

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTUDIO DE LA GENERACIÓN DE BANDAS DE
INTERFERENCIA DE FABRY-PEROT EN LAS PELÍCULAS
RADIOCRÓMICAS EBT3**

Nombre del alumno

DIEGO DE LA CRUZ PÉREZ

Director de tesis

Dr. JORGE OROZCO VELAZCO

Asesor externo

Dr. MIGUEL ÁNGEL CAMACHO LÓPEZ

Toluca, Estado de México, 2017

A mis padres por su esfuerzo y amor,
a mis hermanos por el apoyo,
a mis sobrinos por las alegrías compartidas.

Índice general

1. Resumen y Objetivos	7
1.1. Resumen	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo general	8
1.2.2. Objetivos específicos	8
2. Introducción y Antecedentes	9
2.1. Introducción	9
2.1.1. Parámetros Físicos	9
2.1.1.1. Intensidad	9
2.1.1.2. Transmitancia	9
2.1.1.3. Absorbancia	11
2.1.1.4. Espectro de absorción	11
2.1.1.5. Reflectancia	12
2.1.1.6. Espectro de reflexión	12
2.1.1.7. Interferencia	12
2.1.2. Interferómetro de Fabry-Perot	14
2.1.3. Películas radiocrómicas	16
2.1.3.1. Respuesta de la película radiocrómica a la radiación ionizante	16
2.2. Antecedentes	18
3. Materiales y Metodología	21
3.1. Películas radiocrómicas EBT3	21
3.2. Espectros de absorción neta medida	21
3.3. Espectro de absorción neta calculado	22
3.3.1. Medición de la reflectancia	22
3.3.2. Análisis teórico	23

3.3.2.1.	Placas plano paralelas	23
3.3.2.2.	Películas delgadas	24
3.3.2.3.	Rayos múltiples en placas plano paralelas . .	26
4.	Resultados y discusión	31
4.1.	Resultados	31
4.2.	Discusión	37
5.	Conclusiones	38
5.1.	Conclusiones	38
6.	BIBLIOGRAFÍA	39

Índice de figuras

2.1.	Esquema de transmitancia de la luz a través de la PR EBT3 .	10
2.2.	Esquema de la interferencia constructiva y destructiva debida a la superposición de ondas	13
2.3.	Esquema de interferencia en una pantalla	13
2.4.	Esquema del interferómetro de Fabry-Perot	15
2.5.	Esquema de la estructura de la PR EBT3 (Ashland INC.) . .	17
2.6.	Cambio en la coloración de la película debido a la polimerización desencadenado por la radiación	17
2.7.	Espectros de absorción neta EBT2 y EBT3	20
3.1.	muestra de la PR BET3 de 3 x 3 cm	21
3.2.	Espectrofotómetro UV/VIS	22
3.3.	Medición del espectro de absorción con el espectrofotómetro UV/VIS	22
3.4.	Arreglo experimental fuente, película y detector.	23
3.5.	Placas plano paralelas	24
3.6.	25
3.7.	Reflexión en películas delgadas	26
3.8.	27
4.1.	Espectro de absorción neta de las PR EBT3	32
4.2.	Espectro de absorción neta de las PR EBT2	32
4.3.	Absorción neta en el intervalo de 400 a 500 nm PR EBT 3 . .	33
4.4.	Absorción neta de 400 a 500 nm PR EBT 2	33
4.5.	Espectros teórico y experimental 0.5 Gy	34
4.6.	Espectros teórico y experimental 1 Gy	35
4.7.	Espectros teórico y experimental 3 Gy	36
4.8.	Espectros teórico y experimental 5 Gy	36

6.1. 42

Capítulo 1

Resumen y Objetivos

1.1. Resumen

En los últimos años, el uso de las películas radiocrómicas (PR) se ha incrementado considerablemente, convirtiéndose en una herramienta importante en los tratamientos de radioterapia[1]. Las PR, han sido diseñadas para cubrir las necesidades dosimétricas tanto en la verificación de la dosis, como en los procedimientos de control de calidad[1,2,3,4]. Cuando las PR interactúan con la radiación ionizante presentan un cambio de color que se cuantifica con la magnitud física denominada **densidad óptica**. Por lo tanto, las PR requieren de un sistema óptico para leerlas[2,3,4].

De acuerdo con las características espectrales de la PR, para medir el cambio de color de la PR producido por la radiación ionizante se requiere de un sistema óptico (SO) que sea capaz de detectar longitudes de onda en la parte del espectro electromagnético que corresponde al visible, 390 nm – 780 nm [2,3,4]. Por esta razón, el estudio del espectro de absorción de las PR es un factor importante ya que favorece en la elección del mejor SO para su análisis, además de ayudar a desarrollar nuevos SO mejorados para ampliar el uso de la PR y sus aplicaciones en la clínica[2,3].

El espectro de absorción de la PR EBT3 presenta una banda principal centrada alrededor de 636 nm y una secundaria centrada alrededor de 585 nm. Estos picos también se observan en sus predecesoras, la PR EBT [2,3] y EBT2 [2,3]. Sin embargo, la posición de las bandas de absorción de la PR EBT3 no se conserva, a diferencia anteriores[1]. Además, en el intervalo de longitudes de onda de 400 nm a 540 nm presenta un comportamiento distinto

al de sus predecesoras [1] sugieren que este comportamiento podría ser un efecto de interferencia característico de un interferómetro de Fabry-Perot formada por la estructura simétrica de la PR EBT3[1].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar la generación de bandas de interferencia de Fabry-Perot en el espectro de absorción neta de las PR EBT3 para intervalo de longitudes de onda de 400 nm a 500 nm.

1.2.2. Objetivos específicos

- Medir los espectros de absorción neta de las PR EBT3 irradiadas entre 0 y 5 Gy para un intervalo de longitudes de onda de 400 a 700 nm.
- Generar las bandas de interferencia de Fabry-Perot utilizando el modelo teórico con una cavidad que contiene polidiacetyleno para un intervalo de longitudes de onda de 400 a 500 nm.
- Comparar las bandas de interferencia de Fabry-Perot y las bandas que presenta el espectro de absorción neta medido de las PR EBT3, para el intervalo de longitudes de onda de 400 nm a 500 nm.
- Determinar si las bandas que presenta el espectro de absorción neta de las PR EBT3 en el intervalo de longitudes de onda de 400 a 500 nm son bandas de interferencia o de absorción.

Capítulo 2

Introducción y Antecedentes

2.1. Introducción

2.1.1. Parámetros Físicos

2.1.1.1. Intensidad

La intensidad I se define como la cantidad de energía E que atraviesa un área *perpendicular* a la dirección del flujo de energía, en determinada unidad de tiempo[5,6].

$$I = \frac{c}{4\pi} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \langle E^2 \rangle, \quad (2.1)$$

donde:

c : constante de la velocidad de la luz en vacío.

ϵ : permitividad.

μ : permeabilidad.

\mathbf{E} : vector de campo eléctrico

2.1.1.2. Transmitancia

Cuando un haz de luz de intensidad I pasa a través de un medio absorbente que tiene espesor d se atenúa desde I_0 hasta I , como resultado de las interacciones entre los fotones de luz y los átomos del medio absorbente, como se muestra en la figura 2.1[5,6]. Por lo tanto, la transmitancia T se define como la fracción de la radiación incidente transmitida por el medio,

esto es [6]:

$$T = \frac{I}{I_0}, \quad (2.2)$$

Se acostumbra expresar la T como porcentaje, es decir[7]:

$$T(\%) = \frac{I}{I_0} * 100, \quad (2.3)$$

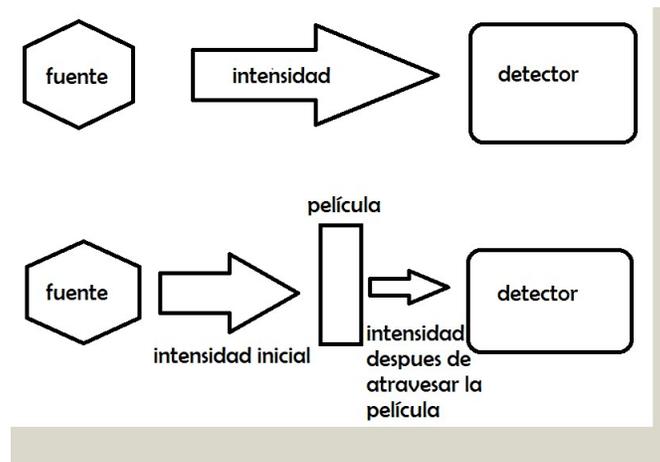


Figura 2.1: Esquema de transmitancia de la luz a través de la PR EBT3

2.1.1.3. Absorbancia

La absorbancia de un medio depende de la *concentración* y el *grosor* de la muestra y se define por la siguiente ecuación,[8]

$$A = -\log_{10}T, \quad (2.4)$$

Al contrario de la T , la A de un medio aumenta cuando se incrementa la atenuación del haz de radiación[6]. La relación entre la A y las intensidades I_0 e I está dada por:

$$A = \log_{10} \frac{I_0}{I}, \quad (2.5)$$

La absorbancia es proporcional al grosor y a la concentración de la muestra, contrario a la transmitancia, que varía exponencialmente con el grosor y la concentración[5,6].

A la absorbancia también se le conoce como *densidad óptica (DO)*. Se llama densidad óptica a la absorbancia para una longitud de onda determinada. Mientras más alta es la densidad óptica, más corta es la transmitancia. Por lo tanto, la DO en términos de las intensidades se expresa como sigue [9]:

$$DO = -\log_{10}T = \log_{10} \frac{I_0}{I}, \quad (2.6)$$

2.1.1.4. Espectro de absorción

Cuando la radiación atraviesa una capa de un sólido, líquido o gas, es posible eliminar en forma selectiva ciertas frecuencias mediante absorción, un proceso en el cual la energía electromagnética se transfiere a los átomos, iones o moléculas que forman la muestra[8.9]. La absorción impulsa a estas moléculas desde su estado fundamental a un estado excitado de energía superior. Para que haya absorción de radiación, la energía del fotón excitador debe corresponder exactamente con la diferencia de energía entre el estado inicial (fundamental) y el estado final (excitado) de la especie absorbente. Como estas diferencias de energías son únicas para cada átomo, el estudio de las longitudes de onda (o frecuencias) de la radiación absorbida proporciona un medio para caracterizar los constituyentes de una muestra de materia[9]. Con este objetivo, se determina de manera experimental una gráfica de la absorbancia (o densidad óptica) en función de la longitud de onda o de la frecuencia. Esta gráfica se denomina *espectro de absorción*[3,4,8].

2.1.1.5. Reflectancia

La reflectancia mide el porcentaje de radiación que no logra entrar a un material y es reflejado por su superficie, es cuantificable por medio de las intensidades reflejada I_r e incidente I_0 [5,6,7]:

$$r = \frac{I_r}{I_0}. \quad (2.7)$$

Cuando una onda plana incide en el limite entre dos medios con propiedades ópticas diferentes, esta se divide en dos: una onda transmitida procedente del primer medio (que se propagara en el segundo medio) y una onda reflejada que se propaga en el mismo medio (medio 1)[6].

2.1.1.6. Espectro de reflexión

La espectroscopia de reflexión es usada particularmente en muestras solidas, es usada para análisis cualitativos o cuantitativos, el espectro de reflexión posee una apariencia similar al de absorción[9]. La espectroscopia de reflexión interna nos ayudara a obtener el espectro para películas de polímeros[8,9]. Si un rayo de luz pasa de un medio a otro con distinta densidad se produce reflexión. Entre mayor sea el angulo incidencia mayor sera la reflexión. Al sobre pasar el angulo critico, se da un fenómeno de reflexión completa[5,6].

Los dos aspectos a considerar en la reflectacia son la dirección de la onda incidente y la de la onda reflejada, pero podemos hacer un promedio de las ondas reflejadas para generar curvas en función de la longitud de onda incidente, lo cual se conoce como espectro de reflexión[9].

El espectrofotómetro mide la cantidad proporcional de luz que refleja una superficie respecto a otra de referencia, como una función de la longitud de onda, lo que produce el espectro de reflectancia[9].

2.1.1.7. Interferencia

Cuando dos ondas de la misma frecuencia y amplitud se superponen en un punto del espacio ocurre un fenómeno llamado *interferencia*. Si las ondas se encuentran en fase se trata de una interferencia constructiva y la onda resultante tendrá el doble de la amplitud y la intensidad será cuatro veces mayor. Por el contrario, si las ondas están en oposición de fase, la amplitud y la intensidad serán de cero y hablamos de una interferencia destructiva (ver figura 2.2) [5,6,7].

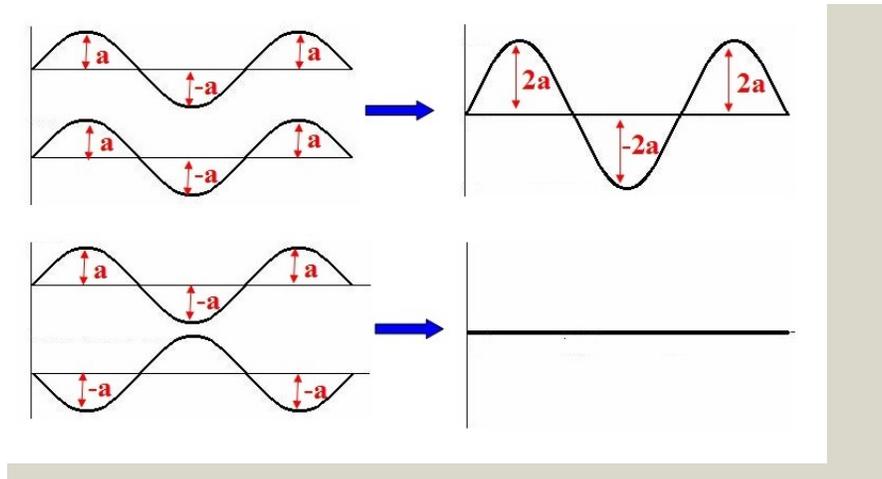


Figura 2.2: Esquema de la interferencia constructiva y destructiva debida a la superposición de ondas

Al superponer dos haces de luz sobre una pantalla se observan zonas de escasa o intensa iluminación, es decir, la energía se conserva globalmente pero se redistribuye en la región donde se superponen, estas regiones “claras” y “oscuras” se presentan con cierta periodicidad. Este fenómeno se conoce como *bandas de interferencia* (ver figura 2.3) [5,6,7].

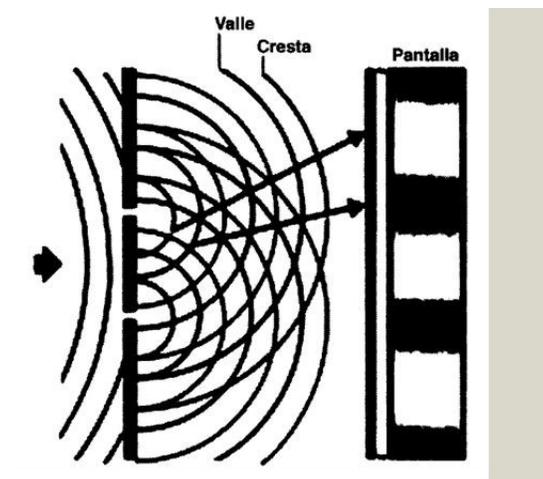


Figura 2.3: Esquema de interferencia en una pantalla

La interferencia total de dos ondas es:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (2.8)$$

es fácil ver que la intensidad máxima es:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}, \quad (2.9)$$

cuando:

$$|\delta| = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$$

y la intensidad mínima es:

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2}, \quad (2.10)$$

cuando:

$$|\delta| = \pi, 3\pi, \dots$$

En el caso donde $I_1 = I_2$ la ec.(2.8) se reduce a[5,6,7]:

$$I = 4I_1 \cos^2 \frac{\delta}{2}. \quad (2.11)$$

2.1.2. Interferómetro de Fabry-Perot

La figura 2.4 muestra un interferómetro de Fabry-Perot, el cual consiste en una cavidad llena de aire u otro medio, limitada por dos superficies de alta reflectancia que dejan pasar una cierta cantidad de luz por transmisión. La interferencia se produce debido a que se genera una diferencia de camino óptico entre los haces transmitido y reflejado doblemente en ambas caras de la superficie que limita la cavidad del interferómetro. El camino óptico es la distancia recorrida por los haces dentro del medio[6,8].

La diferencia de fase de las ondas que interfieren están dadas por:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nt \cos \theta. \quad (2.12)$$

donde n es el índice de refracción, t es el espesor de la lamina (película), θ es el ángulo de propagación de la onda y λ es la longitud de onda [5,6,7].

Por otro lado la reflectancia de estas láminas está dada por la siguiente expresión:

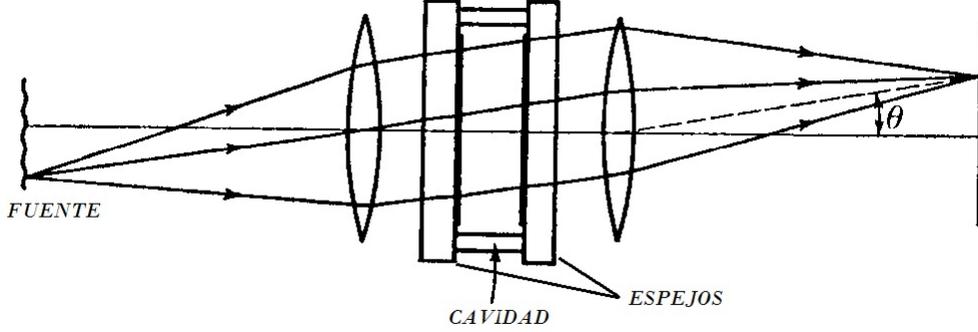


Figura 2.4: Esquema del interferómetro de Fabry-Perot

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{4R_1 \sin^2 \frac{\delta}{2}}{(1 - R_1)^2 + 4R_1 \sin^2 \frac{\delta}{2}} = \frac{F \sin^2 \frac{\delta}{2}}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (2.13)$$

y la transmitancia de la lámina queda expresada como:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{T_1^2}{(1 - R_1)^2 + 4R_1 \sin^2 \frac{\delta}{2}} = \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}. \quad (2.14)$$

Estas dos ecuaciones (2.13 y 2.14), reciben el nombre de *fórmulas de Airy* [6,7], donde $F = \frac{4R_1}{(1-R_1)^2}$, R_1 y T_1 son la reflectancia y transmitancia de una cara cuando los rayos entran en la lámina y cumplen con la siguiente condición[6].

$$R_1 + T_1 = 1. \quad (2.15)$$

Debemos considerar que la transmitancia y la reflectancia no son los únicos fenómenos que ocurren en las caras de las películas, la absorción es otro fenómeno que debemos considerar. Esta es la parte de la onda que no logra pasar átraves del material ni reflejarse, sino que deposita su energía en él[6,7].

Se debe tomar en cuenta todos los fenómenos para cumplir con el principio de conservación de energía, la energía total es la suma de las fracciones de energía, la parte de luz que nunca entro a la película (Reflexión), la fracción que se deposito en las caras de la película (Absorción) y la parte que logro atravesar la película (Transmitancia)[7]. Esto es:

$$R_1 + T_1 + A_1 = 1. \quad (2.16)$$

Entonces la intensidad de la transmitancia queda de la siguiente forma:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \left(1 - \frac{A_1}{1 - R_1}\right)^2 \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}. \quad (2.17)$$

La ecuación (2.17) es el modelo matemático de las *bandas de interferencia de Fabry-Perot*.

2.1.3. Películas radiocrómicas

Las películas radiocrómicas (PR) son detectores de radiación utilizados en dosimetría clínica para el cálculo de la dosis impartida en un tratamiento de radioterapia y procedimientos de control de calidad de los equipos [3,4]. En los últimos años se han introducido al mercado varios modelos de PR, cambiando la composición de la capa activa, la sensibilidad y/o su estructura, con la finalidad de otorgarle las características necesarias para una mayor precisión en la determinación de la dosis [1,8,10]. A finales del 2011, se lanzó al mercado el modelo de PR EBT3, la cual presenta una estructura simétrica, formada por una sola capa activa con un espesor de 28 a 30 μm entre dos capas de poliéster transparente de 120 μm de espesor cada una, como lo muestra la figura 2. [1,10]. La capa activa de la PR EBT3 es básicamente un polidiacetileno, con la siguiente composición: Hidrógeno (56.8%), Carbono (27.6%), Oxígeno (13.3%), Aluminio (1.6%) y Litio (0.6%), [1,4,10]. Por lo tanto, la PR EBT3 está diseñada para utilizarse en un amplio intervalo de dosis muy útil en aplicaciones clínicas, cuando se analiza con un escáner comercial, empleando los tres canales de color, rojo, verde y azul. Esto es posible debido a las características espectrales de la capa activa de las PR EBT3 en el intervalo de longitudes de onda del visible [1,11,12].

2.1.3.1. Respuesta de la película radiocrómica a la radiación ionizante

Se denomina radiación ionizante al intercambio de energía que rompe enlaces y produce pares iónicos. El valor de la energía de ionización depende de la naturaleza del átomo o molécula, [11,12,13]. Cuando hablamos de radiación ionizante se deben tomar en cuenta dos aspectos de suma relevancia



Figura 2.5: Esquema de la estructura de la PR EBT3 (Ashland INC.)

la penetración de esta sobre la materia y el depósito de energía. La radiación ionizante se divide en partículas cargadas y partículas sin carga. Las partículas cargadas se clasifican en pesadas (partículas α , protones e iones pesados energéticos) y no pesadas (electrones). Las partículas sin carga hacen referencia a la radiación electromagnética (rayos X , γ) y a los neutrones[9,11,13].

En la medición de la dosis, las magnitudes físicas de interés son la fluencia y la dosis absorbida. La fluencia es la cantidad de partículas que atraviesan una unidad de área, mientras que la dosis absorbida corresponde a la energía absorbida por unidad de masa[9].

El principio físico de las PR se basa en una polimerización parcial de los monómeros de la capa activa cuando se expone a la radiación, manifestándose como un cambio de color visible. Este cambio de color visible se cuantifica por medio de la densidad óptica. Por lo tanto, se dice que la respuesta de la PR se caracteriza por medio de la densidad óptica[3,4,8].

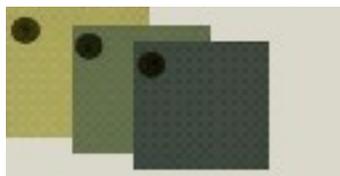


Figura 2.6: Cambio en la coloración de la película debido a la polimerización desencadenado por la radiación

2.2. Antecedentes

Al interaccionar la radiación con películas de tinte radiocrómico, se da un proceso de polarización conocido como radiocrómismo. En 1826 Niepce observo este fenómeno por vez primera bajo otras condiciones. El termino película radiocrómica se empezó a usar en 1965, con aplicaciones a la industria. Es en 1980 cuando se aplica a medicina. En 2005 se da a conocer la película radiocrómica Gafchromic EBT, con el tiempo su evolución[4].

Las películas son detectores muy usados en clínica por su simplicidad, sensibilidad, alta resolución espacial y baja dependencia con la energía. En 2003 Butson et.al en su artículo Radiochromic film for medical radiation dosimetry, habla de las ventajas de usar estos detectores en medicina, alguna de sus carencias y se inicia el camino en busca del detector "ideal". Butson en 2005 en el trabajo Absorption spectra variations of EBT radiochromic film from radiation exposure, presenta un análisis de estos detectores sus resultados muestran dos picos en el espectro de absorción localizados en 636 nm y 585 nm, hace la comparación con otras películas radiocrómicas como las MD-55 y HS, que presentan picos de absorción en 676 nm y 671 nm respectivamente. Butson hace un nuevo análisis de estas películas en 2009 con una versión más reciente de la EBT, la EBT2, Dose and absorption spectra response of EBT2 Gafchromic film to high energy x-rays es el nombre de la publicación donde se comparan los espectros de absorción de ambas películas (EBT y EBT2), reportan un cambio visible en el color debido a la presencia de un colorante, se produce un cambio en el espectro debido a la estructura física del sustrato, los espectros de absorción neta son similares[4].

Por otra parte Devic en sus artículos Dosimetric properties of improved GafChromic films for seven different digitizers (2004) y Precise radiochromic film dosimetry using a flat-bed document scanner, realizó estudios sobre las películas modelo HS diseñada especialmente para fotones de alta energía (mayores a 1 MeV) y el modelo XR-T para fotones de baja energía (0.1 MeV), En sus resultados muestra que existen errores y limitaciones asociados a los sistemas de lectura. Propone un protocolo para la lectura de películas en escáner de cama plana, con la finalidad de reducir las incertidumbres, para el caso de la PR EBT, la incertidumbre reportada siguiendo el protocolo es de 2%. En el trabajo Absorption spectroscopy of EBT model GAFCHROMICTM film (2006), Devic muestra que el espectro de absorción no son solo dos bandas si que en realidad esta compuesta de 8 bandas mediante funciones de Lorentz se pueden obtener[2,3].

En 2016 León-Marroquín et.al, presentaron el estudio del espectro de absorción neta de la película radiocrómica EBT3, que mantuvo la misma composición que sus predecesoras, la principal modificación fue hecha a su estructura que ahora es simétrica. Esto se reflejada en el espectro de absorción neta pues aparecen bandas extras a la de los espectros de la EBT y EBT2, las bandas no mantienen su posición y al descomponerla en funciones de Lorentz aparecen 11 bandas tres más que en sus predecesoras. León-Marroquín propone la posibilidad que la estructura de la película radiocrómica forme una cavidad de Fabry-Perot, esto podría explicar la presencia de las bandas extras[1].

En las figuras se muestran los espectros de películas radiocromicas EBT2 irradiadas a las mismas dosis, para películas radiocromicas EBT3, en los espectros reportados para la EBT2 se puede ver que la banda central no presenta un corrimiento en la posición unicamente la absorción aumenta conforme la dosis a la que es irradiada es mayor, contrario a lo que se observa en el espectro de las EBT3 donde se nota un ligero corrimiento de la banda central hacia la izquierda a medida de que la dosis aumenta. La siguiente región de interés es la que comprende los 400 a 500 nm, donde se observan comportamientos muy distintos, mientras que en la EBT 3, se observan claramente picos son forma senosoidal, en las EBT 2[1,8].

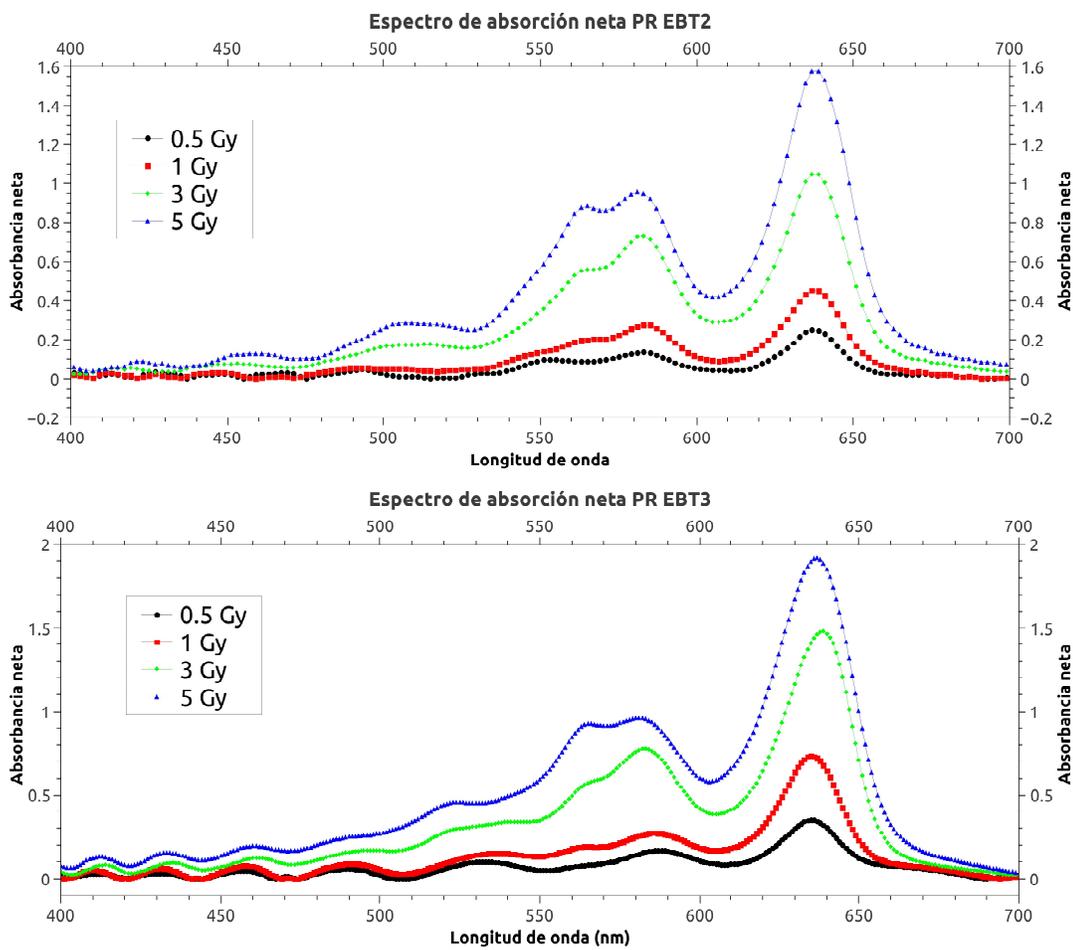


Figura 2.7: Espectros de absorción neta EBT2 y EBT3

Capítulo 3

Materiales y Metodología

3.1. Películas radiocrómicas EBT3

En el proceso se usaron películas radiocrómicas irradiadas entre 0 y 5 GY.



Figura 3.1: muestra de la PR BET3 de 3 x 3 cm

3.2. Espectros de absorción neta medida

El espectro de absorción neta de la PR EBT3 irradiada con rayos X de 6 MV se obtuvo utilizando un espectrofotómetro UV/VIS de doble haz marca PerkinElmer modelo Lambda 650.

El espectro de absorción neta se midió en un intervalo de longitudes de onda de 400 a 700 nm (visible y parte del infrarrojo) en pasos de 1 nm. El espectro de absorción neta no toma en cuenta la absorción intrínseca de la PR, dando solo la absorción inducida debido a la polimerización de la capa activa. Para estabilizar al sistema se puso en funcionamiento 30 minutos antes de la irradiación.



Figura 3.2: Espectrofotómetro UV/VIS



Figura 3.3: Medición del espectro de absorción con el espectrofotómetro UV/VIS

3.3. Espectro de absorción neta calculado

3.3.1. Medición de la reflectancia

Para tener un mejor análisis teórico se realizó la medición de un espectro de reflectancia, con la finalidad de eliminar posibles errores, fluctuaciones, o cualquier otro tipo de ruido derivado del experimento.

Se uso un intervalo de onda de 1 nm, será tomado de 400 nm a 700 nm. Para fraccionar la luz en los distintos intervalos, se hizo pasar la luz blanca a través de un dispositivo monocromático. Para calibrar el espectrofotómetro se uso un espejo de plata con una reflexion de casi el 100 %. Para estabilizar la lámpara de dejo calentar 10 minutos aproximadamente, el uso de cables de

fibra óptica redujo la pérdida en la intensidad de luz de la lámpara al espejo de plata. Una vez tomados los valores de referencia se retiró el espejo de plata y se montó en su lugar una película radicrómica EBT3. La reflectancia se expresó como fracción entre 0 y 1. Los valores obtenidos son relativos y para muestras sin fluorescencia, el valor es independiente de la cantidad de luz y de la calidad de la fuente.

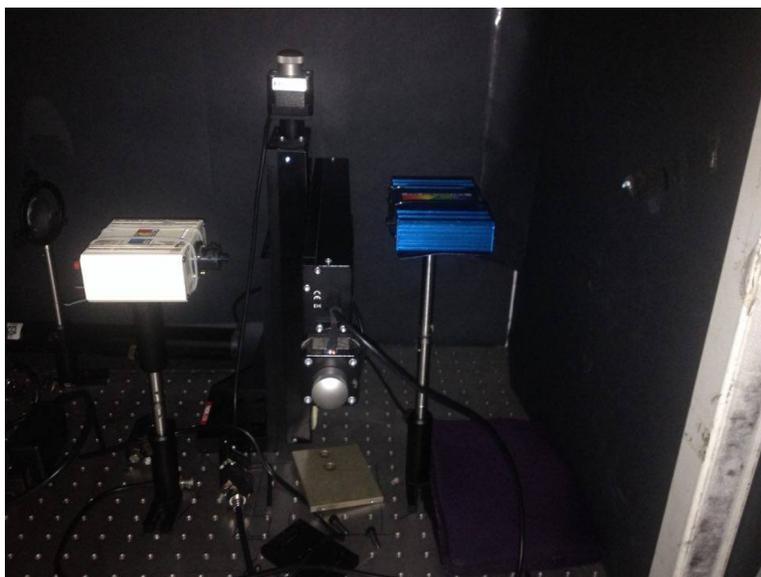


Figura 3.4: Arreglo experimental fuente, película y detector.

3.3.2. Análisis teórico

3.3.2.1. Placas plano paralelas

Cuando una placa paralela plana transparente es iluminada por una fuente puntual S , siempre existirá un punto P sin importar la posición de este, que será alcanzado por dos rayos provenientes de S , el primero reflejado en la parte superior de la placa y el segundo en la parte inferior (ver figura 3.3)[5,6]. Las franjas son circulares y se sitúan alrededor de la normal SN en el eje de la placa. La diferencia de camino óptico es[6]:

$$\Delta\phi = n'(AB + BC) - nAN, \quad (3.1)$$

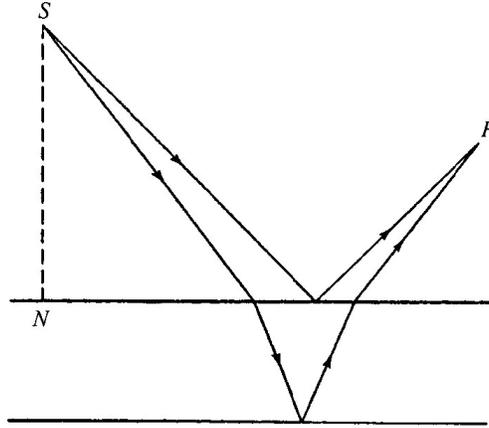


Figura 3.5: Placas plano paralelas

donde n' y n son los índices de refracción de la placa y el medio que lo rodea, N es perpendicular a C en la dirección AD . h es el espesor de la placa y θ , θ' son los ángulos de incidencia y refracción[6]

$$AB = BC = \frac{h}{\cos \theta'}, \quad (3.2)$$

$$AN = AC \sin \theta = 2h \tan \theta' \sin \theta, \quad (3.3)$$

$$n' \sin \theta' = n \sin \theta. \quad (3.4)$$

usando las relaciones anteriores tenemos

$$\Delta\phi = 2n'h \cos \theta', \quad (3.5)$$

por lo que la diferencia de fase es[5,6],

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n'h \cos \theta', \quad (3.6)$$

3.3.2.2. Películas delgadas

Al usar películas transparentes y delgadas con superficies reflectantes, pero no necesariamente paralelas, son iluminadas por una fuente puntual S , dos rayos provenientes de S , que llamaremos SAP y $SBCDP$, coincidirán en

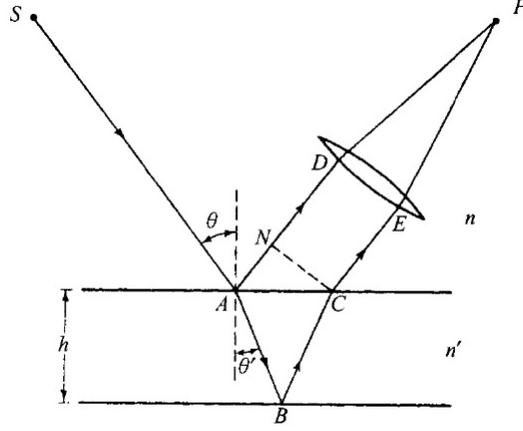


Figura 3.6:

un punto P del mismo lado de S . la diferencia de camino óptico de los rayos entre S y P es[5,6],

$$\Delta\phi = n(SB + DP - SA - AP) + n'(BC + CD), \quad (3.7)$$

donde n' y n son los índices de refracción de la placa y el medio que lo rodea

Calcular el valor del camino óptico puede complicarse, pero si la película es lo suficientemente delgada, como para que B , A y D , casi coincidan tendremos que[6,7],

$$nSA \sim nSB + n'BN_1, \quad (3.8a)$$

$$nA \sim nDP + n'N_2D, \quad (3.8b)$$

donde AN_1 y AN_2 son las perpendiculares a BC y CD , respectivamente

$$\Delta\phi \sim n'(N_1C + CN_2), \quad (3.9)$$

además si el ángulo entre las caras de la película es lo suficientemente pequeño

$$N_1C + CN_2 \sim N'_1C + CN'_2, \quad (3.10)$$

donde N'_1 y N'_2 son perpendiculares a BC y CD respectivamente en E , E es la intersección de la normal entre las caras de la película[6].

$$N'_1C = CN'_2 = h \cos \theta', \quad (3.11)$$

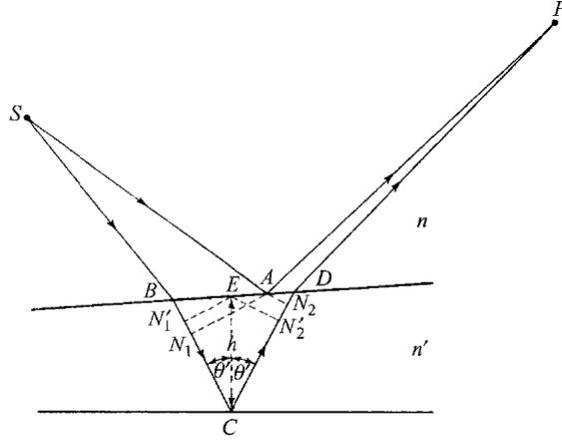


Figura 3.7: Reflexión en películas delgadas

donde $h = CE$ el espesor de la película, θ' es el ángulo de reflexión de la película, usando las ec. anteriores entonces podemos escribir a la diferencia camino óptico como[6,7].

$$\Delta\phi = 2n'h \cos \theta', \quad (3.12)$$

y la diferencia de fase en P ,

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n'h \cos \theta'. \quad (3.13)$$

3.3.2.3. Rayos múltiples en placas plano paralelas

Considerando una placa plana con índice de refracción n' , y un medio con índice de refracción n , se hace incidir un haz sobre la placa con un ángulo θ , la dirección del rayo es SB_1 . Al tocar la primer superficie el rayo se divide en dos uno reflejado en la dirección B_1C_1 y el otro transmitido en la dirección B_1D_1 , ahora el segundo rayo incide en la otra superficie de la placa con un ángulo θ' , lo que vuelve a dividir el rayo en uno transmitido hacia el interior de la placa en la dirección D_1B_2 y otro transmitido al exterior de la placa en la dirección D_1E_1 , este proceso se repite con cada rayo que inciden sobre la placa[5,6,7].

La amplitud del vector eléctrico de la onda que incide es $A^{(i)}$, suponiendo que esta polarizado linealmente paralela o perpendicular al plano de incidencia, $A^{(i)}$ es compleja y la fase es igual a la constante de la fase de la función de la onda[5,6].

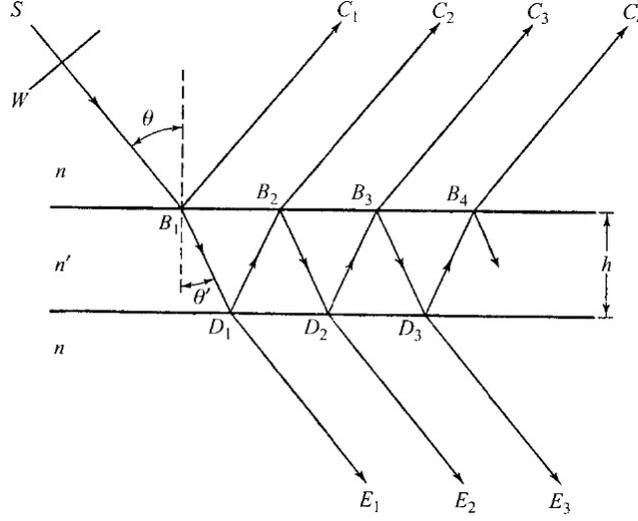


Figura 3.8:

Para el conjunto de ondas reflejadas o transmitidas, la parte variable de la fase en la función de onda diferirá del precedente en una cantidad que corresponderá al doble del recorrido de la placa, la diferencia de fase es[5,6]:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n' h \cos \theta,$$

Para una onda que viaja en un medio dentro de las placas, r es el coeficiente de reflexión y t el coeficiente de transmisión, r' y t' son los coeficientes que viajan de la placa a el medio que la rodea. Las amplitudes complejas de la ondas reflejas por la placa son[5,6],

$$rA^{(i)}, tt'r'A^{(i)}e^{i\delta}, tt'r'^3A^{(i)}e^{2i\delta}, \dots, tt'r'^{2(p-3)}A^{(i)}e^{i(p-1)\delta}, \dots \quad (3.14)$$

y las amplitudes transmitidas a través de la placa son,

$$tt'A^{(i)}, tt'r'^2A^{(i)}e^{i\delta}, tt'r'^4A^{(i)}e^{2i\delta}, \dots, tt'r'^{2(p-1)}A^{(i)}e^{i(p-1)\delta}, \dots \quad (3.15)$$

De acuerdo con las formulas de Fresnel las cantidades de r, r', t, t' , están dados en términos de n, n', θ, θ' . Usando las relación entre los términos, y las ecuaciones anteriores[6],

$$tt' = \mathcal{T}, \quad (3.16)$$

de manera similar

$$r = -r', \quad (3.17)$$

y

$$r^2 = r'^2 = \mathcal{R}, \quad (3.18)$$

donde \mathcal{R} y \mathcal{T} , son la reflectancia y la transmitancia en las caras de la placa respectivamente se relacionan de la siguiente manera[5,6,7],

$$\mathcal{R} + \mathcal{T} = 1, \quad (3.19)$$

suponiendo que las primeras ondas reflejadas p tendrán una amplitud

$$A^{(r)}(p) = \left\{ r + tt'r'e^{i\delta} \left(1 + r'^2 e^{i\delta} + \dots + r'^{2(p-2)} e^{i(p-2)\delta} \right) \right\} A^{(i)}, \quad (3.20a)$$

$$= \left\{ r + \left(\frac{1 - r'^{2(p-1)} e^{i(p-1)\delta}}{1 - r'^2 e^{i\delta}} \right) tt'r'e^{i\delta} \right\} A^{(i)}, \quad (3.20b)$$

si la placa es lo suficientemente larga, el número de ondas reflejadas sera muy grande entonces limite de $p \rightarrow \infty$ [6],

$$A^{(r)} \equiv A^r(\infty) = -\frac{r' \left\{ 1 - (r'^2 + tt') e^{i\delta} \right\}}{1 - r'^2 e^{i\delta}} A^{(i)}, \quad (3.21)$$

usando (3.16), (3.18) y (3.19),

$$A^{(r)} = \frac{(1 - e^{i\delta}) \sqrt{\mathcal{R}}}{1 - \mathcal{R} e^{i\delta}} A^{(i)}, \quad (3.22)$$

la intensidad reflejada $I^{(r)} = A^{(r)} A^{(r)*}$ es

$$I^{(r)} = \frac{(2 - 2 \cos \delta) \mathcal{R}}{1 + \mathcal{R}^2 - 2\mathcal{R} \cos \delta} I^{(i)} = \frac{4\mathcal{R} \operatorname{sen}^2 \frac{\delta}{2}}{(1 - \mathcal{R})^2 + 4\mathcal{R} \operatorname{sen}^2 \frac{\delta}{2}} I^{(i)}, \quad (3.23)$$

donde la intensidad incidente $I^{(i)} = A^{(i)} A^{(i)*}$

De la misma manera se puede obtener una expresión para la amplitud transmitida [5,6],

$$A^{(t)}(p) = tt' \left(1 + r'^2 e^{i\delta} + \dots + r'^{2(p-1)} e^{i(p-1)\delta} \right) A^{(i)}, \quad (3.24a)$$

$$= \left(\frac{1 - r'^{2p} e^{ip\delta}}{1 - r'^2 e^{i\delta}} \right) tt' A^{(i)}, \quad (3.24b)$$

en el limite $p \rightarrow \infty$,

$$A^{(t)} \equiv A^t(\infty) = \frac{tt'}{1 - r'^2 e^{i\delta}} A^{(i)}, \quad (3.25)$$

usando (3.16) y (3.18),

$$A^{(t)} = \frac{\mathcal{T}}{1 - \mathcal{R}e^{i\delta}} A^{(i)}, \quad (3.26)$$

la intensidad transmitida $I^{(t)} = A^{(t)} A^{(t)*}$ es

$$I^{(t)} = \frac{\mathcal{T}^2}{1 + \mathcal{R}^2 - 2\mathcal{R} \cos \delta} I^{(i)} = \frac{\mathcal{T}^2}{(1 - \mathcal{R})^2 + 4\mathcal{R} \sin^2 \frac{\delta}{2}} I^{(i)}, \quad (3.27)$$

Las ecuaciones (3.23) y (3.27) sse conocen como las fórmulas de Airy[5,6,7]. La distribución de intensidades reflejada y transmitida son:

$$\frac{I^{(r)}}{I^{(i)}} = \frac{F \sin^2 \frac{\delta}{2}}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (3.28a)$$

$$\frac{I^{(t)}}{I^{(i)}} = \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (3.28b)$$

donde el parámetro F se define como[6]:

$$F = \frac{4\mathcal{R}}{(1 - \mathcal{R})^2}, \quad (3.29)$$

Si la película tiene caras idénticas \mathcal{R} es la reflexión interna y la diferencia de fase δ se define[6]:

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda_0} n' h \cos \theta' + 2\phi, \quad (3.30)$$

donde ϕ es la fase que cambia con la reflexión interna[7]. Al considerar que en las caras de la película una fracción de la energía es retenida mediante un proceso de absorción de luz, siendo este un porcentaje considerable no se puede despreciar al hacer un buen análisis[8].

Entonces podemos escribir:

$$\mathcal{R} + \mathcal{T} + \mathcal{A} = 1, \quad (3.31)$$

donde \mathcal{A} es la fracción de las luz que se absorbe en las caras de la película Finalmente usando (3.27) y (3.29) obtenemos:

$$\frac{I^{(t)}}{I^{(i)}} = \left(1 - \frac{\mathcal{A}}{1 - \mathcal{R}}\right)^2 \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}}, \quad (3.32)$$

Reescribiendo esta ecuación a los parámetros definidos en el capítulo 2:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \left(1 - \frac{A_1}{1 - R_1}\right)^2 \frac{1}{1 + F \operatorname{sen}^2 \delta}, \quad (3.33)$$

A partir de esta ecuación y variando los parámetros se podrá hacer un ajuste teórico, donde se obtendrá una idea general del comportamiento del espectro, así también se verá la dependencia de los parámetros y cómo influyen en dicho comportamiento.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1. Resultados

En la figura 4.1 se muestra el espectro de absorción neta de las películas radiocromicas EBT3 irradiadas a 0.5 Gy, 1 Gy, 3 Gy y 5 Gy. El espectro se medio para el intervalo de longitudes de onda de 400 nm a 700nm, que en el espectro electromagnetico corresponde a la región del visible y parte del infrarojo. Podemos observar las dos bandas características de las PR EBT y EBT2, la más intensa centrada alrededor de 636 nm y la otra centrada alrededor de los 585 nm. Sin embargo, en la región comprendida entre los 400 nm y los 500 nm, región que corresponde al azul del espectro visible, el espectro de absorción neta de las PR EBT3 presenta bandas adicionales que no se observaban en el espectros de absorción neta de sus predecesoras (EBT y EBT2).

En la figura 4.2 se observan bandas que presentan los espectros de absorción neta de las PR EBT3 para el intervalo de longitudes de onda de interés, de 400 nm a 500 nm. Las bandas presentan un comportamiento bien definido para todas las dosis estudiadas. Además la absorbancia neta aumenta como una función de la dosis.

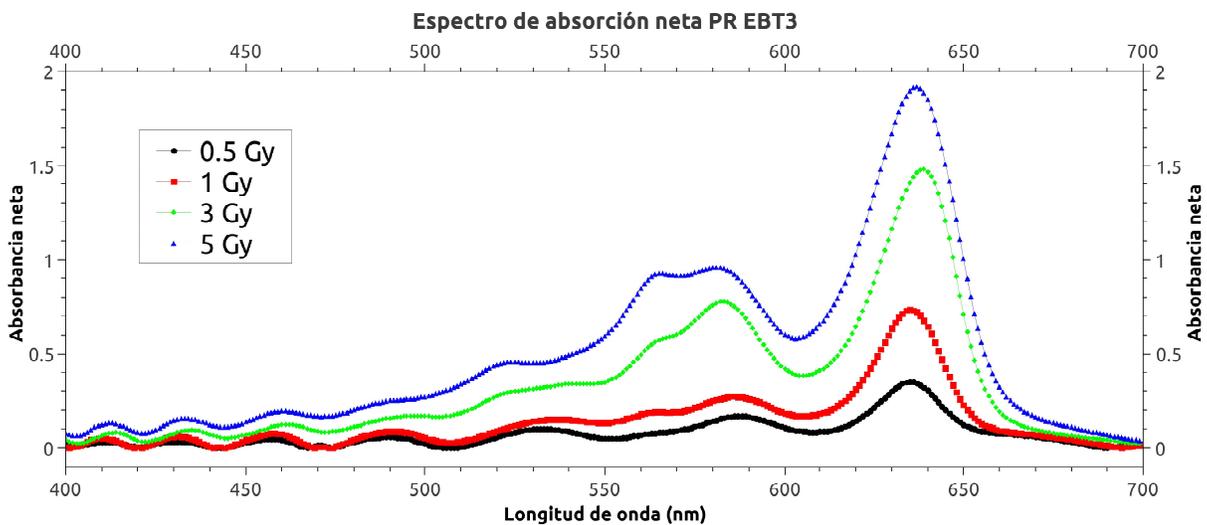


Figura 4.1: Espectro de absorción neta de las PR EBT3

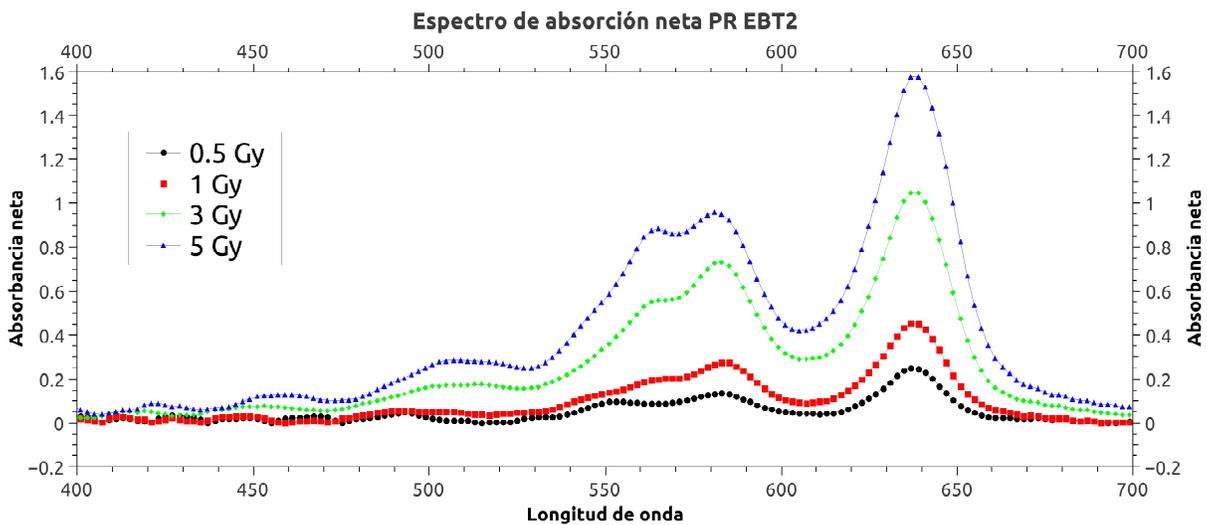


Figura 4.2: Espectro de absorción neta de las PR EBT2

Se presentan los espectros absorción neta medida y teórica (figuras 4.5 a 4.8), de películas radiocromicas EBT3 para la región de longitudes de onda que van de los 400 a 500 nm, irradiados a dosis entre 0.5 Gy y 5 Gy, se observa que el espectro de las películas presentan un comportamiento similar

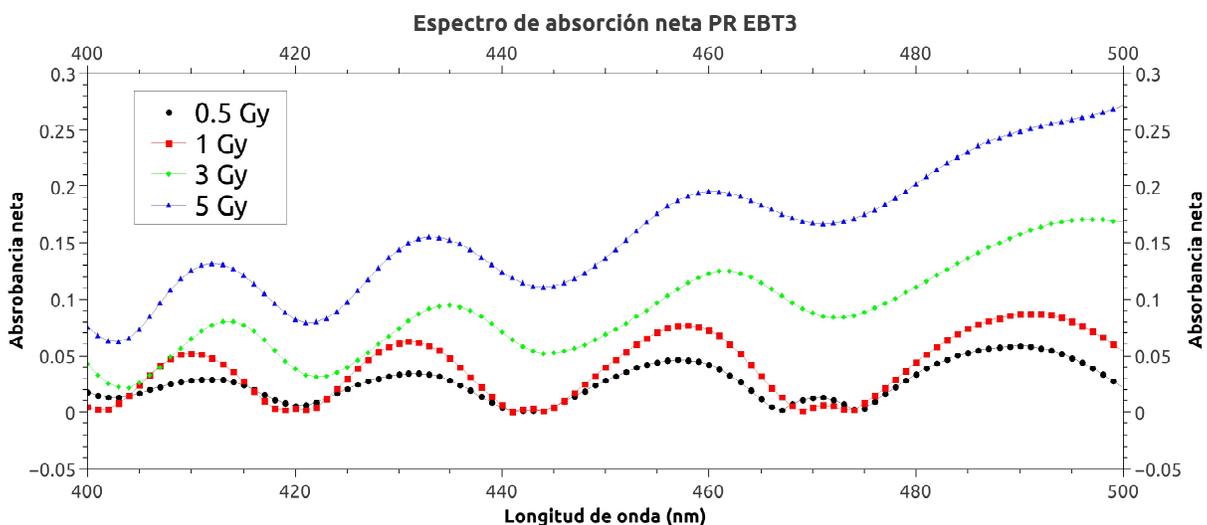


Figura 4.3: Absorción neta en el intervalo de 400 a 500 nm PR EBT 3

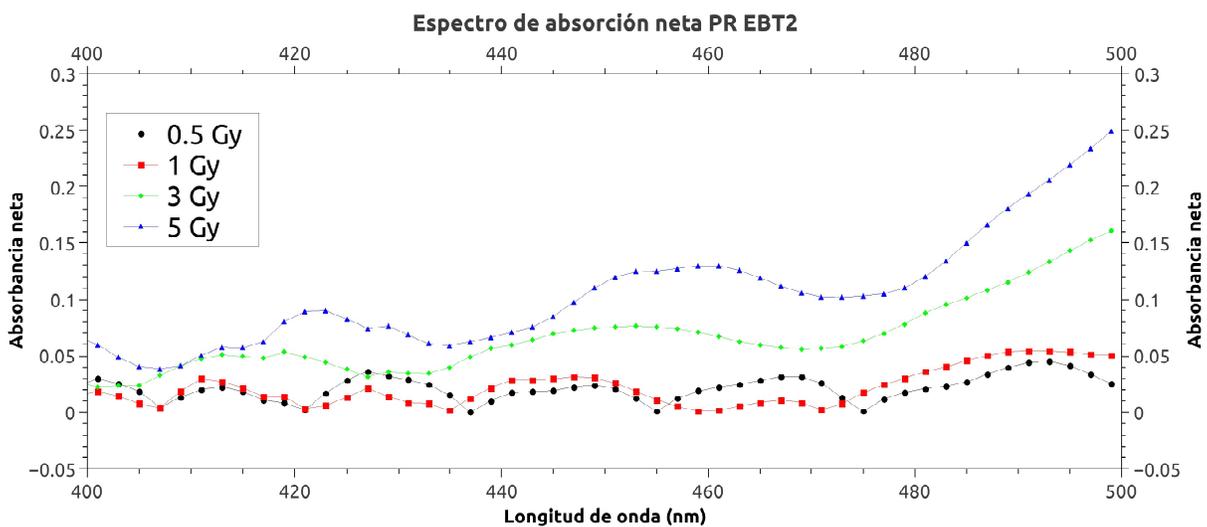


Figura 4.4: Absorción neta de 400 a 500 nm PR EBT 2

en comparación con el modelo para el espectro obtenido de una cavidad de Fabry-Perot.

En la figura 4.5 se muestra el espectro de absorción neta de una película radiocromica EBT3 irradiada a una dosis de 0.5 Gy, podemos observar que

las bandas teóricas son más altas que las bandas medidas experimentalmente, sin embargo se aprecia una clara correspondencia entre las posiciones de las bandas teóricas y experimentales.

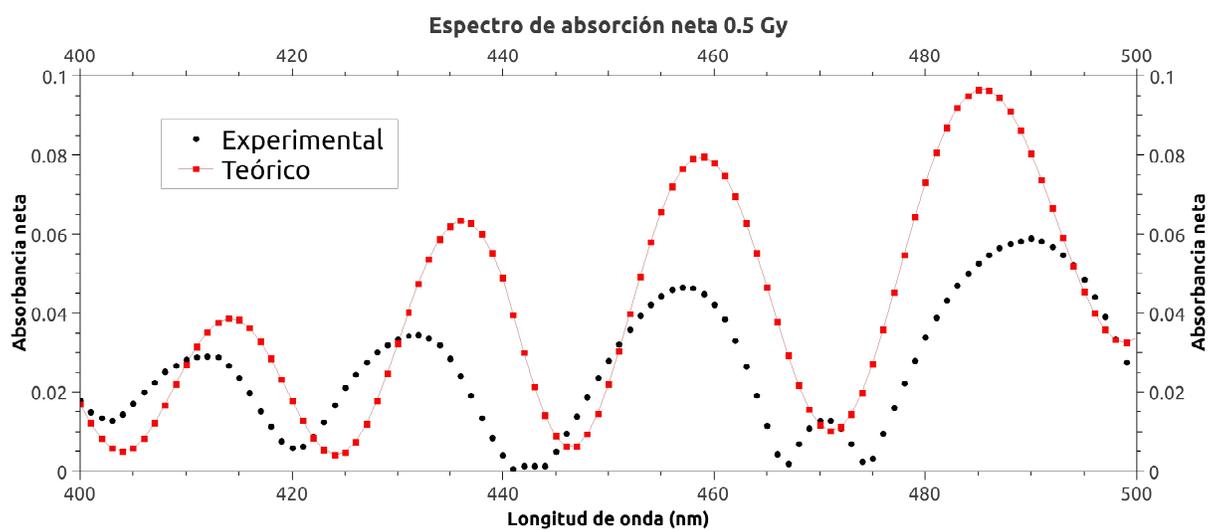


Figura 4.5: Espectros teórico y experimental 0.5 Gy

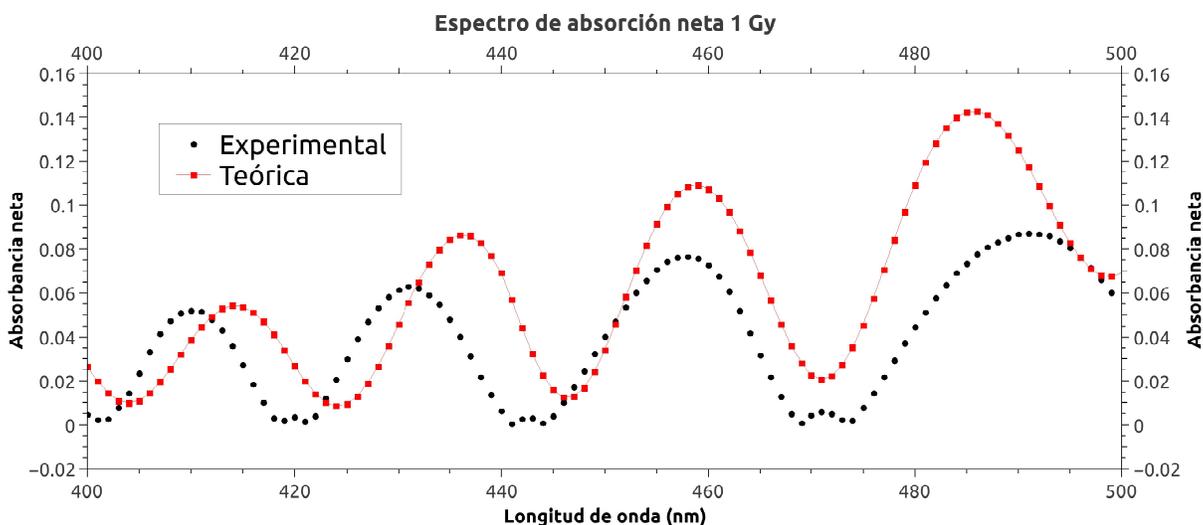


Figura 4.6: Espectros teórico y experimental 1 Gy

En la figura 4.6 mostramos la comparación del espectro de absorción neta medido y el calculado con el modelo de Fabry-Perot, para una película irradiada a 1 Gy, se observa que el modelo reproduce de mejor manera a lo obtenido de forma experimental, las bandas tiene alturas similares y aunque se ve un ligero corrimiento en la posición las bandas, el número de bandas que aparecen entre 400 nm y 500 nm es el mismo.

El análisis del espectro de absorción neta medida y calculada para una película que se irradia con una dosis de 3 Gy se muestra en la figura 4.7, se observa que el modelo reproduce de buena manera al espectro experimental con un ligero desplazamiento, con alturas en las bandas similares, es claro que el espectro de absorción neta de la película radiocrómica EBT3, sigue un patrón característico de interferencia de Fabry-Perot como lo muestra la figura.

En la figura 4.8 se hace la comparación entre los espectros de absorción neta medida y la obtenida con el modelo propuesto, para una película irradiada a 5 Gy, en la figura observamos que existe una pequeña diferencia en la altura de los espectros, pero al igual que en casos anteriores, la forma de estos es muy similar, la región comprendida entre los 400 nm y 480 nm presentan el mismo número de bandas en las mismas posiciones lo cual nos indica que también se trata de interferencia de Fabry-Perot.

El hecho de que el modelo teórico no se superponga al espectro medido

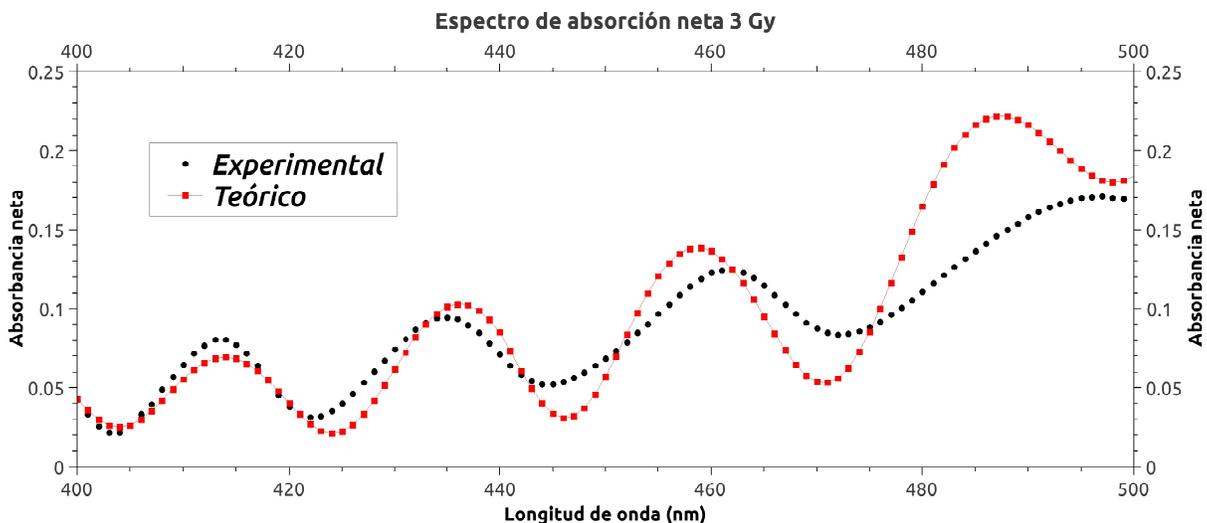


Figura 4.7: Espectros teórico y experimental 3 Gy

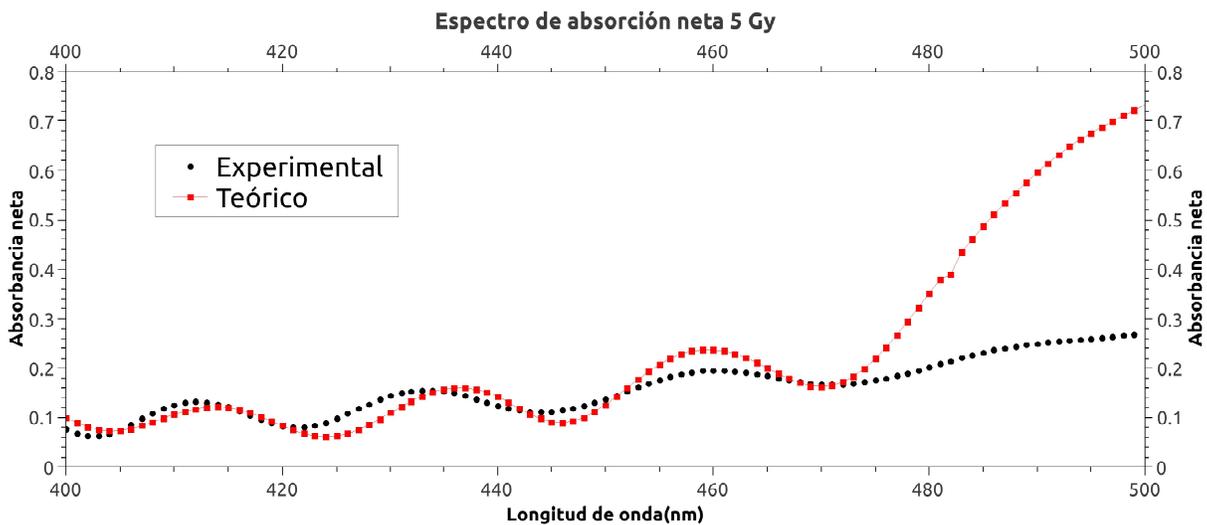


Figura 4.8: Espectros teórico y experimental 5 Gy

es debido a que la capa activa contiene un colorante, estabilizadores y otros aditivos que dan a la película baja dependencia a la energía. Sin embargo sabemos que la posición de los picos en las bandas depende de parámetros como el espesor de la cavidad y el índice de refracción. El fabricante informa

que el espesor de 28 mm y una capa activa compuesta principalmente de polidiacetileno, los componentes adicionales en la capa activa pueden ser la razón para que ambos espectros (teórico y experimental) no se superpongan.

Los resultados nos muestran que la intensidad del espectro obtenido de la medición es menor que la predicha por el modelo teórico, lo cual nos indica que además del polidiacetileno las películas contienen otros elementos que absorben parte de la luz, aunado a esto se sabe que el coeficiente de absorción óptica no es lineal con la dosis. Se observa un desplazamiento de las bandas de absorción (franjas), similar en los espectros medido y teórico. Se ha informado de que la posición del pico de una cavidad de Fabry-Perot que contiene polidiacetileno se desplazan cuando se modifica la separación entre los espejos. Lo cual nos hace pensar que el espesor de la capa activa no es uniforme a lo largo del área de la película.

4.2. Discusión

Al comparar espectros de absorción neta de PR EBT2, con espectros de absorción neta de PR EBT3, donde la composición química es la misma y solo varía la estructura, se observa claramente que estos espectros (de la PR EBT2) no presentan estas bandas al ser irradiadas a las mismas dosis y con las mismas longitudes de onda (ver figuras 4.1 y 4.2).

Las bandas que aparecen en el intervalo de longitud de onda de 400 nm a 500 nm, en el espectro de absorción neta de las películas radiocrómicas EBT3, no son bandas reales de absorción pero son bandas de interferencia características de una cavidad de Fabry-Perot debido a la estructura simétrica de la película. Este resultado es de gran importancia cuando se realiza la dosimetría con película radiocrómica EBT3 y un escáner de superficie plana. Para las dosis más altas que las que se aplican en un tratamiento de rutina, se recomienda utilizar el canal verde y azul para leer la respuesta de la película radiocrómica. Es importante apuntar que el canal azul de un escáner de superficie plana corresponde a la gama de longitudes de onda 400 a 500 nm (Mack et al., 2003), siendo sólo el rango espectral en el que el patrón de interferencia de Fabry-Perot afecta a la medición de la respuesta de la película. Por lo tanto, cuando las películas radiocrómicas EBT3 se analizan utilizando el canal azul de un escáner de superficie plana, no se interpreta la respuesta real de la película a la radiación si no que se ve afectada por el fenómeno de interferencia.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones

Se observaron bandas adicionales a las que presentan los espectros de absorción neta de las PR EBT2, en los espectros de absorción neta de las películas radiocrómicas EBT3.

Proponiendo un modelo de interferómetro de Fabry-Perot, donde las caras de las películas radiocrómicas actúan como espejos y la capa activa de estas películas compuesta principalmente de polidiacetilenos como una cavidad resonante, se logró reproducir las bandas presentes en el espectro de absorción neta de las PR EBT3

Los resultados muestran que las bandas de absorción que se observan en el espectro de absorción neta medida obedecen a un patrón de interferencia característica de una cavidad Fabry-Perot formado en este caso por la estructura simétrica de la película radiocrómica EBT3. Por lo tanto, las bandas de absorción que aparecen en el espectro de absorción en el rango de longitudes de onda de 400-500 nm no son bandas de absorción "reales" pero son bandas de interferencia.

Esto significa que cuando se utiliza el sistema de dosimetría formado por la película radiocrómica EBT3 y escáner de superficie plana, el canal azul no debe ser utilizado para leer las películas, ya que no interpreta la respuesta real de la película a la radiación de rayos x, pero un efecto de la interferencia en una cavidad de Fabry-Perot.

Capítulo 6

BIBLIOGRAFÍA

1. León-Marroquí, Y., Camacho-López, M.A., García-Garduño O.A., Herrera-González, J.A., Villarreal-Barajas, J.E., Gutiérrez-Fuentes, R., Contreras-Bulnes, R. 2016. Spectral analysis of the EBT3 radiochromic film irradiated with 6 MV X-ray radiation. 89, 82-88
2. Devic S, Tomic N, Pang Z, Seuntiens J, Podgorsak EB, Absorption spectroscopy of EBT model Gafchromic film (2006).
3. Devic S, Aldelaijan S, Mohammed H, Tomic N, Lian LH, DeBlois F, et al. Absorption spectra time evolution of EBT-2 model GAFCHROMIC film. *Med Phys*, 2010;37(5):2207-2214.
4. Butson, M.J., Cheung, T., Yu, P.K.N., Alnawaf, H., 2009. Dose and absorption spectra response of EBT2 Gafchromic film to high energy x-rays. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 32, 196-202.
5. Eugene Hecht, "Optics", Adis on Wesley Longman, U.S.A. (1998).
6. M. Born y E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press., 7ma edición, (1999)
7. J.M. Cabrera, F.J. López, Apuntes de interferencia y difracción, Universidad Autónoma de Madrid, Departamento de Física de materiales.
8. Camacho, M.A., Kar, A.K., Wherret, B.S., Bakarezos, M., Rangel-Rojo, R., Yamada, S., Matsuda, H., Kasai, H., Nakanishi, H., 2005. All-optical switching potentiality in Fabry-Perot devices containing poly-CDHD. *Opt. Commun.* 251, 376-387.
9. D. A. Skoog, F. J. Holler and S. R. Crouch, "Principles of instrumental analysis," 5th ed. (Saunders College Publishing, New York, 2008).
10. International Speciality Products. GAFCHROMIC® EBT3 Self-developing film for radiotherapy dosimetry. Wayne, NJ: ISP; 2011. Manual del fabricante-

te.

11. García-Garduño, O.A., Lárraga-Gutiérrez, J. M., Rodríguez-Villafuerte, M., Martínez-Dávalos, A., Celis, M.A., 2010. Small photon beam measurements using radiochromic film and Monte Carlo simulations in a water phantom. *Radiother. Oncol.* 96, 250-253.

12. Arráns, R., Miras, H., Ortiz-Seidel, M., Terrón, J.A., Macías, J., Ortiz-Lora, A., 2009. Radiochromic film dosimetry. *Rev. Fis. Med.* 10, 83-104.

13. McLaughlin WL, Al-Sheikhly M, Lewis DF, Kovacs A and Wojnarovits L. Radiochromic solid-state polymerization reaction. *Irradiation of Polymers*.

14. Stevens, M.A., Turner, J. R., Hugtenburg, R.P. and Butler, P.H., High-resolution dosimetry using radiochromic film and a document scanner in *Phys. Med. Bio.* 41:2357-2365 (1996).

15. Chiu-Tsau, de la Zerda, A., Lin J., Kim, J. H., High-sensitivity Gaf-Chromic film dosimetry for ¹²⁵I seed, *Med. Phys.* 21, 651-657 (1994).

Votos aprobatorios



VOTO APROBATORIO

Toda vez que el trabajo de evaluación profesional, ha cumplido con los requisitos normativos y metodológicos, para continuar con los trámites correspondientes que sustentan la evaluación profesional, de acuerdo con los siguientes datos:

Nombre del pasante	Diego De la Cruz Pérez			
Licenciatura	Física	N° de cuenta	0710115	Generación 2010-2016
Opción	tesis	Escuela de Procedencia	Facultad de Ciencias	
Nombre del Trabajo para Evaluación Profesional	ESTUDIO DE LA GENERACIÓN DE BANDAS DE INTERFERENCIA DE FABRY-PEROT EN LAS PELÍCULAS RADIOCROMICAS EBT3			

NOMBRE		FIRMA DE VOTO APROBATORIO	FECHA
ASESOR	Dr. Jorge Orozco Velazco		31-05-17
COASESOR ASESOR EXTERNO (Sólo si aplica)	Dr. Miguel Ángel Camacho López		29/may/17

NOMBRE		FIRMA Y FECHA DE RECEPCIÓN DE NOMBRAMIENTO	FIRMA Y FECHA DE ENTREGA DE OBSERVACIONES	FIRMA Y FECHA DEL VOTO APROBATORIO
REVISOR	Dr. Federico Gabriel García Santibañez Sánchez	26/05/2017 	31/05/2017 	31/05/2017
REVISOR	Dra. Alicia Lucrecia Lira Campos	31/05/17 		

Derivado de lo anterior, se le **AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN DEL TRABAJO DE EVALUACIÓN PROFESIONAL** de acuerdo con las especificaciones del anexo 8.7 "Requisitos para la presentación del examen de evaluación profesional".

NOMBRE		FIRMA	FECHA
AREA DE EVALUACIÓN PROFESIONAL			

Figura 6.1: