



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE BIOLOGÍA

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS:

**Estudio del fenómeno de luminiscencia térmicamente
estimulada de KMgF_3 impurificado con Tb para dosimetría de la
radiación ionizante.**

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta:

Martha Itzel Ramírez Romero

Ing. en Materiales

Director de tesis:

Dra. Maricela Villicaña Méndez

Co-director de Tesis:

M.C. María de la Salud Laura García Salinas

Morelia, Michoacán.

Septiembre, 2017.

La educación del Ser es el centro de la buena educación. Sin espiritualidad la educación no tiene futuro.

Ramón Gallegos Nava.

No se educa para la sabiduría ni para la comprensión, se educa para pasar pruebas. Esa es la terrible pérdida de vida y tiempo. El robo que le hacen a la gente en sus vidas.

Claudio Naranjo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer sinceramente a:

Mi directora de Tesis, la **Dra. Maricela Villicaña**, por su generosidad al brindarme la oportunidad de trabajar con ella en un marco de confianza y afecto para la concreción de este trabajo.

Al **ININ** y al **Dr. Pedro González** por compartir su experiencia, sus conocimientos así como por su orientación y apoyo durante mi periodo de estancia en el ININ.

Al honorable jurado, **M.C. Laura García, Dr. Rafael Huirache y al Dr. José Apolinar** por regalarme un poco de su tiempo para la revisión de esta Tesis así como sus acertadas revisiones y sugerencias para completar con éxito mi trabajo final de investigación.

Al **CONACyT** (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología); por las facilidades otorgadas para llevar a cabo este proyecto. Y a la **UMSNH** por la autorización de trabajar y estudiar en las instalaciones.

A mi **familia y amigos**, que a pesar de la distancia siempre me hicieron llegar sus buenas vibras, apoyo, amor y motivación para que concluyera con esta meta.

¡Muchas Gracias a Todos!

ÍNDICE

Contenido	Página
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ACRÓNIMOS	VIII
RESUMEN	X
INTRODUCCIÓN	1
I. MARCO TEÓRICO	2
1.1 Fundamentos de Radiación	2
1.1.1 Decaimiento Radiactivo	3
1.1.2 Tiempo de vida media	4
1.1.3 Actividad	4
1.1.4 Interacción de la Radiación con la materia	5
1.1.5 Magnitudes y Unidades	7
1.1.5.1 Exposición	8
1.1.5.2 Dosis de Absorción	9
1.1.5.3 Dosis Equivalente	10
1.1.6 Efectos biológicos de la radiación ionizante	12
1.1.6.1 Absorción de radiación y daño celular.	14
1.1.7 Efectos de la Radiación Ionizante en el Medio Ambiente	15
1.1.7.1. Fuentes de Radiación	16

1.1.7.2 Emisiones a la Atmósfera	16
1.1.7.3 Ocupación del Suelo	17
1.2 SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS	18
1.2.1 Métodos para la síntesis.	18
1.2.1.1 Método Sol-Gel	19
1.2.1.2 Síntesis Solvotermal	19
1.2.1.3 Síntesis por microondas	20
1.2.2 Calentamiento por microondas.	21
1.2.3 Trifluoruro Potasio Magnesio con estructura Perovskita (KMgF ₃)	23
1.3 FENÓMENO DE TERMOLUMINISCENCIA	26
1.3.1 Equipo Lector Termoluminiscente (TL)	28
1.3.2 Generación de la Curva de Brillo	29
1.4 DETECTORES DE LA RADIACIÓN IONIZANTE.	34
1.4.1 Detectores por ionización en gases.	35
1.4.2 Detectores de centelleo.	35
1.4.3 Detectores semiconductores de unión.	35
1.4.4 Dosímetros	36
1.4.4.1 Dosimetría Termoluminiscente (DTL)	37
II. JUSTIFICACIÓN	39
III. HIPÓTESIS	40
IV. OBJETIVOS	41
4.1 General	41
4.2 Específicos:	41

V. METODOLOGÍA	42
5.1 Síntesis de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ vía Microondas.	42
5.2 Pruebas de sensibilidad de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ en polvo.	44
5.3 Elaboración de Dosímetros en forma de pastillas.	45
5.4 Caracterización Dosimétrica	46
5.4.1 Tratamiento térmico de Borrado	46
5.4.2 Sensibilidad a la Radiación	47
5.4.3 Respuesta TL en función de la dosis.	48
5.4.4 Prueba de Reproducibilidad.	48
5.4.5 Prueba de Estabilidad de la señal TL (fading)	49
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
6.1 Prueba de Sensibilidad	50
6.2 Respuesta TL en función de la dosis	50
6.3 Prueba de reproducibilidad	52
6.4 Estabilidad de la señal (fading)	54
VII. CONCLUSIONES	57
RECOMENDACIONES	58
REFERENCIAS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Clasificación de la Radiación.	3
FIGURA 2. Esquema del proceso de ionización y excitación.	6
FIGURA 3. Clasificación de la Radiación ionizante.	6
FIGURA 4. Unidades de Radiación ionizante.	11
FIGURA 5. Tipos de afectación a la célula.	13
FIGURA 6. Espectro Electromagnético.	21
FIGURA 7. Distribución de temperatura en un calentamiento por microondas y convencional.	22
FIGURA 8. Estructura ideal tipo perovskita ABX_3.	25
FIGURA 9. Estructura cristalina típica de un óxido tipo Perovskita.	26
FIGURA 10. Fenómeno de Termoluminiscencia.	27
FIGURA 11. Proceso de Termoluminiscencia.	30
FIGURA 12. Formación de la curva Termoluminiscente.	32
FIGURA 13. Ejemplo de curvas de brillo TL.	34
FIGURA 14. Reactor de Microondas Anton Paar.	42
FIGURA 15. Vial de 30 ml con la mezcla para la síntesis de $KMgF_3:Tb$.	43
FIGURA 16. Irradiador Gammacell modelo 220.	44
FIGURA 17. Dosímetros en forma de pastilla.	45
FIGURA 18. Mufla para tratamiento térmico de Borrado.	46
FIGURA 19. Lector de TL Harshaw Modelo 4000.	47
FIGURA 20. Portadosímetro de plexiglás para irradiar.	49
FIGURA 21. Linealidad de la respuesta TL de los dosímetros en función de la dosis.	51
FIGURA 22. Curva de brillo de $KMgF_3:Tb$, en intervalo 1- 1000 Gy.	51
FIGURA 23. Respuesta relativa de los dosímetros en función de los ciclos (Reproducibilidad).	53

FIGURA 24. Curva de brillo de la reproducibilidad.	54
FIGURA 25. Comparativa del desvanecimiento TL de $\text{KMgF}_3\text{:Tb+PTFE}$, al día siguiente y en dos meses.	55
FIGURA 26. Curvas de brillo del <i>fading</i> inicial y final.	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dosis de Radiación y sus efectos.	15
Tabla 2. Ocupación de terreno de algunas centrales energéticas.	17
Tabla 3. Sensibilidad del $\text{KMgF}_3\text{:Tb}$ relativa a la de fondo.	50
Tabla 4. Reproducibilidad de la Respuesta TL de dosímetros.	52
Tabla 5. Desvanecimiento de la información TL de $\text{KMgF}_3\text{:Tb+PTFE}$.	54

ACRÓNIMOS

μGy	microgray
⁶⁰Co	cobalto-60
BC	banda de conducción
BP	banda prohibida
Bq	Becquerel
BV	banda de valencia
Ci	curie
CI	cámaras de ionización
Cr	cromo
DS	desviación estándar
DTL	dosimetría termoluminiscente
EBR	Eficacia Biológica Relativa
eV	electronvoltio
Fe	hierro
GHz	gigahertz
Gy	gray
H₂O⁺	agua ionizada
ICRU	International Commission on Radiation Units
IR	infrarojo
K⁺	ion potasio
keV	kiloelectronvoltio
KF	fluoruro de potasio
KMgF₃	trifluoruro potasio magnesio

Mg²⁺	ion magnesio
Mn	manganeso
Mo	molibdeno
mSv	milisievert
N₂	nitrógeno
nC	nanocolumb
OH[*]	radical hidroxilo
OMS	Organización Mundial de la Salud
p	probabilidad de escape
PTFE	politetrafluoretileno
Q	factor de Calidad
R	Roentgenio
Rad	Radiation absorbed dose
Rem	Radiation equivalent mammalian
s	segundos
Sv	Sievert
T	temperatura
Tb	terbio
TFM	tubo fotomultiplicador
TL	termoluminiscencia
TLE	Transferencia lineal de energía
UV	ultravioleta
α	alfa
β	beta
γ	gama

RESUMEN

Estudio del fenómeno de luminiscencia térmicamente estimulada de KMgF_3 impurificado con Tb para dosimetría de la radiación ionizante.

En este trabajo se presentan los resultados experimentales sobre el estudio del fenómeno de luminiscencia térmicamente estimulada también conocido como Termoluminiscencia (TL) del trifluoruro potasio magnesio dopado con terbio (Tb) ($\text{KMgF}_3:\text{Tb}$) expuesto a distintas dosis de radiación ionizante.

La obtención de las nanopartículas se llevó a cabo utilizando un reactor de microondas, estableciendo las rampas de calentamiento y tiempo con base a un trabajo de investigación previo enfocado principalmente a la síntesis de este material (Herrero C. et al, 2015). Las características dosimétricas estudiadas en este trabajo incluyen la sensibilidad a la radiación, respuesta termoluminiscente en función de la dosis absorbida, la reproducibilidad y la estabilidad de la señal TL.

La respuesta TL del $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ en función de la dosis presentó una linealidad en el intervalo de 1 a 1000 Gy; se obtuvo una buena reproducibilidad y estabilidad TL del material estudiado. Por los resultados obtenidos, se puede decir que el $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ presenta características dosimétricas prominentes para ser utilizado como un dosímetro de radiación ionizante.

Palabras clave: Perovskita KMgF_3 , dosimetría, termoluminiscencia, radiación ionizante.

ABSTRACT

Study of the phenomenon of thermally stimulated luminescence of KMgF_3 doped with Tb for dosimetry of ionizing radiation.

In this work we present the experimental results of studying the phenomenon of thermally stimulated luminescence (TL) of trifluoride potassium magnesium doped with terbium ($\text{KMgF}_3:\text{Tb}$) exposed to several doses of ionizing radiation.

The preparation of the nanoparticles was carried out using a microwave reactor, establishing the heating and time ramps based on a previous research work focused mainly on the synthesis of this material (Herrero C. et al, 2015). The dosimetric characteristics studied in this work include the sensitivity to radiation, thermoluminescent response to absorbed dose, reproducibility and TL signal stability.

The TL response of $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ as a function of dose presented a linearity in the range of 1 to 1000 Gy; a good reproducibility and TL stability of the material studied were obtained. Therefore the results obtained when studying the TL properties of the $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ exposed to different doses of radiation show that it meets prominent dosimetric characteristics to be used as an ionizing radiation dosimeter.

INTRODUCCIÓN

La amplia aplicación de las fuentes de radiación ionizante en muchos campos de la vida cotidiana (generación de energía, radioterapia, monitorización del medio ambiente, esterilización, etc.) requiere el desarrollo continuo de detectores de radiación adecuados para medir y controlar la dosis o la tasa de dosis en cada caso particular (Marcazzó et al, 2010).

Sin embargo, estos pueden afectar a los trabajadores que intervienen directamente en la aplicación de la radiación o el material radiactivo, a la población en general, a las generaciones futuras y al medio ambiente (Tomasina, 2010). Es de gran importancia la seguridad radiológica para eliminar o limitar al mínimo los efectos nocivos de la radiación ionizante y del material radiactivo en los trabajadores, el público y/o el medio ambiente sin obstaculizar su empleo en actividades beneficiosas, ya que a nivel popular, suele desconocerse que la radiación y radiactividad forman parte de la Naturaleza y de nuestro propio cuerpo, siendo vistas en general como un nefasto invento del Hombre por ello es necesario el estudio de materiales empleados como dosímetros (Cherry et al, 2010).

Un dosímetro es un dispositivo o material que permite evaluar la cantidad de radiación absorbida. Existe una clasificación que tiene que ver directamente con la aplicación práctica en protección radiológica: dosímetros personales, monitores portátiles, detectores de área (radiación ambiental), electrómetros de precisión y detectores telescópicos.

I. MARCO TEÓRICO

1.1 Fundamentos de Radiación

La radiación es la emisión, propagación y transferencia de energía en cualquier medio en forma de ondas electromagnéticas o partículas. Sin embargo el término se emplea frecuentemente en el sentido de radiación ionizante; es decir, que al interaccionar con la materia logra desprender un electrón y de esta manera alterar el estado físico de la materia en la que incide haciendo que sus átomos queden eléctricamente cargados.

En la Figura 1 se puede ver que la radiación se clasifica en dos categorías principales en función de su capacidad para ionizar la materia: ionizante y no ionizantes. Las radiaciones no ionizantes no tienen la capacidad de ionizar la materia, porque no tienen la suficiente energía como para romper los enlaces que unen los átomos del medio que irradian (ondas de radio, TV, microondas, luz visible, etc.); por otra parte, la radiación ionizante puede ionizar la materia, ya sea directamente o indirectamente porque tienen suficiente energía como para producir ionizaciones de los átomos del medio o materia que es irradiado. Van desde los rayos X hasta la radiación cósmica. La radiación ionizante se divide en: radiación directamente ionizante, que son las partículas cargadas como: electrones, protones, partículas alfa y iones pesados; y la radiación indirectamente ionizante, son las partículas neutras como los neutrones y los fotones de rayos X y rayos gamma (Faiz et al, 2003).

El mundo, como se sabe, está hecho principalmente de átomos cuyos núcleos son estables, es decir, que no muestran ninguna tendencia a cambiar. Existe un número limitado (alrededor de 270) de núcleos estables. Sin embargo, en un momento dado puede ocurrir que la distribución de energía en el núcleo de un átomo cambie dando como resultado que el átomo se vuelva inestable.

Por otro lado, los elementos radiactivos que se utilizan para fines médicos, industriales e investigación, son fabricados artificialmente en reactores nucleares, en

los cuales se altera la proporción de neutrones y protones en un núcleo atómico estable, para hacerlo inestable (radiactivo).

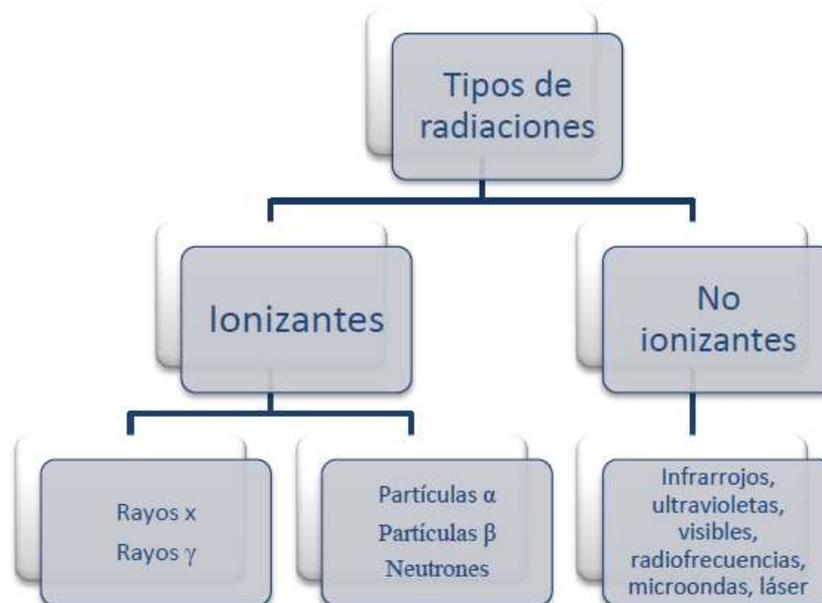


FIGURA 1. Clasificación de la Radiación.

Posteriormente, el átomo inestable comienza a liberar energía de manera espontánea para alcanzar la estabilidad nuevamente. Este cambio espontáneo que se presenta cuando aparece un exceso de protones o de neutrones sobre una combinación estable de estos, convierte en inestable al núcleo, el cual tiende a transformarse en un núcleo estable mediante la emisión de una partícula nuclear (radiación). A estos fenómenos de transformación nuclear espontánea se le conoce como radiactividad (Guzmán, 2016).

1.1.1 Decaimiento Radiactivo

El decaimiento radiactivo es un fenómeno aleatorio, es decir, que no es posible predecir en qué momento un átomo en particular habrá de decaer. Solamente se puede estimar la probabilidad de que un átomo de una muestra de un radioisótopo dado decaiga en un cierto tiempo. Dicha probabilidad es una propiedad fundamental de cada radioisótopo, y solo depende de qué tan inestable sea el átomo, del intervalo de tiempo considerado y del tamaño de la muestra.

Esta ley se expresa matemáticamente:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Dónde:

N= Número de átomos radiactivos que han sobrevivido durante un tiempo t.

N₀= Número original de átomos radiactivos de la muestra.

λ = Constante de decaimiento radiactivo en unidades de tiempo (s⁻¹).

t= tiempo transcurrido.

e = 2.718281828: Base de los logaritmos naturales.

1.1.2 Tiempo de vida media

Se verifica sistemáticamente que la actividad de una muestra radioactiva disminuye exponencialmente con el tiempo. Para un período de tiempo preciso, sin importar cuando se inicie éste, la actividad de la muestra disminuye a la mitad de la que tenía al iniciarse este período. El tiempo de vida media de un isótopo radiactivo se define como el tiempo necesario para que la cantidad de átomos de dicho isótopo sea igual a la mitad del número inicial de éstos, es decir $N = N_0/2$. En otras palabras, la vida media es el tiempo en que decaen la mitad de los átomos radiactivos de una fuente radiactiva. Se calcula con la siguiente ecuación:

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

1.1.3 Actividad

Partiendo de la ecuación (1), y multiplicando ambos miembros de ésta por la constante de decaimiento radiactivo (λ) se obtiene lo siguiente: Al producto $N\lambda$ se le conoce como actividad, y se denota con “A”, es decir:

$A=N\lambda$. Por lo que la ecuación de decaimiento se puede escribir, en términos de A como $N\lambda = N_0e^{-\lambda t}$ quedando la actividad como se muestra en la ecuación 3:

$$A = A_0e^{-\lambda t} \quad (3)$$

La actividad se define como el número de desintegraciones espontáneas, o decaimientos que ocurren por unidad de tiempo en una cantidad dada de material radiactivo.

Las unidades de actividad son el Becquerel (Bq) y el Curie (Ci), donde:

$$1\text{Bq}= 1 \text{ decaimiento/ segundo}$$

$$1 \text{ Ci}= 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

1.1.4 Interacción de la Radiación con la materia

La radiación puede atravesar un cierto espesor de materia antes de perder totalmente su energía inicial. Este espesor se mide generalmente en metros para los neutrones y para los rayos gamma y rayos X, en milímetros para las partículas beta y en centésimas de milímetro para las partículas alfa y protones.

Los efectos de la radiación sobre la materia se puede manifestar mediante tres mecanismos principales: ionización, excitación y disociación o radiólisis. En la Figura 2 se puede apreciar un esquema de estos mecanismos. La ionización se produce cuando uno o más electrones atómicos reciben la energía suficiente para abandonar el átomo; cuando uno de los electrones atómicos recibe la energía suficiente para ocupar un nivel de energía superior al que le corresponde se dice que ha ocurrido excitación, mientras que, si se produce la ruptura de enlaces químicos moleculares, se dice que ha ocurrido disociación o radiólisis, la que a su vez produce transformaciones químicas en las sustancias irradiadas. Los efectos más intensos de la radiólisis se producen en moléculas con uniones covalentes cuya disociación crea radicales libres (Azorín et al, 2010).

Por interacción de la radiación con la materia, se entienden los mecanismos mediante los cuales ésta cede energía a los átomos que encuentra en su trayectoria.

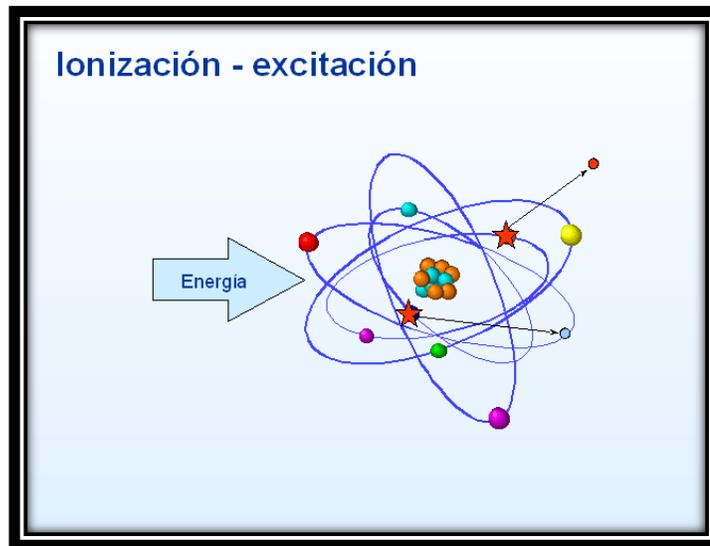


FIGURA 2. Esquema del proceso de ionización y excitación.

Para el estudio de la interacción de la radiación con la materia, la radiación ionizante puede ser clasificada en electromagnética y corpuscular como se observa en la Figura 3.

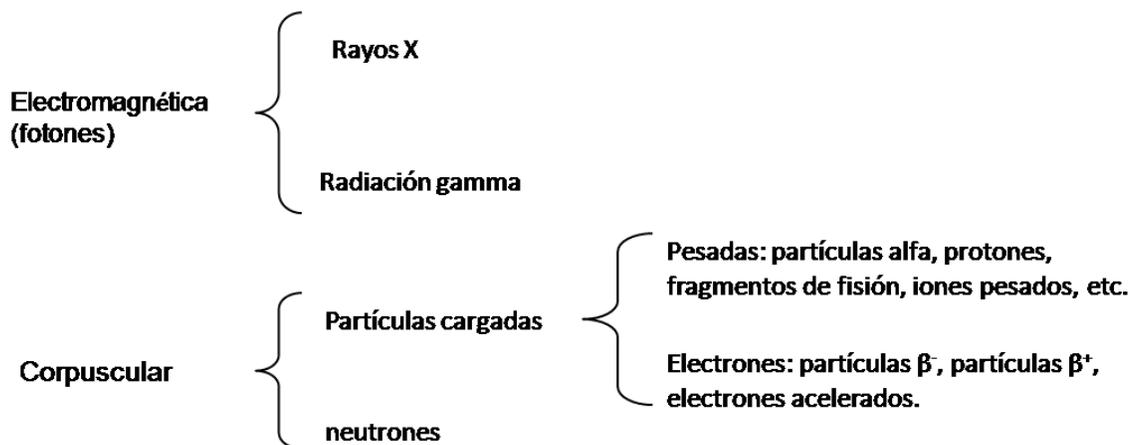


FIGURA 3. Clasificación de la Radiación ionizante.

La radiación ionizante por su forma de interactuar con la materia se puede clasificar en radiación directamente ionizante o indirectamente ionizante. A diferencia de la radiación corpuscular, que tiene un alcance bien definido, y por lo tanto puede ser absorbida completamente, la radiación electromagnética (Rayos X o Rayos γ) no puede ser absorbida por completo sino que sólo disminuye su intensidad al aumentar el espesor del absorbedor, es decir, se atenúa.

Si se realizan mediciones de atenuación de radiación electromagnética, en condiciones de buena geometría, es decir, con un haz de radiación bien colimado, usando un dispositivo experimental y se grafican en escala semilogarítmica la intensidad de la radiación transmitida en función del espesor del material absorbedor, se obtendrá una línea recta para radiación monoenergética. Si el haz de radiación es heteroenergético, se obtendrá una curva.

1.1.5 Magnitudes y Unidades

En 1925 se creó la Comisión Internacional de Medidas y Unidades Radiológicas (ICRU, por sus siglas en inglés), cuya misión más importante es hacer recomendaciones respecto a:

- Magnitudes y unidades de radiación y radiactividad.
- Métodos de medida y campos de aplicación en Radiobiología y Radiología Clínica.
- Datos y constantes físicas requeridas para la aplicación de estos procedimientos.

Entre 1953 y 1962 la ICRU estableció las definiciones de las magnitudes de dosis absorbida, exposición, actividad y dosis equivalente así como sus correspondientes unidades especiales: el rad, el roentgenio, el curie y el rem. Con ellas se tratará de conocer, no solo la cantidad de radiación de un haz de radiación, sino también la cantidad de radiación de dicho haz que es absorbida por la materia, y la probabilidad de producir efectos indeseables como consecuencia de esta absorción.

En la actualidad se establecen tres tipos de unidades radiológicas distintas: de exposición, de absorción y de equivalencia biológica; cada una de ellas cuantifica la radiación ionizante atendiendo a tres aspectos diferentes de las mismas pero complementarios entre sí (Alcaráz, 2001).

1.1.5.1 Exposición

La magnitud de exposición se define como el cociente de la carga absoluta dQ ; es decir, a partir de la carga total de los iones de un signo producidos cuando todos los electrones liberados por fotones son frenados completamente; entre una masa de aire dm . Es decir, la exposición es una medida de la cantidad de carga eléctrica producida en el aire por la radiación gamma o rayos X. Se representa con el símbolo $X = dQ / dm$.

La unidad utilizada fue el Roentgenio (R), definida como la exposición producida por un haz de radiación X o gamma, que absorbida en 1 cm^3 de aire seco y en condiciones normales produce, por ionización, la liberación de una unidad electrostática de carga (u.e.c). La unidad moderna, que posteriormente ha sustituido al Roentgenio, en el SI, es el culombio/kg (C/Kg). La relación entre ambas unidades es la siguiente:

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/Kg}$$

$$1 \text{ C/Kg} = 3876 \text{ R}$$

Sin embargo, las unidades de radiación deben de expresarse en tasa de dosis, es decir, dosis de radiación por unidad de tiempo. Se define la tasa de exposición como dX/dt donde dX es el incremento de exposición durante el intervalo de tiempo dt . La tasa de exposición se expresa en R/s o C/kg s. Las unidades de tiempo día, hora y minuto pueden usarse en el SI.

1.1.5.2 Dosis de Absorción

Con las unidades anteriores se podía valorar la cantidad de radiación que produce un tubo de rayos X, y que suele medirse en aire. Sin embargo, con la dosis de absorción, de cualquier tipo de radiación ionizante, se pretende valorar la cantidad de radiación que es absorbida por la materia. La absorción de los fotones está representada por una cesión de energía al medio, que conlleva la desaparición o pérdida de parte de su intensidad. El uso clínico de los rayos X viene determinado por esta capacidad para ser absorbidos en diferentes grados por la materia. Esta magnitud queda definida como el cociente $D = d\varepsilon/dm$, donde $d\varepsilon$ es la energía promedio depositada por la radiación ionizante en una porción de materia con masa dm . La energía impartida y la dosis, depende del tipo de radiación y de su intensidad, así como de la naturaleza del material irradiado (Guzmán, 2016).

La unidad antigua fue el rad, formado por las iniciales de dosis de radiación absorbida (Radiation Absorbed Dose). En su definición se pretendió crear una unidad que sirviera para cualquier tipo de radiación. No obstante, la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas considera que esta cantidad física es de tal importancia en Radiología, Radioterapia y Protección Radiológica que se justifica el empleo de un nombre especial, asignándole el de Gray (Gy), cuyas unidades son joule por kilogramo. $1 \text{ (Gy)} = 1 \text{ J.Kg}^{-1}$

El Gray es la dosis de radiación absorbida que equivale a 100 rads. La equivalencia entre estas dos unidades es:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergios/gramo}$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

La dosis absorbida, que es la magnitud dosimétrica de más interés, resulta válida para cualquier tipo de radiación y requiere la especificación del material en el que se produce la interacción. La tasa de dosis absorbida se define como el cociente de $D = dD/dt$, donde dD es el incremento de la dosis absorbida en el intervalo de tiempo dt .

1.1.5.3 Dosis Equivalente

A pesar de la minuciosidad en la elaboración de las magnitudes radiológicas nombradas hasta ahora, pronto quedó patente que una misma cantidad de dosis de radiación absorbida podría provocar efectos biológicos muy diferentes, en función del tipo de agente que emitía o producía la radiación ionizante que se absorbía.

Según se ha podido comprobar en estudios efectuados sobre efectos biológicos de la radiación, la dosis absorbida en un tejido orgánico no determina el efecto biológico resultante ya que intervienen otros factores como la naturaleza de la radiación, energía y espectro de la radiación, tipo de efecto biológico, etc. Por esta razón la radiobiología ha dirigido sus esfuerzos en la definición de una nueva magnitud que tome en consideración la pluralidad de los efectos biológicos que se observan. Dado que la mayoría de los conocimientos sobre efectos biológicos se adquirieron sobre animales de experimentación, especialmente mamíferos, la nueva unidad creada define la radiación que es equivalente entre los mamíferos *rem* por sus siglas en inglés (Radiation Equivalent Mammalian) (Alcaráz, 2001).

El daño biológico depende de la naturaleza de la radiación, es decir, de su calidad. De ahí, aparece la necesidad de introducir una nueva magnitud que permita medir radiaciones de calidad distinta con una misma unidad. Esta magnitud es, inicialmente la eficiencia biológica relativa (*EBR*). La eficiencia biológica relativa de dos radiaciones es la razón entre las dosis absorbidas de ambas, necesarias para provocar el mismo efecto biológico. De la definición se deduce que la noción de la *EBR* es una noción experimental pues está referida a un efecto biológico y, para las mismas radiaciones, variara según el efecto biológico considerado. El resultado es un número adimensional que recibe la denominación de Factor de Calidad (*Q*), y que expresa el grado de agresividad de los diferentes tipos de radiación en su comparación con los rayos X. Este factor pretende incluir el efecto de la distribución microscópica de la energía absorbida sobre el detrimento.

Con posterioridad se instauró, arbitrariamente, una nueva unidad para su uso en el S.I. Esta unidad es el *Sievert (Sv)*. Por analogía con la definición que se realizó de la dosis de absorción, se define el Sievert como la dosis de radiación que es equivalente a 100 rem. También en este caso se emplean los submúltiplos de esta unidad:

$$1 \text{ cSv} = 1 \text{ rem}$$

$$1 \text{ mSv} = 0.1 \text{ rem}$$

El uso cotidiano y frecuente del milisievert (mSv) en la práctica habitual lo ha convertido en la unidad moderna e internacional de equivalencia biológica y, como consecuencia de ello, en la unidad más empleada en Protección Radiológica. La tasa de dosis equivalente se define como el cociente dH/dt , en donde dH es el incremento de dosis equivalente en el intervalo temporal dt . Las unidades quedan expresadas en rem/h. o Sv/h. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 4.

Exposición	<ul style="list-style-type: none">• Roentgen• Culombio/Kg
Dosis Absorbida	<ul style="list-style-type: none">• Gray• Rad
Dosis Equivalente	<ul style="list-style-type: none">• Sievert• Rem

FIGURA 4. Unidades de Radiación ionizante.

1.1.6 Efectos biológicos de la radiación ionizante

La radiobiología es una combinación de dos disciplinas: la física de radiaciones y la biología; estudia los fenómenos que se producen en un ser vivo como consecuencia de la absorción de energía procedente de las radiaciones ionizantes. Al interactuar con la materia, este tipo de radiación pierde su energía ionizando, excitando o disociando las moléculas que componen al material que atraviesa. A escala atómica y molecular, estos son los fenómenos que ocurren independientemente de que la materia que sufre la acción de la radiación sea viva o inerte. Las modificaciones sufridas por los átomos y moléculas que componen las células vivas tienen importantes consecuencias a nivel biológico. Las alteraciones en macromoléculas fundamentales como el ADN, ARN y otras proteínas celulares, inducen cambios en la estructura y funcionalidad de todo el sistema (Azorín N. et al, 2010).

Cuando la radiación ionizante es absorbida en material biológico el daño a la célula puede ocurrir de forma directa o indirecta. La acción directa de la radiación, interactúa directamente con los átomos del ADN, ARN, proteínas, etc., y son ionizados o excitados a través de interacciones de Coulomb produciendo una serie de eventos físicos y químicos que eventualmente producen daños biológicos, y por lo general, el resultado es una alteración de las moléculas por rotura de enlaces.

La acción indirecta de la radiación, interactúa con otras moléculas y átomos dentro de la célula (principalmente agua, ya que cerca del 80% de la célula está compuesta de agua) para producir radicales libres, los cuales pueden, a través de difusión en la célula, dañar el ADN. Estos dos tipos de daños se pueden apreciar en la Figura 5. En la interacción de la radiación con el agua se producen iones y radicales libres extremadamente reactivos tales como H_2O^+ y OH^* . Los radicales libres pueden reaccionar con otras moléculas y causar lesiones en zonas distantes del lugar de interacción primaria. En el caso de que actúen sobre moléculas no fundamentales como carbohidratos, lípidos o proteínas, pueden producir efectos transitorios ya que se sintetizan inmediatamente. Si la acción de los radicales libres es sobre el ADN, los efectos son mucho más importantes ya que pueden producir

roturas en la cadena, alteración o destrucción de las bases y azúcares y provocar lesiones múltiples locales.

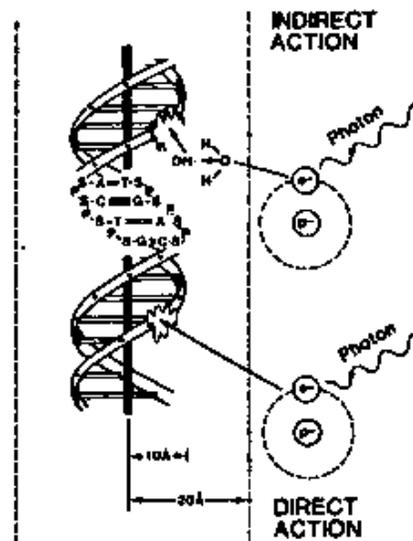


FIGURA 5. Tipos de afectación a la célula.

Los efectos que produce la radiación se agrupan en dos clases: no estocásticos o deterministas y estocásticos. Los efectos no estocásticos sólo se producen cuando la dosis alcanza un valor umbral determinado (valor mínimo permitido), su gravedad depende de la dosis recibida y su aparición es inmediata. Por el contrario, los efectos estocásticos no precisan umbral, la probabilidad de que aparezcan aumenta con la dosis y suelen ser graves y de aparición tardía. Además, desde el punto de vista biológico, los efectos son somáticos cuando aparecen en el sujeto que recibe la radiación, o genéticos cuando aparecen en su descendencia en virtud de la lesión que recibieron las células germinales de los progenitores.

En casi cien años de usarse las radiaciones, ha sido posible observar la respuesta de diferentes organismos sometidos a tratamiento médico, o sujetos a accidentes con radiaciones. Con base en estas observaciones se tienen ahora caracterizados los efectos, lo cual da los elementos para prevenir futuros riesgos.

1.1.6.1 Absorción de radiación y daño celular.

La importancia de la ionización inducida en los tejidos vivos por una radiación, se cuantifica mediante un concepto de amplia utilización en radiobiología: la transferencia lineal de energía (TLE, o LET en abreviatura inglesa) o la cantidad de energía cedida por unidad de recorrido de la radiación en el tejido. La TLE depende del tipo de radiación (masa, carga y energía de las partículas) así como del medio absorbente. En general, de forma simplificada, pero útil, se suelen clasificar las radiaciones en dos categorías: de baja y de alta TLE; a la primera pertenecerían los electrones (radiación β) y la radiación X o γ , mientras que la radiación α y los neutrones, se consideran de la segunda.

La aparición y proliferación de células modificadas puede verse influenciada por un buen número de otras causas (agentes cancerígenos o mutágenos) aparte de la radiación, que puede actuar antes o después de la exposición a la misma. Por ello, el peligro de la radiación no es la producción de mutaciones en sí, sino que ésta pueda inducir un número de las mismas superior al espontáneo que se produce en todo ser vivo, provocando una situación cuyas condiciones el organismo no sea capaz de superar (Gallego, s.f.).

Estudios de laboratorio, mediante la irradiación celular in vitro, permiten afirmar que la cantidad de mutaciones es mayor cuanto mayor es la dosis de radiación aplicada, no existiendo umbral de dosis por debajo del cual no puedan producirse mutaciones, observándose, para una misma dosis, una mayor cantidad de mutaciones cuanto mayor TLE posea la radiación.

A medida que crece el interés en conocer los efectos sobre la salud de las bajas dosis de radiación natural o artificial, se hace más necesario un sistema dosimétrico capaz de medir con precisión esos niveles de dosis. Por más de veinte años los dosímetros termoluminiscentes (TL) han constituido un método simple y preciso para tales mediciones (Molina et al, 2014). En la siguiente tabla se aprecian los valores límite y sus efectos en un ser vivo.

Tabla 1. Dosis de Radiación y sus efectos.

Dosis de radiación (mSv) y sus efectos	
Límite de dosis legislación	20
Valor de dosis que puede tener riesgo de cáncer	250
Valor de dosis que puede producir enfermedad grave	1000
Valor de dosis que puede producir muerte en un mes	5000

1.1.7 Efectos de la Radiación Ionizante en el Medio Ambiente

Las personas están expuestas a fuentes naturales de radiación ionizante, como el suelo, el agua o la vegetación, así como a fuentes artificiales, tales como los rayos X y algunos dispositivos médicos. Las causas naturales constituyen el fondo radiactivo natural que puede provenir de tres causas:

- *Espacio exterior (radiación cósmica)*: Llegan a la Tierra cada segundo (protones (86%) y partículas alfa (12%)). Puesto que la atmósfera absorbe parcialmente las radiaciones, el fondo natural debido a esta causa varía con la altitud, de tal modo que es menor a nivel del mar que en lo alto de una montaña. Para el promedio mundial, la radiación cósmica supone un 10% de la dosis.
- *Corteza terrestre*: Supone un 14% de la dosis promedio mundial.
- *Organismo humano*: Principalmente isótopos de carbono y potasio, contribuyen aproximadamente el 52% de la dosis promedio mundial.

En el ambiente general hay aproximadamente una fuente de 400 mSv y como promedio, la dosis procedente del fondo natural que recibe una persona es del orden de 2.4 mSv/año.

Las causas artificiales se deben a la exposición a diversas fuentes de origen no natural, como son: exploraciones radiológicas con fines médicos, viajes en avión (en este caso, la mayor dosis de radiación cósmica que se recibe son en vuelos a gran altura), etcétera (Foro nuclear, 2010).

1.1.7.1. Fuentes de Radiación

Las personas están expuestas a diario tanto a la radiación de origen natural o humano. La radiación natural proviene de muchas fuentes, como los más de 60 materiales radiactivos naturales presentes en el suelo, el agua y el aire. El radón es un gas natural que emana de las rocas y la tierra y es la principal fuente de radiación natural. Diariamente inhalamos e ingerimos radionúclidos presentes en el aire, los alimentos y el agua. Asimismo, estamos expuestos a la radiación natural de los rayos cósmicos, especialmente a gran altura. Por término medio, el 80% de la dosis anual de radiación de fondo que recibe una persona procede de fuentes de radiación natural, terrestre y cósmica. Los niveles de la radiación de fondo varían geográficamente debido a diferencias geológicas. En determinadas zonas la exposición puede ser más de 200 veces mayor que la media mundial.

La exposición humana a la radiación proviene también de fuentes artificiales que van desde la generación de energía nuclear hasta el uso médico de la radiación para fines diagnósticos o terapéuticos. Hoy en día, las fuentes artificiales más comunes de radiación ionizante son los dispositivos médicos, como los aparatos de rayos X. Cada año se realizan en el mundo más de 3600 millones de pruebas diagnósticas radiológicas, 37 millones de pruebas de medicina nuclear y 7.5 millones de tratamientos con radioterapia (OMS, 2016).

1.1.7.2 Emisiones a la Atmósfera

Desde el punto de vista de la protección del medio ambiente, las centrales nucleares siempre han estado sujetas a un estricto control reglamentario institucional

difícil de igualar por otras actividades industriales. Dicho marco reglamentario contempla todas y cada una de las fases que componen el ciclo de producción, así como la protección de los trabajadores y del público en general.

Las centrales nucleares generan emisiones de efluentes radiactivos en cantidades limitadas de acuerdo con la regulación, que quedan registradas de forma continua y son objeto de constante seguimiento mediante un extenso programa de análisis realizado por entidades independientes y la administración. Los valores de estos efluentes medidos en términos de actividad radiológica y de dosis son mil veces inferiores a lo permitido.

1.1.7.3 Ocupación del Suelo

Considerando que el impacto ambiental afecta a multitud de factores, por ejemplo, hablando de la ocupación de terreno cuando éste alcanza valores relativos significativos y teniendo en cuenta que es un bien cada vez más escaso y caro, existen importantes diferencias entre unas y otras centrales energéticas, tal y como se observa a continuación:

Tabla 2. Ocupación de terreno de algunas centrales energéticas.

Nuclear	Entre 1 y 4 km ²
Solar	Entre 20 y 50 km ²
Eólica	Entre 50 y 150 km ²
Biomasa	Entre 4.000 y 6.000 km ²

Se observa que las centrales nucleares son las que menos impacto causan.

1.2 SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS

La nanociencia y la nanotecnología se ocupan del estudio y aplicación de sistemas de dimensiones muy pequeñas entre 1-100 nanómetros. A estos tamaños los materiales conocidos como nanomateriales tienen un área superficial muy elevada con respecto a su volumen, y sus propiedades fundamentales (como color, dureza, punto de fusión, propiedades magnéticas, etc.) son diferentes con respecto a las que presentan en las escalas micro o macroscópicas. De tal forma, el confinamiento de la luz o de los electrones en dimensiones reducidas hace que las propiedades ópticas y electrónicas cambien. La nanotecnología, al controlar la forma en cómo se acomodan los átomos y las moléculas, lo que busca es usar las propiedades de los nanomateriales en aplicaciones novedosas. Esta disciplina constituye una revolución científico-tecnológica, pues ha venido a transformar radicalmente los conocimientos, conceptos de manufactura y diseño de estos nuevos materiales (Cocoletzi, 2010).

Estas partículas de tamaño nanométrico han atraído un gran interés en los últimos años debido a sus propiedades únicas de la física y la química, así como su potencial de aplicación en la industria.

1.2.1 Métodos para la síntesis.

Las nanopartículas se fabrican en forma económica usando métodos químicos y biológicos. Entre los primeros tenemos, por ejemplo, el modo sol-gel, el de micro-emulsiones y el de microondas por mencionar algunos. Los métodos de síntesis de nanopartículas suelen agruparse en dos categorías: de “ruptura” y de “construcción”. La primera consiste en la división de sólidos másicos en porciones más pequeñas, este enfoque puede involucrar la molienda o el desgaste, métodos químicos y la volatilización de un sólido seguido por la condensación de los componentes volatilizados. La segunda consiste en la fabricación de nanopartículas a través de la condensación de átomos o entidades moleculares en una fase gaseosa o en solución. Este último enfoque es mucho más popular en la síntesis de nanopartículas, las cuales pueden ser soportadas o no. El soporte da estabilidad a

las nanopartículas, además de que les puede conferir propiedades específicas (Zanella, 2012).

Muchas partículas luminiscentes de diferentes composiciones químicas, formas y distribuciones de tamaño han sido preparados por muchos tipos diferentes de métodos tales como la evaporación de gas, vaporización con láser, deposición por haz ionizado, el proceso de sol-gel, hidrotermal, proceso solvotermal, etc.

1.2.1.1 Método Sol-Gel

El método sol-gel se inicia con la síntesis de una suspensión coloidal de partículas sólidas o cúmulos en un líquido (sol) y la hidrólisis y condensación de éste sol para formar un material sólido lleno de solvente (gel). El solvente se le extrae al gel simplemente dejándolo reposar a temperatura ambiente durante un periodo de tiempo llamado envejecimiento, en el cual el gel se encogerá expulsando el solvente y agua residual. Al finalizar el tiempo de envejecimiento, el material se somete a un tratamiento térmico para eliminar los solventes y agua que permanecen en el material. Las microemulsiones son mezclas líquidas estables de aceite, agua y un surfactante. A escalas macroscópicas, las microemulsiones son sistemas homogéneos, pero son heterogéneos a escala molecular ya que existen fases de agua y aceite separados por el surfactante.

1.2.1.2 Síntesis Solvotermal

Con el nombre general de síntesis solvotermal se agrupan una serie de técnicas en las que un precursor metálico disuelto en un líquido, en un recipiente cerrado, es calentado por encima de su punto de ebullición, lo que genera una presión superior a la atmosférica (normalmente moderada). El líquido habitual es el agua, y de ahí el nombre de “síntesis hidrotermal”; sin embargo, cada vez se van utilizando con mayor frecuencia otros medios líquidos: disolventes orgánicos, amoníaco líquido, hidracina, etc., y tenemos entonces la síntesis solvotermal. En este tipo de técnicas normalmente los tiempos de reacción son largos (comparados con otros métodos químicos).

La síntesis hidrotermal se refiere a reacciones heterogéneas en medio acuoso por encima de 100°C y 1 bar. Una característica distintiva de la síntesis hidrotermal es que los reactivos que difícilmente se disuelven en agua pasan a la disolución por acción del propio disolvente o de mineralizadores. El objetivo de esta técnica es lograr una mejor disolución de los componentes de un sistema y así se logran disolver o hacer reaccionar especies muy poco solubles en condiciones habituales (p. ej., la sílice, aluminosilicatos, titanatos, sulfuros). Por otra parte, pueden añadirse distintas especies conocidas como “mineralizadores”, tanto básicos (carbonatos, hidróxidos) como ácidos (nítrico, clorhídrico, sales amónicas) oxidantes o reductores, etc., que potenciarán la capacidad de disolución del agua en una u otra dirección. Además, el agua en estas condiciones suele actuar como agente reductor (liberando oxígeno), por lo que cabe esperar también variaciones en el estado de oxidación de los elementos implicados en la síntesis.

1.2.1.3 Síntesis por microondas

El descubrimiento del calentamiento por medio de microondas ocurrió en 1940 durante la Segunda Guerra Mundial, después de que los científicos británicos John Randall y H. A. Boot inventaran una válvula magnetrón para generar microondas, que es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en energía electromagnética en forma de microonda, componente fundamental de los sistemas de radar. Sin embargo, fue en 1975 cuando Sutton observó que la radiación microondas calentaba los materiales cerámicos, algo que podría resultar sorprendente considerando que la región de microondas en el espectro electromagnético está situada por debajo del infrarrojo, lo que supone una zona de bajas energías, esto se puede observar en la Figura 6 en donde las ondas microondas se encuentran en donde está Radar.

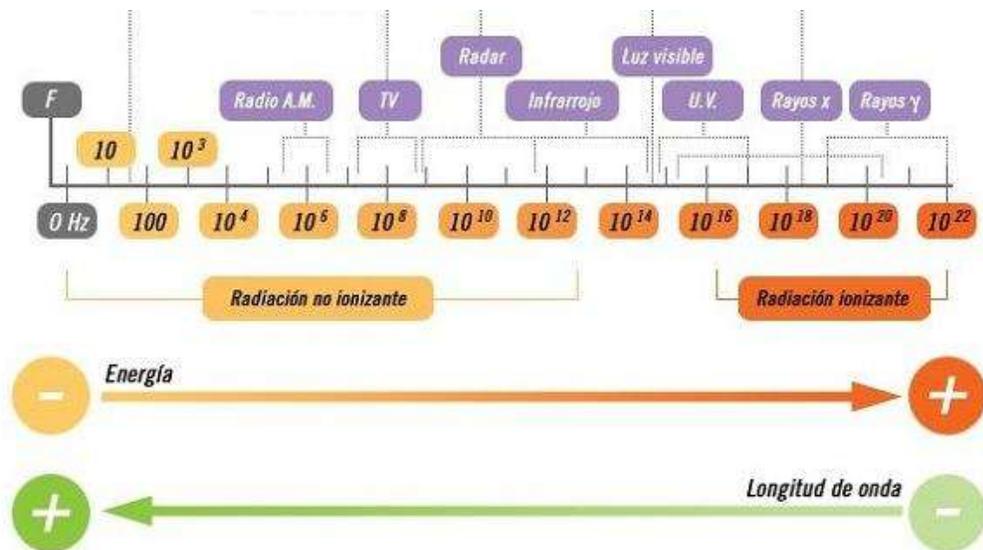


FIGURA 6. Espectro Electromagnético.

Recientemente, la irradiación por microondas ha sido un método atractivo para síntesis de nanomateriales debido a sus efectos de reacción únicas, tales como calentamiento volumétrico rápido y el consiguiente aumento dramático en la velocidad de reacción y por lo tanto, es considerado como un método limpio, económico y es un método de calentamiento conveniente que a menudo se consigue mayores rendimientos y tiempos de reacción cortos (Quan et al, 2009).

1.2.2 Calentamiento por microondas.

El calentamiento se produce debido a que el campo eléctrico de los microondas es alterno, provocando un rápido movimiento de las especies polares que tratan de alinearse con el campo, la resistencia a dicho movimiento genera calor, solo se genera un movimiento rotacional de la molécula, su estructura no se ve afectada. Los hornos de microondas convencionales trabajan a una frecuencia de 2.45 GHz y la energía asociada a dicha radiación es de 0.0016 eV, energía mucho menor que la que posee un enlace de hidrógeno (0.21 eV) (Prado et al., 2011).

Las principales características del calentamiento por microondas son las siguientes:

a) *Radiación penetrante*: En un tratamiento térmico convencional, la energía es transferida al material mediante conducción y convección creando gradientes térmicos. Sin embargo, en el caso del calentamiento por microondas, la energía se transfiere directamente al material mediante una interacción a nivel molecular con el campo electromagnético como se aprecia en la Figura 7. Esta diferencia en la forma de transferencia de energía es crucial en la síntesis de los materiales. La profundidad que alcanza la radiación varía en función del material y de otros factores como las propiedades dieléctricas y magnéticas, la frecuencia y potencia del microondas, la temperatura, la conductividad, el tamaño y la densidad del material.

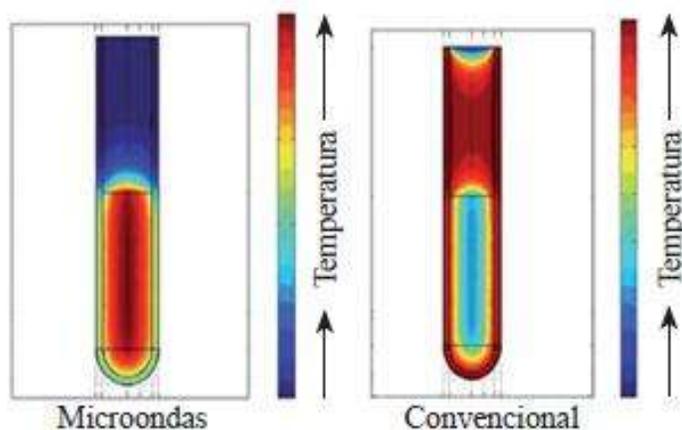


FIGURA 7. Distribución de temperatura en un calentamiento por microondas y convencional.

b) *Calentamiento rápido*: El empleo de microondas reduce significativamente el tiempo de procesamiento respecto a las síntesis convencionales, manteniendo las propiedades e incluso muchas veces mejorándolas. Sin embargo, hay que tener cuidado para prevenir la creación de puntos calientes durante un calentamiento tan rápido. Algunos autores aseguran que las reacciones se aceleran entre 10 y 1000 veces cuando se realizan asistidas por microondas.

c) *Calentamiento selectivo de los materiales*: Las microondas se pueden emplear para efectuar un calentamiento selectivo, algo que no es posible en los tratamientos convencionales. Dependiendo de las características del material empleado

(propiedades dieléctricas, tamaño y estructura molecular) y su habilidad para acoplarse con el campo eléctrico y/o magnético de las microondas, el calentamiento se localiza en ciertas regiones (Prado et al., 2011).

Se ha demostrado que la síntesis asistida por microondas es un método muy rápido y efectivo para la producción de materiales con estructura perovskita. Un tratamiento de 30 minutos de microondas es suficiente para obtener un producto puro y cristalino, esto se debe al comportamiento metálico de estos materiales, que hacen que en el momento que se originan las primeras partículas del producto, éstas actúen como susceptor (material que se usa por su capacidad de absorber energía electromagnética y convertirla en calor) de la radiación acelerando la reacción.

La técnica de irradiación con microondas produce nanopartículas en donde las microondas actúan como campos eléctricos de alta frecuencia, capaces de calentar cualquier material conteniendo cargas eléctricas como las moléculas polares en un disolvente o iones conductores en un sólido. Los solventes polares se calientan y sus componentes moleculares se ven obligados a girar con el campo y pierden energía en colisiones. Las muestras conductoras y semiconductoras se calientan cuando los iones y los electrones contenidos en ellas forman una corriente eléctrica y la energía se pierde debido a la resistencia eléctrica del material (Zhu et al., 2009).

1.2.3 Trifluoruro Potasio Magnesio con estructura Perovskita (KMgF₃)

El estudio de materiales tipo perovskita ha tenido en los últimos años una trascendencia fundamental en la investigación científica y aplicaciones tecnológicas, debido a sus propiedades eléctricas y magnéticas a diferentes temperaturas. La investigación de sus características morfológicas, estructurales, mecánicas, eléctricas y fisicoquímicas, ha revelado la gran cantidad de posibilidades de optimización y mejoramiento de los procesos eléctricos, ópticos y termodinámicos en estos materiales cerámicos, a través de modificaciones estructurales inducidas mediante sustituciones composicionales parciales, deficiencias iónicas (vacancias) o introducción de defectos (Rendón, 2006).

Las perovskitas son materiales cerámicos, formados por elementos metálicos y no metálicos constituidos principalmente por enlaces iónicos y/o covalentes; en general, son frágiles con baja ductilidad. Se comportan usualmente como buenos aislantes eléctricos y térmicos debido a la ausencia de electrones conductores a temperatura ambiente, poseen altas temperaturas de fusión y, así mismo, una estabilidad relativamente alta en la mayoría de los medios agresivos, por causa de la estabilidad de sus enlaces fuertes. Al realizar ligeras modificaciones de la arquitectura ideal de la perovskita a menudo se producen nuevas propiedades. Esta familia de materiales cubre parte de aislantes (no conductores), semiconductores, conductores súper-iónicos, conductores metálicos y superconductores de alta temperatura. No existe una correlación exacta entre las características estructurales y la respuesta eléctrica del material, ya que una determinada modificación estructural, no genera un grado particular de conductividad eléctrica. Cada vez que se altera la estructura ideal surge la posibilidad de nuevas propiedades (Cuervo, 2011).

Las perovskitas puras y dopadas, tal como KMgF_3 , muestran una intensa termoluminiscencia después de la exposición a la radiación ionizante (Lal et al, 2004). La fluorperovskita es de los más importantes compuestos que son capaces de almacenar al menos parte de la energía de la radiación incidente ionizante y la liberación de al menos parte de la energía almacenada a la estimulación óptica o calefacción. Fue descubierta en los montes Urales en Rusia por el mineralogista y Químico alemán Gustav Rose en 1839 y fueron denominadas de esta manera en honor al dignatario, mineralogista y oficial militar ruso Lev Alexeievitch Perovsky. El material KMgF_3 , se propuso como un material TL por primera vez en 1990 y mostró buenos resultados dosimétricos (Furetta et al., 1990).

Los cristales perfectos de KMgF_3 exhiben transparencias altas en la región de longitud de onda de la luz solar, y los cristales KMgF_3 dopados o aquellos con defectos de red absorben la luz visible. Por lo tanto, también tienen el potencial de utilizarse como fotocatalizadores sensibles a la luz visible (Hu et al., 2013).

En su forma ideal las perovskitas que se describen por la fórmula química ABX_3 constituyen una celda cúbica con tres elementos químicos diferentes (A, B y X), presentes en una proporción 1:1:3. Los átomos A y B son cationes metálicos y los átomos X son aniones no metálicos. El catión A que es el de mayor radio atómico se encuentra el centro del cubo, el catión B ocupa los ocho vértices y en centro de las aristas de la celda cúbica se encuentran centrados los aniones X, como se aprecia en la Figura 8 (Wang et al, 2013).

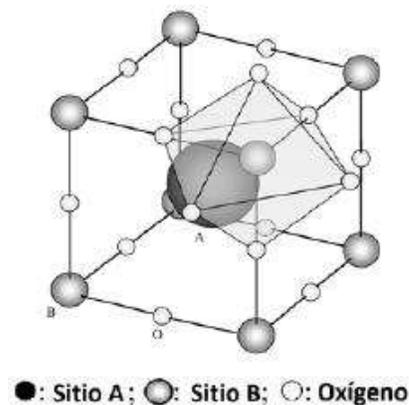


FIGURA 8. Estructura ideal tipo perovskita ABX_3 .

Para modificar las perovskitas conocidas actualmente, se combinan elementos como bario, potasio, estroncio, calcio o en general elementos pertenecientes al grupo de los metales alcalinos, alcalinotérreos o una tierra rara como el Lantano (posiciones A) y aproximadamente 50 elementos estables de la tabla periódica, correspondientes a los metales de transición, como Fe, Mn, Cr, Mo (posiciones B). Las posiciones X pueden ser ocupadas por miembros de la familia de los halógenos como flúor, cloro o bromo. Los cristales de $KMgF_3$ dopados con tierras raras han sido investigados para potenciales aplicaciones como centelladores UV y dosimetría (Mahlik et al, 2011).

Cada catión B, que define el vértice de los cubos vecinos, está fuertemente unido a los seis aniones que lo rodean pertenecientes a cada una de las seis aristas del cubo que convergen en el vértice. Los aniones definen los vértices de un octaedro. El catión A, anteriormente visto como el centro de un cubo, se considera ahora rodeado por ocho octaedros con vértices compartidos, cada uno de los cuales

contiene un catión B en el centro, Figura 9 (Cuervo, 2011). Las perovskitas dopadas con tierras raras, según los informes muestran una termoluminiscencia intensa después de la exposición a la radiación ionizante (Lal et al., 2004).

El material KMgF_3 tiene estructura perovskita donde los iones grandes de K^+ están en el centro de poliedros KF y los iones pequeños de Mg^{2+} son seis veces coordinados (Mahlik, et al, 2011).

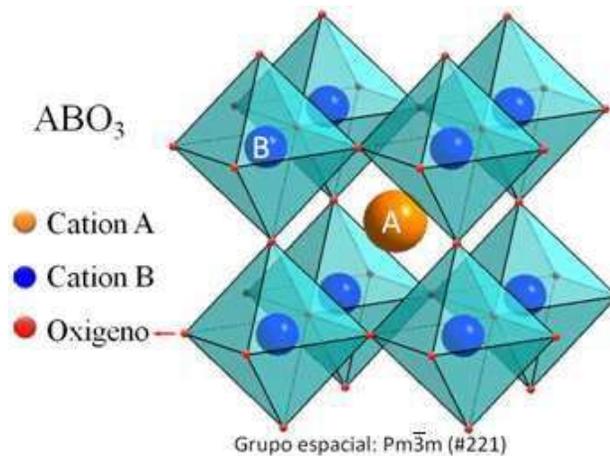


FIGURA 9. Estructura cristalina típica de un óxido tipo Perovskita.

1.3 FENÓMENO DE TERMOLUMINISCENCIA

La ley de Stoke dice que cuando la radiación incide sobre un material, parte de su energía puede ser absorbida y remitida como luz de una longitud de onda más larga de acuerdo a las características del propio material, a este proceso se le llama luminiscencia. La longitud de onda de la luz emitida es característica del material luminiscente y no de la radiación incidente, la luz emitida por el material puede ser de luz visible, rayos ultravioletas o infrarrojos. Los diversos fenómenos de luminiscencia reciben su nombre por el tipo de mecanismo utilizado para excitar la emisión. Por ejemplo: la fotoluminiscencia que es la excitación por medios ópticos o luz ultravioleta, la radioluminiscencia que es la excitación por radiaciones nucleares, la quimioluminiscencia que es luminiscencia generada por una reacción química, sonoluminiscencia que se genera por onda sonoras, etc. (Flores, 2011)

La termoluminiscencia provee información muy útil acerca de las trampas cargadas y el proceso de transferencia de energía en una red cristalina resultando una emisión de luz. La Termoluminiscencia además de su empleo como herramienta adecuada en muchos casos para la caracterización de propiedades ópticas y térmicas en Ciencia de los Materiales, la principal aplicación práctica de la termoluminiscencia (TL) es sin duda en la Dosimetría Termoluminiscente (DTL) (Joseph D., et al, 2015). La termoluminiscencia está considerada como un método de medida de gran versatilidad que se adapta sin excesivas dificultades a la gran variedad de actividades científicas o técnicas en la que se requiera una determinación precisa de la dosis absorbida por irradiación.

El proceso de termoluminiscencia (TL) es un fenómeno de emisión de luz por parte de un material aislante o semiconductor cuando es calentado tras haber absorbido previamente cierta cantidad de energía de un campo de radiación ionizante, diferente a la que se origina simplemente por calentar un cuerpo hasta la incandescencia. Este fenómeno se puede ver en la Figura 10 (Flores, 2011).

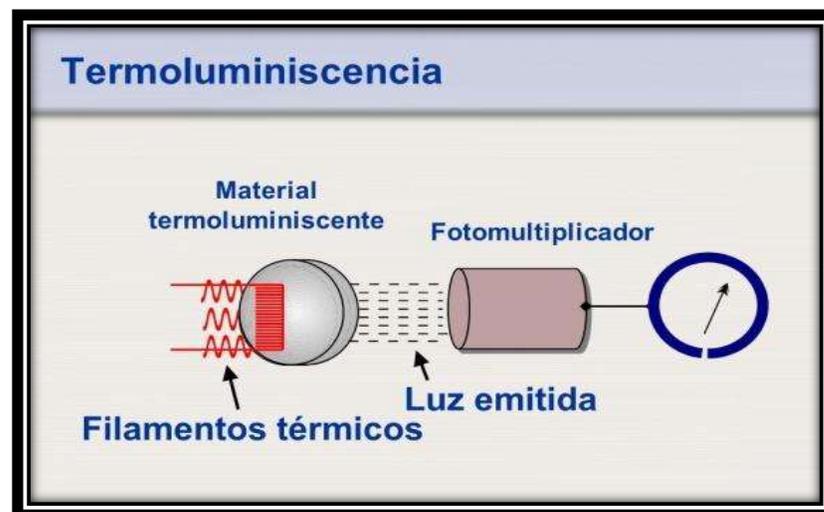


FIGURA 10. Fenómeno de Termoluminiscencia.

1.3.1 Equipo Lector Termoluminiscente (TL)

En un tiempo relativamente corto (de unos cuantos segundos a unos cuantos minutos), el material TL debe ser calentado desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 300°C dependiendo el material y la luz emitida debe ser medida en forma cuantitativa.

Los componentes básicos de un equipo lector TL son:

- ❖ *Sistema de calentamiento:* Uno de los requisitos esenciales para el calentamiento de un material TL es que exista óptimo contacto térmico entre el dispositivo que calienta y el material TL. El equipo utilizado tiene un dispositivo de calentamiento llamado plancheta de calentamiento. Este elemento actúa como el elemento calentador mediante el paso de una corriente eléctrica alta (-200A) a través de ella. Esta plancheta de calentamiento va colocada en un cajón, el cual es introducido o extraído de la cámara oscura para leer o colocar el material TL respectivamente.
- ❖ *Sistema Detector de luz:* Con el propósito de obtener la máxima eficiencia de detección, y concentrar la mayor cantidad posible de la luz emitida por el material TL, el equipo lector cuenta con un tubo fotomultiplicador (TFM).
- ❖ *Flujo de gas:* El equipo lector tiene un dispositivo para hacer fluir gas N₂ dentro de la cámara oscura. El flujo de este gas es con el fin de reducir y estabilizar la corriente oscura mediante el enfriamiento de la cara frontal del TFM y para eliminar la luminiscencia espuria.
- ❖ *Fuente de alto voltaje:* En virtud de que la carga sobre el TFM es prácticamente independiente de la señal de salida, se requiere que la Corriente Directa a la salida de la fuente de alto voltaje sea constante. Esto se logra usando una entrada regulada de bajo voltaje en el circuito oscilador.

- ❖ *Sistema acondicionador de la señal:* Este sistema sirve esencialmente para convertir la señal de salida del TFM en una magnitud que pueda medirse cuantitativamente. Esto puede hacerse de diversas maneras tales como: conteo de pulsos, medición de corriente directa o conteo de fotones. Para nuestro caso, se usa la de medición de corriente directa o carga integrada. La corriente de salida del TFM es amplificada para posteriormente ser registrada en un graficador (Rivera et al, 1993).

1.3.2 Generación de la Curva de Brillo

La forma de la curva de brillo se refiere a la representación gráfica de la intensidad de la luz liberada al estimular los electrones que quedaron atrapados en los huecos, se ha observado que esta característica es como la huella digital de cada material TL en estudio. Aunque puede existir mucha similitud entre varias curvas de brillo de distintos materiales cada una tiene características diferentes como pueden ser la posición de los picos TL de intensidad máxima y la misma intensidad de los picos TL. La curva de brillo TL consiste en picos superpuestos en un rango de temperatura de 30-300 ° C y estos picos mediante deconvolucion se pueden ajustar los picos, usando un software (Bajaj et al, 2016).

La termoluminiscencia o Luminiscencia Térmicamente Estimulada es un proceso de radiación inducida en materiales cristalinos, en los cuales se consideran tres espacios continuos de energía a los que se les llama bandas: banda de valencia (BV), banda prohibida (BP) y banda de conducción (BC) (González U., 2000). En los materiales termoluminiscentes empleados en dosimetría las emisiones TL son esencialmente procesos relacionados con la presencia de impurezas que han sido introducidas artificialmente en la red del material matriz (dopantes). Estas impurezas generan niveles de energía específicos (trampas) en la banda de energías prohibidas situada entre la banda de valencia y la banda de conducción los cuales no existen en el material puro. Estos nuevos niveles pueden ser ocupados por los portadores de carga, electrones y/o huecos, liberados durante la irradiación (Townsend et al, 1983). En materiales aislantes la banda prohibida suele ser bastante ancha, 6eV ó mayor,

permitiendo la presencia de gran variedad de trampas asociadas a diversos complejos de defectos en los que intervienen precisamente las impurezas con las que se ha dopado al material.

En efecto, durante la irradiación el material absorbe cierta cantidad de energía que se traduce en la creación de pares electrón hueco (e^-h^+), excitando electrones a la banda de conducción y dejando sus respectivos huecos en la banda de valencia. Ambos tipos de cargas pueden moverse por sus respectivas bandas y tras un corto intervalo de tiempo se recombinan. La existencia de esos niveles intermedios en la banda prohibida hace que se abra un canal alternativo a través del cual parte de esos electrones y/o huecos generados tras la irradiación quedan estabilizados retrasando o impidiendo su inmediata recombinación; en la Figura 11 se representa el proceso (Flores, 2011).

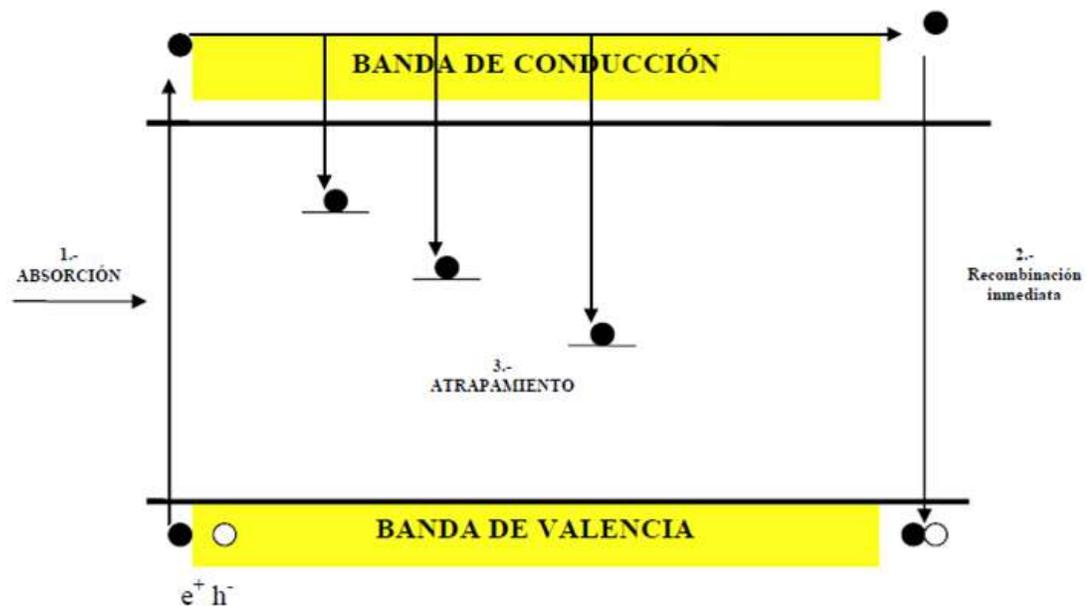


FIGURA 11. Proceso de Termoluminiscencia.

1.- *Absorción:* la radiación incidente, lleva o deposita la energía suficiente para ionizar al sólido cristalino, generando pares iónicos; electrón y hueco (carga negativa y carga positiva).

2.- *Recombinación inmediata*: representa el regreso al estado fundamental previo a la irradiación. Sin embargo, al haber defectos en el material (cristales reales), los pares iónicos generados por la radiación, migran por la red hasta ser capturados por dichos defectos o trampas.

3.- *Atrapamiento*: la energía depositada en el material, genera un número determinado de pares iónicos o trampas ocupadas, el cual depende de la dosis depositada. Mientras mayor dosis se aplique en el material, su intensidad TL se incrementa de manera proporcional. Este es el fundamento de la dosimetría TL, "la emisión de luz térmicamente estimulada, de un dosímetro previamente irradiado, es proporcional a la dosis recibida" y si conoces la dosis, conocerás también la energía depositada por unidad de masa ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$).

Es posible encontrar estructuras red matriz en las que haya una distribución de estos niveles de impurezas cercana a la banda de conducción. En tal caso, se consigue excitar de nuevo las cargas atrapadas a la banda de conducción simplemente suministrando una pequeña cantidad de energía en forma de calor, es decir, elevando la temperatura del material. Si se aumenta gradualmente la temperatura, las cargas atrapadas en las trampas más próximas a la banda de conducción serán excitadas en primer lugar. Estas alcanzarán la banda de conducción a temperaturas inferiores que aquellas cargas que hayan sido atrapadas en trampas más profundas y que obviamente necesitarán una energía mayor para ser liberadas. Todo este proceso tiene lugar durante la etapa de lectura del dosímetro y se ha representado en la Figura 12.

4.- *Calentamiento*: es la liberación térmicamente estimulada de cargas atrapadas seguida de la difusión de electrones por la banda de conducción y huecos en la banda de valencia.

5.- *Recombinación TL*: tiene lugar en el centro de recombinación y que es la que genera la curva de termoluminiscencia.

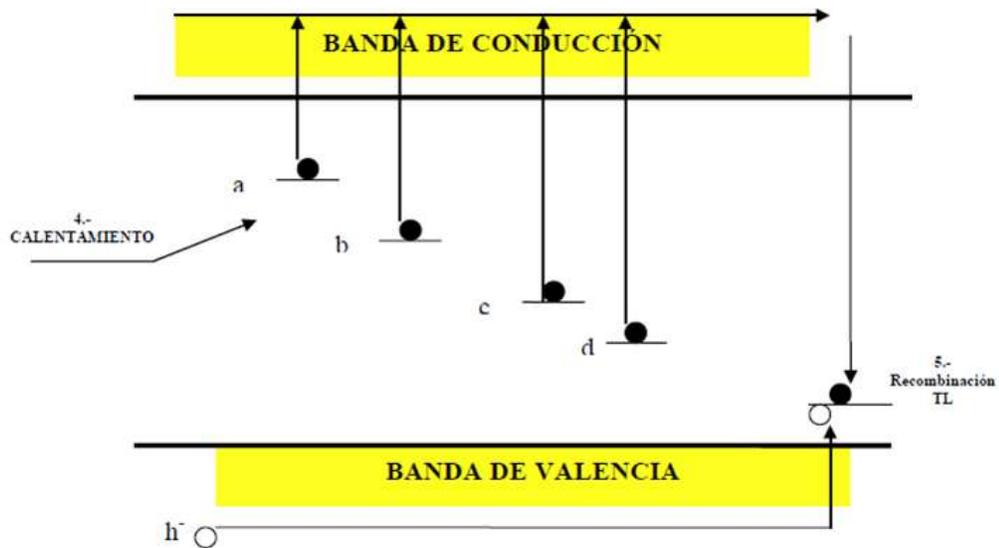


FIGURA 12. Formación de la curva Termoluminiscente.

El número de cargas atrapadas en los niveles asociados a las impurezas es proporcional a la concentración de trampas existentes y naturalmente es función de la cantidad de energía absorbida por el material del campo de radiación. Si la concentración de trampas permanece constante, el número de cargas atrapadas dependerá únicamente de la energía absorbida. Entonces calentando el material irradiado se tiene un método para estimar el número de cargas atrapadas y por tanto la dosis absorbida a través de la medición de la luz que se emite. Evidentemente la medida de la luminiscencia que se produce en la lectura no es por sí sola una medida cuantitativa de la dosis absorbida por el dosímetro.

La curva de brillo TL es una medida de la intensidad de la luz emitida como una función de la temperatura. Esas curvas son particularmente importantes ya que son los principales indicadores si un material puede ser usado para dosimetría TL o no. La forma y estructura de la curva TL que se obtiene en la lectura está determinada por el proceso de liberación-recombinación de las cargas de distinto signo atrapadas, en este esquema electrones y huecos.

Para trampas profundas, como la **c** o la **d** de la figura 12, la probabilidad de escape de sus trampas a temperatura ambiente es muy baja y los picos asociados

son estables a esa temperatura. Las trampas **a** y **b** de la misma figura, dada su proximidad a la banda de conducción, requerirán menos energía para ser liberadas y su probabilidad de escape será mayor pudiendo no ser estables a temperatura ambiente. Por esta razón los picos TL de baja temperatura no se emplean en dosimetría ya que la información dosimétrica no se almacena con una estabilidad térmica suficiente.

Para cualquier trampa TL la probabilidad de escape **p** de las cargas atrapadas crece proporcionalmente con la temperatura T. Si bien, **p** aumenta proporcionalmente con la temperatura, no lo hace la tasa de liberación de cargas atrapadas dn/dt debido a que, naturalmente, la población de cargas atrapadas es finita y decrece conforme aumenta la temperatura. Por esa razón, al ser incrementada progresivamente la temperatura durante la lectura llega un momento en que la población de cargas atrapadas no es capaz mantener nuevos incrementos en dn/dt y en consecuencia comenzará a decrecer. Por tanto al aumentar la temperatura, dn/dt tendrá la forma de un pico: aumenta del lado de bajas temperaturas alcanzando un máximo determinado por las características de la trampa y finalmente decrece hasta cero cuando la temperatura ha crecido lo suficiente como para haber vaciado completamente la trampa. La recombinación sigue a la liberación de las cargas, la intensidad de la luz detectada durante la lectura tendrá también la forma de un pico.

En la Figura 12 cada pico de termoluminiscencia está asociado a una trampa diferente e independiente y la composición de todos ellos daría lugar a una curva compleja de termoluminiscencia, muy habitual en los diferentes materiales termoluminiscentes, como se puede apreciar en la siguiente Figura un ejemplo de curvas de brillo. Las características concretas que presenta cada pico, como la forma y proporción en la curva, depende una amplia variedad de factores como son el ciclo de lectura empleado, los tratamientos térmicos que se hayan aplicado antes y/o después de la irradiación, el tipo de radiación, la dosis impartida, la longitud de onda

en la que se efectúe la medida e incluso de la partida de procedencia de las muestras.

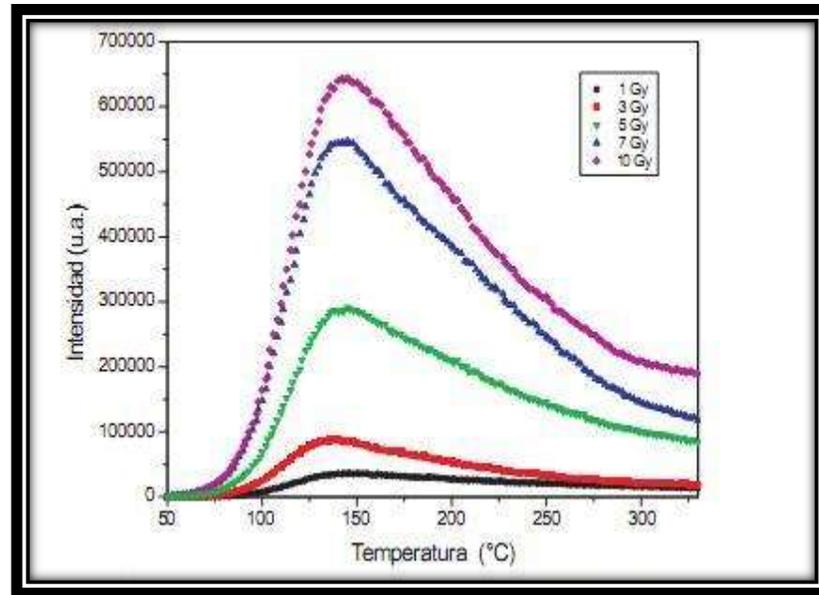


FIGURA 13. Ejemplo de curvas de brillo TL.

1.4 DETECTORES DE LA RADIACIÓN IONIZANTE.

Una característica de las radiaciones que dificulta su detección y en cierta forma su comprensión, es que no impresionan nuestros sentidos, sus efectos no son tangibles a menos que sea muy alta la intensidad de éstas.

Debido a que las radiaciones producen principalmente ionizaciones y excitaciones en los átomos del material que atraviesan, la detección de las mismas no se limita a indicar únicamente su presencia, es muy importante medir el tipo específico de radiación, su intensidad, energía y sus propiedades. A continuación se describen algunos detectores utilizados:

1.4.1 Detectores por ionización en gases.

El detector por ionización en gases consiste en una cavidad llena de algún gas provista de electrodos entre los cuales se les aplica una diferencia de potencial. Al interaccionar la radiación con el gas contenido entre los dos electrodos produce iones; los cuales, debido al voltaje aplicado entre los electrodos, son atraídos hacia el ánodo los negativos y los positivos hacia el cátodo. Este flujo de iones constituye una corriente eléctrica que da respuesta cuantitativa de la cantidad de radiación que recibe el detector. Dependiendo de la región de respuesta del detector en función del voltaje que se le aplica a los electrodos, los detectores por ionización en gases se clasifican en: Cámaras de ionización (CI.), detectores proporcionales y detectores Geiger-Müller (G-M).

1.4.2 Detectores de centelleo.

Este método fue uno de los primeros en usarse para detectar la radiación ionizante. Actualmente, un detector de centelleo está constituido por un cristal (material centellador) que emite luz cuando recibe la radiación ionizante, acoplado a un tubo fotomultiplicador (TFM) para medir la luz emitida por el material que centellea. El funcionamiento de un detector de centelleo se basa en el hecho de que al incidir la radiación sobre el cristal centelleado, este produce un destello luminoso el cual desprende electrones del fotocátodo del TFM. Estos electrones una vez multiplicados en los dinodos del TFM llegan al circuito de medida donde se obtiene una respuesta proporcional a la cantidad de radiación recibida por el detector. Con este tipo de detectores es posible detectar además de partículas alfa de alta energía, partículas beta y radiación gamma de 5 keV en adelante.

1.4.3 Detectores semiconductores de unión.

Este tipo de detector actúa como una cámara de ionización de estado sólido ya que su funcionamiento es análogo al de una cámara de ionización de gas. En estos detectores la radiación ionizante interacciona con el volumen sensible del sólido produciendo electrones por ionización.

1.4.4 Dosímetros

Un dosímetro se considera absoluto si con el podemos medir la energía absorbida sin necesidad de calibrarlo en un campo de radiación conocido cada vez que se quiera usar el dosímetro; y se considera secundario cuando por el contrario necesita calibrarse antes de ser usado. Entre los métodos absolutos se encuentran la ionización en gases y la calorimetría. La calorimetría, es un método fundamental para la medición de la dosis basado en el hecho de que la energía que absorbe un líquido o sólido se transforma en calor, lo que ocasiona una elevación de la temperatura, la cual puede medirse directamente, pero esto requiere de aparatos que la mayoría de las veces son complicados, no disponibles comercialmente, difíciles de portar, etc. Los dosímetros secundarios, juegan un papel muy importante en la dosimetría; entre estos principalmente los dosímetros químicos y los de estado sólido.

La dosimetría de estado sólido ha sido ampliamente usada; en especial el método de la termoluminiscencia (TL), el cual aunque no es un método absoluto, permite efectuar mediciones precisas. La dosimetría TL presenta ventajas respecto a otros métodos de dosimetría ya que posee las siguientes características:

- No necesitan un empaque especial
- Cubren un amplio intervalo de dosis
- Hay materiales equivalentes al tejido
- Retienen la información por mucho tiempo
- No necesitan conexiones entre el dosímetro y el equipo electrónico asociado, lo que los hace fáciles de transportar.
- Son sensibles a casi cualquier tipo de radiación
- Se pueden usar varias veces
- Son baratos
- Se pueden preparar en un laboratorio
- Tienen un tamaño pequeño
- Son de fácil ubicación (muy útil en dosimetría de área)

1.4.4.1 Dosimetría Termoluminiscente (DTL)

Los dosímetros termoluminescentes son cristales orgánicos o inorgánicos con defectos o imperfecciones en sus redes cristalinas (Yoshizumin, 2013).

A medida que crece el interés en conocer los efectos sobre la salud de las bajas dosis de radiación natural o artificial, se hace más necesario un sistema dosimétrico capaz de medir con precisión esos niveles de dosis. Por más de veinte años los dosímetros termoluminiscentes (TL) han constituido un método simple y preciso para tales mediciones. En el monitoreo ambiental se requiere de materiales TL que reúnan las siguientes propiedades: alta sensibilidad, estabilidad en las condiciones climáticas severas a que son expuestos, lectura cero y dosis mínimas medibles, desvanecimiento pequeño de la respuesta entre el momento de la irradiación y la lectura (*fading*) (Molina et al, 2014).

El fundamento de la dosimetría TL se basa en el hecho de que la cantidad de luz emitida por el material TL irradiado es proporcional a la cantidad de radiación recibida, además que el material puede retener la información por mucho tiempo. En el caso de la dosimetría de la radiación se puede hacer una división, de acuerdo con el intervalo de dosis absorbida que se va a medir. Las dosis bajas del orden de los microgray (μGy) son importantes en el monitoreo ambiental y personal; las dosis intermedias, del orden de los grays (Gy) lo son en radiodiagnóstico y en radioterapia; y las dosis altas, alrededor de decenas de gray, en la irradiación de alimentos para su preservación y para la esterilización de material quirúrgico.

En un principio, la técnica convencional disponible para dosimetría era el método de la película fotográfica, en el cual la dosis se determina por el grado de oscurecimiento de la película, aunque no en forma lineal y por ello se debe obtener una curva de calibración. Por consiguiente éste método poco a poco ha sido reemplazado por la dosimetría TL, en virtud de que el segundo presenta ventajas en lo que se refiere a sensibilidad, estabilidad, precisión y exactitud, además de la confiabilidad de estos así como el bajo desvanecimiento.

Los dosímetros termoluminiscentes deben de ser expuestos a una fuente de radiación conocida a fin de obtener la respuesta de éstos a diferentes dosis y poder llevar a cabo la elaboración de una curva de calibración. Otra ventaja de la dosimetría termoluminiscente es la del hecho de que el equipo de lectura no posee una electrónica asociada muy complicada, ya que consta básicamente de un sistema calefactor (plancheta) así como un sistema detector (tubo fotomultiplicador). La plancheta provee de la cantidad de calor necesaria al material termoluminiscente a fin de lograr la emisión de luz por parte de este, la cual es proporcional a la radiación a la que fue expuesto.

II. JUSTIFICACIÓN

La amplia aplicación de las fuentes de radiación ionizante en muchos campos de la vida cotidiana como la generación de energía, radioterapia, monitorización del medio ambiente, esterilización, estudios médicos, requiere el desarrollo continuo de detectores de radiación adecuados para medir y controlar la dosis o la tasa de dosis en cada caso particular.

III. HIPÓTESIS

En base a bibliografía y trabajos de investigación previos (Herrero et al, 2015), las perovskitas KMgF_3 dopadas con tierras raras, cuentan con propiedades termoluminiscentes, pudiéndose obtener una respuesta lineal entre la cantidad de radiación absorbida y la intensidad de la señal TL para aplicarse como dosímetro.

IV. OBJETIVOS

4.1 General

Estudiar el efecto de termoluminiscencia del material KMgF_3 con estructura perovskita, sobre las propiedades dosimétricas al doparlo con terbio (Tb) y posteriormente irradiarlo; para su aplicación en dosimetría de radiación ionizante.

4.2 Específicos:

- a) Establecer y desarrollar los parámetros para la caracterización dosimétrica de la perovskita $\text{KMgF}_3:\text{Tb} + \text{PTFE}$.
- b) Estudiar el efecto de la termoluminiscencia del material en función de distintas dosis de radiación ionizante, realizando el tratamiento térmico de borrado, de irradiación en una fuente de ^{60}Co y su lectura en el equipo lector correspondiente.
- c) Evaluación de las propiedades dosimétricas del material $\text{KMgF}_3+\text{PTFE}$ dopado con terbio, con la finalidad de determinar su eficiencia para aplicarlo cómo dosímetro de radiaciones ionizantes.

V. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el procedimiento experimental utilizado desde la síntesis del material $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ así como su caracterización dosimétrica que se llevó a cabo en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ).

5.1 Síntesis de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ vía Microondas.

La síntesis se llevó a cabo en un reactor de Microondas Anton Paar, con sensor de temperatura IR de $300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, termómetro de rubí de $300^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, cubierta giratoria, presión máxima de 30 bar, agitación magnética y enfriamiento con aire comprimido. En la Figura 14 se puede apreciar una foto de dicho reactor.



FIGURA 14. Reactor de Microondas Anton Paar.

Para realizar la síntesis del trifluoruro potasio magnesio impurificado con terbio (Tb) se realizó haciendo una mezcla de trifluoroacetato de potasio y de magnesio en un vial de 30 ml como se aprecia en la Figura 15, a una relación de 1:1 mol.

De acuerdo con el trabajo de Quan Z. (Quan et al, 2009), él manejó una concentración de terbio de 0.05 mol% en esta investigación el material se impurificó con 1.0 y 2.0 mol% de Tb; como medio dispersante se agregaron 9 ml de oleilamina debido a que es un buen solvente, tiene elevado punto de fusión (348-350°C) y actúa como un surfactante que impide la aglomeración de los nanocristales, también se adicionó el cloruro de terbio a las concentraciones mencionadas, se agregó nitrógeno por desplazamiento con llaves, una vez bien sellado el vial se introdujo al reactor hasta una temperatura de 220°C durante 10 minutos.



FIGURA 15. Vial de 30 ml con la mezcla para la síntesis de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$.

El producto obtenido se recolectó para centrifugarlo, y fue lavado con etanol varias veces hasta eliminar excedente del dispersante, posteriormente se realizó el secado en un horno tubular con atmósfera inerte de nitrógeno a 60°C por 4 h.

Se obtuvo el material en polvo, se le realizó un tratamiento térmico para homogeneizar la fase de KMgF_3 , a una temperatura de 700°C durante 2 horas y se dejaron enfriar dentro del horno, se realizó difracción de rayos X para comprobar que dicha fase estuviese presente (Herrero et al., 2015).

5.2 Pruebas de sensibilidad de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ en polvo.

Se realizó un tratamiento térmico previo a la irradiación, también conocido como borrado para su homogenización, el cual se llevó a cabo en una mufla a 300°C por 30 minutos, con enfriamiento fuera del horno. Cada muestra se guardó en capsulas previamente clasificadas de grenetina, se llevaron a irradiar a una dosis de 3.0 Gy en el irradiador gamma de ^{60}Co , modelo Gammacell serie 220 con una razón de dosis actual de 35.495161 Gy/h. Se guardaron para tomar sus lecturas al día siguiente.



FIGURA 16. Irradiador Gammacell modelo 220.

La muestra dopada con 2.0 mol% de Tb, fue la que presentó la sensibilidad más alta a la radiación, por lo que optamos por la elaboración de dosímetros en forma de pastillas con el material de esta concentración.

5.3 Elaboración de Dosímetros en forma de pastillas.

La pérdida de masa, al manejar el material en forma de polvo, ocasiona la baja reproducibilidad en la respuesta TL y la presencia de partículas extrañas atraídas por el material, crea señales espurias. Para evitar éstos inconvenientes se elaboraron dosímetros en forma de pastillas. Para llevar a cabo el procedimiento se mezcló en una relación 2:3 el polvo de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ (2.0 mol%), y politetrafluoretileno (PTFE), respectivamente, se comprimió en un molde de acero inoxidable en una prensa a temperatura ambiente.

Las pastillas obtenidas se trataron térmicamente dentro de una mufla para ser sinterizadas en un intervalo de temperatura de 40°C hasta 400°C , por un tiempo aproximado de 6 horas. Después de la sinterización, las muestras se dejaron enfriar dentro del horno. Se obtuvo un lote de 40 pastillas como se puede ver en la Figura 17.



FIGURA 17. Dosímetros en forma de pastilla.

5.4 Caracterización Dosimétrica

5.4.1 Tratamiento térmico de Borrado

Es el tratamiento térmico que recibe el material previo a cualquier irradiación. Los dosímetros termoluminiscentes fueron sometidos a un tratamiento térmico de borrado cuyos objetivos son:

- Eliminar cualquier exposición de radiación residual.
- Desocupar completamente las trampas de material irradiado
- Estabilizar dichas trampas para obtener, entre límites experimentales, las mismas curvas TL después de ciclos repetidos de irradiación y borrado térmico.

Se estableció el tratamiento térmico de borrado estándar para los dosímetros de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}+\text{PTFE}$, el cual consistió en calentar a una temperatura de 300°C durante media hora, se llevó a cabo en una mufla como la presentada en la Figura 18. Dicho tratamiento térmico se utilizó durante el desarrollo experimental de la investigación.



FIGURA 18. Mufla para tratamiento térmico de Borrado.

5.4.2 Sensibilidad a la Radiación

La sensibilidad de un material TL puede definirse como la cantidad de luz emitida por éste por unidad de dosis de radiación. Para esta prueba se les realizó tratamiento térmico de borrado, dejándolos enfriar a temperatura ambiente, posteriormente se irradiaron simultáneamente a una dosis de 3.0 Gy. Su lectura TL se tomó al día siguiente; con las lecturas obtenidas se determinó la sensibilidad de cada dosímetro de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\text{Intensidad TL}}{\text{Dosis} \times \text{Masa}} \quad (4)$$

Considerándose sólo los que estén dentro de una variación no mayor al 5.0% para la realización de las siguientes pruebas, se eligió el dosímetro con la lectura de fondo más baja, siendo de 2.11 nC, con la masa de dicho dosímetro se sustituyeron valores en la ecuación 4.

Para tomar las lecturas TL, se utilizó el equipo lector Harshaw Modelo 4000 acoplado a una PC; previamente se recibió el adiestramiento para el manejo del equipo, así como del software asociado para la digitalización de los datos para la obtención de las curvas de brillo, se puede apreciar en la Figura 19. Todas las lecturas se llevaron a cabo en atmósfera de nitrógeno para evitar contribuciones espurias en las lecturas TL (González, 2017).



FIGURA 19. Lector de TL Harshaw Modelo 4000.

5.4.3 Respuesta TL en función de la dosis.

Para determinar el intervalo de linealidad de la respuesta TL, de los dosímetros estudiados, en función de la dosis de radiación gamma, se colocó un lote de dosímetros de cada tipo en portadosímetros de plaxiglas para ser irradiados en un intervalo de dosis entre 1Gy y 1000Gy. La irradiación de los dosímetros se realizó con la fuente de radiación gamma de ^{60}Co propiedad del ININ, a una tasa de dosis de 35.164225 Gy/h.

La curva ideal de respuesta de un material TL en función de la dosis debe ser lineal, o bien producir una línea recta en escala logarítmica en el intervalo útil de exposición.

5.4.4 Prueba de Reproducibilidad.

La reproducibilidad se define como la medida de la señal TL de un dosímetro irradiado a la misma dosis, debe ser la misma durante n ciclos consecutivos de borrado, irradiación y lectura (Sepúlveda et al., 2003). Para evaluar la reproducibilidad de los dosímetros de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}+\text{PTFE}$, se tomó un lote de dosímetros, se les dio tratamiento térmico de borrado, se dejaron enfriar a temperatura ambiente y en seguida, se irradiaron a una dosis de 10 Gy, en el irradiador Gamma, se tomaron las lecturas de las pastillas 15 minutos después de la irradiación. Este procedimiento se repitió por 10 ciclos consecutivos.

La reproducibilidad de su respuesta TL se estimó de acuerdo con la siguiente ecuación; en dónde DS es la desviación estándar y \bar{x} es la media.

$$\frac{DS}{\bar{x}} 100 < 7.5\% \quad (5)$$

Se empleó el uso de porta-dosímetros de plexiglás para irradiar los dosímetros como el que se muestra en la Figura 20:

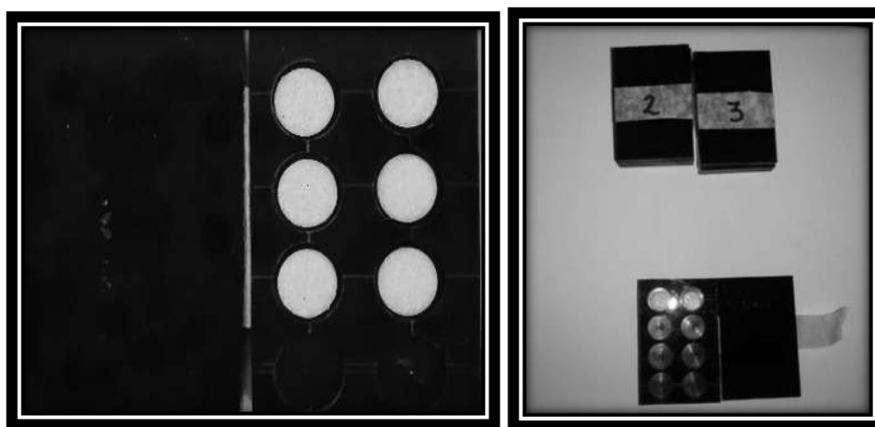


FIGURA 20. Portadosímetro de plexiglás para irradiar.

5.4.5 Prueba de Estabilidad de la señal TL (*fading*)

Esta prueba se refiere a la estabilidad o desvanecimiento de la señal TL de los dosímetros respecto al tiempo, después de haber sido irradiados, el periodo de tiempo de estudio será por dos meses. Han deducido que el desvanecimiento es pequeño si las trampas de electrones que producen centros luminiscentes, tienen una profundidad suficientemente grande. La temperatura del pico de brillo (180-300°C) corresponde a las trampas relativamente profundas (0.8-1.2eV) (Azorín J., 2015).

La prueba se llevó a cabo con un lote de dosímetros que posteriormente a su tratamiento térmico de borrado, se irradiaron a la misma dosis de 10 Gy y fueron leídos en una misma jornada un día después de la irradiación para obtener su lectura TL inicial. Posteriormente fueron tratados térmicamente y se irradiaron a la misma dosis, se agruparon para almacenarlos aislados de la luz, en portadosímetros; las lecturas TL de los dosímetros irradiados se tomaron a 5, 15, 30, 45 y 60 días posteriores a la irradiación.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos así como su discusión sobre la caracterización dosimétrica del $\text{KMgF}_3:\text{Tb}+\text{PTFE}$, para determinar si es aplicable en dosimetría de radiaciones ionizantes.

6.1 Prueba de Sensibilidad

En la tabla 3, se muestran los resultados obtenidos de la sensibilidad promedio de los dosímetros de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}+\text{PTFE}$; tomando en cuenta la sensibilidad de fondo como la unidad. La sensibilidad se obtuvo sustituyendo valores en la ecuación 4, y con base a la sensibilidad relativa a cero dosis se obtiene la sensibilidad relativa irradiado a 3.0 Gy, lo cual es muy buena de 3.01.

Tabla 3. Sensibilidad del $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$ relativa a la de fondo.

Material TL	Sensibilidad (nC/mg-Gy)	Sensibilidad Relativa
$\text{KMgF}_3:\text{Tb}$, cero dosis	2.11	1.0*
$\text{KMgF}_3:\text{Tb}$, 3.0 Gy	6.37	3.01

6.2 Respuesta TL en función de la dosis

En la Figura 21 se presenta el comportamiento lineal obtenido de la respuesta a la dosis absorbida en el intervalo de 1- 1000 Gy del material $\text{KMgF}_3:\text{Tb}+\text{PTFE}$.

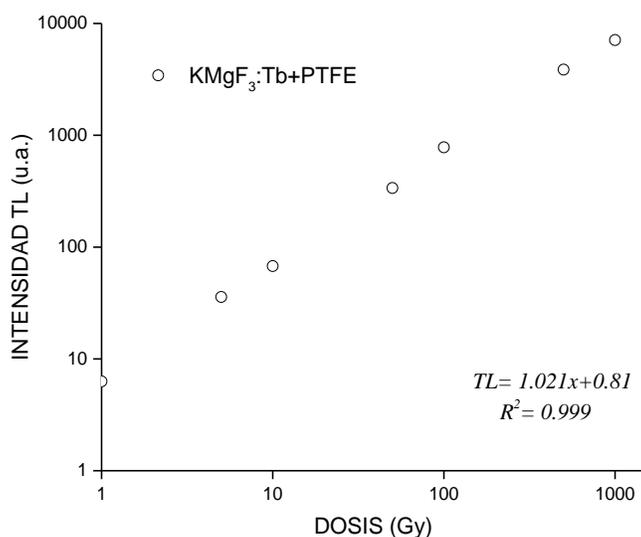


FIGURA 21. Linealidad de la respuesta TL de los dosímetros en función de la dosis.

En la Figura 22 se aprecia la curva de brillo de la respuesta TL en función de la dosis de esta perovskita dopada y se observa que aproximadamente a 160 °C, alcanza un máximo de la señal TL, cercano a 350,000 nC, cuando la dosis fue de 1000 Gy.

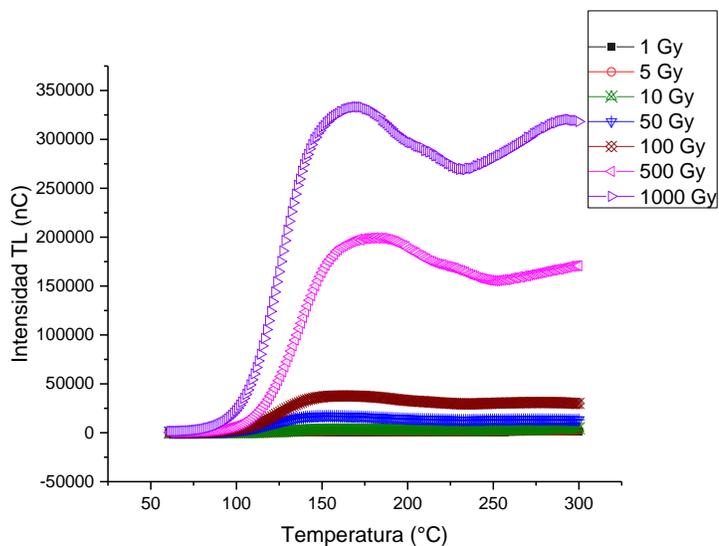


FIGURA 22. Curva de brillo de KMgF₃:Tb, en intervalo 1- 1000 Gy.

6.3 Prueba de reproducibilidad

La desviación estándar asociada al promedio calculado de diez ciclos repetidos, efectuados en el mismo dosímetro, fue menor al 5%.

En la tabla 4 se aprecian los datos obtenidos de la señal TL así como su desviación estándar (DS), se puede ver una variación considerable en los valores obtenidos en el ciclo 6 debido a una variación en el tiempo de lectura ya que el equipo lector presentó un inconveniente en su funcionamiento, elevando significativamente su desviación estándar.

Tabla 4. Reproducibilidad de la Respuesta TL de dosímetros.

Ciclo	TL (nC)	DS
1	128.34	5.48
2	129.58	0.82
3	126.90	2.34
4	136.90	2.17
5	127.21	1.25
6	141.87	19.75
7	130.75	3.29
8	135.76	6.37
9	135.41	5.77
10	135.76	4.11
\bar{x}	132.85	
DS	4.99	
%DS	3.75	

La reproducibilidad de su respuesta TL se estimó de acuerdo con la ecuación 5, teniendo en cuenta que la norma exige para este parámetro un valor de $\pm 7.5\%$ (Furetta C., 2003).

$$\frac{DS}{\bar{x}} 100 < 7.5\%$$

Al sustituir los valores obtenidos se tiene:

$$\frac{4.99}{132.85} 100 < 7.5\%$$

$$3.7 < 7.5\%$$

En la figura 23 se aprecia la gráfica respecto a los datos obtenidos en la tabla 4, en donde se observan los límites de 7.5% de DS representados con líneas rojas y la media obtenida con azul. Los cuadros negros son los valores de cada ciclo, en donde en el ciclo 6 se ve la variación antes mencionada.

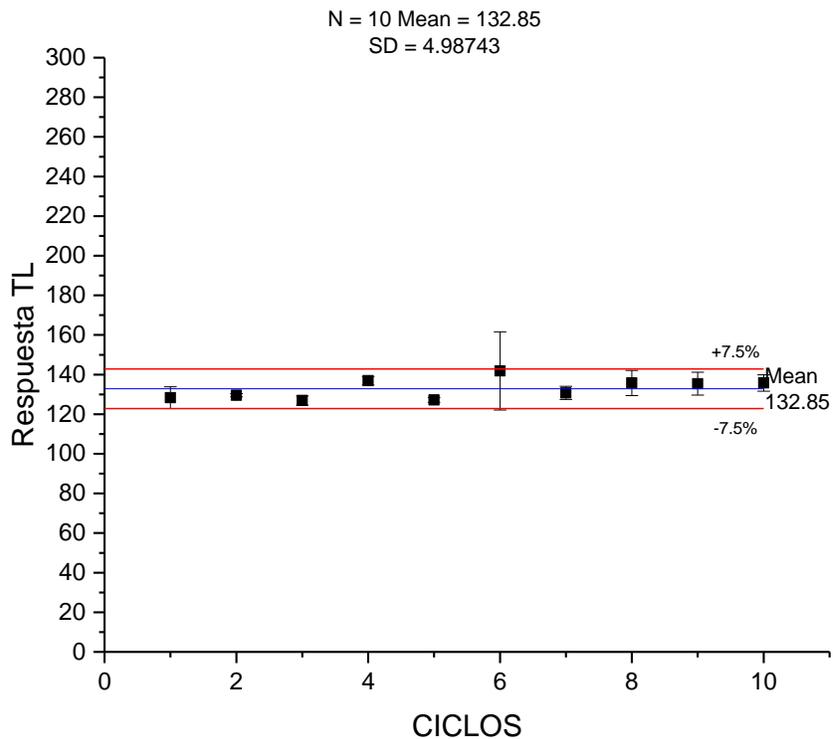


FIGURA 23. Respuesta relativa de los dosímetros en función de los ciclos (Reproducibilidad).

Las curvas de brillo de cada ciclo se aprecian en la Figura 24, donde podemos ver el mismo pico máximo con muy poca variación.

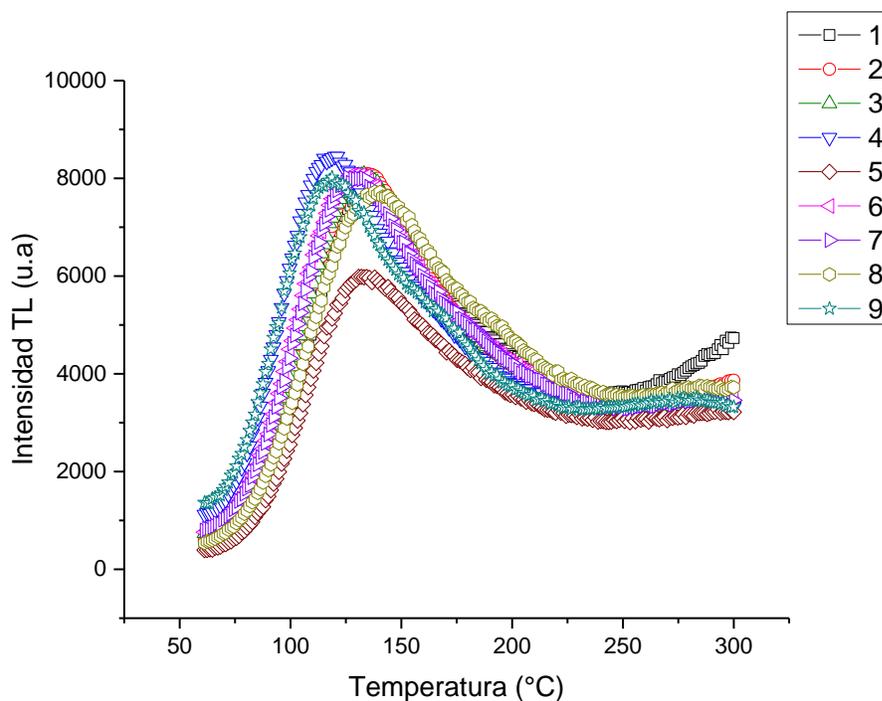


FIGURA 24. Curva de brillo de la reproducibilidad.

6.4 Estabilidad de la señal (*fading*)

En la tabla 5, se presentan las lecturas TL de los dosímetros de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}+\text{PTFE}$, tomados durante dos meses después de la irradiación.

Tabla 5. Desvanecimiento de la información TL de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}+\text{PTFE}$.

No. de días	Intensidad TL	Sensibilidad (nC/mg.Gy)	Sensibilidad relativa
5	46.07	4.6	1.00
15	47.08	4.7	1.0217
30	44.68	4.46	0.9696
45	43.52	4.35	0.9457
60	53.82	5.38	1.1696

Se aprecia que en los primeros 45 días después de la irradiación la variación en las lecturas TL, corresponde a la variación del lote, presentando un 3.4%DS, por lo tanto, el desvanecimiento es nulo, mientras que a los 60 días después, se apreció un incremento en su sensibilidad relativa, esto se debe a que el material está acumulando la contribución de la radiación ambiental. Esto se aprecia en la Figura 25 en donde se ve la comparativa de ambas señales.

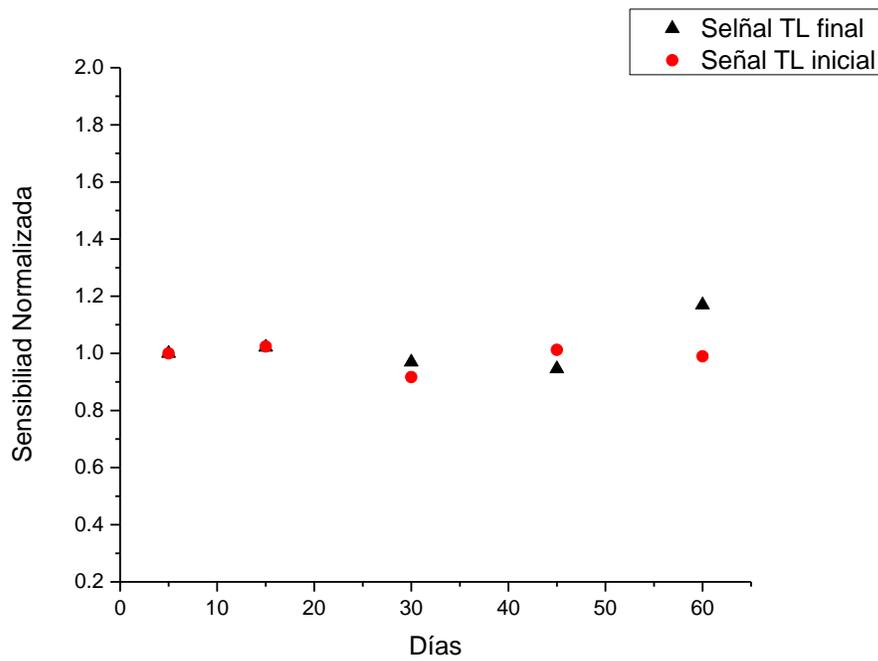


FIGURA 25. Comparativa del desvanecimiento TL de $\text{KMgF}_3:\text{Tb}+\text{PTFE}$, al día siguiente y en dos meses.

En la figura 26 podemos ver las curvas de brillo del *fading* inicial y final respectivamente y se puede observar que es aproximadamente en 160-165°C en donde se aparece el pico máximo, sin embargo el desvanecimiento de la señal es casi nulo. Lo que nos indica que el material tiene buena estabilidad TL.

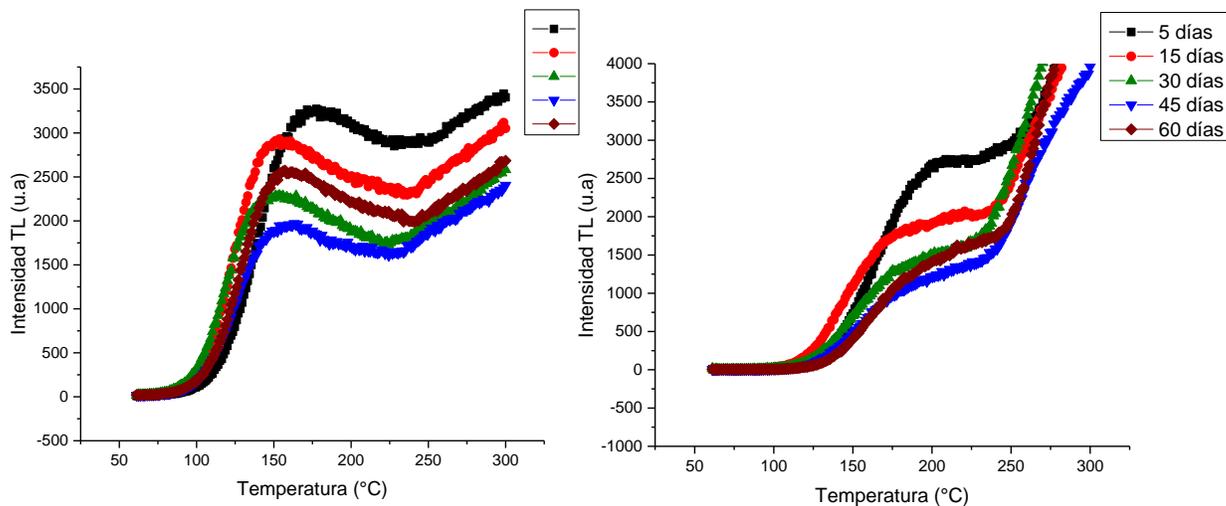


FIGURA 26. Curvas de brillo del *fading* inicial y final.

VII. CONCLUSIONES

La respuesta TL de los dosímetros de $\text{KMgF}_3\text{:Tb+PTFE}$ en función de la dosis de radiación gamma de ^{60}Co fue lineal en el intervalo de dosis entre 1- 1000 Gy.

En cuanto a los resultados obtenidos en la prueba de reproducibilidad nos indican que para las distintas lecturas realizadas en los tres dosímetros seleccionados para esta prueba cumple con las normas establecidas que recomiendan un porcentaje de desviación estándar menor o igual a 7.5% para 10 ciclos, ya que obtuvimos 3.7% indicando una buena reproducibilidad.

Se ha comprobado que KMgF_3 dopado con terbio a 2.0% molar presenta alta intensidad TL al ser expuesto a irradiación gamma de ^{60}Co y buena sensibilidad. La curva de brillo de esta perovskita está compuesta por varios picos y el primer pico aparece como el más adecuado para ser aplicado en dosimetría personal o ambiental ya que se encuentra en una temperatura entre 160-165°C.

Debido a lo anterior y a los resultados obtenidos del estudio del fenómeno de termoluminiscencia del material $\text{KMgF}_3\text{:Tb+PTFE}$ como dosímetros en forma de pastilla descritos anteriormente, podemos concluir que este material, dopado con iones de terbio, representa un éxito real en la investigación para materiales dosimétricos eficientes, ya que cumple ampliamente con los parámetros recomendados por las normas internacionales para ser usado como sistema dosimétrico. La excelente sensibilidad de este material TL, el notable desempeño de su respuesta, aunada a otras propiedades, hacen de la fluoroperovskita KMgF_3 un material muy promisorio para los propósitos de la dosimetría TL, con lo cual nos permite medir eficientemente niveles de dosis de radiación ambiental y personal en tiempos relativamente cortos.

RECOMENDACIONES

Debido a que este material nos dio excelentes resultados para dosimetría de radiaciones ionizantes al estudiar sus propiedades termoluminiscentes, se recomienda a la persona interesada en continuar con alguna otra hipótesis relacionada con este compuesto, a realizar su caracterización óptica, morfológica y cristalográfica, entre otras propiedades físicas y químicas del $\text{KMgF}_3:\text{Tb}$.

REFERENCIAS

Bibliografía

Alcaráz M., 2001. Detección de Radiación Ionizante. Bases físicas y biológicas de radiodiagnóstico médico. Universidad de Madrid, tema 4, 271p.

Alcaráz M., 2001. Magnitudes y Unidades radiológicas. Bases físicas y biológicas de radiodiagnóstico médico. Universidad de Madrid, tema 3.

Azorín J., 2014. Preparation methods of thermoluminescent materials for dosimetric applications: an overview. Applied Radiation and Isotopes 83, 187–191.

Azorín J., Khaidukov M., Sánchez A., Azorín V., 2007. Thermoluminescence of terbium doped double fluorides. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 263 36–40.

Azorín N. y Azorín V., 2010. Protección Radiológica, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Iztapalapa, primera edición, México, D.F pp. 13, 53-55, 61, 71, 91, 97-99, 117-126.

Azorin J., 2015. Present status and future trends in the development of thermoluminescent materials. Appl. Radiat. Isotopes.

Bajaj N., Palan C., Koparkar K., Kulkarni M., Omanwar S., 2016. Preliminary Results on Effect of Boron Co-Doping on CW-OSL and TL Properties of LiMgPO_4 : Tb. Journal of Luminescence S0022-2313.

Cherry R., Lodde, G., Porter, S. W. Jr., y Upton, A. C., 2001. Radiaciones ionizantes. En Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo, II, 48.2-48.34. Madrid: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

Cocoletzi H., Vázquez N., Takeuchi N., 2010. Nanomateriales en las instituciones de educación superior y de investigación en México. Mundo Nano | Artículos | Vol. 3, No. 2.

Cuervo J. y Roa R., 2011. Propiedades estructurales y espectroscopía de impedancia del estanato tipo perovskita. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Departamento de Física Santafé de Bogotá D.C.

Faiz M. y Ph. D., 2003. The Physics of Radiation Therapy. Third Edition, Department of Therapeutic Radiology University of Minnesota Medical School. Minneapolis, Minnesota.

Flores O., 2011. Implementación dosimétrica de la técnica de irradiación a cuerpo entero con electrones de 6 MeV por termoluminiscencia. CICATA LEGARIA-IPN.

Furetta C., 2003. Handbook of Thermoluminescence. Physics Department Rome University "La Sapienza" Italy. ISBN 9812382402 p.417.

Furetta C., Bacci C., Rispoli B., Sanipoli C. and Scacco A., 1990. Luminescence and dosimetric performances of KMgF_3 crystals doped with metal impurity ions. Rad. Prot. Dos. 33(1/4), Vol.1, 107-110.

Gallegos Díaz E., s.f. Radiaciones ionizantes y protección radiológica. Foro Nuclear, Foro de la Industria Nuclear Española. 1-31.

González P., 2017. Dosimetría TL. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.

González P., Azorín N., Furetta C., s.f. Respuesta TL de dosímetros de LiF:Mg,Cu,P+PTFE (México) y GR200A (China).

González P., Furetta C. y Cruz Z., 2006. The thermoluminescent (TL) kinetics parameters of the perovskite like KMgF_3 activated by lutetium impurities". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 243, 349-353.

González U., 2000. Dosimetría termoluminiscente de las radiaciones ionizantes en aplicaciones médicas. Universidad Veracruzana.

Guzmán R., 2017. Curso de protección radiológica para personal ocupacionalmente expuesto, IPN Asesoría en Protección Radiológica ALARA.

He D., Yu Ch., Chenga J., Li Sh., Hu L., 2011. Effect of Tb³⁺ concentration and sensitization of Ce³⁺ on luminescence properties of terbium doped phosphate scintillating glass, Journal of Alloys and Compounds 509, 1906–1909.

Herrero R., Villicaña M., García L., González P., Custodio M., Mendonza D., 2015. Desarrollo de detectores de radiación, basados en nanocristales de KMgF₃:Tb sintetizados por microondas. Facultad de Ingeniería Química, UMSNH.

Hu R., Li Ch., Wang X., Zhou T., Yang X., Gao G., Zhang Y., 2013. Synthesis of perovskite KMgF₃ with microemulsion for photocatalytic removal of various pollutants under visible light. Catalysis Communications 40, 71–75.

Joseph D., Annalakshmi O., Madhusoodanan U., Ramasamy P., 2014. Thermoluminescence characteristics and dosimetric aspects of fluoroperovskites (NaMgF₃:Eu²⁺, Ce³⁺) Journal of rare earths, Vol. 32, No. 6, P. 496.

Joseph D., Madhusoodanan U., Annalakshmi O., Jose M., Ramasamy P., 2015. Thermoluminescence dosimetric characteristics on cubic fluoroperovskite single crystal (KMgF₃:Eu²⁺, Ce³⁺). Optical Materials 45, 224–228.

Lal B., Khosa S., Tickoo R., Bamzai K., Kontru P., 2004. Dielectric characteristics of melt grown doped KMgF₃ crystals. Materials Chemistry and Physics 83, 158–168.

Mahlik S., Wisniewski K., Grinberg M., Jin H., 2011. Low temperature luminescence of KMgF₃:Eu²⁺ cristal. Optical Materials 33, 996–999.

Marcazzó J., Santiago M., D'Angelo C., Furetta C., Caselli E., 2010. Study of the luminescent properties of $\text{KMgF}_3:\text{Sm}$. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 268. 183–186.

Molina P., Díaz B., Prendes A., 1990. Estudio del Material TL $\text{LiF}:\text{Mg}$, Ti para su Empleo en el Monitoreo Ambiental. Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR), Ciudad Habana, CUBA.

Molina P., Pernas S., Martínez G., 2014. Pruebas tipo al sistema de Dosimetría Termoluminiscente Automático adquirido por el Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (CPHR) para dosimetría personal. IX International Symposium/XIX Nacional Meeting on Solid State Dosimetry.

Oberhofer M., Scharmann A., 1995. Personnel Thermoluminescence Dosimetry. Official Publications of the European Communities. pp.47.

Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), 2005. Determinación de la Dosis Absorbida en Radioterapia con ases externos. Colección de Informes Técnicos No 398.

Ortega X. Jorba J., 1996. Radiaciones Ionizantes (Utilización y riesgos). Institut de Tècniques Energetiques (INTE), 2ed pp. 191-248.

Prado J., Morán E., 2011. Síntesis asistida por microondas de sólidos inorgánicos. Universidad Complutense de Madrid. Química Inorgánica I, Facultad de Ciencias Químicas. An. Quím. 107, 129-136.

Quan Z., Yang P., Li C., Yang J., Yang D., Jin Y., Lian H., Li H., Lin J., 2009. Shape and Phase-Controlled Synthesis of KMgF_3 Colloidal Nanocrystals via Microwave Irradiation. J. Phys. Chem., 113, 4018-4025.

Rendón J., Moreno L., Valencia J., 2006. Síntesis y caracterización de perovskitas de LaCoO_3 por el método citrato. Revista Colombiana de Física, Vol. 38, No.2.

Rivera M., Azorín N., 1993. Estudio y determinación de las propiedades termoluminiscentes de un nuevo dosímetro de α - $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$ Universidad Veracruzana; Facultad de Ciencias Químicas.

Ruinian H., Jicheng Y., Huiming J. y Chunshan S., 2007. Mild solvothermal synthesis and luminescent properties of the complex fluorides $\text{KMgF}_3:\text{Eu}$ and $\text{KZnF}_3:\text{RE}$ (RE = Eu, Ce). *Journal of Alloys and Compounds* 432, 253-257.

Ruinian H., Zhihong J. y Chunshan S., 2005. Preparation of KMgF_3 and Eu doped KMgF_3 nanocrystals in water-in-oil microemulsions. *Materials Research Bulletin* 42, 249-255.

Ruinian H., Zhihong J., Demin X. y Chunshan S., 2002. Solvothermal synthesis of the complex fluorides KMgF_3 and KZnF_3 with the Perovskite structures. *Materials Research Bulletin* 37, 1189-1195.

Sahnoun M., Zbiri M., Daul C., Khenata R., Baltache H., Driz M., 2005. Full potential calculation of structural, electronic and optical properties of KMgF_3 . *Materials Chemistry and Physics* 91: 185-191.

Sepúlveda F., Azorín J., Rivera T., Furetta C., Sanipoli C., 2004. Thermoluminescence (TL) characteristics of perovskite-like KMgF_3 activated by La ions. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 213, 329–332.

Singh H. Nalwa, 2002. *Nanostructured Materials and Nanotechnology*. Academic Press.

Tomasina F., Laborde A., Spontón F., Blanco D., Pintado C., Stolovas N., Satragno N., 2010. Surveillance of the exposure to ionizing radiations of the university health staff. *Revista Cubana de Salud Pública*; 36, 119-127.

Townsend P., Abmed K., Chandier P. and Whitlow H., 1983. Measurements of The emission spectra of LiF during Radiaton Effects. 72, pp. 245-257.

Wang W., Liu X., Zhang J., Ji Y., Jiang N., Ma B., Wang X., Liu L., 2013. A facile way to synthesis KMgF_3 and its luminescent property with Eu doping. *Inorganic Chemistry Communications* 33, 165-169.

Yoshizumin M. T., Linda V. E. Caldas, 2013. TL emission spectra measurements using a spectrometer coupled to the Risoe TL/OSL reader. *Radiation Physics and Chemistry* 104, 292–296.

Zanella R., 2012. Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo Nano Universidad Autónoma de México*, Vol.5, No.1.

Zhu X., Da Y., Zhou H., Hui J., Quan X., 2009. Synthesis and fluorescence properties of cerium– KMgF_3 through a solvothermal process. *Chinese Chemical Letters* 20, 106-110.

Referencias de sitios web

[1] 22 de junio 2010. Foro de la Industria Nuclear Española, <http://www.foronuclear.org/es/energia-nuclear/faqas-sobre-energia/capitulo-5>

[2] Cocolletzi H. et al, 2 julio-diciembre 2010. Nanomateriales en las instituciones de educación superior y de investigación en México, <http://www.revistas.unam.mx/index.php/nano/article/viewFile/52222/46520>

[3] Organización Mundial de la Salud (OMS), abril de 2016. Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>

[4] Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, <https://www.gob.mx/inin/>