadores se interesaron en desarrollar, investigar y mejorar este tipo de películas y en 1988 se introdujo una nueva película llamada GafChromic (Chemical Corporation, New Jersey) [McL, 1988]. Este dosímetro consiste en un tinte precursor, llamado tinte radiocrómico, cuya característica es que cambia de tono de color al ser expuesto a un campo de radiación ionizante. Los cambios de tono de color pueden ser causados por el rompimiento de enlaces químicos, formación de radicales libres o iones, (para el caso particular de las PTR, ver sección 3.3). Este cambio de color (oscurecimiento) es aprovechado para determinar la intensidad del campo de radiación ionizante a la que fue expuesta la película. La propiedad dosimétrica que se mide en este tipo de películas es el cambio en la densidad óptica (DO), el cual muestra una relación que puede ser descrita analíticamente (dentro de cierto intervalo), como función de la dosis absorbida. Otra propiedad importante de esta película es que, después de ser expuesta a un campo de radiación ionizante, no requiere de ningún procesamiento químico, térmico u óptico para manifestar el cambio de color.

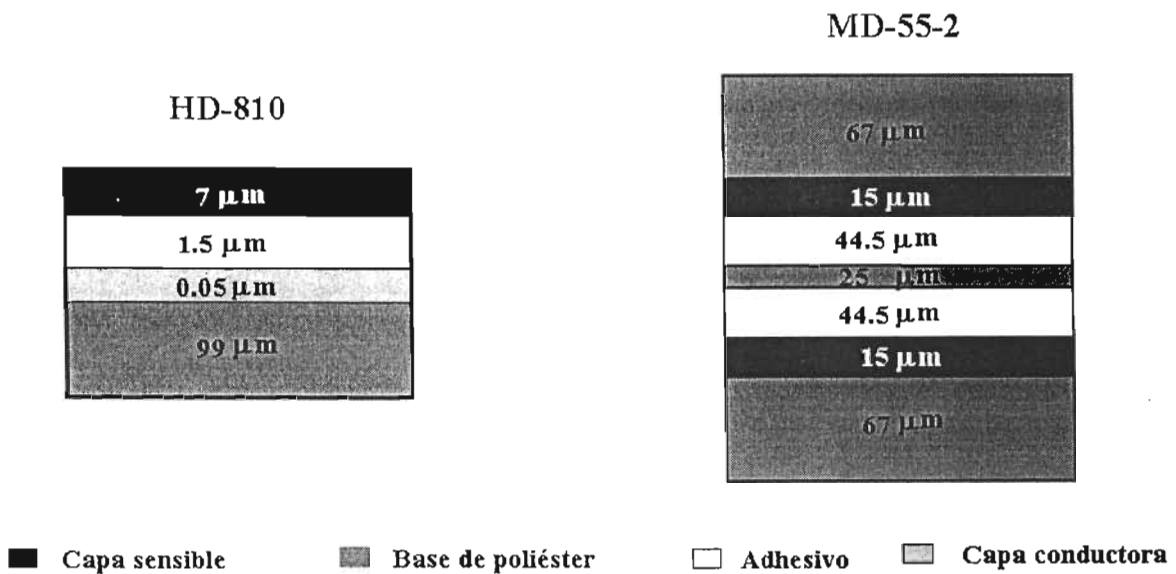
Después de haber sometido a las PTR a un campo de radiación ionizante, éstas requieren de un determinado tiempo para desarrollar el color de manera completa y estable. A este intervalo de tiempo lo llamaremos tiempo de estabilización y lo abreviaremos como TE. Diversos investigadores han reportado diferencias en el tiempo de estabilización de las PTR, [McL, 1995] reporta un tiempo de estabilización de 24 horas, mientras que [Ali, 2003; Roa, 2003] reportan un TE de 48 horas, [Mei, 1996] reporta 5 horas para el TE. Por estas discrepancias entre los diferentes investigadores, en esta tesis se desea encontrar el tiempo de estabilización en las películas GafChromic HD-810 y MD-55-2.

### 3.2. Descripción

En la presente tesis se estudiaron dos tipos de películas de tinte radiocrómico: GafChromic tipos MD-55-2 y HD-810. Estas películas se emplean en muchos programas de dosimetría médica y de investigación, por lo que su estudio es de suma importancia. Consisten básicamente de:

- 1) una capa radio-sensible elaborada de microcristales orgánicos (monómeros de diacetileno) incoloros dispersos en un gel.
- 2) una capa adhesiva.
- 3) una película de plástico que sirve de base o soporte del gel.

Cada capa y cada tipo de película tienen diferentes espesores y diferente estructura atómica. En la figura 3.1 se muestra la estructura física de ambas películas y en la Tabla 3.1 se muestra la composición aproximada de la base de poliéster, el lado sensible, el lado adhesivo y el lado conductor [Nir, 1998; Mer, 2004].



**Figura 3.1 Estructura física de las películas Gafchromic HD-810 y MD-55-2 [Nir, 1998].**

La PTR tipo MD-55-2, es apropiada para medir dosis en el intervalo de 3 a 100 Gy mientras que la HD-810 es útil para dosis en el intervalo de 10 a 2500 Gy. Ambas tienen una resolución espacial de 1200 líneas/mm. Se encuentran disponibles en el mercado en forma de rollos hasta de



5 m de largo, y hojas de 12 x 15 cm. Estas presentaciones las hacen muy manejables en todo tipo de trabajos e investigación.

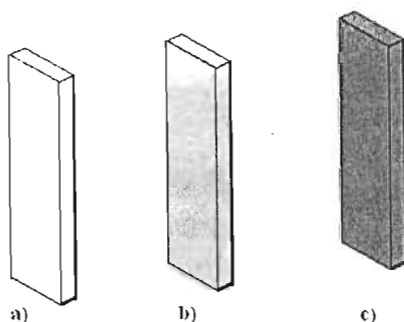
Sin embargo, también existen ciertas desventajas de las PTR en relación con otros dosímetros. Una de éstas es que son sensibles a los rayos UV y les afectan la humedad y la temperatura, por lo que deben ser almacenadas en lugares secos y a temperatura ambiente controlada. Además es necesario tener control sobre estos factores en el momento de irradiar y leer las películas (ver más adelante sección 3.5, los factores que influyen en la DO de las PTR)

**Tabla 3.1 Composición química aproximada de cada capa de las películas GafChromic tipo HD-810 y tipo MD-55-2**

Capa	átomo	Porcentaje Por composición
Base	Carbón	45%
	Hidrógeno	36%
	Oxígeno	19%
Sensible	Carbón	31%
	Hidrógeno	56%
	Oxígeno	8%
	Nitrógeno	5%
Adhesiva	Carbón	33%
	Hidrógeno	50%
	Oxígeno	17%
Conductiva	Óxido de estaño	100%

### 3.3. Efecto de la radiación ionizante sobre las películas HD-810 y MD-55-2

Cuando un campo de radiación ionizante incide sobre las PTR causa cambios en la composición química de la capa sensible de éstas. Estos cambios se manifiestan (visualmente) por medio de un cambio de color. Inicialmente, las PTR tienen un tono azul muy claro y después de que la radiación interacciona con la película su color cambia a un tono azul más oscuro. La tonalidad en el azul depende de la dosis de radiación que se imparte a la película, y es más oscuro cuanto más dosis se imparte a la PTR. En la figura 3.2 se muestra de forma cualitativa este proceso.

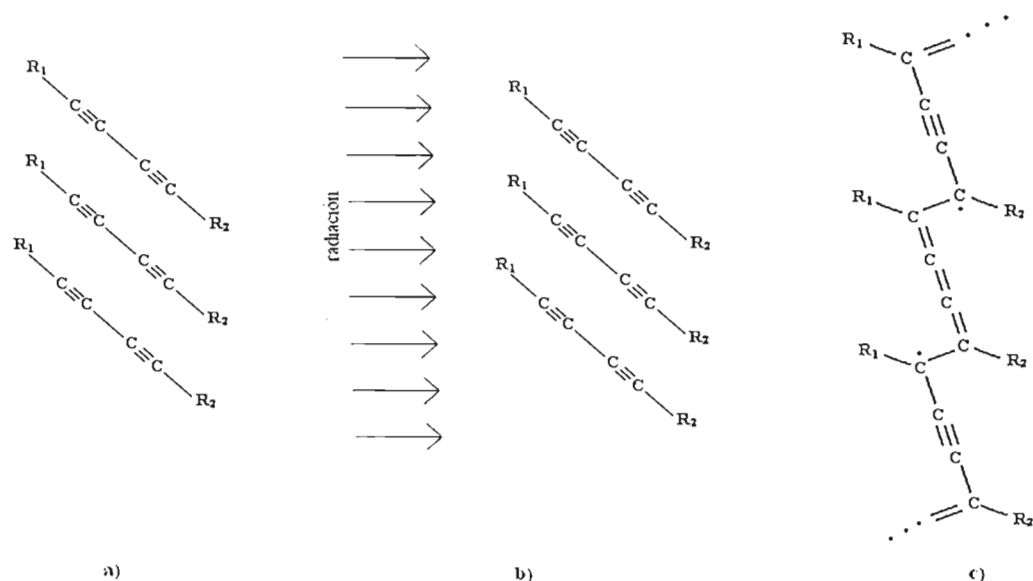


**Figura 3.2 Proceso cualitativo de coloración de las películas de tinte radiocrómico a) película sin irradiar b) película irradiada a baja dosis y c) película irradiada a dosis alta sin exceder el límite propuesto por el fabricante.**

La parte sensible de las PTR contiene un sustrato microcristalino, compuesto de un monómero llamado *diacetileno*, cuyos átomos se encuentran dispuestos en forma de cadenas. Se sabe que estas cadenas se encuentran alineadas a lo largo, ancho y profundo de la parte sensible de las PTR [McL, 1995]. Cuando un campo de radiación ionizante interacciona con esta parte sensible, en ella ocurren cambios químicos que provocan que los monómeros se conviertan en polímeros. Cuando se inicia la polimerización, las cadenas de monómeros empiezan a rotar y a trasladarse, hasta que se combinan unas con otras, comenzando así, a formar el polímero. En la figura 3.3 se muestra un esquema de la formación del color en las películas de tinte radiocrómico tipo GafChromic.

Cuando la dosis sobrepasa el límite aceptado por la película (especificado por el fabricante) o ésta es sometida a temperaturas mayores que 60 °C, se forma un entrecruzamiento de cadenas en

todas direcciones, que se llama un efecto auto-catalítico, y provoca que las PTR se pinten de color rojo y muestren inestabilidad en su densidad óptica. Una posible explicación [McL, 1995; y Nir, 1998] de tal comportamiento es que los carbonos, dicarbonos y diradicales constituyentes de los monómeros del diacetileno se transforman fácilmente en oligómeros mediante la absorción de energía. La cinética de la polimerización depende en gran parte de la forma en que la energía es transferida o atrapada en los sitios de iniciación.



**Figura 3.3 Esquema del proceso de polimerización del diacetileno a) cadenas de monómeros de diacetileno b) radiación incidiendo en los monómeros, y c) polímero formado a partir de los monómeros irradiados [McL, 1995].**

### 3.4 Proceso de lectura

Después de que las PTR han sido expuesta a un campo de radiación ionizante, sigue el proceso de lectura. En éste se utilizan dos propiedades ópticas muy importantes de los cuerpos, que son su capacidad de transmitir y/o absorber la luz que incide en ellos, llamadas transmisión o absorción, respectivamente. Supongamos que un haz de luz de una cierta longitud de onda incide sobre una de las PTR, entonces, parte de la intensidad de la luz original será absorbida por la PTR y la otra parte será transmitida. En la figura 3.4 se muestra este proceso. La transmisión y absorción están

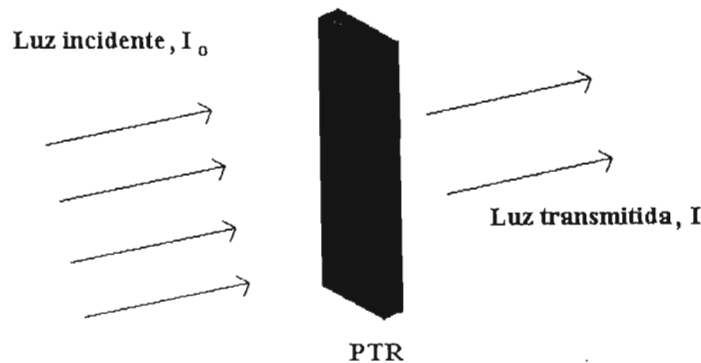
relacionadas por  $A = -\log_{10} T$ , donde  $A$  es la absorción y  $T$  es la transmisión. A su vez, la transmisión se define como:

$$T = \frac{\text{Cantidad de luz transmitida por una región de la película}}{\text{Cantidad de luz incidente en la misma región pero sin película}} \quad (3.1)$$

La absorción también es llamada densidad óptica, que se abrevia como DO, y está relacionada con la transmisión mediante la siguiente ecuación:

$$DO = \log_{10}(1/T) = \log_{10}(I_0/I) \quad (3.2)$$

Donde  $I_0$  es la cantidad de luz incidente en una región sin película, e  $I$  es la cantidad de luz incidente, en la misma región, pero con la película puesta [Roa, 2003].



**Figura 3.4** Proceso de absorción de un haz de luz,  $I_0$  es la cantidad de luz inicial que incide sobre la película e  $I$  es la cantidad de luz que logra pasar.

La densidad óptica puede entenderse como el grado de oscurecimiento de la PTR. Esta propiedad, junto con el proceso de coloración por dosis, es lo que se usa para determinar la dosis a la que ha sido expuesta una película de tinte radiocrómico.

### 3.5 Factores que influyen en la densidad óptica de las películas de tinte radiocrómico

Existen diversos factores que deben considerarse en el momento de someter a las PTR a un campo de radiación ionizante y en el momento de leerlas. Estos factores afectan en forma distinta la coloración de las películas y por lo tanto la densidad óptica, por lo que hay que tenerlos en cuenta al trabajar con las PTR. Diversos investigadores han estudiado el comportamiento de las PTR cuando varían algunos factores como la temperatura, humedad, longitud de onda de lectura, energía de los fotones, etc. Sus resultados se muestran a continuación. La información que se ofrece en lo que resta de este capítulo, incluyendo las figuras, proviene de las siguientes referencias [Nir, 1998; y But, 2003].

#### 3.5.1. La densidad óptica en función de la longitud de onda de lectura

En la figura 3.5 se muestra la DO en función de la longitud de onda para películas MD-55-2, a diferentes dosis de irradiación. Se puede ver claramente como la DO depende de la longitud de onda de la luz que atraviesa la película. Para la película GafChromic MD-55-2 se encuentran dos picos de absorción, uno a 610 y otro a 670 nm.

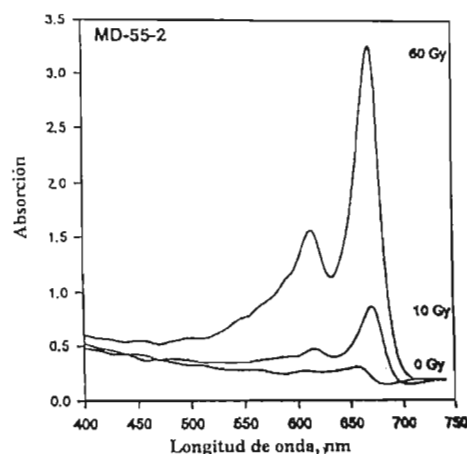
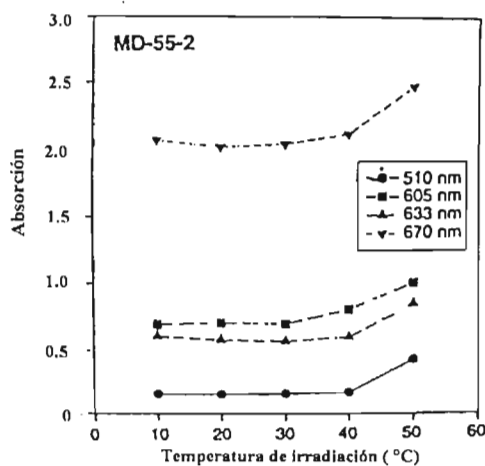


Figura 3.5 Espectro de absorción de película radiocrómica MD-55-2 a dosis de 0, 10 y 60 Gy, respectivamente [Nir, 1998].

### 3.5.2. La densidad óptica en función de la temperatura de irradiación

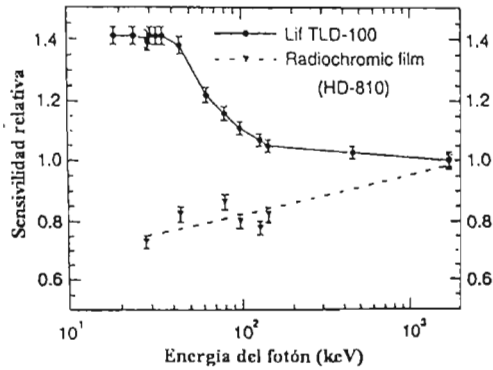
La DO de las PTR muestra también una dependencia marcada con la temperatura de irradiación y post-irradiación. En la figura 3.6 se muestran curvas de DO en función de la temperatura de irradiación, para una película MD-55-2. La película fue irradiada a 40 Gy y estudiada a 4 longitudes de onda diferentes, a temperaturas que van de 10 a 50 °C. A temperaturas mayores que 50 °C existe una variación errática en la respuesta y para temperaturas mayores que 60 °C el color se vuelve rojo, por lo que este dosímetro no debe ser usado a temperaturas mayores que 40 °C.



**Figura 3.6. Dependencia de la respuesta, con la temperatura de irradiación, de la película MD-55-2, para una dosis de 40 Gy, estudiada a 4 diferentes longitudes de onda [Nir, 1998].**

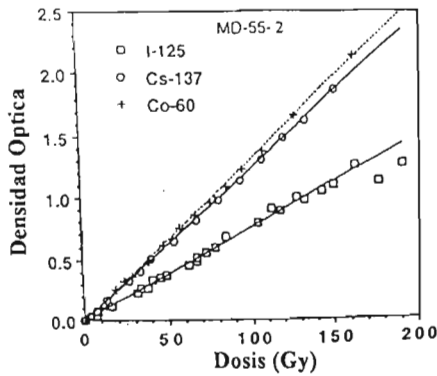
### 3.5.3. La densidad óptica en función de la energía de los fotones incidentes

Existe una gran dependencia de la respuesta de las PTR con la energía de los fotones incidentes. En la figura 3.7 se muestra la respuesta de una película HD-810, en función de la energía de los fotones, en el intervalo de 20 a 1710 keV. La respuesta se comparó con la respuesta dada por TLD-100 (LiF:Mg,Ti). En la gráfica de la figura 3.7 se observa cómo la sensibilidad relativa a  $^{60}\text{Co}$  para esta película crece en un 30 % aproximadamente, cuando crece la energía efectiva de los fotones de 28 a 1710 keV. La variación para los TLD-100 es en sentido inverso, es decir, la sensibilidad relativa (a  $^{60}\text{Co}$ ) decrece cuando aumenta la energía.



**Figura 3.7.** Sensibilidad relativa (a  $^{60}\text{Co}$ ) de las películas HD-810, en función de la energía de los fotones incidentes, comparada con la de dosímetros TLD-100 [Nir, 1998].

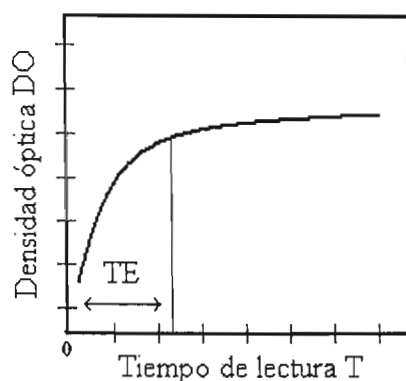
En la figura 3.8 se muestran las curvas de respuesta de una película MD-55-2, en función de la dosis, a diferentes energías. Se observa que la sensibilidad de estas películas es un 40 % más baja para rayos gamma del  $^{125}\text{I}$  (energías de 0.35, 0.31 y 0.27 MeV) que para rayos gamma del  $^{60}\text{Co}$  (energías de 1.33 y 1.17 MeV).



**Figura 3.8.** Curva de respuesta en función de la dosis, de las películas MD-55-2 para tres diferentes radionúclidos,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{60}\text{Co}$ . Cada radionúclido emite radiación de diferente energía [Nir, 1998].

### 3.5.4. La densidad óptica en función del tiempo de lectura

Otro de los factores de que depende la DO es el tiempo de lectura  $T$ . Este es el tiempo que ha transcurrido entre el término de la irradiación y el momento en el que se lee la película en el equipo lector. Diversos investigadores [McL, 1995; Ali, 2003; Mei, 1996] han reportado que la DO, como función, del tiempo comienza a crecer rápidamente durante las primeras horas (a partir de un cierto valor que depende de la dosis que recibió la película), y posteriormente se aproxima asintóticamente a un valor de estabilización. El tiempo que tarda la película en alcanzar el valor de estabilización es el que hemos llamado “tiempo de estabilización”  $TE$  y es el que se desea determinar en este trabajo. En la figura 3.9 se muestra un ejemplo, reportado en la literatura, del comportamiento de la DO en función del tiempo de lectura. En ésta se muestra el tiempo de estabilización.



**Figura 3.9. Densidad óptica, DO, en función del tiempo de lectura  $T$  (en horas), para la película MD-55-2. El tiempo de estabilización está simbolizado por  $TE$  [Ali, 2003].**

Se ha reportado [McL, 1995; Ali, 2003], que las películas MD-55-2 no llegan por completo a estabilizarse (en el tiempo que duraron sus experimentos, aproximadamente 3 meses). Sin embargo, se propone como el tiempo de estabilización, aquél en el cual, la última parte de la curva, crece menos del 4% en promedio, respecto del crecimiento inicial de la curva.

En la figura 3.9 puede verse que la DO en las primeras horas crece muy rápidamente, esto es, la pendiente de la curva es muy grande, y posteriormente la rapidez disminuye, esto es, la



pendiente es menor que la inicial. Existe un modelo empírico propuesto por un grupo de investigadores [Ali, 2003], en el que encuentran una ecuación para describir la DO como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2. Este modelo está descrito por la siguiente ecuación:

$$DO = a + b(1 - e^{-kT}) + c(1 - e^{-mT}) \quad (3.3)$$

En donde a, b, c, k y m son constantes que dependen de la dosis a la que fue irradiada la película y que pueden consultarse en la referencia antes mencionada, y T es el tiempo de lectura. No profundizamos en este modelo, porque fue propuesto para leer las PTR a una longitud de onda de 633 nm y en este trabajo se leyeron a 671 nm, por lo que los valores de la DO calculados con el modelo y medidos en este trabajo tienen que diferir, de acuerdo con lo visto en la sección 3.5.1. Sin embargo la ecuación 3.3 describe bien el comportamiento de la DO experimental, como función del tiempo de lectura, que midió este grupo de investigadores.

### **3.5.5. Dependencia de la densidad óptica con la temperatura y humedad relativa, durante el almacenamiento y lectura de las PTR**

Se ha estudiado el efecto de la humedad y la temperatura en las PTR. Para el caso de la humedad se encontró que el efecto de ésta sobre la DO es de un  $\pm 2\%$  para un intervalo de 6 al 94 % de humedad relativa. En cambio el efecto de la temperatura sí es importante, pues ya se mencionó que a temperaturas mayores que 50 °C las PTR muestran inestabilidad en los valores de la DO y cambio de color del azul al rojo, por lo que se sugiere que las PTR sean almacenadas en la oscuridad, a temperaturas por debajo de los 25 °C y a una humedad relativa debajo del 50%. En el estudio de las PTR todas las lecturas deben de ser realizadas en las mismas condiciones, esto es, a la misma temperatura  $\pm 2\text{ °C}$  y con el mismo tiempo de retraso. Si se tienen estos cuidados se podrá tener una óptima reproducibilidad en el valor de la DO.

### **3.5.6. Sensibilidad de las películas a la exposición con luz ultravioleta**

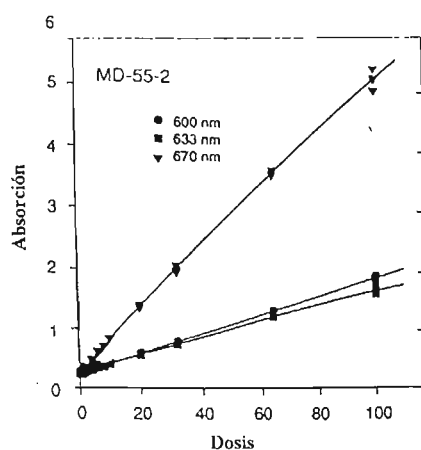
Diferentes investigadores [Nir, 1998; But, 2003] han reportado que las películas GafChromic MD-55-2 y HD-810 son sensibles a la luz ultravioleta, por lo que es importante protegerlas de

ésta. Por lo tanto, es importante aislarlas de la luz de día y de lámparas fluorescentes e incandescentes que no estén libres de componente ultravioleta.

En la presente tesis se tomaron varias lecturas de cada una de las películas MD-55-2 y HD-810 con un escáner, el cual trabaja con una lámpara fluorescente, por lo que es posible que las películas fuesen afectadas por la luz de este tipo de lámpara. Parte importante de la tesis es observar si las películas MD-55-2 y HD810 son o no afectadas por la luz del escáner y por la luz de cada uno de los lectores.

### 3.5.7. Calibración de las películas de tinte radiocrómico

Es de suma importancia que las PTR sean calibradas en un campo de radiación uniforme y bien caracterizado. Las características del haz de calibración deberán ser determinadas por otros dosímetros (por ejemplo cámaras de ionización). Si esto se logra, se podrá calibrar directamente la película en términos de dosis absoluta y se tendrá la relación respuesta en función de la dosis, para cada película. Esta relación es llamada curva de calibración y depende de la película, del tipo de radiación y de su energía. En la figura 3.9 se muestra la curva de calibración para MD-55-2, leída con luz de distintas longitudes de onda.



**Figura 3.10. Respuesta, como función de la dosis, para la película MD-55-2, medida a tres longitudes de onda distintas. La irradiación se hizo con rayos gamma de  $^{60}\text{Co}$  [Nir, 1998]**

El cambio en la respuesta de la película, por unidad de dosis absorbida, se representa por un sólo número. Este número define la sensibilidad promedio de la película, y es el cambio promedio en la respuesta por unidad de dosis absorbida (la pendiente), calculada en la región lineal de la curva de calibración. La sensibilidad puede depender de 4 factores: 1) La longitud de onda usada en la lectura, 2) El tipo de densitómetro usado en la lectura, 3) El tiempo transcurrido entre la irradiación y la lectura (tiempo de retraso TR) y 4) La calidad del haz de la fuente de calibración.

### **3.6. Procedimiento para el manejo de la películas de tinte redicrómico, que reporta la American Association of Physicists in Medicine, Committee Task Group 55, 1998.**

1. Antes de usarse, las películas deben de ser inspeccionadas y manejadas con cuidado.
2. Deben ser almacenadas en un lugar seco, oscuro y en las condiciones de temperatura y humedad en las que serán leídas.
3. Puesto que las PTR son sensibles a la luz fluorescente y a la luz de día, deben ser leídas con luz incandescente normal. Las luces fluorescentes y las ventanas del laboratorio deben ser cubiertas con filtros comerciales de luz ultravioleta.
4. Se debe anotar el número de lote y el modelo de la película, con la finalidad de verificar alguna variación en su elaboración y para control de estudios posteriores.
5. Se debe anotar la orientación y alineación.
6. El tiempo para leer la película es de 24 horas después de haber sido irradiada.
7. Se debe obtener la curva de dosis-respuesta y la sensibilidad de las PTR estudiada, en el intervalo de dosis y condiciones de interés.

**Aplicaciones de las PTR.** Desde su descubrimiento hasta hoy las PTR gozan de un sin número de aplicaciones, puesto que existe gran información de estas aplicaciones en la literatura. Aquí sólo se mencionan algunas, sin detallar. Por ejemplo, las PTR se usan en dosimetría oftálmica, braquiterapia, radiocirugía estereotáctica, dosimetría de partículas pesadas, dosimetría de interfaz, dosimetría de braquiterapia intravascular, etc.

## Capítulo 4

### Descripción del experimento

---

#### 4.1. Descripción de los instrumentos y materiales utilizados

Como se mencionó en la introducción, el objetivo de la tesis fue determinar el tiempo de estabilización (TE) del color en las películas Gafchromic MD-55-2 y HD-810, después de haber sido irradiadas a una dosis determinada. Para llevar a cabo este objetivo se usaron diferentes instrumentos, por lo que antes de describir el experimento, se describen las características más importantes de los instrumentos utilizados, que son cinco: irradiador Gammacell, termohigrógrafo, densitómetro, espectrofotómetro y escáner. Los tres últimos se usaron para medir la densidad óptica de las películas (los llamaremos lectores). Después de dar una descripción sencilla de éstos nos enfocaremos al desarrollo experimental.

##### 4.1.1. Irradiador Gammacell

Para llevar a cabo las irradiaciones de las PTR se utilizó el irradiador Gammacell-200 del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM. La unidad está formada por 24 fuentes de cobalto 60 en forma de lápices distribuidos en forma anular dentro de una cavidad blindada con paredes de plomo; en la figura 4.1 se muestra un esquema de la distribución de las fuentes dentro del contenedor. Las muestras por irradiarse se introducen a través de un émbolo de acero inoxidable con partes de plomo, que se mueve verticalmente desde una posición de carga de muestras, hacia la posición central de las fuentes radiactivas de  $^{60}\text{Co}$ , de irradiación. El émbolo es accionado por un motor eléctrico automático cuyos controles se encuentran en la consola del irradiador. En la figura 4.2 se muestra un esquema del irradiador Gammacell-200 en la cual se pueden apreciar el émbolo y la cavidad donde se colocan las PTR, antes de que el émbolo baje a la posición de irradiación. Para mayor información consultar [Gar, 1979]. La tasa de dosis el día de la primera irradiación fue de  $\dot{D} = 0.795 \pm 0.005 \text{ Gy/min}$ . La tasa de dosis se mide con un dosímetro primario llamado solución Fricke [Gar, 1979], en nuestro caso la tasa de dosis nos fue informada por el operador encargado del Gammacell. En la tabla 4.1 de la sección 4.2 puede observarse el programa de irradiación de las PTR que se llevó a cabo en el irradiador Gammacell.

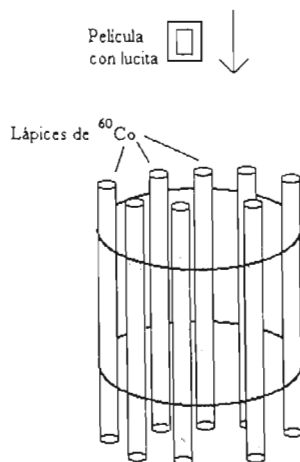


Figura 4.1. Esquema que muestra la distribución de los lápices radiactivos de  $^{60}\text{Co}$  del irradiador Gammacell-200. En el centro del conjunto es donde se coloca, con el émbolo, la PTR por irradiar. La lucita se emplea para obtener equilibrio de partícula cargada durante la exposición. El dibujo no se está a escala.

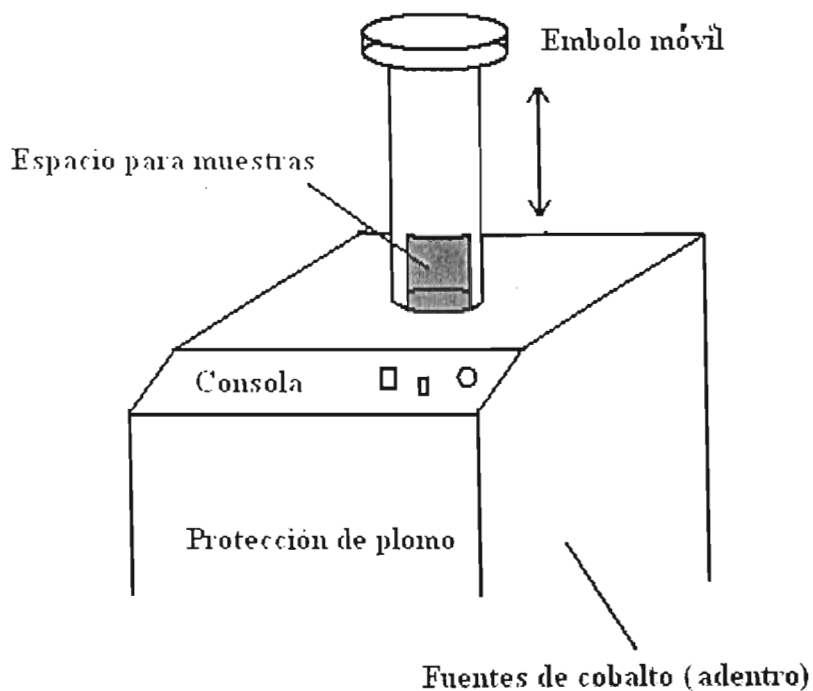


Figura 4.2. Irradiador Gammacell-200, del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM.

#### 4.1.2. Termohigrógrafo.

Para tener registro de la humedad relativa y la temperatura del laboratorio en el cual se leyeron las PTR, se utilizó un termohigrógrafo marca Wilh Lambrecht GMBH, tipo 252, núm. Serie 474616.

#### 4.1.3. Densitómetro

Se trabajó con un densitómetro radiocrómico especialmente fabricado para el estudio de películas de tinte radiocrómico tipo GafChromic. El modelo es 37-443 y el fabricante es Nuclear Associates. Las especificaciones técnicas son las siguientes:

Intervalo de lectura: 0 a 4.00 unidades de densidad óptica.

Exactitud:  $\pm 0.02$ .

Reproducibilidad:  $\pm 0.01$ .

Intervalo de temperatura de operación: 10 a 40 °C.

Intervalo de humedad de operación: 0 a 90 % humedad relativa.

Apertura : 2 mm.

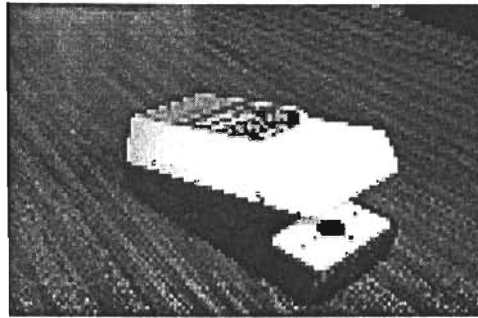
Sensor: fotodiodo de silicón de alta eficiencia.

Controles: cero, encendido y apagado, calibración, lectura y lámpara.

Sistema de iluminación: LED (light emission diode)ultra brillante con pico a longitud de onda de 671 nm .

Filtro pasabanda: 10 nm con banda centrada en 671 nm  $\pm 2$  nm.

En la figura 4.3 se muestra el densitómetro utilizado. Para su exacto manejo consultar el manual de uso en el Laboratorio de Dosimetría, Instituto de Física. UNAM, [Mdn, 2000].



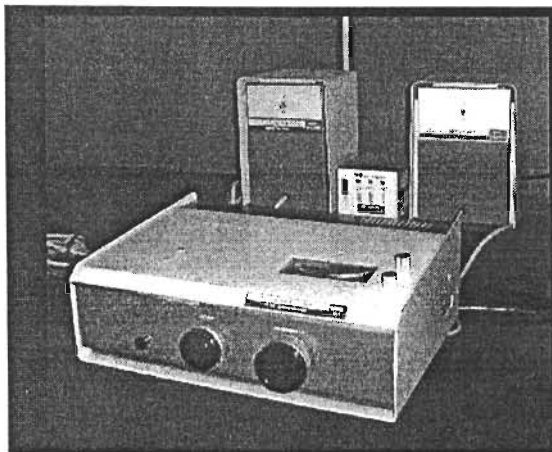
**Figura 4.3. Densitómetro 37-443 especialmente fabricado para la lectura de PTR.**

Para la lectura de las películas se trabajó, de forma básica, de la siguiente manera:

- 1.- Encendido.
- 2.- Calibrar a cero.
- 3.- Calibrar el aparato con las películas de referencia que vienen con éste.
- 4.- Colocar la película que se desea medir y cerrar el aparato.
- 5.- Presionar el botón RED y el valor de la densidad óptica aparecerá en la pantalla.
- 6.- Retirar la película y colocar la siguiente, repetir los pasos desde el 4 hasta el 6.

#### **4.1.4. Espectrofotómetros**

Se utilizaron tres espectrofotómetros distintos a lo largo del desarrollo experimental de la presente tesis, los cuales llamaremos: espectrofotómetro 1, al ubicado en el Laboratorio de Dosimetría del Instituto de Física, UNAM, espectrofotómetro 2, ubicado en el Laboratorio del Acelerador Van de Graaff de 2 MeV del mismo instituto, y espectrofotómetro 3, al ubicado en el Taller de Física de Radiaciones del edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias, UNAM. El espectrofotómetro 1, Marca Perkin Elmer, modelo 1111-050, se muestra en la figura 4.4. Para su manejo exacto consultar el manual de uso en el Laboratorio de Dosimetría del Instituto de Física, UNAM [Me1, 2000].



**Figura 4.4. Espectrofotómetro 1, modelo Perkin Elmer Coleman, ubicado en el Laboratorio de Dosimetría del Instituto de Física de la UNAM.**

Las especificaciones técnicas son la siguientes:

Intervalo de lectura en densidad óptica: -0.4 a 2 unidades de absorción (densidad óptica).

Intervalo de longitud de onda: 100 nm a 1000 nm.

Exactitud: el instrumento cuenta con una escala logarítmica por lo que su exactitud varía.

Intervalo de operación de temperatura: 10 a 40 °C.

Apertura : 3 mm x 10 mm de ancho y de largo, respectivamente.

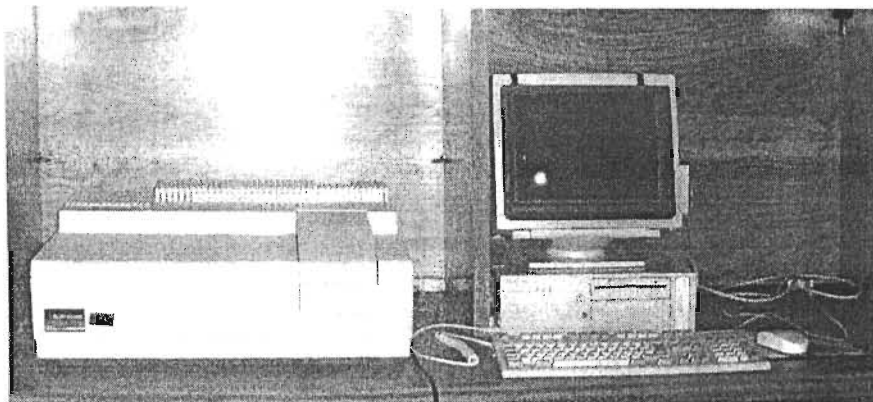
Sensor: foto-tubo de intervalo ancho.

Controles: encendido y apagado, cero, longitud de onda .

Sistema de iluminación: lámpara de tungsteno y lámpara de deuterio. Se seleccionó una longitud de onda de 671 nm.

Espectrofotómetro 2. El modelo es Lambda 20, espectrofotómetro de doble haz de barrido y la marca es Perkin Elmer Coleman. Se encuentra asociado a una computadora por la cual se leen y controlan diferentes parámetros. En la figura 4.5 se muestra el lector. Para su uso, consultar el manual de usuario en el Laboratorio del acelerador Van de Graff de 2 MeV [Me2, 2003].





**Figura 4.5. Espectrofotómetro 2, modelo Lambda 20, Perkin Elmer Coleman, ubicado en el Laboratorio del acelerador Van de Graff de 2 MeV del Instituto de Física de la UNAM.**

Las especificaciones técnicas son las siguientes:

Intervalo de lectura en densidad óptica: -6.00a 6.00 unidades de absorción (densidad óptica).

Intervalo de longitud de onda: 190 nm a 1100 nm.

Exactitud:  $\pm 0.3$  nm para longitud de onda y  $\pm 0.003$  unidades de absorción.

Intervalo de temperatura de operación: 15 a 35 °C.

Apertura : 1mm x 10 mm de ancho y de alto, respectivamente.

Sensor: fotodiodos.

Controles: encendido y apagado, cero, base de funciones en la computadora (controla: longitud de onda, absorción o transmisión, etc).

Sistema de iluminación: lámpara de deuterio y lámpara de halógeno. Se seleccionó una longitud de onda de 671 nm y además un barrido desde 400 nm a 900 nm.

Espectrofotómetro 3. El modelo es Helios Gamma y la marca Thermospectronic, y se muestra en la figura 4.6. El espectrofotómetro cuenta con una pantalla digital donde se muestran los valores y diferentes parámetros de lectura. Para su uso, consultar el manual de usuario en el taller de Física de Radiaciones, edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias [Me3, 2000]. Los datos técnicos son los siguientes.

Intervalo de lectura en densidad óptica: -0.42 a 3 unidades de absorción (densidad óptica).

Intervalo de longitud de onda: 190 nm a 1100 nm.

Exactitud:  $\pm 0.001$  unidades de absorción y  $\pm 0.5$  nm para longitud de onda.

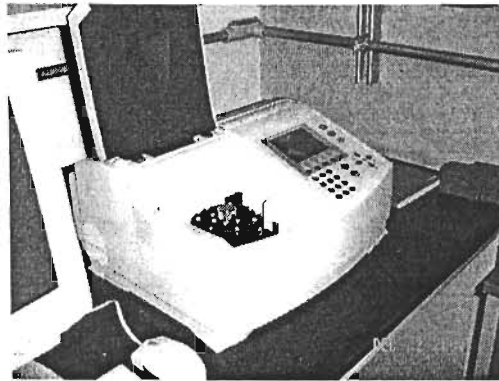
Intervalo de temperatura de operación: 5 a 40 °C.

Apertura : 1 mm x 10 mm de ancho y de largo, respectivamente.

Sensor: foto-tubo.

Controles: encendido y apagado, cero, base de funciones (controla: longitud de onda, absorción o transmisión, etc).

Sistema de iluminación: lámpara de tungsteno y lámpara de deuterio. Se seleccionó una longitud de onda de 671 nm, y además un barrido desde 400 nm a 900 nm.



**Figura 4.6. Espectrofotómetro 3, modelo Helios Gamma, ubicado en el Taller de Física de Radiaciones en el edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias.**

Para la lectura de las películas se trabajó de forma similar en los tres espectrofotómetros, de la manera siguiente.

- 1.- Encender 30 minutos antes de iniciar la lectura de las PTR.
- 2.- Seleccionar la longitud de onda. En este caso fue de 671 nm. Para los espectrofotómetros 2 y 3 realizar un barrido de 400 nm a 900 nm.
- 3.- Seleccionar, el modo Absorción
- 4.-Ajustar a cero.
- 5.- Colocar la película que se desea medir y cerrar el aparato. El instrumento tiene capacidad para almacenar cuatro películas y leerlas sin tener que abrir de nuevo.
- 6.- Observar y registrar la lectura que aparece en la pantalla del instrumento.
- 7.- Retirar la o las películas y colocar las siguientes, repetir los tres últimos pasos.

La respuesta en estos lectores se define como:

$$\text{Respuesta} = DO_f - DO_i \quad (4.1)$$

donde  $DO_f$  es la densidad óptica de la película irradiada a una cierta dosis, y  $DO_i$  es la densidad óptica de la película sin irradiar. Para los objetivos perseguidos, no es necesario encontrar la respuesta  $R$ , así, sólo se trabajó con los valores de la densidad óptica.

#### 4.1.5. Escáner

Se usó un escáner comercial de alta resolución AGFA DuoScan T1200, figura 4.7, cuyas características se describen a continuación.

Tipo: Reflectivo de cama plana.

Resolución óptica: 300 x 600 dpi (puntos por pulgada), vertical y horizontal respectivamente.

Resolución mínima: 300 dpi (color /tono de grises). 3600 ppi (artístico).

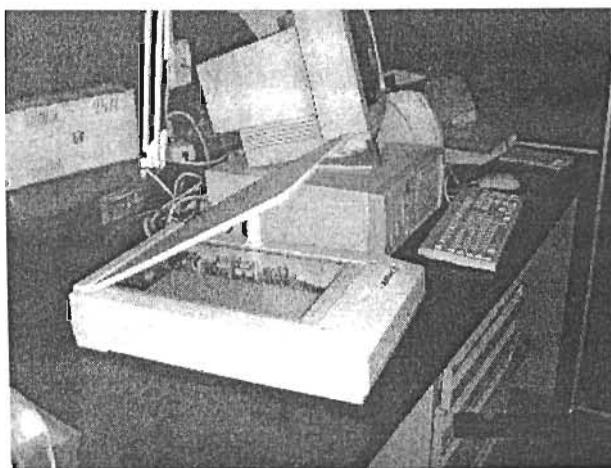
Profundidad de color: 12 bit para tono de grises y 36 bit para color.

Densidad máxima: 3.0 DO.

Lámparas: 3 tubos catódicos fríos fluorescentes.

Programa para escanear: Paint Shop Pro versión 4.1 (Microsoft).

Programa para análisis de las películas: Osiris 3.6.



**Figura 4.7. Escáner utilizado para leer PTR. El modelo es AGFA DuoScan T1200.**

La unidad de lectura de este instrumento contiene una lámpara y un lector basado en tecnología CCD (Charged Couple Device). Cuenta con dos modalidades de lectura: escala de grises y RGB (escala en color rojo, verde y azul). La resolución de un escáner está determinada por la capacidad de digitalizar una imagen y se define por el número de puntos por pulgada (dpi, en inglés) que el dispositivo es capaz de generar o capturar vertical y horizontalmente. Así, la cantidad dpi o ppi indica el número de pixeles que dichos dispositivos pueden leer o mostrar por unidad de medida (tomando como estándar la pulgada). Para este estudio se utilizó una resolución de 300 puntos por pulgada en modo RGB, con lo cual se obtuvieron tres imágenes digitalizadas en sus componentes rojo, verde y azul con 12 bits para cada color.

Mediante el programa llamado Osiris 3.6 se obtuvieron las intensidades de cada componente en una región de interés particular. Con el valor de las intensidades se calculó la respuesta de las películas mediante la siguiente relación:

$$R = \log_{10} (I_0/ I) \quad (4.2)$$

En donde  $I_0$  es la intensidad (rojo, verde o azul) de una película sin irradiar e  $I$  es la intensidad de color (rojo, verde o azul) de una película irradiada a una cierta dosis.

De forma básica se trabajó de la siguiente manera para la digitalización de las PTR en el modo de 24 bits a color, separando la imagen en sus componentes roja, azul y verde, [Alv, 2002].

- 1.- Encender el equipo (escáner y computadora asociada) 15 min antes de la lectura.
- 2.- Seleccionar el programa para escanear; en este caso el programa fue Paint Shop Pro 4.1
- 3.- Colocar la PTR en posición horizontal, centrada en un área tamaño carta sobre la cama del escáner. La PTR debe estar en contacto directo con el vidrio del escáner.
- 4.- Utilizar cuadros blanco y negro de referencia en cada digitalización
- 5.- Escanear la PTR con el programa seleccionado y separar la imagen en los componentes rojo, verde y azul.
- 6.- Leer la intensidad de las PTR en sus diferentes componentes con el programa Osiris.

#### 4.1.6. Películas de tinte radiocrómico

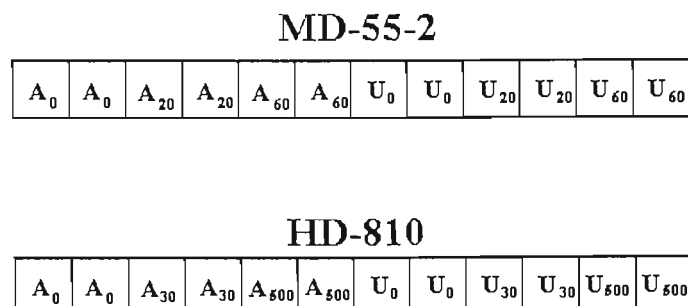
Se utilizaron dos tipos de películas de tinte radiocrómico cuyas especificaciones son las siguientes.

Película Gafchromic modelo MD-55-2 lote # 941206 y película Gafchromic modelo HD-810 lote # 7654-09, fabricadas por ISP Technologies, Inc. Distribuido por Nuclear Associates (Division of Victoreen, Inc., 100 Voice Rd., P.O. Box 349, Carle Place, NY 11514-0349). En ambos casos, se usó el mismo lote durante todo el estudio.

#### 4.2. Procedimiento Experimental

La forma como se llevó a cabo el experimento es la siguiente:

1.- Se recortaron 36 piezas de película HD-810 y MD-55-2 de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ . Las películas fueron cortadas 24 horas antes de ser irradiadas. Se distribuyeron en tres paquetes de 12 películas cada uno. Cada paquete se leyó en un lector distinto, esto es, escáner, densitómetro y espectrofotómetro 1. De cada paquete se almacenaron en el laboratorio 6 películas irradiadas a diferentes dosis que se leyeron después de tres meses. En la figura 4.8, se muestra un esquema de cada paquete para cada tipo de PTR (cada lector tuvo un paquete similar). La PTR con letra U fue la que se leyó regularmente en su respectivo aparato y la PTR con letra A fue la almacenada. El subíndice es la dosis (en Gy) a la que se irradió cada PTR.



**Figura 4.8 Esquemas de un paquete de películas MD-55-2 y uno HD-810. La letra A implica las películas almacenadas y la U las leídas regularmente. El subíndice es la dosis (en Gy) impartida a la PTR.**

2.- Se irradiaron las películas a diferentes dosis en el irradiador Gammacell. La tasa de dosis del irradiador el día de la irradiación fue de  $\dot{D} = 0.795 \pm 0.005$  Gy/min. Las películas fueron colocadas en una estructura de acrílico con paredes de 4 mm de espesor para garantizar equilibrio de partícula cargada y se colocaron a 3 cm por encima de la base del émbolo del irradiador, ya que ésta es la posición a la cual está calibrado el irradiador. Para cada dosis se irradiaron 2 películas de cada tipo (MD-55 o HD810) para cada instrumento, esto es, 12 películas. El tiempo de exposición, la dosis suministrada y el programa de irradiación se muestran en la tabla 4.1. La dosis más alta que se administró fue de 630 Gy, en que la irradiación duró 13 horas.

**Tabla 4.1.**

**Tiempo de exposición, dosis suministrada y fecha de irradiación de las películas HD-810 y MD-55-2.**

Tipo de Película	Núm. de películas	Dosis (Gy)	Tiempo de exposición (min)	Fecha	Hora (h)
HD-810	12	630	792	1-2/4/2003	19:00 pm a 8:20 am
HD-810	12	30	38	2/4/2003	8:00 am a 8:38 am
MD-55-2	12	60	75	2/4/2003	8:00 am a 9:15 am
MD-55-2	12	20	25	2/4/2003	8:00 am a 8:25 am

3.- Se iniciaron las lecturas de la DO de las PTR con los diferentes lectores a las 11:00 am del día 4 de abril del 2003. A partir de esta fecha las lecturas de la DO se realizaron cada hora durante los siguientes dos días. Para la siguiente semana se realizaron dos lecturas por día, y a la siguiente se hizo una lectura por día. Después, en la 4ª semana, las lecturas se hicieron una sola vez por semana para después pasar a ser una lectura cada 15 días y por último cada mes, para así completar tres meses. Al tercer mes se leyeron las películas almacenadas y se compararon los resultados con las películas de los paquetes que se habían leído regularmente. Al tiempo en que se leyeron las películas almacenadas se define como tiempo de almacenamiento TA.

En todas las lecturas se mantuvo el registro de la temperatura y la humedad con el termohigrógrafo descrito anteriormente.

4.- El 25 de agosto de 2003 se llevó a cabo un nuevo experimento, en el cual se utilizaron el escáner, el densitómetro y el espectrofotómetro 2. El procedimiento fue similar al descrito en el inciso 4.2. Se añadió una exposición a la películas MD-55-2, de 2 Gy. Se analizó en cada lectura, con detalle, la forma y la longitud de onda en el pico principal del espectro de absorción de la película HD-810, irradiada a 600 Gy, y se repitieron las irradiaciones a algunas dosis. En la tabla 4.2 se muestran las fechas y las dosis suministradas en este segundo experimento. Después de la irradiación se procedió a la lectura de las PTR. El programa de lectura fue similar al descrito en el punto 3, aunque esta vez el tiempo máximo de exposición fue de 831 minutos puesto que la tasa de dosis del Gammacell fue de  $0.740 \pm 0.005$  Gy/min.

**Tabla 4.2.**

**Tiempo de exposición, dosis suministrada y fecha de irradiación de las películas HD-810 y MD-55-2.**

Tipo de Película	Núm. de películas	Dosis (Gy)	Tiempo de irradiación (min)	Fecha	Hora (h)
HD-810	12	618	831	25-26/4/2003	19:00 pm a 9:00 am
HD-810	12	30	40	26/4/2003	8:00 am a 8:40 am
MD-55-2	12	60	82	2/64/2003	8:00 am a 9:22 am
MD-55-2	12	20	27	26/4/2003	8:00 am a 8:27 am
MD-55-2	12	2	3	26/4/2003	9:15 am a 9:18 am

5.- Finalmente, en un tercer experimento llevado a cabo el 13 de octubre del 2004, se estudió la película HD-810, irradiada a 600 Gy, con el espectrofotómetro 3. Se utilizó para este estudio un cristal de cuarzo cuyo espectro de absorción se tiene bien caracterizado y con el cual se mantuvo el registro de las posibles variaciones estocásticas del funcionamiento del espectrofotómetro 3, para poder distinguir éstas de las posibles variaciones de la posición de los picos en el espectro de la película. El tiempo de irradiación en el Gammacell fue de 841 min y la tasa de dosis fue de  $0.710 \pm 0.005$  Gy/min.

## Capítulo 5

### Resultados

---

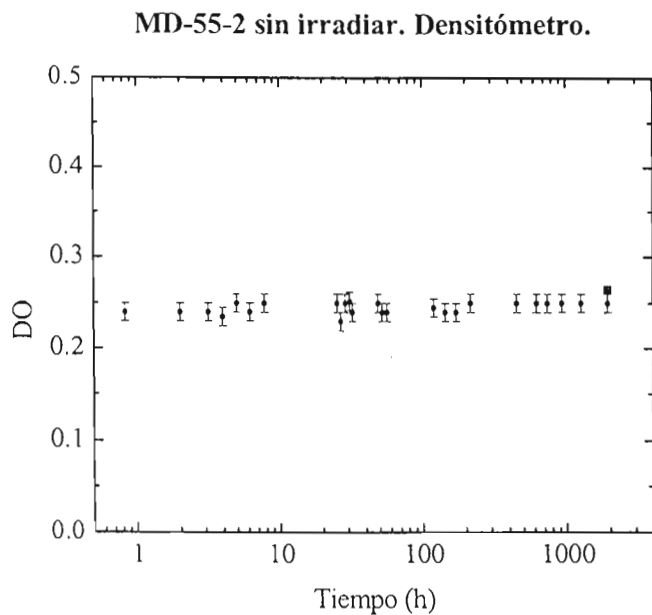
En esta sección se presentan los resultados de los 3 experimentos descritos en el capítulo anterior para las películas HD-810 y MD-55-2, en forma de gráficas. En la parte I se presenta el comportamiento de la densidad óptica DO, como función del tiempo de lectura T, para ambas películas expuestas a distintas dosis. En la parte II, se muestra la densidad óptica como función del cambio de temperatura, y de la humedad relativa, sólo para las películas MD-55-2 y HD-810 leídas con el densitómetro.

#### 5.1. Parte I

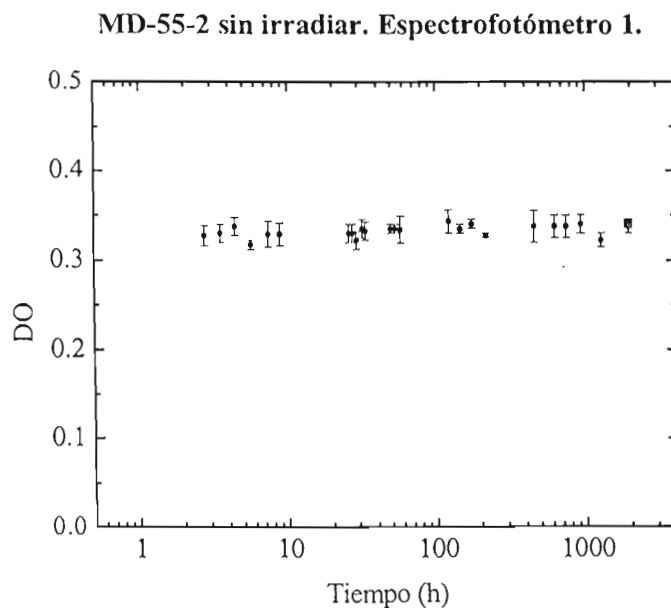
En esta parte se muestran las gráficas de la densidad óptica de películas MD-55-2 y HD-810, en función del tiempo de lectura T (ver sección 3.5.4), estudiadas en diferentes lectores (espectrofotómetro, escáner y densitómetro). En algunos casos se especifica, sobre el eje de las abscisas, el tiempo de lectura en horas y otras veces se presenta en forma de logaritmo en base 10 del tiempo (Log T). En el eje de las ordenadas se grafica la densidad óptica (DO), ya sea medida con el densitómetro o con el espectrofotómetro, y cuando se lee en el escáner se grafica  $\text{Log}(I_0/I)$ . Se trató de mantener lo mejor posible, el intervalo en la escala del eje de las ordenadas (donde se registra la densidad óptica) en las gráficas de películas irradiadas con la misma dosis, y leídas en el densitómetro y los espectrofotómetros. Para películas sin irradiar, leídas en el escáner se grafica la intensidad en el tono rojo. El punto en forma de cuadro de color gris que se observa al final en las gráficas, tanto para HD-810 como para MD-55, corresponde a la lectura de las películas almacenadas y leídas tres meses después de su irradiación, para una mejor visualización se omitió la incertidumbre de éste. Cada punto en las gráficas es el promedio de la DO de las dos películas irradiadas a una misma dosis.



5.1.1. Películas MD-55-2 sin irradiar. Experimento del 2 de abril al 2 de julio del 2003

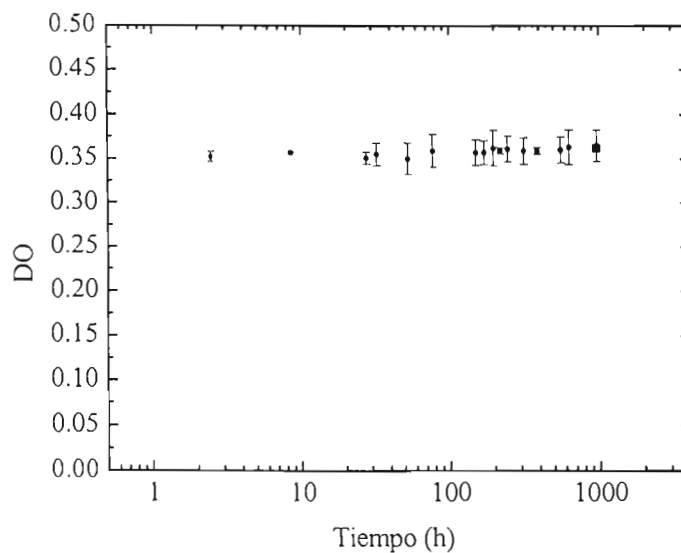


**Gráfica 5.1** Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 sin irradiar, leída en el densitómetro.



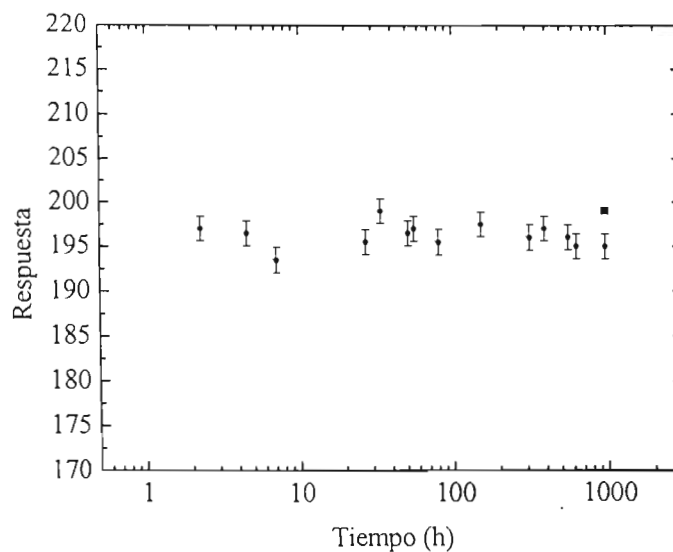
**Gráfica 5.2** Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 sin irradiar, leída en el espectrofotómetro 1.

MD-55-2 sin irradiar. Espectrofotómetro 2.



Gráfica 5.3 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 sin irradiar, leída en el espectrofotómetro 2.

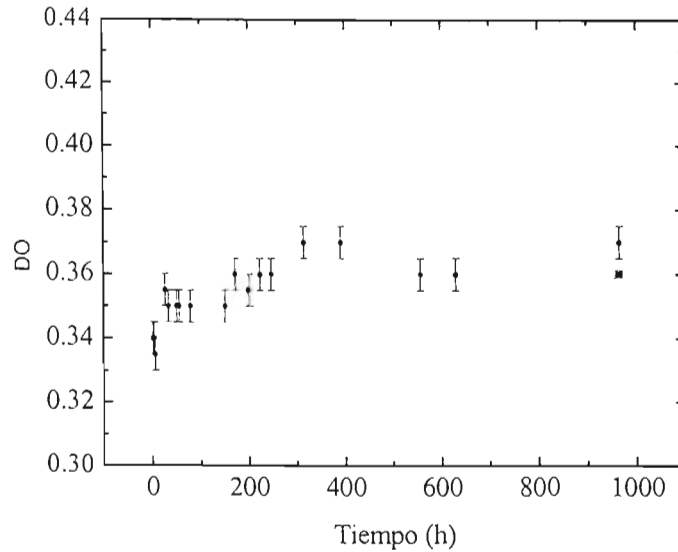
MD-55-2, sin irradiar, escáner (tono rojo).



Gráfica 5.4 Respuesta como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 sin irradiar, leída en el escáner.

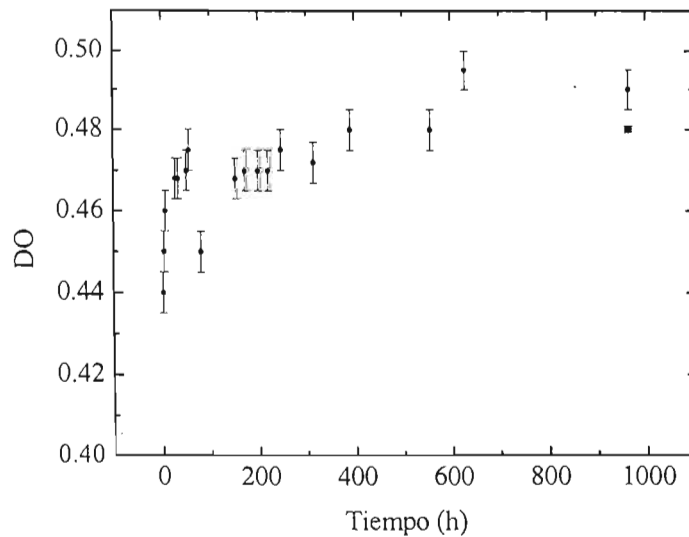
### 5.1.2. Películas MD-55-2 irradiadas a 2 Gy

MD-55-2 irradiada a 2 Gy. Densitómetro.



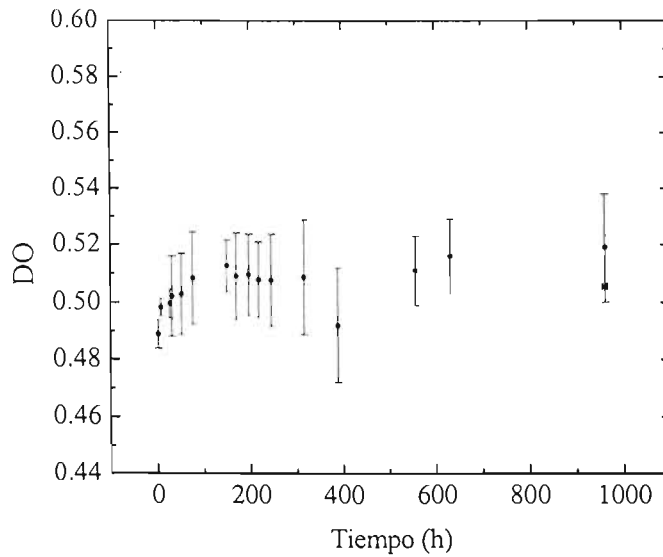
Gráfica 5.5 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 2 Gy y leída en el densitómetro .

MD-55-2 irradiada a 2 Gy. Espectrofotómetro 1.



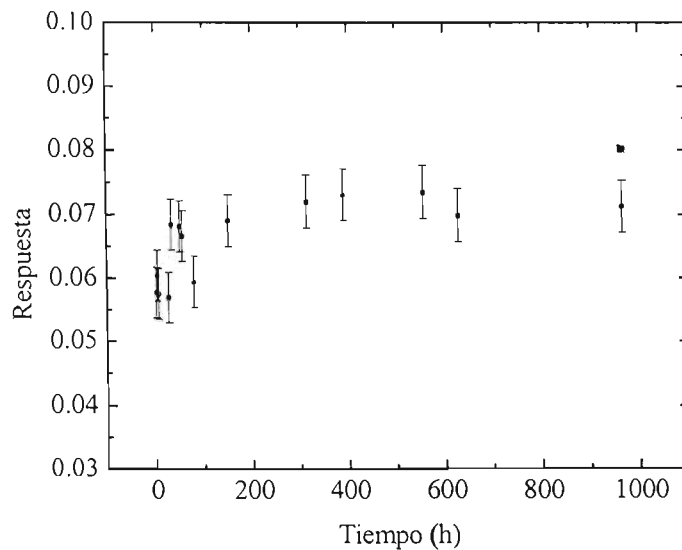
Gráfica 5.6 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 2 Gy y leída en el espectrofotómetro 1.

MD-55-2 irradiada a 2 Gy. Espectrofotómetro 2



Gráfica 5.7 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 2 Gy y leída en el espectrofotómetro 2.

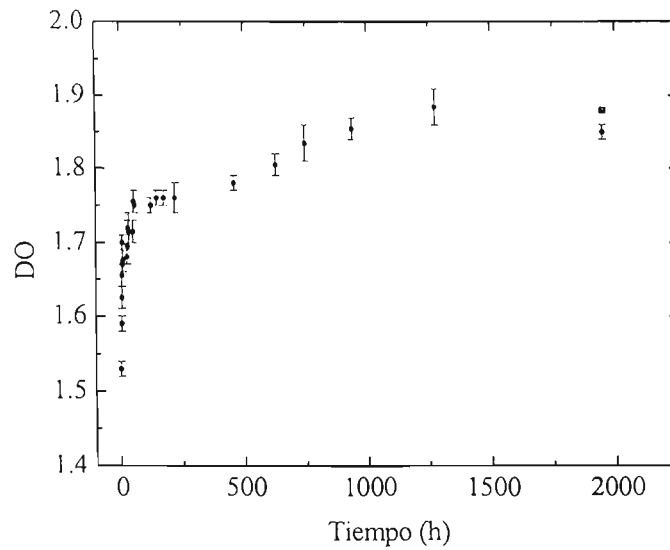
MD-55-2 irradiada a 2 Gy. Escáner (tono rojo)



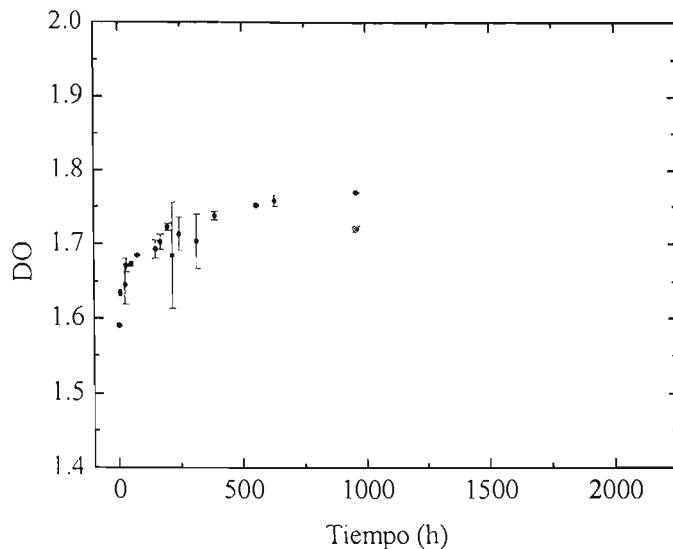
Gráfica 5.8 Respuesta como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 2 Gy y leída en el escáner, en el tono rojo.

### 5.1.3. Películas MD-55-2 irradiadas a 20 Gy

MD-55-2 irradiadas a 20 Gy. Densitómetro.

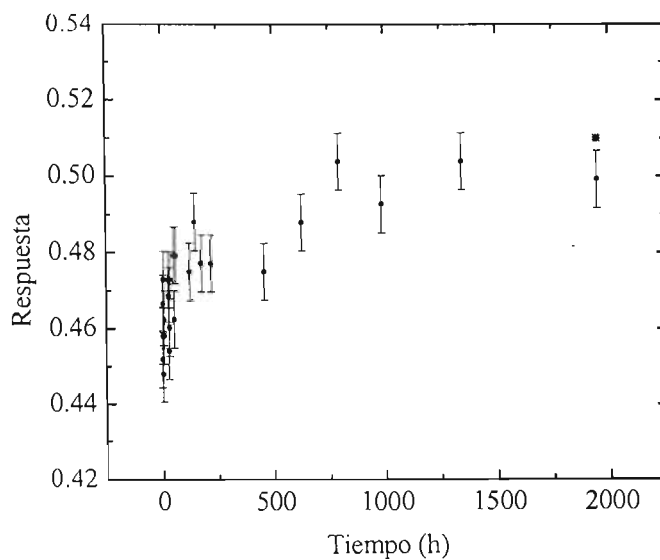


MD-55-2 irradiada a 20 Gy. Espectrofotómetro 2.



Gráfica 5.11 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 20 Gy y leída en el espectrofotómetro 2.

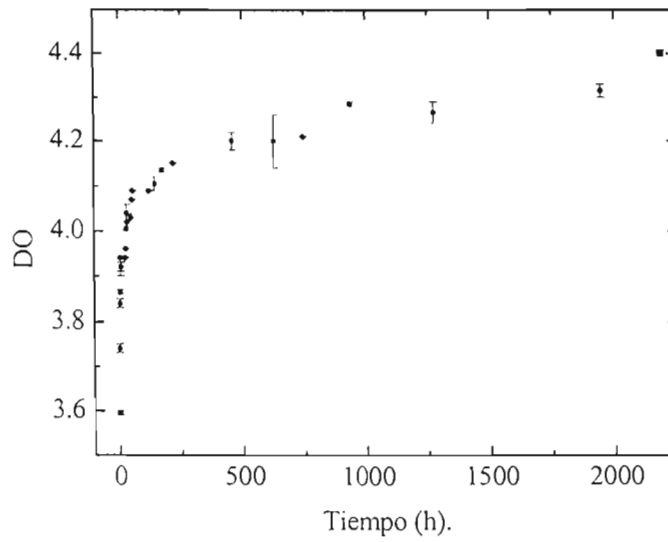
MD-55-2 irradiada a 20 Gy. Escáner (tono rojo)



Gráfica 5.12 Respuesta como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 20 Gy y leída en el escáner, en el tono rojo.

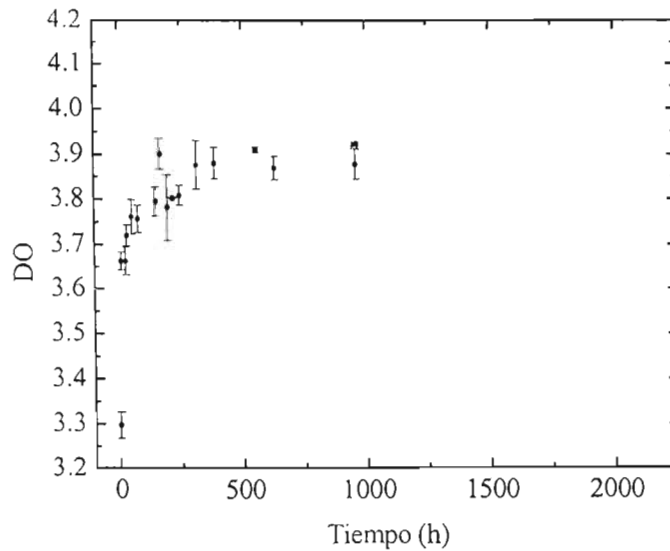
#### 5.1.4. Películas MD-55-2 irradiadas a 60 Gy

MD-55-2 irradiada a 60 Gy. Densitómetro.



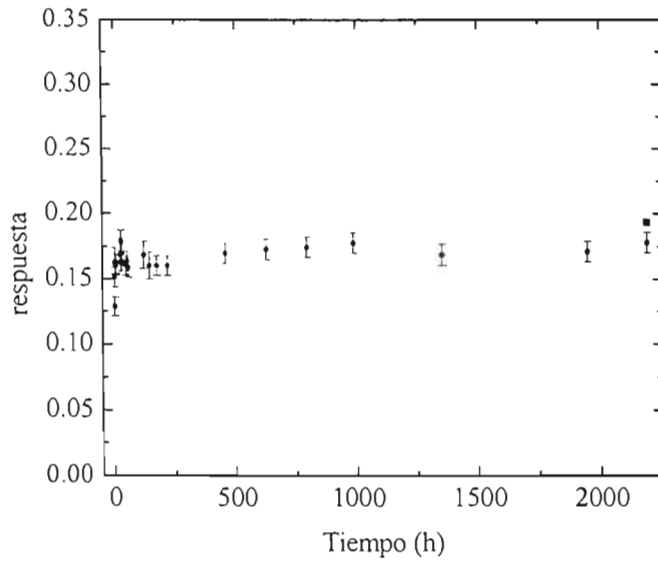
Gráfica 5.13 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 60 Gy y leída en el densitómetro.

MD-55-2 irradiada a 60 Gy. Espectrofotómetro 2.



Gráfica 5.14 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 60 Gy y leída en el espectrofotómetro 2.

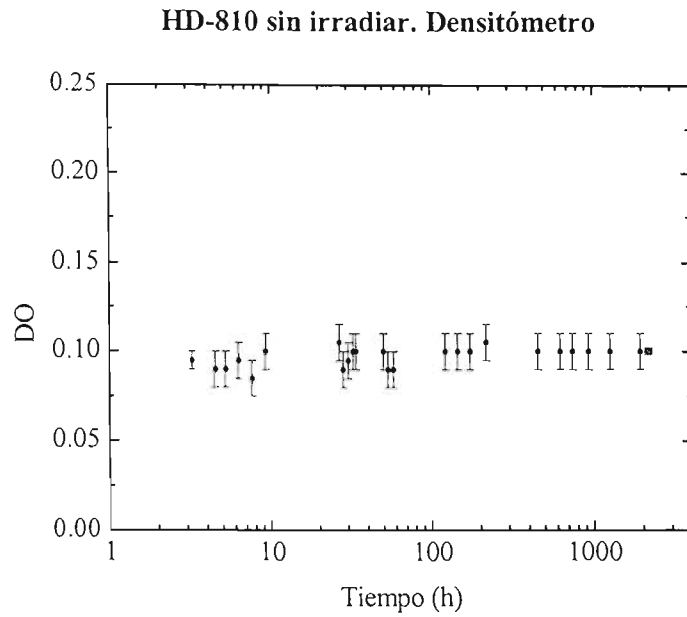
MD-55-2 irradiada a 60 Gy. Escáner (tono azul)



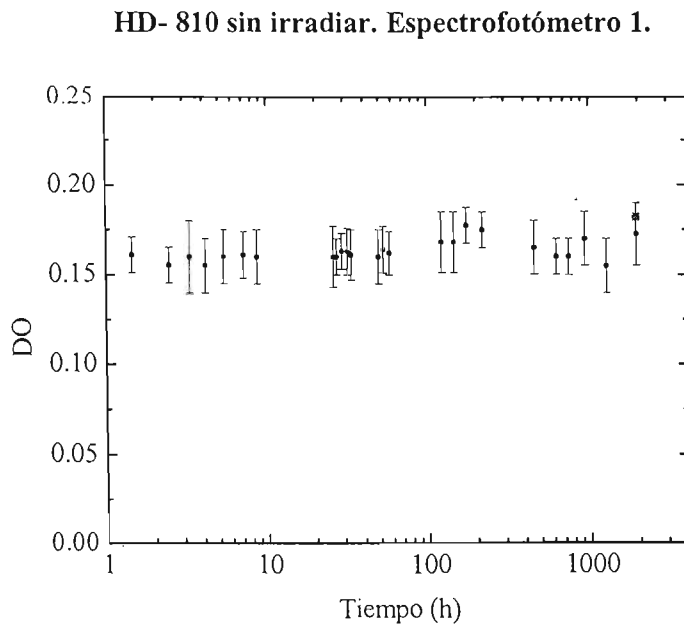
Gráfica 5.15 Respuesta como función del tiempo de lectura, para la película MD-55-2 irradiada a 60 Gy y leída en el escáner, en el tono azul.



### 5.1.5. Películas HD-810 sin irradiar

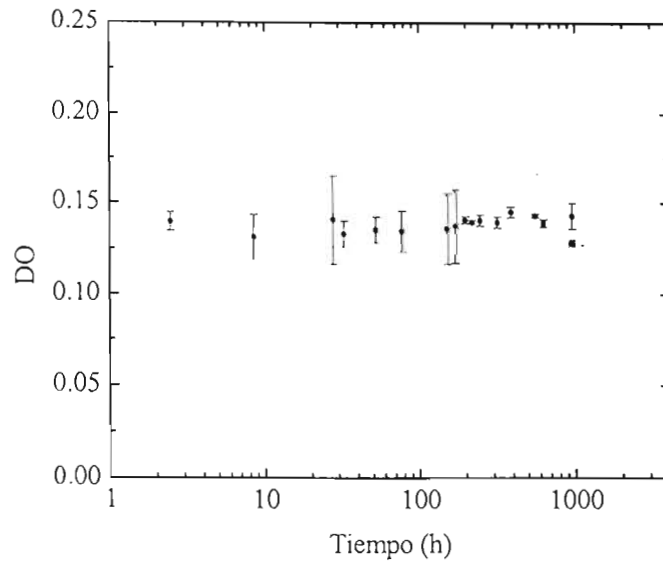


**Gráfica 5.16** Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 sin irradiar y leída en el densitómetro.



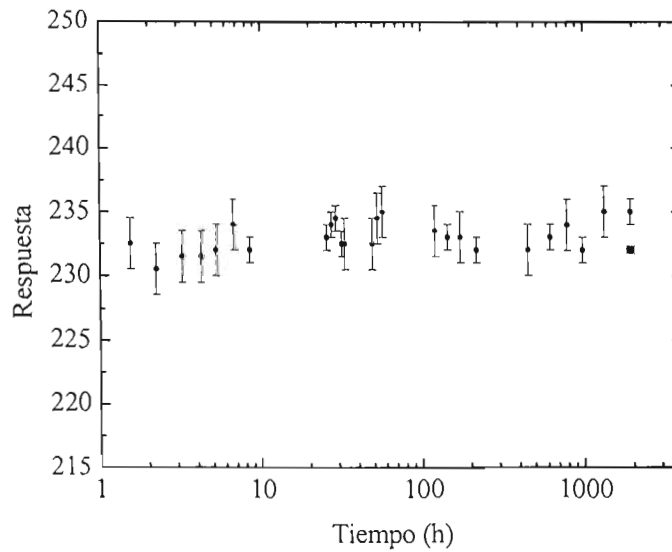
**Gráfica 5.17** Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 sin irradiar y leída en el espectrofotómetro 1.

HD-810 sin irradiar. Espectrofotómetro 2.



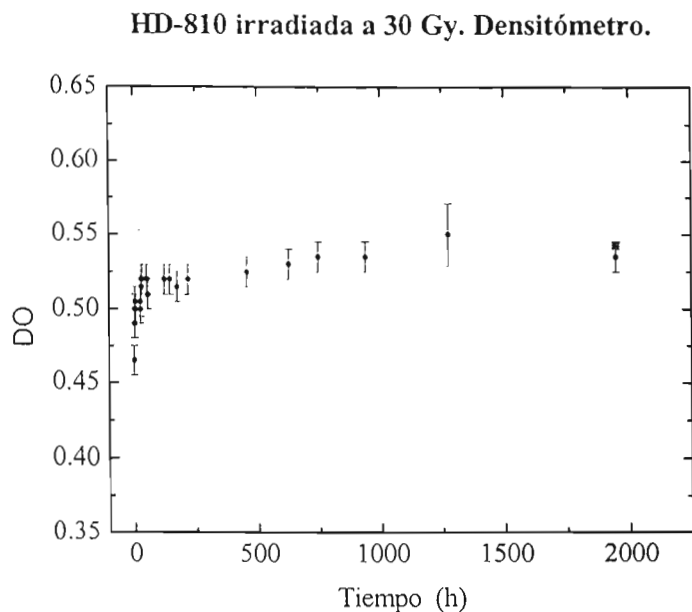
Gráfica 5.18 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 sin irradiar y leída en el espectrofotómetro 2.

HD-810 sin irradiar. Escáner (tono rojo)

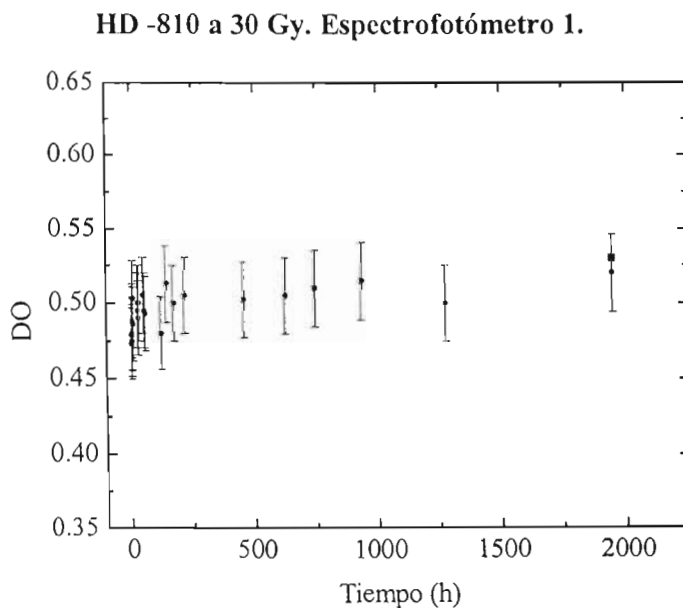


Gráfica 5.19 Respuesta como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 sin irradiar y leída en el escáner, en el tono rojo.

### 5.1.6. Películas HD-810 irradiadas a 30 Gy

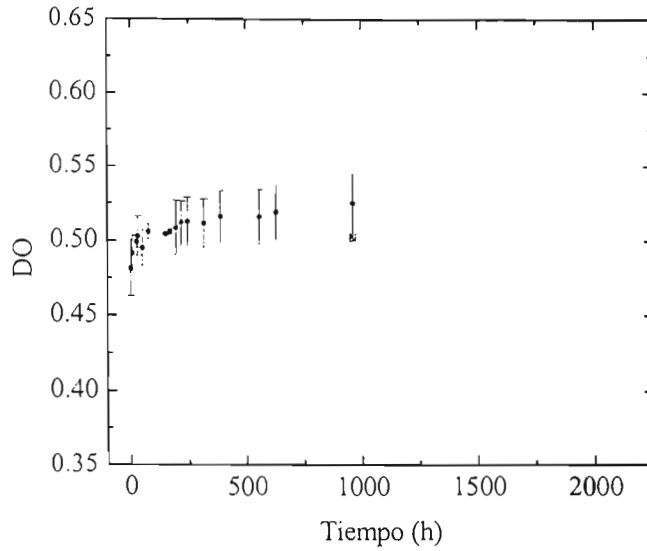


**Gráfica 5.20** Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 30 Gy y leída en el densitómetro .



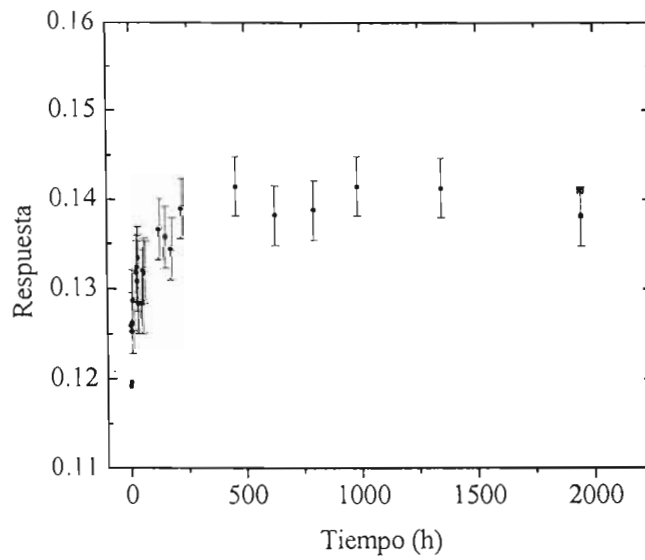
**Gráfica 5.21** Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 30 Gy y leída en el espectrofotómetro 1.

HD-810 irradiada a 30 Gy. Espectrofotómetro 2



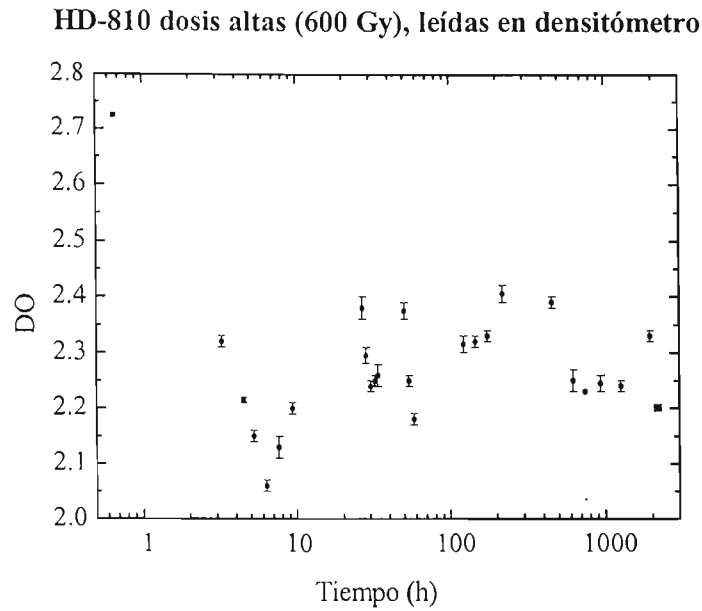
Gráfica 5.22 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 30 Gy y leída en el espectrofotómetro 2.

HD-810 irradiada a 30 Gy. Escáner (tono rojo).

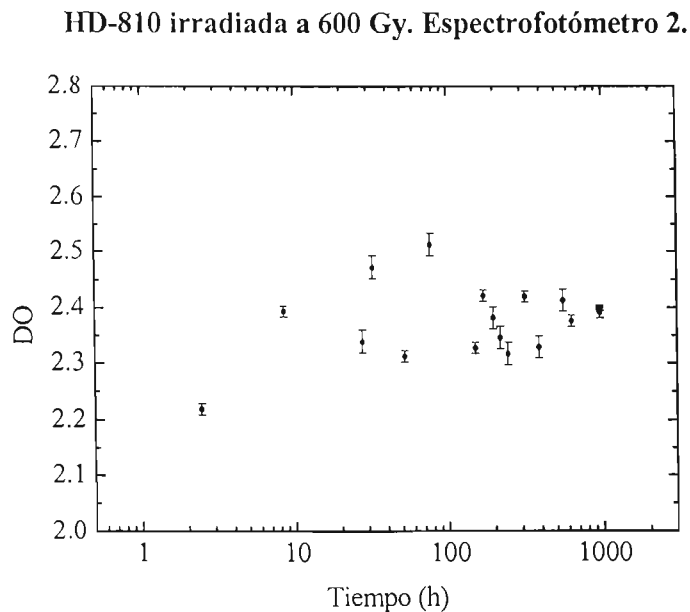


Gráfica 5.23 Respuesta como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 30 Gy, leída en el escáner, en el tono rojo.

5.1.7. Películas HD-810 irradiadas a 600 Gy. Experimento del 25 de agosto al 25 de octubre del 2003

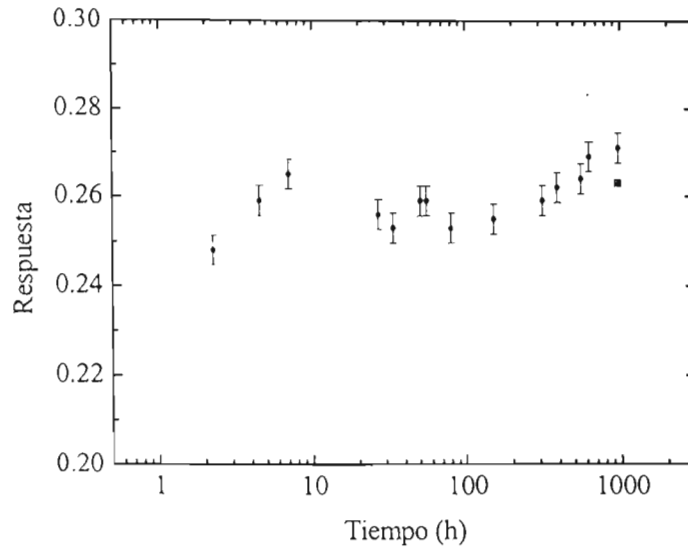


Gráfica 5.24 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 600 Gy y leída en el densitómetro.



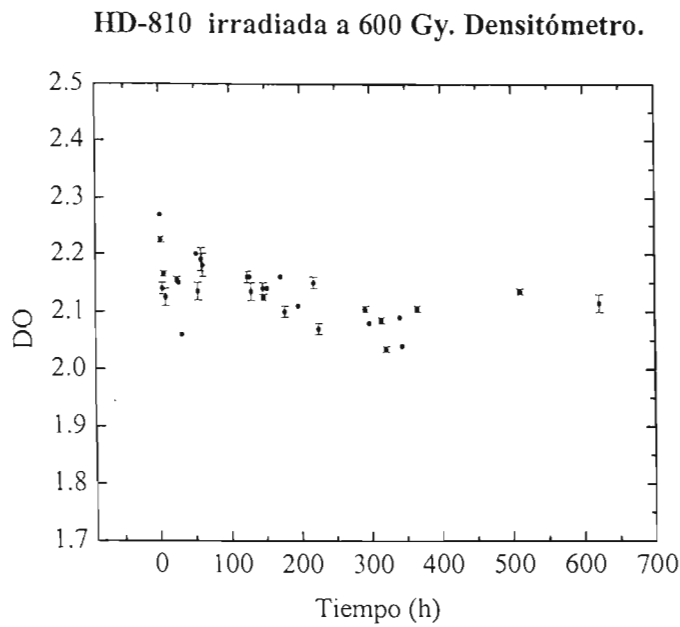
Gráfica 5.25 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 600 Gy, leída en el espectrofotómetro 2.

HD-810 irradiada a 600 Gy. Escáner (tono azul)

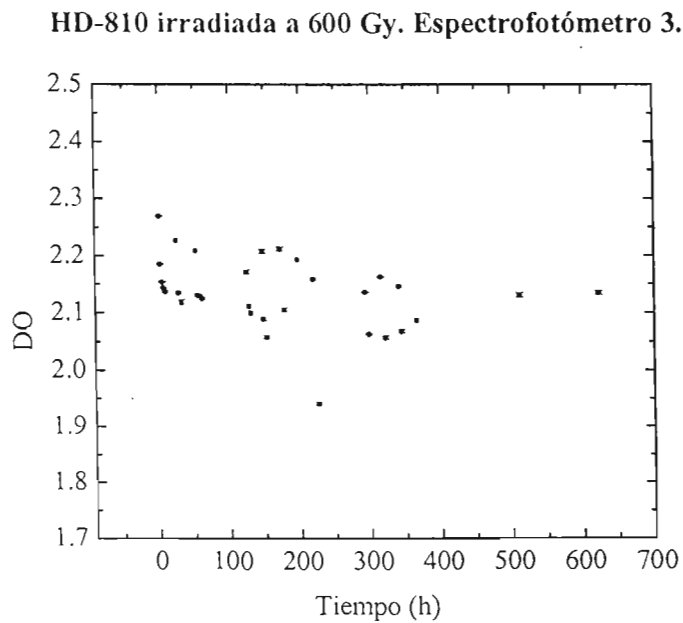


**Gráfica 5.26** Respuesta como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 600 Gy, leída en el escáner, en el tono azul.

5.1.8. Películas HD-810 irradiadas a 600 Gy. Experimento del 5 de noviembre al 5 de diciembre del 2003.



Gráfica 5.27 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 600 Gy, leída en el densitómetro .



Gráfica 5.28 Densidad óptica como función del tiempo de lectura, para la película HD-810 irradiada a 600 Gy, leída en el espectrofotómetro 3.

De las diferentes gráficas puede observarse que el tiempo de estabilización varía en un intervalo de 60 a 80 horas aproximadamente. Si se toma el promedio de los valores observados, se tendría que el tiempo de estabilización es de  $70 \pm 10$  horas. De forma general, se acostumbra reportar el valor del tiempo de estabilización en unidades de días, por lo que en este trabajo se propone como tiempo de estabilización el valor de 72 horas, esto es, tres días, para las películas HD-810 y MD-55-2 leídas a una longitud de onda de 671 nm.

Se midió que, posteriormente a las 72 horas y hasta el término del estudio, la DO puede crecer un 5% aproximadamente respecto del valor de la DO a 72 horas, por lo que no existe mucha diferencia si las películas se leen hasta 3 meses después del tiempo de estabilización propuesto.

Dado que la necesidad de medir la DO es para determinar la dosis recibida por las PTR, se recomienda que en el caso de requerir un valor muy preciso de la dosis (que no deje lugar a dudas) se lea la película a los 7 días después de la irradiación.

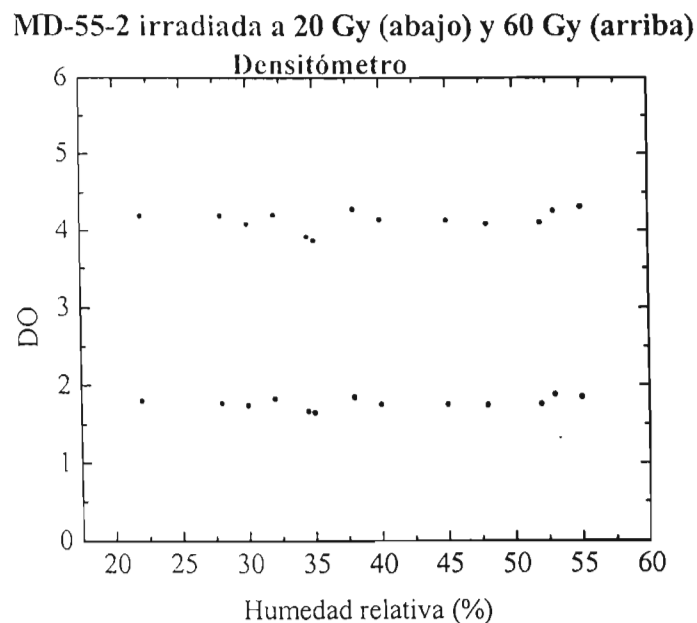
El caso de la película HD-810 irradiada a 600 Gy se observa un caso anómalo que se discutirá en el análisis del experimento, próximo capítulo.



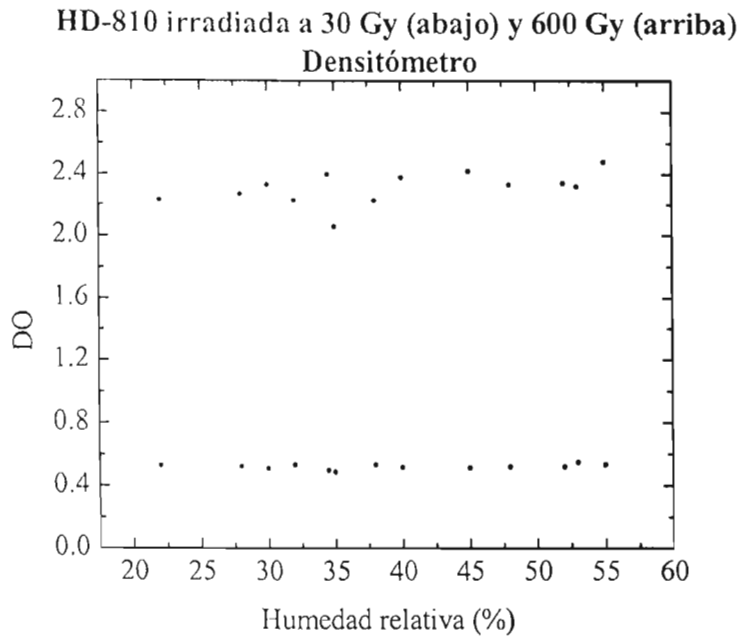
## 5.2. Parte II

Como se mencionó en el capítulo 4 sección 4.2 se registraron los valores de la temperatura y la humedad relativa con un termohigrógrafo en cada medida de la DO. Se graficó la densidad óptica en función de temperatura y humedad relativa, respectivamente. Es importante señalar que los valores de la DO que se tomaron para realizar las graficas fueron los observados para tiempo posteriores a 72 horas, esto es, tiempos posteriores al tiempo de estabilización TE, para eliminar la dependencia de la DO con TE. Por lo tanto en esta segunda parte se presentan los resultados que muestran el comportamiento de la densidad óptica en función de la humedad relativa y de la temperatura, para las medidas realizadas con el densitómetro, ya que para los demás lectores el comportamiento fue similar. Experimento del 2 de abril al 2 de julio del 2003.

### 5.2.1. Densidad óptica como función de la humedad relativa

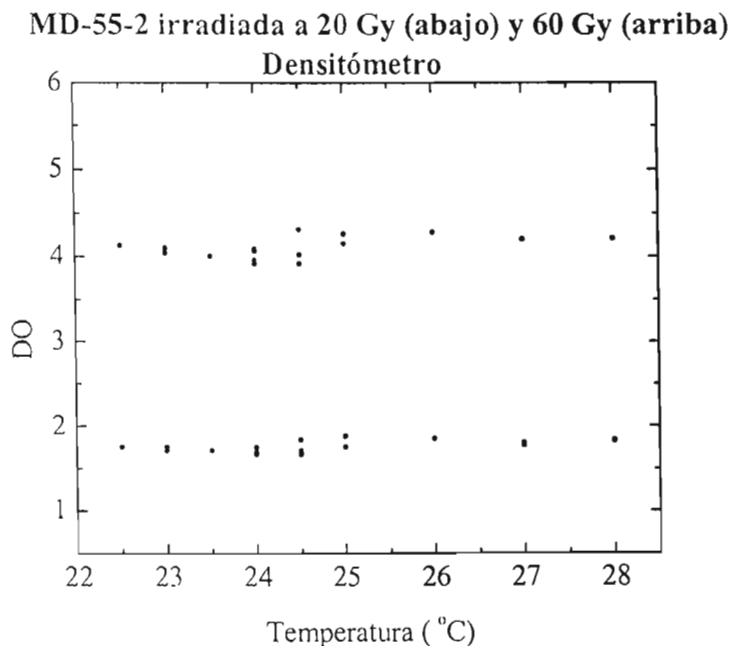


**Gráfica 5.29 Densidad óptica como función de la humedad relativa (%), para las películas MD-55-2 irradiadas a 20 y 60 Gy, estudiadas en el densitómetro.**



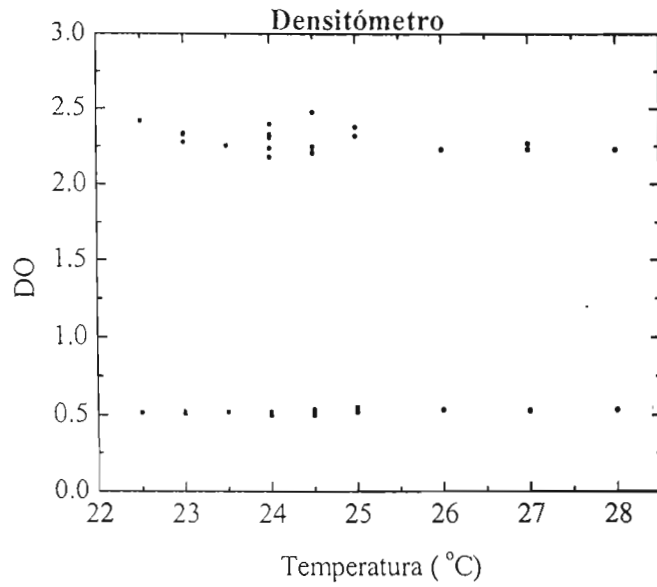
Gráfica 5.30 Densidad óptica como función de la humedad relativa (%), para las películas HD-810 irradiadas a 30 y 600 Gy, estudiadas en el densitómetro.

5.2.2. Densidad óptica como función de la temperatura.



Gráfica 5.31 Densidad óptica como función de la temperatura (°C), para las películas MD-55-2 irradiadas a 20 y 60 Gy, estudiadas en el densitómetro.

HD-810 irradiada a 30 Gy (abajo) y 600 Gy (arriba)



**Gráfica 5.32** Densidad óptica como función de la temperatura (°C), para las películas HD-810 irradiadas a 30 y 600 Gy, estudiadas en el densitómetro.

## Capítulo 6

### Análisis del experimento

---

En el presente capítulo se analizan los resultados mostrados en el capítulo anterior. Recordando, los objetivos de la tesis fueron:

- 1.- Determinar el tiempo de estabilización de la densidad óptica en películas Gafchromic MD-55-2 y HD-810, irradiadas con  $^{60}\text{Co}$  a diferentes dosis, y analizadas en tres diferentes lectores.
- 2.- Determinar si la sensibilidad de las películas Gafchromic cambia con el número de veces que se leen y con el tiempo de almacenamiento.
- 3.- Correlacionar cambios en la respuesta de las películas con la temperatura y humedad relativa durante las lecturas y el almacenamiento.

#### 6.1 Estabilización del color en el tiempo posterior a la irradiación

Las gráficas de la sección 5.1, parte I (graficas 5.1-5.28) muestran la densidad óptica en función del tiempo de lectura posterior a la irradiación, de las películas Gafchromic MD-55-2 y HD-810. En estas gráficas se observan características de la respuesta de las películas después de haber sido irradiadas y analizadas en los tres lectores utilizados. Estas son:

- a) La densidad óptica DO aumenta con el tiempo posterior a la irradiación, empezando con un valor inicial  $DO_0$  (primer valor del ciclo de lecturas), y se aproxima asintóticamente a un nivel de estabilización.

Es importante señalar que este comportamiento ya ha sido reportado antes, aunque los diferentes autores [McL, 1995; Roa, 2003; Ali, 2003] no concuerdan siempre en el valor del tiempo de estabilización (TE) de las películas (ver capítulo 3 sección 3.5.4). En nuestro trabajo se encontró que el TE es de 72 horas aproximadamente (ver los comentarios del capítulo 5 parte I al final de las gráficas).

El crecimiento asintótico de la densidad óptica se observa para ambas películas, con los tres lectores y para todas las dosis, dentro de los límites de error de cada lector (excepto para películas sin irradiar y para la película HD-810 irradiada a 600 Gy). En el caso de las PTR sin irradiar este resultado es de esperarse porque el tinte no se está desarrollando. Lo que es deseable es que la respuesta sea estable en el tiempo. En el caso de la película HD-810 irradiada a 600 Gy, gráficas 5.24, 5.25 y 5.26, se observa un comportamiento distinto al crecimiento asintótico. El análisis de la DO como función del tiempo de lectura para esta película, se discute en el inciso c.

En el caso de las PTR leídas en el escáner se muestra la respuesta tal como se definió en la ecuación (4.1), para el tono rojo (en los demás colores el comportamiento fue el mismo). En los casos en los que hubo saturación del rojo (el programa propio del escáner mostró saturación para este color), se reemplaza por el comportamiento en el tono azul, como sucedió en la película MD-55-2 irradiada a 60 Gy, gráfica 5.15, y en la película HD-810 irradiada a 600 Gy, gráfica 5.26. Aunque no se incluyeron en este trabajo, las gráficas para cada uno de los tres colores, la tendencia del crecimiento de la DO en función del tiempo de lectura, es independiente del tono de color (rojo, verde o azul) en el que se estudia la película.

Se tiene saturación en el caso de la película MD-55-2 irradiada a 20 Gy y leída en el espectrofotómetro 1, gráfica 5.10, en que el valor de la DO se mantiene constante a partir de 48 horas posteriores a la irradiación. Este valor no se debe a que el color de la PTR se haya estabilizado sino a que el equipo mostró saturación en la lectura, teniendo como límite el valor de 1.5 en la DO. En comparación, podemos observar las gráficas 5.9 y 5.11 que corresponden a la película MD-55-2, irradiada a 20 Gy y leída en el densitómetro y en el espectrofotómetro 2 respectivamente, en las que se observa claramente, el crecimiento asintótico de la DO con el tiempo posterior a la irradiación.

Podemos decir que la forma del crecimiento de la DO, en función del tiempo de lectura, en las películas HD-810 y MD-55-2, para las diferentes dosis, concuerda con lo reportado por los diferentes grupos de investigadores [McL, 1995; Roa, 2003; Ali, 2003; Mei, 1996]. Incluso podría proponerse un modelo (ecuación 3.3) semejante al de [Ali, 2003], aunque habría que

estudiar exactamente la forma de obtener las constantes, además de tener en cuenta el cambio de la longitud de onda

b) En las películas sin irradiar se observa que no existe crecimiento de la densidad óptica con el tiempo entre irradiación y lectura (T), por lo que en este trabajo, no se encontró influencia de la luz de los lectores sobre el valor de la DO de ambas películas GafChromic. Si hubiera esa influencia, se observaría un pequeño incremento en la DO con el número de lecturas realizadas. Además puede verse (gráficas 5.1, 5.2, 5.3, 5.16, 5.17, 5.18) que, para películas no irradiadas, los valores de la DO leídos en el espectrofotómetro 1 y el espectrofotómetro 2 son muy parecidos, tanto para MD-55-2 como para HD-810. La discrepancia entre ambos es del 3 % en el caso de MD-55-2 y de 7 % en el caso de HD-810. Cuando se comparan los valores de DO leídos en el densitómetro con aquellos leídos en el espectrofotómetro 2 se tienen discrepancias del 24 % en el caso de la película MD-55-2 y del 32 % en el caso de película HD-810. A pesar de que no se hizo un estudio de películas sin irradiar con el espectrofotómetro 3, las gráficas 5.27 y 5.28 muestran que los valores de DO del densitómetro y del espectrofotómetro 3 coinciden.

Al intentar entender por qué dos de los lectores usados responden en una forma y los otros dos en otra, se encontró que los distintos lectores tienen algunas diferencias en sus características. Por ejemplo, el espectrofotómetro 1 tiene aproximadamente 30 años de uso (es el único con el que se contaba al inicio de estos experimentos) mientras que, el espectrofotómetro 3 y el densitómetro son lectores nuevos. Estas observaciones y los estudios de Martín J Butson [But, 2003] nos permiten suponer que las diferencias (en los distintos lectores) de los valores de la DO para películas sin irradiar, se deben a la forma en la que están calibrados internamente los lectores. En el caso del densitómetro el usuario es capaz de calibrarlo directamente, pero en los demás lectores esto no es posible, se supone que permanecen “calibrados indefinidamente”. Si observamos las gráficas se verá que a bajas densidades ópticas es donde existen mayores discrepancias entre los lectores, por lo que es ahí donde existe el mayor error de calibración. Por lo tanto, las diferencias en cuanto a las lecturas de la DO de películas no irradiadas se deben a las diferencias de calibración a bajas densidades ópticas de los lectores. Una solución es tomar películas de referencia y calibrar con ellas a los lectores siempre que estos se utilicen. De la misma manera como se hace con el densitómetro [Mdn, 2000].

c) La tasa de crecimiento de la DO es grande inmediatamente después de la exposición de la PTR al campo de radiación y durante las primeras 72 horas. Posteriormente, la tasa de crecimiento disminuye y se hace muy pequeña, pero nunca llega a ser igual a cero.

Como se observa en las gráficas 5.1 a 5.23, dentro de las primeras 72 horas posteriores a la irradiación, existe una tasa de crecimiento grande de la densidad óptica, en ambos tipos de películas, en relación con la correspondiente después de transcurridos las 72 horas. En la tabla 6.1 se muestran los valores del crecimiento porcentual de la DO de ambas películas a las 72 horas, con respecto al primer valor, para las distintas dosis y leídas en los diferentes equipos. El crecimiento porcentual con respecto al primer valor se define como  $[(DO_f - DO_i)/DO_i] \times 100$ , donde la  $DO_f$  es la densidad óptica a las 72 horas y  $DO_i$  es la densidad óptica inicial. En la tabla 6.1 se puede observar que para la película MD-55-2, a la dosis de 2 Gy, los valores del crecimiento porcentual, determinado usando los diferentes lectores, son muy parecidos. Para la dosis de 20 Gy y la película MD-55-2, se observa que el valor obtenido en el densitómetro está muy alejado del señalado por los demás lectores. Esta discrepancia queda sin entender, aunque puede deberse a que la primera lectura se le haya asignado una hora equivocada.

Para la dosis de 60 Gy, película MD-55-2, de nuevo se observa que los valores de crecimiento porcentual coinciden. En este caso sólo se muestran los resultados en dos lectores puesto que la densidad óptica en los otros dos quedó fuera de sus límites de lectura.

Por otro lado, para la película HD-810 a 30 Gy se observa que los valores porcentuales son muy parecidos. Para esta película sólo se pudo calcular el valor porcentual a 30 Gy, puesto que a 600 Gy el comportamiento de la DO fue cualitativamente distinto. Este comportamiento se analiza más adelante.

**Tabla 6.1. Crecimiento porcentual de la densidad óptica, con respecto de la primera medida, en las primeras 72 horas después de la irradiación.**

Tipo de película	Dosis (Gy)	Lector	Valor porcentual
MD-55-2	2	Densitómetro	2.94
MD-55-2	2	Espec. 1	2.27
MD-55-2	2	Espec. 2	2.93
MD-55-2	2	Escáner	2.94
MD-55-2	20	Densitómetro	14.38
MD-55-2	20	Espec. 1	8.60
MD-55-2	20	Espec. 2	5.95
MD-55-2	20	Escáner	6.05
MD-55-2	60	Densitómetro	13.77
MD-55-2	60	Espec. 2	14.06
HD- 810	30	Densitómetro	9.68
HD- 810	30	Espec. 1	9.33
HD- 810	30	Espec. 2	8.06
HD- 810	30	Escáner	8.89

Espec. 1 = espectrofotómetro 1

Espec. 2 = espectrofotómetro 2

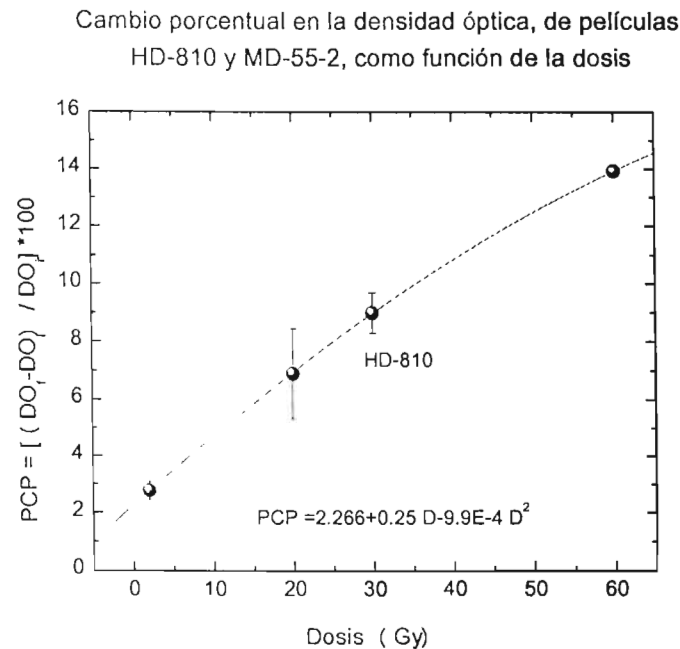
Los valores observados en la tabla 6.1 nos sugieren que el crecimiento porcentual de la DO depende de la dosis suministrada a las películas. Calculando el promedio del valor del crecimiento porcentual, para cada uno de los lectores a la misma dosis y graficando este valor en función de la dosis, se obtiene la gráfica 6.1, donde PCP es el promedio del crecimiento porcentual de la DO de las PTR, a una dosis determinada, medida con los distintos lectores. Este ajuste está determinado por un polinomio de grado 2, cuya ecuación es:

$$PCP = 2.27 + 0.25 D - (9.9 \times 10^{-4}) D^2$$

en donde D es la dosis absorbida por la película. En la curva se observa claramente cómo el tercer punto (que corresponde a la película HD-810 a la dosis de 30 Gy) se ajusta bastante bien a la sistemática de la película MD-55-2. Esto nos ha sorprendido, ya que sugiere que el comportamiento del crecimiento porcentual es independiente del tipo de película y sólo depende



de la dosis suministrada. Este comportamiento podía haberse esperado, puesto que las dos películas tienen el mismo tipo de material sensible a la radiación y sólo difieren por la cantidad de éste contenida en cada una de ellas. Es por ello que una es más sensible que la otra. En el momento de calcular el valor de crecimiento porcentual, el factor de sensibilidad se cancela y es por esta razón que las dos películas muestran el mismo comportamiento, observado en la gráfica 6.1.



**Figura 6.1** Crecimiento porcentual de la DO, entre 1 y 72 h, en función de la dosis aplicada a la películas MD-55-2 y HD-810. Un punto corresponde a la película HD-810 y los demás corresponden a la película MD-55-2.

Es importante señalar que se ha encontrado una diferencia fundamental en cuanto al comportamiento del crecimiento de la DO en las primeras horas, respecto de lo reportado por diversos investigadores. Primero, [Ali, 2003] propone que el crecimiento de la DO en películas MD-55-2 irradiadas a bajas dosis, 1 Gy, crece un 200%, respecto del primer valor medido, mientras que a dosis mayores, 20 Gy, crece un 20%. Sin embargo nosotros hemos encontrado, figura 6.1, que a bajas dosis, 2 Gy, el crecimiento porcentual de la DO es pequeño (aproximadamente 3 %) y éste depende de la dosis. Segundo, la mayoría de los investigadores [Ali, 2003; Nir, 1998, Mei, 1996] reporta un porcentaje de crecimiento de la DO de alrededor del

18% en las primeras 48 horas, sin señalar a qué dosis o si esto es un promedio del estudio de varias dosis aplicadas a las PTR. De nuevo, nosotros encontramos que el crecimiento de la DO durante las primeras 72 horas depende considerablemente de la dosis aplicada a la película, figura 6.1, incluso para película HD-810, por lo que si hablamos del crecimiento porcentual de la DO durante las primeras horas debemos mencionar necesariamente a qué dosis, de acuerdo con lo encontrado en esta tesis.

Observemos ahora el comportamiento de la densidad óptica en función del tiempo de lectura en la película HD-810 irradiada a 600 Gy, gráficas 5.24, 5.25 y 5.26. Como se ve, para esta película la tendencia de la curva de DO es distinta a la de las demás. En ésta no existe un incremento grande gradual durante las primeras 72 horas y tampoco se observa el crecimiento asintótico en la densidad óptica. En un principio se pensó que el comportamiento de la DO con respecto al tiempo, para esta película, era caótico. Sin embargo, un estudio posterior mucho más cuidadoso (ver cap. 4 sección 4.2 num. 5), se observó que no existen fluctuaciones en el espectro de absorción de las películas HD-810 a esta dosis, de acuerdo con la comparación realizada, durante cada lectura, con el espectro de un cristal de cuarzo, (ver gráficas 5.27 y 5.28 sección 5.1). Esto se llevó a cabo con un espectrofotómetro nuevo (espectrofotómetro 3) y con el densitómetro. Los resultados muestran que la densidad óptica en función del tiempo de lectura, sigue una tendencia particular para esta película y a esta dosis. Inicia con valores aleatorios sobre una línea imaginaria en las primeras horas, y tiende a un valor particular específico en las horas posteriores. Un estudio de la dispersión porcentual ( $\text{dispersión porcentual} = (\sigma/\text{promedio}) \times 100$ ) de la densidad óptica en esta película y a esta dosis, nos da valores de 10, 7.3, 7 y 9 % de dispersión a  $3\sigma$ , para las gráficas 5.24, 5.25, 5.27 y 5.28, respectivamente. El mismo estudio aplicado a la última fase del crecimiento de la DO, para la película MD-55-2 irradiada a 20 Gy estudiada en el densitómetro, nos da el valor de 8 % de dispersión a  $3\sigma$ . En la tabla 6.2 se muestran los valores de la dispersión porcentual para las gráficas del capítulo 5. En ésta se observa que los valores de dispersión porcentual no difieren mucho entre ambas películas.

Esto induce a pensar que, si bien la DO de la película HD-810 irradiada a 600 Gy, no muestra el crecimiento gradual inicial (mostrado para las demás dosis y en la película MD-55-2), en las primeras 72 horas, sí muestra un comportamiento oscilatorio inicial dentro de estas 72 horas y

posteriormente la amplitud de la oscilación empieza a disminuir tendiendo a un valor más estable, mostrando porcentajes de dispersión, en la etapa de “estabilidad”, con respecto a un valor promedio, no mayor que los porcentajes de dispersión observados en las películas HD-810 irradiadas a las demás dosis y en la película MD-55-2, en la etapa final (de estabilidad) de las lecturas. Estas observaciones nos hacen descartar el comportamiento caótico inicialmente supuesto.

**Tabla 6.2. Valores de la dispersión de la densidad óptica para cada aparato y para cada dosis**

Tipo de película	Dosis (Gy)	Lector	(Dispersión %) $\times$ 3
MD-55-2	2	Densitómetro	6
MD-55-2	2	Espec. 1	8
MD-55-2	2	Espec. 2	4
MD-55-2	2	Escáner	9
MD-55-2	20	Densitómetro	8
MD-55-2	20	Espec. 2	5
MD-55-2	20	Escáner	7
MD-55-2	60	Densitómetro	5.4
MD-55-2	60	Espec. 2	4
HD- 810	30	Densitómetro	6
HD- 810	30	Espec. 2	4
HD- 810	30	Escáner	5
HD- 810	600	Densitómetro	10
HD- 810	600	Espec. 2	7.3
HD- 810	600	Escáner	7.3
HD- 810*	600	Densitómetro	7
HD- 810*	600	Espec. 3	9

Espec. 1 = espectrofotómetro 1

Espec. 2 = espectrofotómetro 2

\*Tercer experimento

## 6.2 La densidad óptica en función del número de lecturas y del tiempo de almacenamiento

Parte del estudio consistió en observar si existe o no dependencia de la DO con el número de lecturas de DO hechas a las PTR, y con el tiempo de almacenamiento (TA). Para llevar a cabo esta tarea, se guardaron (como ya se especificó en la sección 4.2) películas MD-55-2 y HD-810, irradiadas a distintas dosis, en un gabinete a temperatura y humedad relativa ambientales. Estas se leyeron al final del experimento, aproximadamente 3 meses. El valor que se registró de la DO para ambas películas (irradiadas a diferentes dosis) es el que se muestra, junto al último punto de las distintas gráficas, en forma de cuadro y en color gris, para poder diferenciarlo. Por cuestiones de claridad se omite la incertidumbre de este punto, la cual es comparable a la incertidumbre del punto negro.

Como puede observarse claramente en ambas películas, irradiadas a diferentes dosis y evaluadas en todos los lectores, no hay dependencia de la densidad óptica DO con el número de lecturas realizadas ni con el tiempo de almacenamiento, puesto que el punto gris tiene aproximadamente el mismo valor que el punto en color negro al final de las lecturas normales repetidas muchas veces (dentro de los límites de error en la medida de cada lector). Recordemos que los puntos de color negro (en todos los lectores) corresponden al valor de la DO de las películas leídas regularmente. Sorprende el caso del escáner, pues existen diferencias de opinión entre distintos investigadores [Nir, 1998; But, 2003; Alv, 2002] sobre si la luz del escáner contiene componente ultravioleta (UV) o no. El escáner utiliza una lámpara fluorescente, cuya luz (capítulo 3) podría afectar gradualmente el valor de la DO de las PTR. Sin embargo, como se observa en todas las gráficas que corresponden al escáner (gráficas 5.4, 5.8, 5.12, 5.15, 5.19, 5.23, y 5.26), no existe un incremento de la DO por la componente UV, de acuerdo con la comparación entre películas leídas regularmente y películas almacenadas.

### 6.3 Cambios en la densidad óptica de las películas en función de la temperatura y humedad relativa

En esta parte se analiza el comportamiento de la densidad óptica de las películas Gafchromic en función de la humedad relativa y de la temperatura. En este estudio se usó, para leer la DO, el densitómetro. Es importante mencionar que este estudio no se llevó a cabo con todo rigor, pero se presenta aquí como complemento a las observaciones de las variables antes mencionadas.

En las gráficas, 5.29 a la 5.31, se puede observar el comportamiento de la DO como función de la humedad relativa, para MD-55-2 a dos dosis distintas y para HD-810 irradiada a 30 Gy. En estas gráficas se puede observar que existe muy poca variación de la DO, en función de la humedad relativa. Estas observaciones sólo las podemos hacer cualitativamente, ya que se están moviendo 3 variables al mismo tiempo: la humedad relativa, la temperatura y el en menor medida, el tiempo entre irradiación y lectura después de 72 horas, por lo que no se puede separar la variable humedad relativa. Los experimentos no fueron diseñados para medir las variaciones de la DO respecto de esta propiedad en las películas Gafchromic. En el caso de la película HD-810 irradiada a 600 Gy, gráfica 5.32, se observa una discrepancia con respecto a la tendencia de incremento de la DO respecto de la humedad relativa, y la variación es mucho más notable. Con excepción de la película HD-810 irradiada a 600 Gy, no parece que la densidad óptica en las películas Gafchromic dependa de la humedad relativa entre el 20 y el 55 %.

Por otro lado, existe la influencia de la temperatura sobre la DO. En las gráficas 5.33 a 5.35 se puede observar una pequeña tendencia de aumento de la DO con la temperatura, tanto para MD-55-2 como para HD-810 irradiada a 30 Gy. Por otro lado, nos encontramos de nuevo con el caso especial en la película HD-810 irradiada a 600 Gy, gráfica 5.36. En esta película la tendencia es a la inversa, esto es, la DO tiende a disminuir conforme aumenta la temperatura, comportamiento que es anómalo en relación con el comportamiento de la DO para la películas HD-810 irradiada a las demás dosis y con la película MD-55-2. Por lo que, con excepción de la película HD-810 irradiada a 600 Gy, se puede pensar, cualitativamente, que existe una tendencia general de aumento de la DO en relación con el aumento de temperatura en las películas Gafchromic, para un intervalo entre 22 y 28 °C.

Para un mayor entendimiento de las variaciones de la DO respecto de la temperatura y la humedad relativa, se tendrían que irradiar varias películas de un mismo tipo (sea HD-810 o MD-55-2) a una misma dosis y leerlas a diferentes valores de humedad relativa o de temperatura (manteniendo la otra variable constante), y al mismo tiempo. De esta forma sólo quedaría una variable libre.

## Capítulo 7

### Conclusiones

---

Con base en los experimentos realizados durante ocho meses y el análisis presentado en el capítulo 6, sobre las películas GafCromic MD-55-2 y HD-810, obtenemos las siguientes conclusiones.

Generalmente la estabilización de la densidad óptica de las películas ocurre 72 horas después de la irradiación. El valor inicial de la DO depende de la dosis aplicada y tende asintóticamente a un valor de saturación. Antes de las 72 horas la densidad óptica presenta un crecimiento grande y gradual, por lo que se recomienda leer las películas después de transcurrido este tiempo. En esta tesis se proponen 72 horas como tiempo de estabilización, TE, de las películas GafChromic MD-55-2 y HD-810.

La película HD-810 irradiada a 600 Gy presenta un comportamiento diferente en la estabilización de la densidad óptica, respecto del tiempo de lectura, en comparación con las irradiadas a las demás dosis y con la película MD-55-2. Sin embargo, se observó que esta película también se estabiliza después de 96 horas. Por lo que, igual que los otros casos, la lectura de la densidad óptica se recomienda para después de 72 horas de la irradiación. Proponemos que en un futuro se realice un estudio para encontrar la dosis a la que empieza a ocurrir un comportamiento distinto del asintótico.

No existe dependencia de la densidad óptica como función del número de lecturas o del tiempo de almacenamiento. Con esto se descarta, para los tres lectores, que haya influencia sobre la densidad óptica en las películas por causas del tipo de luz y por tanto del tipo de lámpara del lector. También se descartan influencias sobre la densidad óptica por causas de estrés mecánico en las películas (teniendo presente que siempre se manipularon con sumo cuidado).

Por último, aunque no se pudo realizar un estudio concluyente sobre la influencia de la temperatura y humedad relativa en la densidad óptica de películas irradiadas, cualitativamente se observó que generalmente la humedad relativa no afecta la densidad óptica de las películas. En cambio, se observó que sí existe influencia de la temperatura sobre la densidad óptica.

La película HD-810 presenta un comportamiento diferente en los valores de la densidad óptica en función de la humedad relativa y en función de la temperatura, en comparación con la misma película irradiada a las demás dosis y con la película MD-55-2. De nuevo, no se pudo realizar un estudio cuantitativo del fenómeno, pero sí se observan ciertas tendencias. Para esta película y a esta dosis, si hay un efecto de la humedad relativa sobre la densidad óptica y también existe un efecto de la temperatura, aunque el efecto es opuesto al efecto encontrado en las demás dosis.

Con estos breves comentarios se dan por cumplidos los objetivos de la tesis.



## REFERENCIAS.

- Ali, 2003** Ali L, Costescu c, M. Vicic, J. F. Dempsey, J. F. Williamson. Dependence of radiochromic film optical density postexposure kinetics on dose and dose fractionation. *Med. Phys.* **30-8** (2003).
- Alv, 2002** Alva Héctor. Mercado-Uribe H., Rodríguez M. The use of reflective scanner to study radiochromic film response, *Phys. Med. and Biology*, **47** (2002) 1-9.
- Att, 1986** Attix Frank H. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. Editorial: John Wiley & Sons. Capítulos: 3, 5, y 7. Impreso en Estados Unidos, 1986.
- Bro, 1998** Brown, LeMay. Química, la ciencia central.. Editorial Prentice Hall, impreso en México, 1998.
- But, 2003** Buston Martin J., Peter K.N. Yu, Tsang Cheung Radiochromic film for medical radiation dosimetry. *Materials Science and Engineering R*, **41** (2003) 61-120.
- Gar, 1979** García Cruz Luz María. Calibración de fuentes de cobalto 60 de alta intensidad por medio de un dosímetro químico. Tesis de licenciatura Fac. de Ciencias, UNAM, México, 1979.
- McL, 1988** McLaughlin W. L., Novel radiation dosimetry systems, *Proceedings of International Symposium*, Viena, STI/PUB/846, 1988, pp 3-27.
- McL, 1995** McLaughlin W. L., M A Alsheikhly. D. F. Lewis. Radiochromic Solid-State Polymerization Reaction. *Radiat. Prot. Dosim.* **66**, (1995) 263-268.
- Mdn, 2000** Manual del densitómetro, Nuclear Associates, Model 37-443-1 IM Rev. 3, Radiochromic Densitometer, 1999.
- Mei, 1996** Meigooni A. S. Dosimetric characteristics of an improved radiochromic film *Med. Phys.* **23** 1883-1888 (1996).

- Mer, 2004** Mercado-Uribe H., Brandan M. E., Thermoluminescent response of TLD-100 irradiated with 20 keV electrons and the use of radiochromic dye films for the fluence determination. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, **222** (2004) 201-212.
- Me1, 2000** Manual del espectrofotómetro 1, Compañía Elmer Coleman, Laboratorio de Dosimetría, Instituto de Física, UNAM, México, 2000.
- Me2, 2003** Manual del espectrofotómetro 2, Laboratorio del Acelerador Van de Graff de 2 MeV Instituto de Física UNAM, México, 2000.
- Me3, 2000** Manual del espectrofotómetro 3, Compañía ThermoSpectronic, Laboratorio de Física de Radiaciones, edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias UNAM, México, 2000.
- Nir, 1998** Niroomand-Rad Azam, Charles R. Blackwell, Bert M, Coursey. Radiochromic film dosimetry: Recommendations of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 55. *Med. Phys.***25**, (1998) 2093-2115.
- Ric ,2001** Jorge Rickards. La física de las radiaciones en materia. UNAM, México 2001.
- Roa, 2003** Roa Solís Jazmín. Implementación del método de doble exposición para películas de tinte Radiocrómico: aplicaciones en radiocirugía. Tesis de Licenciatura, Fac. de Ciencias, UNAM, México 2003.
- Rob, 2000** Robledo Rebolledo Rogelio. Respuesta de películas de tinte radiocrómico a la irradiación con partículas cargadas pesadas, Tesis de licenciatura, Fac. de Ciencias, UNAM, México, 2000.
- Rod, 2001** Rodríguez Laguna Alejandro. Diseño, construcción y caracterización dosimétrica de un irradiador de bajas dosis para muestras biológicas. Tesis de licenciatura, Fac. de Ciencias, UNAM, México, 2001.