



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Y METALURGIA

LUMINISCENCIA TÉRMICAMENTE ESTIMULADA DE UNA
ZEOLITA NATURAL CON POSIBLE APLICACIÓN EN
DOSIMETRÍA DE RADIACIÓN IONIZANTE

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO EN MATERIALES

Presenta

JUAN PABLO RAMOS VELÁZQUEZ

Hermosillo, Sonora

Agosto 2023

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

UNIVERSIDAD DE SONORA

VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora, a 28 de Agosto de 2023

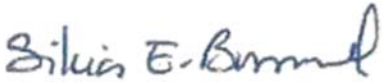

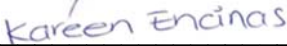
DR. PAUL ZAVALA RIVERA
Jefe Del Departamento
Ingeniería Química Y Metalurgia

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para revisar la Tesis Profesional "**LUMINISCENCIA TÉRMICAMENTE ESTIMULADA DE UNA ZEOLITA NATURAL CON POSIBLE APLICACIÓN EN DOSIMETRÍA DE RADIACIÓN IONIZANTE**", presentada por:

JUAN PABLO RAMOS VELÁZQUEZ

La han revisado y cada uno de los integrantes da su **VOTO APROBATORIO** ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

INGENIERO EN MATERIALES

<u>28/8/2023</u>	
Fecha	DRA. SILVIA ELENA BURRUEL IBARRA
<u>28/8/2023</u>	
	DR. MARTÍN ANTONIO ENCINAS ROMERO
<u>28/8/2023</u>	
	DRA. KAREEN KRIZZAN ENCINAS SOTO
<u>28/8/2023</u>	
	DR. LUIS ALBERTO NUÑEZ RODRÍGUEZ

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Juan Pablo y Francisca, quienes siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Con su gran cariño me han impulsado a nunca rendirme y perseguir mis metas a pesar de las adversidades.

Le agradezco profundamente a mi tutora, la Dra. Silvia Burruel por su dedicación, paciencia y sobre todo la enseñanza que me ha brindado. Gracias a sus palabras y correcciones, así como el gran apoyo, no estuviese llegando a este punto. Siempre la llevaré en mi memoria para mi futuro profesional.

A mis profesores quienes me han brindado las herramientas y el conocimiento necesario para llegar a este tan anhelado momento.

A mi familia en especial a mis tíos A. Josefina, Felipe, M. de los Ángeles, Gerardo y M. de Jesús., quienes han sido parte esencial durante muchas etapas de mi formación académica, así como al resto de mi familia, gracias.

A mi novia Alejandra, quien me ha mostrado su apoyo incondicional y transmitirme esa motivación día con día para perseguir mis sueños y nunca dejar de lado mi constante preparación académica y profesional.

Agradecerles a todos mis amigos y compañeros quienes muchos de ellos se han convertido en parte importante de mi vida. Gracias por las horas compartidas.

Y por último a la Universidad de Sonora por siempre abrirme sus puertas para mi formación académica.

CONTENIDO

VOTOS APROBATORIOS	I
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE ECUACIONES	VI
LISTA DE TABLAS	IX
RESUMEN	X
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
2.1 OBJETIVO GENERAL	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
III. MARCO TEÓRICO	3
3. ANTECEDENTES	3
3.1 ZEOLITAS	5
3.1.1 Historia y Origen	6
3.1.2 Características de las zeolitas	9
3.1.2.1 Estructura	9
3.1.2.2 Propiedades	12
3.1.2.3 Aplicaciones	15
3.2. PROPIEDADES TERMOLUMINISCENTES	17
3.2.1 Radiación	17
3.2.1.1 Tipos de radiación	18
3.2.1.2 Interacción con la materia	24
3.2.1.3 Detección de la radiación	25
3.2.2 Luminiscencia	27

3.2.3 Termoluminiscencia (TL)	30
3.3. DOSIMETRÍA TERMOLUMINISCENTE	37
3.3.1. Características de los TLDs	40
3.3.2 Aplicaciones prácticas	42
IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	44
4.1 MATERIALES	44
4.2.1 Obtención y preparación de la zeolita	44
4.2.2 Tratamiento térmico de la zeolita.	45
4.2.3 Caracterización de los materiales obtenidos	47
4.2.3.1 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	47
4.2.3.2 Difracción de rayos x (DRX)	48
4.2.3.3 Termoluminiscencia	49
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
5.1 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	50
5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES OBTENIDOS	50
5.2.1 Análisis estructural	50
5.2.2 Análisis morfológico	51
5.3. PROPIEDADES TERMOLUMINISCENTES DE LA ZEOLITA	52
5.3.1 Curvas de emisión termoluminiscente	53
5.3.2 Pruebas de reproducibilidad	58
5.3.3 Curvas de desvanecimiento (Fading) TL	59
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
VIII. REFERENCIAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
IX. ANEXO	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación de los principales países productores tradicionales de zeolitas naturales _____	8
Figura 2. Depósitos de zeolitas de sonora, méxico. Ubicación de las muestras: 1, nogales; 2, agua prieta; 3, tubutama; 4, magdalena; 5, tetuachi; 6, mazocahui; 7, huasabas; 8, rancho las palmas, divisaderos; 9, el cajón, rayón; 10, el sauz, nacori chico; 11, san pedro, ures; 12, tepoca; 13, los mezcales, álamos. _____	9
Figura 3. Estructuras de algunas zeolitas naturales comunes. _____	10
Figura 4. Estructura del armazón de una zeolita. _____	11
Figura 5. Esquema de la unidad estructural básica de una zeolita, mostrando la disposición de los átomos de oxígeno y silicio en el tetraedro fundamental. _____	11
Figura 6. Unidades de construcción secundaria (sbu) en zeolitas (las esferas representan átomos T de tetraedros TO_4 ; los átomos de oxígeno están ocultos para una figura más clara; los números entre paréntesis representan la frecuencia de ocurrencia. _____	13
Figura 7. Estructura de la chabazita _____	15
Figura 8. Espectro electromagnético. _____	20
Figura 9. Decaimiento alfa. _____	21
Figura 10. Decaimiento alfa. _____	22
Figura 11. Decaimiento gama. _____	23
Figura 12. Transiciones de energía involucrados en la producción de (a) fluorescencia y (b) fosforescencia. _____	29

Figura 13. Esquema del proceso TL. Muestra los efectos producidos por la irradiación y el calentamiento en un sólido cristalino irradiado. _____	32
Figura 14. Esquema que se usa para el tratamiento teórico del modelo simple, Randall y Wilkins. _____	33
Figura 15. Tm y curva de brillo. _____	34
Figura 16. Temperatura $T(t)$, la intensidad de termoluminiscencia $I(t)$, y la concentración de huecos atrapados $n_h(t)$ en el centro de recombinación, r_c en función del tiempo t . Se utiliza una razón de calentamiento lineal β durante el experimento. _____	36
Figura 17. Comparación esquemática de picos de brillo $I(t)$ para cinéticas de primer y segundo orden. Los parámetros utilizados son $e = 1 \text{ eV}$, $s = 10^{12} \text{ s}^{-1}$, $n_0 = n = 10^3 \text{ m}^{-3}$. _____	37
Figura 18. Rocas con mineral de zeolita, recolectadas del municipio de divisaderos, sonora. _____	45
Figura 19. Esquema de los pasos de preparación de la muestra de zeolita. _____	46
Figura 20. Mufla marca terlab, con panel de control programable. _____	47
Figura 21. Microscopio electrónico de barrido equipado con un analizador EDS marca Jeol. _____	48
Figura 22. Difractómetro de rayos x marca Bruker (D8 advance eco). _____	49
Figura 23. Lector $\text{ris}\varnothing$ TL/OSL modelo TL-DA-20 equipado con una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. _____	50
Figura 24. Patrones DRX de la muestra ZEOTT. _____	52
Figura 25. (a-b) imágenes de meb a diferentes magnificaciones y (c) espectro EDS de la muestra de zeolita. _____	53
Figura 26. Curva de brillo TL de la chabazita obtenida después de ser expuesta a 690 Gy irradiada con partículas beta. _____	54

- Figura 27.** Curva de TL de zeolita de divisaderos, sonora después de ser expuesta a irradiación de partículas beta en el rango 5 a 7017 Gy. _____ 55
- Figura 28.** ITL como función de la dosis, de la muestra ZEOTT después de la irradiación con partículas beta en el rango de 5 a 7017 Gy. _____ 55
- Figura 29.** Curvas de emisión TL (a) y ITL como función de la dosis (b) de la muestra ZEOTT en el rango de 5 a 690 Gy, correspondiente al rango lineal. ____ 57
- Figura 30.** Curvas de emisión TL de la muestra de ZEOTT expuesta a 300 Gy de irradiación de partículas beta con diez ciclos sucesivos de irradiación-lectura. El recuadro muestra el ITL normalizado de cada curva de brillo TL. ____ 59
- Figura 31.** Curvas de fading TL de la zeolita expuestas a 690 Gy irradiada con partículas beta obtenida después de diferentes tiempos de almacenamiento (a) y el comportamiento de la intensidad de TL entre el tiempo transcurrido (b)._____ 61

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Producción anual de zeolitas naturales en México _____	6
Tabla II. Energías de isótopos beta emisores responsables de dosimetrías beta _	22
Tabla III. Fenómenos de luminiscencia _____	28
Tabla IV. Tipos de material y radiación, ubicación de picos de Tl de aluminosilicatos sintéticos y naturales reportados por varios autores. _____	39

RESUMEN

Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados cristalinos de cationes alcalinotérreos y con estructuras infinitas y tridimensionales y también se han considerado parte integrante de las aplicaciones en procesos radioquímicos y de los residuos líquidos de bajo nivel debido a su alta selectividad de intercambio iónico. Además, es de importancia en aplicaciones de radiación nuclear que se cree es por su resistencia a la radiación de partículas beta. El creciente uso y demanda de radiación en muchos campos ha motivado la investigación de nuevos materiales dosimétricos. La termoluminiscencia (TL) ha sido un tema de investigación popular para los investigadores desde el siglo XVI debido a su aplicación avanzada en dosimetría. El dosímetro ideal debe tener una respuesta de dosis lineal, alta sensibilidad, reproducibilidad y no desvanecerse con el tiempo. Se han reportado muchos fósforos con excelentes propiedades TL que podrían utilizarse como dosímetros. Sin embargo, se ha informado que los fósforos de aluminosilicatos han sido seleccionados porque su fosforescencia de larga duración los convierte en los candidatos preferidos en el campo de la dosimetría. En este trabajo presentamos por primera vez las propiedades dosimétricas de una zeolita natural recolectada del municipio de Divisaderos, Sonora, México. Para este propósito, se realizaron análisis DRX, MEB y EDS para estudiar la estructura cristalina, morfología y composición química elemental. Para evaluar a la zeolita como dosímetro TL, se reportan las mediciones de dosis-respuesta en el rango de dosis de 5 a 7017 Gy, la reproducibilidad y la prueba de desvanecimiento. Los resultados obtenidos indican que las zeolitas sonorenses tienen aplicaciones potenciales como detectores y dosímetros para radiación ionizante.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, una de las áreas de investigación que atrae significativamente la atención, es la detección de radiaciones, debido a la gran cantidad de equipos, tanto a nivel industrial, así como en el área de la medicina, que utilizan fuentes de radiación ionizante para llevar a cabo sus actividades. Se han utilizado materiales dosimétricos naturales y sintéticos para determinar la dosis de radiación recibida en el ambiente, en actividades médicas e industriales. Actualmente se cuenta con algunos materiales patentados utilizados como detectores o dosímetros, sin embargo, algunos no son útiles para diversos tipos de radiación ionizante, y nos son muy eficientes y presentan deficiencias para mantener guardada la información. La búsqueda de nuevos materiales eficientes que puedan cumplir con el mayor número características adecuadas para aplicación como detectores y dosímetros de radiación es la finalidad de las investigaciones realizadas actualmente en esta área de estudio.

Muchos materiales fósforos, tanto sintéticos como naturales, se han caracterizado para evaluar su viabilidad como dosímetro termoluminiscente (TLD), aplicable en varias áreas de dosimetría de bajas dosis. Las aplicaciones para altas dosis, que implican dosis superiores a 10^2 Gy, pueden encontrarse dentro de los reactores nucleares o durante la esterilización de alimentos y las pruebas de materiales. Las zeolitas son ampliamente utilizadas como excelentes materiales huésped para aplicaciones de materiales luminiscentes debido a su alta estabilidad química. El uso potencial de los minerales de zeolita en el manejo de sustancias radiactivas y otras sustancias peligrosas en el medio ambiente ha sido abordado en una gran cantidad de publicaciones encontradas en la literatura, particularmente en la última década. Se conoce que las zeolitas sintéticas se encuentran disponibles comercialmente y sus propiedades no cambian drásticamente en comparación con la zeolita natural para aplicaciones como los sistemas de enfriamiento por adsorción. Sin embargo, se espera que la zeolita natural tenga más defectos asociados con impurezas, lo cual es deseable para las propiedades termoluminiscentes.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar las propiedades termoluminiscentes y estructurales, de una zeolita natural tipo chabazita, para evaluar su posible aplicación como dosímetro de radiación ionizante.

Este documento se encuentra conformado por un resumen del trabajo al inicio, después en el primer capítulo, se hace una introducción con el propósito de ubicar en el tema. En el capítulo tres, se hace una mención breve de los fundamentos utilizados para llevar a cabo la tesis. El cuarto capítulo corresponde a la sección de experimentación, donde se muestran las condiciones bajo las cuales fueron preparadas las muestras. En el quinto capítulo se muestran los resultados obtenidos de la caracterización realizada y discusión sobre ellos y finalmente en el capítulo 6 se exponen las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Llevar a cabo el estudio de la respuesta termoluminiscente de la zeolita natural tipo chabazita usando radiación beta, para evaluar su posible aplicación como dosímetros de radiación ionizante.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar la extracción de la zeolita en forma de polvo, a través del raspado de rocas obtenidas de depósitos minerales del municipio de Divisaderos, Sonora
- Realizar un pretratamiento mecánico de los materiales obtenidos.
- Llevar a cabo el tratamiento térmico de la zeolita natural en atmosfera de aire
- Realizar la caracterización estructural y morfológica de la zeolita natural tratada térmicamente.

- Llevar a cabo la caracterización de la respuesta termoluminiscente de la zeolita natural tratada térmicamente y analizar su posible aplicación como dosímetro de radiación beta.

III. MARCO TEÓRICO

3. ANTECEDENTES

El creciente uso y demanda de radiación en muchos campos ha motivado la investigación de nuevos materiales dosimétricos. La técnica de luminiscencia térmicamente estimulada, comúnmente denominada termoluminiscencia (TL), es ampliamente aceptada como una técnica confiable para estudiar defectos en materiales aislantes y semiconductores, pero la aplicación más importante de la TL es en el campo de la dosimetría de la radiación [20]. Revista Mexicana de Física, 59(1), 152-157. La TL es la emisión de luz de algunos materiales al ser calentados y previamente irradiados con radiación ionizante [15,72]. La intensidad de TL emitida es proporcional a la dosis de radiación recibida por el material, por lo que es posible estimar la cantidad a partir de irradiaciones desconocidas [51]. La dosimetría termoluminiscente se ha desarrollado activamente en las últimas 3 décadas gracias a sus exitosas aplicaciones. La dosimetría TL es una técnica utilizada para protección radiológica, procedimientos médicos y monitoreo ambiental [33]. Los materiales TL se utilizan tradicionalmente para detectar rayos X, radiaciones gamma y beta [25, 33, 43, 56, 69,74,79,89,92]. En los últimos años se han estudiado ampliamente las propiedades dosimétricas de estos materiales para medir dosis altas [78,96, 100] y radiación corpuscular como partículas beta [23, 48]. Con el aumento creciente de las tecnologías de radiación, el interés en las mediciones de dosis altas de radiaciones ionizantes está aumentando. Estas tecnologías incluyen modificación de propiedades de materiales, productos médicos, esterilización, desinfección de productos agrícolas, radiación y control de defectos en grandes equipos. Las mediciones de dosis altas se utilizan principalmente para el control de la radiación de la central nuclear, el

almacenamiento de combustible nuclear gastado o en el caso de accidentes como fugas de radiación, la radioterapia y muchas otras industrias [18, 51,96]. En la actualidad, existen muchos detectores luminiscentes comerciales, pero la elección de fósforos de alta dosimetría aún es limitada. El avance de la investigación espacial explica el interés por las dosis altas [54] y el uso de partículas beta en medicina [61,91,93,105]. Los materiales TL que están atrayendo mucha atención en dosimetría de radiación son aquellos que son fáciles de preparar, económicos y químicamente estables [5,11]. Los materiales derivados de la naturaleza y propuestos como dosímetros tienen la ventaja de ser una alternativa de bajo costo y están disponibles en grandes cantidades [80]. El noroeste de México ofrece muchas especies y composiciones de zeolita natural. Las zeolitas son un grupo de minerales de aluminosilicato microporosos. Se encuentran de forma natural en el medio ambiente, pero también se pueden sintetizar en un laboratorio. Las zeolitas naturales son algunas de las rocas sedimentarias más comunes. Como tales, están fácilmente disponibles y son económicos; representan una extensa familia de minerales aluminosilicatados hidratados y cristalinos, se clasifican en estructuras cristalinas, por ejemplo, la estructura chabazita [84]. La chabazita es una de las zeolitas naturales más abundantes y versátiles del planeta, [36] su estructura microporosa es atractiva para numerosas aplicaciones además de la catálisis y la absorción [29,94]. En las instalaciones nucleares se han considerado a las zeolitas como parte integral de las aplicaciones de procesos radioquímicos, la limpieza del agua en circulación y los desechos líquidos de bajo nivel debido a la alta selectividad del intercambio iónico. Además, la disponibilidad en aplicaciones de radiación nuclear presumiblemente su resistencia a la radiación de partículas beta [75,105,115]. También se utilizan ampliamente como excelentes materiales anfitriones para aplicaciones de materiales luminiscentes debido a su alta estabilidad química y como maravillosos fósforos emisores de luz verde con aplicaciones prometedoras en los campos de la iluminación y las pantallas [95,111]. Las zeolitas como posibles materiales luminiscentes son un tema que ha recibido poca atención. Sin embargo, se han reportado las propiedades termoluminiscentes de aluminosilicatos naturales ricos en Na y K (albita y leucita,

respectivamente), para aplicaciones potenciales como dosímetros de radiación (UV) no ionizante [14,21,104,112]. Por lo tanto, las investigaciones sobre características luminiscentes de estos materiales son de gran importancia en la investigación básica y aplicada.

Motivados por los antecedentes antes mencionados, en este trabajo presentamos por primera vez las propiedades dosimétricas de TL de muestras de zeolita natural recolectadas en el municipio de Divisaderos, Sonora, México. Para este propósito, se realizaron análisis de difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) y rayos X de energía dispersiva (EDX) para investigar la estructura cristalina, morfológica y la composición química elemental, respectivamente. Para evaluar las muestras de zeolita como dosímetros TL, se analizaron los estudios de dosis-respuesta en el rango de dosis de 5 a 7017 Gy, la reproducibilidad y las pruebas de desvanecimiento, utilizando radiación beta.

3.1 Zeolitas

Las zeolitas son minerales del grupo de los *tectosilicatos*; son roca sedimentaria que proceden de cenizas volcánicas de grano fino que fueron arrastrados por el viento y depositadas en lagos salinos que por reacción con el agua salina y o mecanismos de disolución-precipitación se transforman en microcristales de zeolita [87, 67]. Desde el descubrimiento original de minerales zeolíticos en una roca sedimentaria vulcanogénica, se han encontrado tobas zeolíticas en muchas áreas del mundo, puede decirse que las zeolitas naturales representan el grupo más variado y extenso de la corteza terrestre. En las últimas décadas, las zeolitas naturales han encontrado una variedad de aplicaciones en adsorción, catálisis, industria de la construcción, agricultura, remediación de suelos y energía. Se ha estimado que el consumo mundial de zeolita natural es de 5,5 Mt en 2010 [108]

La extensa disponibilidad de yacimientos de rocas zeolitizadas en prácticamente todo el planeta, unido al bajo costo que representa su extracción y puesta a punto, ha favorecido su espectacular uso frente a las tradicionales materias primas minerales, cuya escasez, restricción medioambiental y alto valor que tienen en el mercado las

sitúan en una clara desventaja. Este es uno de los principales factores que inciden en el empleo cada vez mayor de estos recursos naturales. La producción anual y uso de las zeolitas en México se detalla en la Tabla I.

Las zeolitas naturales vendidas en México en forma de productos triturados, cribados y pulverizados; que son de bajo coste, y está destinado a aplicaciones simples, como acondicionamiento de suelos y vivienda de animales domésticos. Y los productos que son micronizados de granulometría fina (5 a 10 mm) y los ultrafinos, alrededor de 1mm son empleadas en procesos especiales, como la elaboración de papel filtro [23,24].

Tabla I. Producción anual de zeolitas naturales en México

Aplicación	Producción (Toneladas)	Zonas productoras
Agricultura	10,000	Puebla, Oaxaca, Hidalgo y San Luis Potosí
Construcción	500,000	Oaxaca
Remediación ambiental	1,000	San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla
Alimentos balanceados	4,000	Sonora, San Luis Potosí, Michoacán, Puebla, Oaxaca
Industrias textil	3,500	San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla

Fuente: [23]

3.1.1 Historia y Origen

La zeolita como roca fue descubierta por primera vez por el geólogo sueco Alex Fredrik Cronstedt en 1756. Al recolectar una muestra de zeolita de una mina de cobre, calentó la roca y observó la liberación de grandes cantidades de vapor del agua adsorbida dentro de la estructura mineral. A partir de esta observación se acuñó el nombre 'zeolita', proviene del griego “zeo” (hervir) y lithos (piedra), piedra hirviendo [84].

Posteriormente, analizó y revisó algunas de las propiedades de este tipo de materiales, para después clasificarlas como un grupo propio dentro de los minerales [16,23,107]. La propiedad del intercambio de iones de las zeolitas fue reportada por primera vez por Damour en 1840, quien mostró que estos minerales podrían ser reversiblemente deshidratados sin cambios aparentes en su transparencia o morfología cristalina. Más tarde, en 1945 las zeolitas serían clasificadas por R. M. Barrer en tres clases dependiendo del tamaño molecular y por la capacidad de absorción, si era rápida, lenta o inapreciable a temperatura ambiente. Al principio, las zeolitas carecían de interés comercial hasta que las investigaciones de Barrer lograron sintetizar modernita a alta temperatura y presión. De esta forma fue como nacieron las zeolitas sintéticas. Las zeolitas se sintetizaron por primera vez en laboratorios en la década de 1930 y encontraron una importante demanda en el mercado en la década de 1960, cuando este material fue utilizado a gran escala por la industria del petróleo con fines de craqueo catalítico. La demanda de zeolitas sintéticas volvió a alcanzar su punto máximo en la década de 1970, cuando se descubrió que las zeolitas sintéticas eran reemplazos adecuados para los compuestos de fosfato en los detergentes para ropa. Estos incrementos en la demanda hicieron que se intensificaran las investigaciones sobre zeolitas. Aunque la zeolita natural se conocía desde hacía algún tiempo, no fue hasta mediados del siglo XX cuando se descubrieron grandes depósitos de zeolita.

Existen cerca de treinta países productores de zeolita natural (Figura 1), donde México ocupa el lugar 21 [23]. En México, se tienen identificados varios yacimientos de Zeolita en distintos estados tales como: Baja California, Chihuahua, Guanajuato, Oaxaca, Sonora, entre otros. [67]



Figura 1. Relación de los principales países productores tradicionales de zeolitas naturales. Fuente: [23]

En 1972, Mumpton, F. realizó en México el primer descubrimiento de un yacimiento de zeolita, a 15 km al noroeste de la ciudad de Oaxaca. En 1987 se reportaron nuevos yacimientos de zeolita en Sonora, en el municipio de Rayón y Agua Prieta. Los depósitos de zeolitas más estudiados, y posiblemente de mayor importancia en México, son los de Oaxaca y Sonora, con un potencial mayor a 10 millones de toneladas. En estos estados se estima, según estudios, que se encuentra el mineral altamente puro, con requerimientos mínimos de procesamiento. [23]

Las zeolitas sonorenses (Figura 2) son características de un ambiente volcánico continental y son ricas en Si, Ca y K. La investigación con zeolitas puede beneficiar a la población local mediante el uso de zeolitas naturales para sistemas de refrigeración, para la alimentación de vacas lecheras y para uso en intercambiadores de iones, ya que las zeolitas de Ca tienen propiedades más favorables en comparación con las formas de Na [19]. En general, dependiendo de su origen, las zeolitas presentan diferentes características y propiedades que es necesario conocer para determinar los usos que se les puede dar.

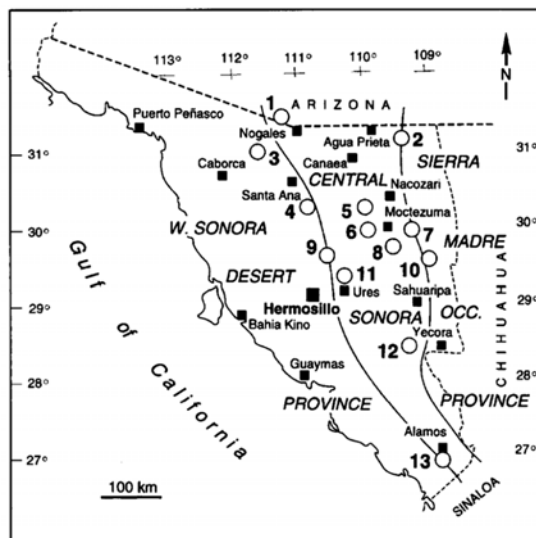


Figura 2. Depósitos de zeolitas de Sonora, México. Ubicación de las muestras: 1, Nogales; 2, Agua Prieta; 3, Tubutama; 4, Magdalena; 5, Tetuachi; 6, Mazocahui; 7, Huasabas; 8, Rancho Las Palmas, Divisaderos; 9, El cajón, Rayón; 10, El Sauz, Nacori Chico; 11, San Pedro, Ures; 12, Tepoca; 13, Los Mezcales, Álamos. Fuente: [19]

El Atlas más reciente de Tipos de Marco de Zeolita enumera 133 estructuras, todas con topologías distintas, y caracterizadas por diferentes estructuras de poros y morfología cristalina. [30]

3.1.2 Características de las zeolitas

3.1.2.1 Estructura

Estructuralmente se consideran tectosilicatos hidratados de aluminio donde el aluminio sustituye al silicio en el centro de los tetraedros estructurales con cationes alcalinos y alcalinotérreos que forman estructuras abiertas. Las diferentes combinaciones de los cationes, tanto en disposición como en naturaleza hace que exista una gran familia de zeolitas naturales. [87]

Las mineralizaciones se producen en el interior de vacuolas o fractura, y presentan disposiciones en forma de anillo, formando individuos cristalinos idiomórficos. Las variedades de zeolitas formadas en este ambiente son: Phillipsita, chabazita, mesolita, natrolita, escolecita, thomsita, estibilita, mordenita y analcima.

Generalmente se asocian a estas otras especies de zeolitas y variedades arcillosas. La Figura 3 muestra las estructuras de los tipos de zeolitas naturales de uso común [23]. Las zeolitas son similares a las arcillas, pues tienen una composición porosa y son aluminosilicatos, pero su gran diferencia es su estructura cristalina [77]. La fórmula empírica de una zeolita es del tipo $M(x/n) O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$, donde M es cualquier átomo alcalino o alcalinotérreo, n es la carga de ese átomo, y es un número del 2 al 7 y, x es un número del 2 al 10. [111].

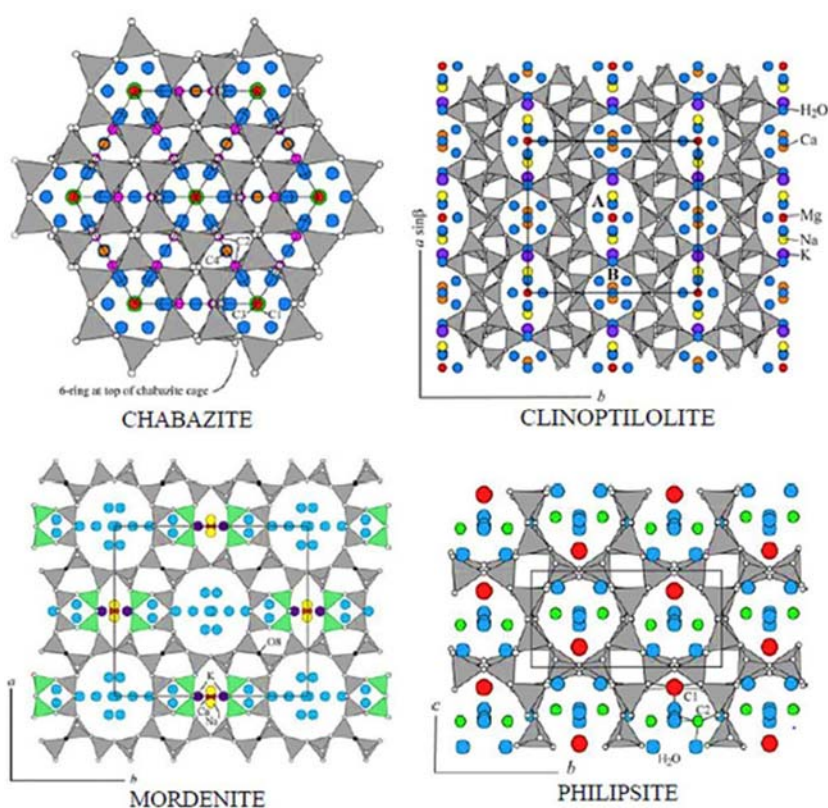


Figura 3. Estructuras de algunas zeolitas naturales comunes. Fuente: [103]

Las zeolitas son materiales de aluminosilicatos altamente cristalinos, que tienen estructuras de panal 3D basados en un esqueleto aniónico rígido con cavidades, canales y poros bien definidos, ocupadas por cationes de equilibrio de carga intercambiables y moléculas de agua, formado por átomos de Si o Al interconectados a través de puentes de oxígeno. Si y Al también se denominan "átomos T", ya que son

el centro de las estructuras tetraédricas de SiO_4 o AlO_4 . La Figura 4 presenta una estructura modelo de zeolitas naturales. Estos tetraedros son los bloques de construcción que forman las diversas estructuras reticulares cristalinas conocidas hasta ahora, a partir de zeolitas sintéticas de orígenes naturales o diseñados específicamente [9,81, 84, 103].

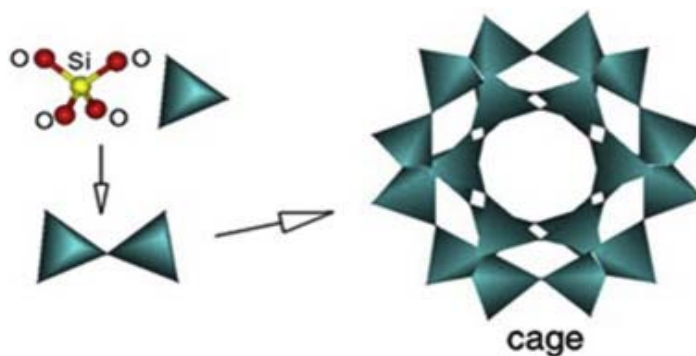


Figura 4. Estructura del armazón de una zeolita. Fuente: [103]

Dado que el aluminio tiene una valencia de +3 y el silicio de +4, la sustitución de Si por Al origina un déficit de carga que es responsable de la necesidad de cationes de equilibrio de carga, para mantener la neutralidad de la red zeolítica [81].

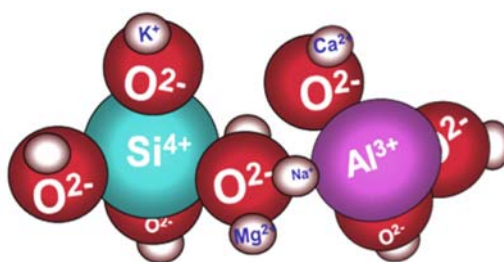


Figura 5. Esquema de la unidad estructural básica de una zeolita, mostrando la disposición de los átomos de oxígeno y silicio en el tetraedro fundamental. Fuente: [23]

Los cationes de equilibrio de carga comunes son metales alcalinos como Na^+ , K^+ , Mg^{2+} o Ca^{2+} o de tierras raras, que están unidos electrostáticamente a los átomos de Al, como se observa en la Figura 5. A temperaturas superiores a $500\text{ }^\circ\text{C}$, las moléculas de agua pueden eliminarse por completo de las cavidades abiertas de la estructura y los cationes pueden reemplazarse por otros, sin que se produzca ningún cambio en la estructura y, además, las propiedades zeolíticas no se ven afectadas. La capacidad de intercambio iónico de una zeolita depende de la relación Si/Al de la estructura, donde un mayor contenido de Al corresponderá a un mayor contenido de cationes de equilibrio de carga, lo que a su vez aumentará la capacidad general de intercambio iónico. Las zeolitas naturales presentan un alto contenido de Al, con proporciones de Si/Al que suelen oscilar entre 1 y 6. [103,53,36,45,98,99].

Las zeolitas están hechas principalmente de tetraedros, cuyas disposiciones geométricas se definen como unidades de construcción secundarias (SBU). Los tipos de estructura de zeolita están determinados por las diferentes formas de formar poliedros a través de enlaces entre SBU. Hay siete grupos de SBU y alrededor de 40 tipos de zeolitas naturales registradas [103]. La Figura 6 muestra los tipos de SBU que se pueden encontrar en las zeolitas naturales con respecto a las posiciones de Si o Al.

3.1.2.2 Propiedades

El intercambio iónico, la adsorción, la deshidratación y la rehidratación de una zeolita, que están relacionados con su estructura, armazón y composición, son importantes para determinar las propiedades de la zeolita. Las especies de zeolita natural varían mucho en composición. La proporción de Si/ Al dentro de la estructura de una zeolita es uno de los factores más importantes cuando se considera la aplicabilidad de una zeolita para aplicaciones de intercambio iónico [103].

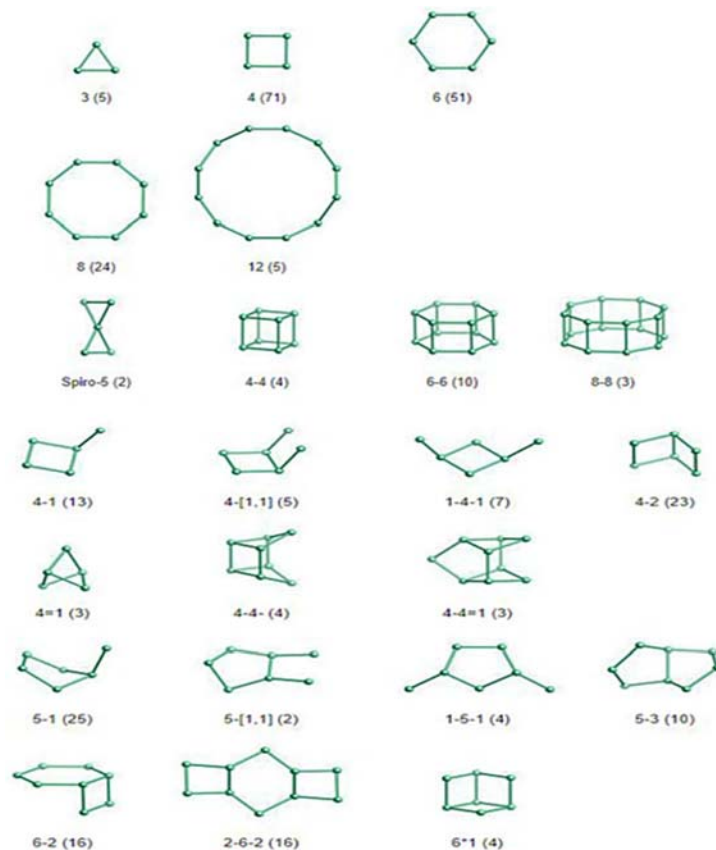


Figura 6. Unidades de construcción secundaria (sbu) en zeolitas (las esferas representan átomos T de tetraedros TO₄; los átomos de oxígeno están ocultos para una figura más clara; los números entre paréntesis representan la frecuencia de ocurrencia. Fuente: [103]

La porosidad es un factor importante para diferenciar entre especies de zeolitas. La porosidad de una zeolita está determinada por su estructura cristalina. Los tamaños de poro varían entre 0.3 y 1 nm, lo que resulta en porosidades entre 0.1 y 0.35 cm³/g, respectivamente. Al tener una estructura microporosa, las zeolitas también exhiben propiedades de tamizado molecular en condiciones apropiadas. Los pequeños tamaños de poro de la zeolita pueden excluir físicamente iones más grandes; lo que significa que los iones más pequeños se intercambian selectivamente. Como el tamaño de los poros y la estructura cristalina varían entre cada especie de zeolita, también lo hace el potencial de esa especie para actuar como un tamiz molecular.

Además, las zeolitas solo tienden a funcionar bien como tamices moleculares después de que se hayan deshidratado por completo [84].

Durante la década de los 80 y 90's, la investigación en tamices moleculares comenzó a avanzar más allá de las estructuras exclusivamente zeolíticas. De ser aluminosilicatos zeolíticos pasaron a ser compuestos polimórficos de sílice, para después pasar a compuestos microporosos de aluminofosfatos y compuestos metalosilicatos. Por otra parte, también es posible encontrar dentro del mercado a las zeolitas sintéticas donde, se encuentran bien establecidas y consideradas con un alto valor ya que, están compuestas con otros materiales y logran ser comercializadas como catalizadores, adsorbentes [70]. Vale destacar la gran capacidad de absorción de las zeolitas naturales procedentes de los yacimientos de México. Así mismo, son especies minerales que exhiben un alto grado de pureza, al punto de ser prácticamente monominerales; siendo notable por añadidura, su elevada superficie específica. [23]

A medida que se intensificó la investigación de zeolitas sintéticas, se identificó que estas zeolitas naturales de bajo costo tenían propiedades similares a los materiales sintéticos de mayor costo y, como tal, también se intensificó la investigación de zeolitas naturales, junto con la participación de mercado del material. [84]

Los aluminosilicatos de calcio son materiales que se pueden encontrar en forma natural y sintética. Dependiendo de la relación entre CaO , SiO_2 y Al_2O_3 , y por tanto presentan diferentes estructuras cristalinas, una de ellas es la chabazita. La chabazita un mineral perteneciente a las zeolitas y el tipo de zeolita utilizada en este trabajo, ha sido uno de los primeros en ser individualizado debido al cubo que distingue sus cristales. Anteriormente se había denominado solo cómo zeolita cúbica pero ya se le otorgó su denominación actual derivado del griego. Físicamente y como se muestra en la Figura 7, los cristales tienen un contorno hexagonal gracias a la formación de maclas y es considerada una especie diferente al resto.

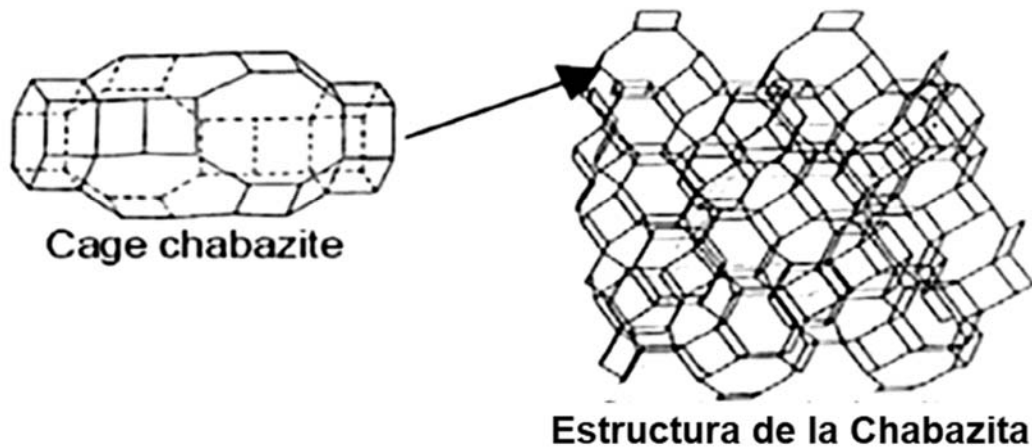


Figura 7. Estructura de la Chabazita Fuente: [30]

La chabazita, junto con la clinoptilolita, es una de las zeolitas naturales más abundantes y versátiles de la tierra. Tiene una estructura formada por dobles anillos paralelos unidos por cuatro anillos inclinados que producen un marco con cavidades que son accesibles a través de una abertura de ocho anillos, llena típicamente de moléculas de agua y cationes Na y Ca. Chabazite tiene una relación de Si/Al alrededor de 2-4, y se considera una zeolita de poro pequeño con aplicaciones particulares en el almacenamiento de hidrógeno. [36]

En su forma original, el mineral tiende a ser regularmente romboédricos con un aspecto parecido a los cubos. También tiende a ser transparente y de color amarilla, blanca, verde o incoloro. La parte cristalográfica de este material nos arroja que tiene una estructura trigonal y sus parámetros de celda son $a = 13.78 \text{ \AA}$ y $c = 14.97 \text{ \AA}$. Al igual que las demás zeolitas, la chabazita se compone de varios elementos, donde el O y Si son los más abundantes, así como también Al, H, agua y Ca en diferentes concentraciones.

3.1.2.3 Aplicaciones

Hasta la fecha, se han descubierto alrededor de 45 tipos de zeolitas naturales que tienen diversas propiedades químicas. Las zeolitas son minerales no tóxicos (sin efectos adversos para la salud ni para el ambiente). Esta característica es importante cuando se utilizan en grandes cantidades, como en la agricultura, en la que muchos de los agroquímicos que se aplican tienen efecto tóxico residual. [77]

Los mercados que consumen zeolitas naturales en México son los relacionados con la remediación ambiental, la agricultura, los alimentos balanceados, las mascotas, la industria agropecuaria, las bebidas para consumo humano, el petróleo los aceites combustibles, las pinturas, los plásticos, la industria textil, las cementeras, la medicina humana y veterinaria. Sin embargo, el potencial de usos de las zeolitas es amplio y sólo está acotado por la creatividad de quien necesite de ellas. A partir del año 2003 y a tres décadas de la primera descripción de zeolitas en México, la minería e industria de las zeolitas comenzó a tener una actividad constante [23,86].

La aplicación de zeolitas naturales para el tratamiento de aguas y aguas residuales se ha realizado y sigue siendo una técnica prometedora en los procesos de limpieza ambiental. En las últimas décadas, la utilización de zeolitas naturales se ha centrado en la eliminación de amonio y metales pesados debido a la naturaleza del intercambio de iones. [108]

La aplicación de zeolitas naturales en el control de la contaminación industrial se está volviendo importante y el nivel de esfuerzo técnico se está expandiendo cada vez más. Es poco probable que el alcance de la aplicación esté relacionado únicamente con su bajo costo, pero también con la mejora de las propiedades y las características de rendimiento, lo que promoverá la aplicación práctica de la tecnología de las zeolitas naturales. [55]

La zeolita tipo clinoptilolita ya se ha utilizado ampliamente en Chernobyl en una amplia variedad de maneras. Incluyen la adición de esta zeolita a detergentes, alimentos para animales, a las aguas residuales, y su uso en la descontaminación de leche [64]. Esto

hace que las zeolitas sean únicas por sus propiedades desde escala doméstica hasta industrial y por ello, son materiales muy versátiles.

Las zeolitas son también utilizadas como excelente material anfitrión para aplicaciones de materiales luminiscentes debido a la alta estabilidad química, etc. Se conoce que los materiales de aluminosilicatos son los candidatos más preferibles en el campo de la dosimetría debido a su fosforescencia de larga duración [111]. Sin embargo, la aplicación de la zeolita natural como dosímetros de radiación ha sido escasamente explorada. Existe muy pocos trabajos reportados, acerca de la posible aplicación como dosímetros de radiación no ionizante (radiación UV) utilizando algunas especies de aluminosilicatos naturales [28,35,38] y algunos materiales como zeolitas sintéticas puras y dopadas con tierras raras para aplicaciones en dosimetría de radiación ionizante (radiación γ , β) [90,90]. Cabe mencionar que las zeolitas extraídas de los yacimientos del Estado de Sonora son ampliamente utilizadas en la industria del cemento y de la construcción [23].

3.2. Propiedades termoluminiscentes

3.2.1 Radiación

El Universo tal como lo conocemos contiene materia y energía, pero sabemos que estos dos componentes están relacionados a través de la famosa ecuación de A. Einstein: $E=mc^2$, donde E representa la energía, m= la masa de la materia y c = la velocidad de la luz. La luz es una manifestación de la energía y está asociada a la radiación electromagnética que se encuentra en todo el universo y se describe como un campo electromagnético (con descripción ondulatoria) o como fotones (con descripción como partícula), tanto ondas como fotones se desplazan en el espacio a la velocidad de la luz. Todos los seres humanos están expuestos a radiación proveniente de fuente natural o artificial. En forma natural existen ondas electromagnéticas procedentes del sol, las estrellas y de diferentes lugares del universo, de hecho, la luz solar también es una onda electromagnética. Las radiaciones de origen artificial proceden de diversos artefactos creados por el hombre

y pueden ser producidas por equipos radioeléctricos o no; por ejemplo, el monitor de una PC, un tubo de iluminación fluorescente, un horno a microondas, un secador de cabello, una afeitadora eléctrica, una licuadora, un televisor, un celular, etc [38,47,113].

El término de radiación es un concepto amplio, que abarca un abanico de fenómenos de diferente naturaleza y es tema de interés dentro de la sociedad. Parte de la población desconoce su concepto y lo relaciona totalmente con peligro. Se define como **radiación** a cualquier emisión y propagación de energía, a través del vacío o de un medio material, en forma de onda electromagnética (Rayos UV, Gamma o Rayos X) llamada radiación electromagnética, la cual no poseen masa, sólo energía; y en forma de partícula (partículas α , partículas β y neutrones), que recibe el nombre de radiación corpuscular, son radiaciones que se propagan asociadas a la masa [39,52]. Con independencia del tipo de radiación, si ésta posee suficiente energía como para provocar ionización sobre el medio que atraviesa, entonces se habla de «Radiación ionizante», o «Radiación no ionizante».

3.2.1.1. Tipos de radiación

Ionización. Los átomos están generalmente en su estado fundamental, pero pueden ser excitados de maneras diversas, por ejemplo, mediante una descarga eléctrica, por bombardeo con electrones, con radiación electromagnética, etc. Excitar un átomo es provocar el desplazamiento de alguno de sus electrones a niveles de mayor energía por lo que, para que esto ocurra, es necesario suministrarle la energía necesaria para efectuar el salto. Cuando la energía de los electrones y de los fotones incidentes es suficientemente elevada, la colisión con un electrón atómico puede provocar la separación completa de ese electrón del átomo y como resultado queda ionizado [7,114]. El enlace roto, que se mueve en el seno del cristal se denomina hueco. Y como el electrón que falta es negativo, la zona inmediata donde falta el electrón se hace positiva. La neutralidad eléctrica se rompe en la vecindad del enlace roto. El hueco es, por consiguiente, positivo. Y como es móvil, transporta también corriente eléctrica.

Radiación no ionizante. Es todo tipo de radiación que, debido a su insuficiente energía, no puede ionizar la materia. Las radiaciones no ionizantes constituyen, en general, la parte del espectro electromagnético cuya energía fotónica es demasiado débil para romper enlaces atómicos. Entre ellas cabe citar la radiación ultravioleta, la luz visible, la radiación infrarroja, los campos de radiofrecuencias y microondas, y los campos de frecuencias extremadamente bajas. [38,106]

Radiación ionizante. El tipo de radiación que nos interesa es la ionizante. La radiación ionizante hace que los átomos o moléculas neutrales adquieran una carga eléctrica positiva o negativa. Es aquella radiación con energía suficiente para interactuar con la materia arrancando electrones y, por tanto, ionizarla mediante la ruptura de los enlaces atómicos. Por ejemplo, de átomos inestables (radiactivos) que emiten energía para estabilizarse, se dice que “decaen” cuando emiten energía en forma de radiación ionizante.

Existen 2 tipos de radiaciones ionizantes:

a) De origen electromagnético

Constituido por rayos gamma, rayos X, y rayos UV. En este caso se trata de una onda compuesta por un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares entre sí y a la dirección de propagación. La radiación electromagnética viaja en el vacío a la velocidad de la luz y muestra características duales, de onda y de partícula. La radiación viaja formando paquetes de energías, llamadas *fotones*. La energía del Fotón depende de la frecuencia (o de la longitud de onda de la radiación), según la Ecuación 1:

$$E = h\nu = h \cdot c/\lambda$$

Ecuación 1. Relación de Planck-Einstein

Siendo:

h = La constante de Planck (6.62618 x 10⁻³⁴ J.s)

ν = frecuencia

λ = longitud de onda

c = velocidad de la luz

Se puede apreciar que, a mayor frecuencia, hay mayor energía transportada. En la Figura 8, se puede observar un gráfico en el cual se representan las frecuencias que componen el Espectro electromagnético, el mismo va desde las más bajas frecuencias (50 Hz. de una red eléctrica), pasando por los sistemas radioeléctricos y la luz visible, que son radiaciones no ionizantes, hasta llegar a las radiaciones ionizantes, como Rayos X, Gamma, etc.

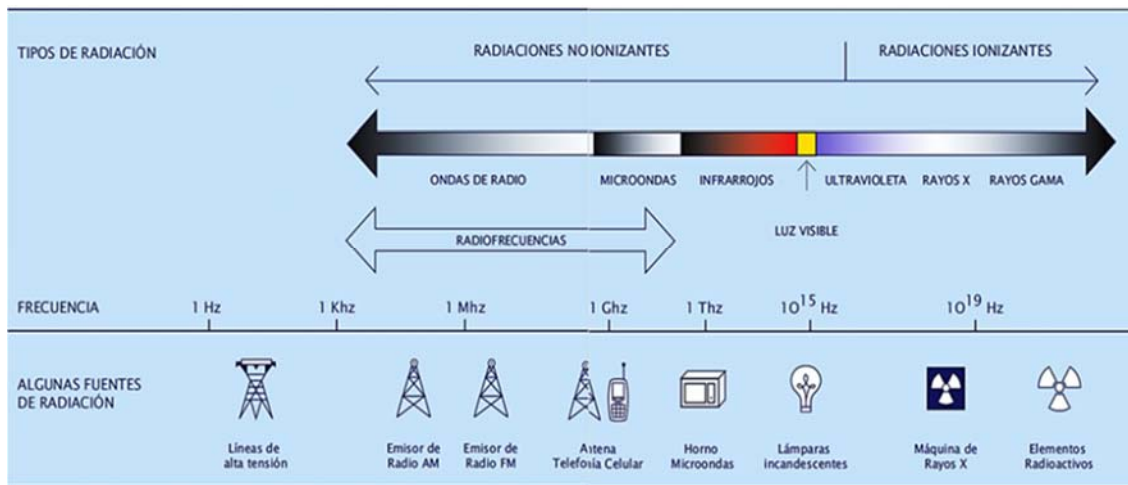


Figura 8. Espectro electromagnético. Fuente: [38,109]

b) Las partículas subatómicas (electrones, protones y neutrones)

Los átomos de los que están formadas todas las sustancias o materiales están constituidos por una región central, el núcleo, y a su alrededor por electrones que describen órbitas con determinadas energías. El núcleo, a su vez, está constituido por la asociación de protones y neutrones (llamados nucleones). Mientras que el electrón y protón tienen carga de igual magnitud, el neutrón es una partícula eléctricamente neutra [8]. Cuando hay un exceso de protones y neutrones frente a las combinaciones estables, se presentan núcleos inestables que tienden a transformarse en núcleos más estables mediante la emisión de alguna partícula nuclear, ocasionándose la *radiactividad*. Las partículas emitidas por los átomos radiactivos consisten o bien, en partículas alfa (α), o en partículas beta (β).

Generalmente, ambas partículas van acompañadas de una radiación electromagnética conocida como radiación gamma (γ).

- Partículas α . Estas partículas son núcleos de helio doblemente ionizados, ${}^4\text{He}$, (dos protones unidos a dos neutrones), con spin total igual a cero. Son emitidas generalmente por núcleos de elementos pesados como el uranio (Figura 9), el torio o el radio, con energías comprendidas entre 3 MeV y 9 MeV. Debido a la constitución de las partículas alfa, éstas tienen doble carga positiva (debida a los dos protones); comparadas con otro tipo de radiación, estas partículas son muy pesadas (ésta pesa arriba de 7000 veces más que una partícula beta o un electrón) y transportan suficiente energía, por lo cual pueden interactuar con cualquier partícula que se encuentre en su camino, incluyendo los átomos componentes del aire, generando en una corta distancia, un gran número de ionizaciones, por ejemplo, una partícula alfa de 4 MeV producirá en su absorción en aire, unos 115,000 pares ion-electrón.

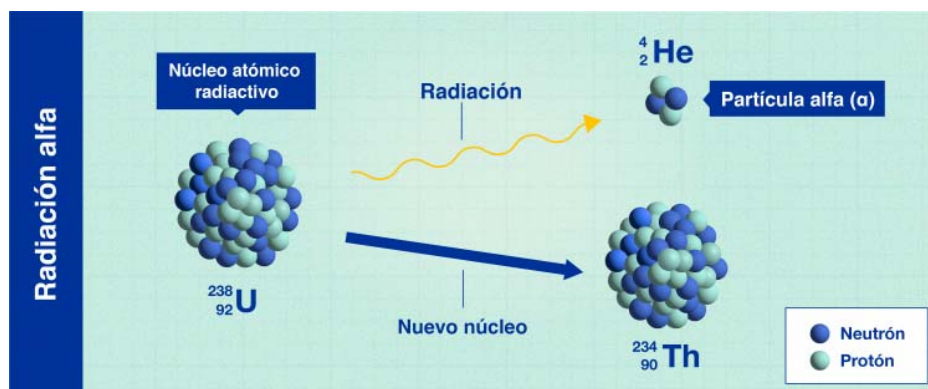


Figura 9. Decaimiento alfa. Fuente: [82]

En general transfieren su energía con gran rapidez, y su poder de penetración en los materiales es pequeño, pudiendo ser detenidas por una hoja de papel. Este tipo de radiación suele actuar sobre lugares en que son depositados, ya sea por sedimentación, ingestión o inhalación. La radiación alfa se frena en las capas

exteriores de la piel y no es peligrosa, a menos que se introduzca directamente, a través de heridas, alimentos, etc. [8,110]

- Partículas β . Tiene su origen en un proceso de reorganización nuclear, en el que el núcleo emite un electrón y una partícula denominada neutrino que se lleva algo de la energía perdida del núcleo (Figura 10). La radiación beta tiene lugar en los isótopos ricos en neutrones y que suelen ser elementos producidos en reacciones nucleares naturales y en las plantas de energía nuclear. La Tabla II muestra los isótopos beta emisores responsables de dosimetrías beta y sus energías.

Las partículas beta suelen ser electrones de carga negativa, o electrones de carga positiva (positrones); por su pequeña masa reaccionan menos frecuentemente con la materia que las partículas alfa, pero son más penetrantes que éstas. Se pueden detener con capas delgadas de plástico o de metales ligeros como el aluminio. Se introducen 1-2 cm en los tejidos vivos.

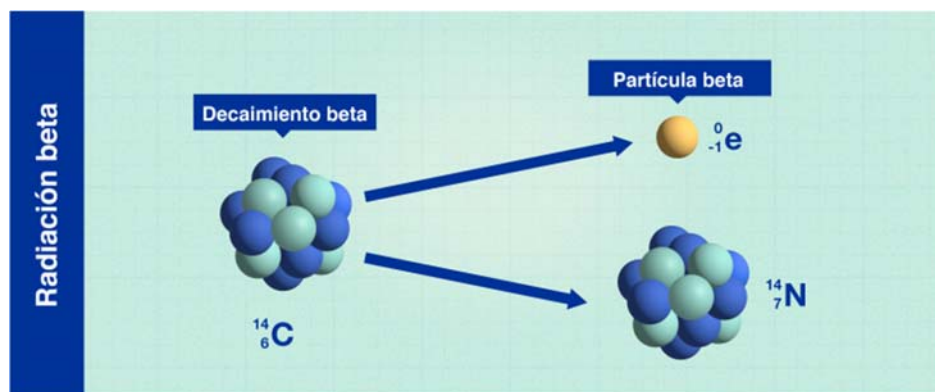


Figura 10. Decaimiento beta. Fuente [82]

Tabla II. Energías de isótopos beta emisores responsables de dosimetrías beta

Isótopo	$E_{\text{máx}}$ (MeV)	Isótopo	$E_{\text{máx}}$ (MeV)
^{60}Co	0.38	^{14}C	0.156
^{137}Cs	1.18	$^{90}\text{Sr} / ^{90}\text{Y}$	0.54-2.27
$^{131}\text{I}, ^{132}\text{I}$	0.61-2.12	^{51}Cr	0.76
^{32}P	1.71	^{54}Mn	0.53
^{204}Tl	0.76	^{35}S	0.167

Fuente: [12,12]

- Radiación γ . Tras emitirse una partícula α o β del núcleo de un átomo, aquel queda aún con exceso de energía que se elimina en forma de ondas electromagnéticas de alta frecuencia (entre 10^{20} y 10^{24} Hertzios (Hz), denominadas radiación gamma (Figura 11). Este tipo de radiación no tiene masa en reposo ni carga eléctrica y su interacción con la materia se hace a través de colisiones con las capas electrónicas de los átomos perdiendo muy poca energía, por lo que pueden viajar cientos de metros en el aire, y sólo son detenidos por gruesas capas de hormigón, plomo o agua.



Figura 11. Decaimiento gama. Fuente: [82]

A la vez que tienen efectos nocivos, los rayos gamma tienen efectos benéficos, por lo que son ampliamente utilizados en la industria, la biología, la

agricultura y la medicina, entre otros. Estos rayos pueden penetrar profundamente en los tejidos; sin embargo, libera menos energía que las radiaciones alfa y beta.

3.2.1.2 Interacción con la materia

Cuando las partículas nucleares interactúan con la materia, producen una serie de efectos que son función del tipo de partícula, de su energía y del medio material en el que sufren la interacción. Las partículas cargadas que pasan a través de la materia pierden su energía cinética por interacciones electromagnéticas dominantes que consisten en la excitación e ionización de los átomos a lo largo de su paso. Este proceso suele denominarse proceso de colisión. [63]

Los fotones, electrones, neutrones y partículas cargadas y neutras pueden crear defectos ya que la radiación desplaza los átomos del cristal de su posición normal en la red, produciendo vacancias e intersticiales. El número de defectos es proporcional al flujo de radiación y al tiempo de radiación. Sin embargo, durante una irradiación prolongada el número de defectos producidos decrece gradualmente ya que la posibilidad de recombinación vacancia-intersticial aumenta.

Hay varios tipos de defectos en los materiales, sin embargo, en este trabajo hablaremos de los **defectos puntuales** (vacancias, átomos sustitutivos e intersticiales) y de los **defectos electrónicos** (electrones y huecos). La posición que ocupan los cationes y aniones en la red cristalina se llamará sitio.

Los **defectos puntuales** pueden dividirse en dos categorías principales:

- 1- Defectos intrínsecos. Que son parte integral del cristal, es decir su presencia no altera la composición global del material;
- 2- Defectos extrínsecos. Que se crean cuando se inserta un átomo o dopante externo en la red cristalina, que puede sustituir a un ion normal en la red o puede entrar en una posición intersticial (entre los iones de la red).

Los defectos puntuales a menudo se clasifican en los siguientes tipos con nomenclatura y notaciones especiales:

- vacancia: consiste en un sitio vacío que originalmente estaba ocupado por algún átomo, un hueco (h^+) es la ausencia de un electrón (e^-) que genera una carga positiva, se denota por V_A
- Intersticial: un átomo A que ocupa un sitio intersticial se denota por I_A .
- Sustitucional: un átomo C que reemplaza a un átomo anfitrión A se denota por C_A
- Antisitio: un tipo especial de defecto de sustitución en el que se encuentra un átomo huésped B.
- Par de defectos de Frenkel: un complejo V_A-I_A formado por un átomo A desplazado de un sitio reticular a un sitio intersticial cercano

Muchos defectos importantes son eléctricamente activos. Los defectos que pueden aportar electrones libres al cristal huésped se conocen como donantes, mientras que los defectos que pueden aportar huecos (es decir, eliminar electrones libres) se conocen como aceptores. [10,17,17]

3.2.1.3. Detección de la radiación

La detección y medición de la radiación se basa en la detección y medición de sus efectos en un medio, y la historia de la aparición de detectores de radiación está estrechamente relacionada con el descubrimiento de la radiación y los efectos de la radiación. Aunque las radiaciones ionizantes han estado presentes en la naturaleza (rayos cósmicos, materiales radiactivos de origen natural) a lo largo de la historia del hombre, pasaron desapercibidas hasta hace menos de 100 años. El hombre no tiene un sentido específico que pudiera haber respondido a este tipo de radiación y no hubiera sido posible que la iniciativa científica desarrollara ningún instrumento que hubiera amplificado una respuesta humana a esa radiación, como fue el caso, por ejemplo, en el área de las ondas de luz visible (óptica). [35,35]

La radiación emitida por una sustancia radiactiva no impresiona nuestros sentidos, por ellos es necesario emplear métodos especiales para detectar cada tipo de radiación. La detección de la radiación no se limita a indicar solo su presencia; es necesario

también medir la cantidad de radiación, su energía y las propiedades. La detección de la radiación se basa en el efecto que produce dicha radiación sobre la materia con la que interacciona. Como sabemos hoy, las herramientas para detectar la radiación ionizante existían, en principio, mucho antes: el fenómeno de la termoluminiscencia se describió por primera vez en el siglo XVII; Sin embargo, pasaron muchos años para Röntgen en 1895 y por H. Becquerel en 1896 abrieran las puertas a estos nuevos campos de la ciencia. [35]. Antes de la introducción de las técnicas de TL, la dosimetría de radiación ionizante fue dominada por películas fotográficas y cámaras de ionización. En condiciones favorables, la intensidad de la luz emitida por un material TL es proporcional a la dosis absorbida, y, por lo tanto, con una calibración adecuada, se puede evaluar la dosis aplicada en el campo de radiación. La dosis absorbida también llamada dosis material (D_{material}) o dosis exposición, es la energía de radiación ionizante absorbida por unidad de masa de materia irradiada en un punto específico. Su unidad de medida es el Gray (Gy), un Gy equivale a un joule (J) de energía por kilogramo de materia. En el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, la dosis absorbida indica la dosis promediada sobre un tejido u órgano. En la literatura también puede encontrarse la unidad especial "rad", la cual es equivalente a 10^{-2} Gy; a su vez la unidad "sievert (Sv)" donde $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rem}$. Como referencia se puede acotar que la dosis promedio anual en las personas debida a radiación ambiental (fuentes naturales) es de 2,4 mSv

Los sistemas de detección de radiación específicos incluyen los sentidos humanos, fotografía, calorimetría, dosimetría de color, cámaras de iones, electrómetros, electroscopios, contadores proporcionales, contadores Geiger Mueller, escaladores y medidores de velocidad, platino cianuro de bario, contadores de centelleo, detectores de semiconductores, dosímetros radiofotoluminiscentes, dosímetros termoluminiscentes, dosímetros luminiscentes estimulados ópticamente, almacenamiento de iones directos, electretos, cámaras de niebla, cámaras de burbujas y dosímetros de burbujas.[37]. Todo sistema de detección funciona siguiendo la misma secuencia: comienza con la interacción de una determinada radiación con el

medio de detección; el resultado de la interacción se transforma en señales, que se leen y normalmente se registran. El proceso de interacción depende tanto del tipo como de la energía de las partículas entrantes (o fotones). Los instrumentos para la detección de radiación evolucionan a medida que se dispone de nuevas tecnologías y, como consecuencia, hoy en día dispositivos cada vez más sofisticados se ponen a disposición de los usuarios. [5,63]

En nuestro trabajo se utilizó un equipo automatizado de medición de la dosis absorbida, en el cual pueden realizarse mediciones con diferentes fuentes radiactivas (rayos x , β y γ). Este equipo se encuentra en el laboratorio de física de radiaciones del Departamento de Investigación en Física de la Universidad de Sonora. La zeolita utilizada en este trabajo se sometió a radiación ionizante, se hicieron pruebas utilizando rayos x y partículas beta, y se observaron resultados muy similares al utilizar cada una de ellas. Se optó por medir la respuesta termoluminiscente usando radiación de partículas beta.

3.2.2 Luminiscencia

Luminiscencia, el nombre proviene de la palabra latina lumen que significa luz. El término "Luminescenz" fue utilizado por primera vez en 1888 por el gran físico alemán Eilhardt Wiedemann. Una fuente de excitación impulsa un electrón del estado fundamental a un estado de mayor excitación y cuando regresa a su estado original, si emite una parte de la energía dada como fotón, este proceso se conoce como luminiscencia. A menudo se describe como "luz fría" para distinguirla de la emisión de luz incandescente. En los últimos dos siglos, se realizaron más observaciones y descubrimientos, incluida la luminiscencia de materiales inorgánicos dopados con iones de metales de transición y tierras raras. A estos materiales se les dio el nombre de "fósforos" que absorben, almacenan energía y finalmente la convierten en luz. Los materiales luminiscentes pueden ser excitados por diferentes tipos de energía y, por lo tanto, se clasifican según su modo de excitación como se indica en la Tabla III. [102]

Tabla III. Fenómenos de Luminiscencia

Fenómeno	Métodos de Excitación
Bioluminiscencia	Energía Bioquímica
Catodoluminiscencia	Rayos catódicos, haz de electrones
Quimioluminiscencia	Energía química
Electroluminiscencia	Campo eléctrico
Fotoluminiscencia	Fotones (UV, Visible y luz IR)
Piezoluminiscencia	Presión (10 tons m ⁻²)
Triboluminiscencia	Energía mecánica, ej. Fricción
Radioluminiscencia	Radiaciones nucleares, ej. Rayos γ , partículas β, α , etc.
Sonoluminiscencia	Ondas de sonido
Termoluminiscencia	Cualquier tipo de radiación seguida de la liberación de energía a calentar la muestra

Fuente: [102]

Los materiales luminiscentes se utilizan ampliamente en muchos campos, como dispositivos de iluminación y visualización. La luminiscencia es una de esas propiedades de un fósforo que ha fascinado a los científicos durante muchos años. Los fósforos son los materiales con alta posibilidad de aplicación en diversos campos. Cuando se agrega un ion de impureza a la matriz huésped, crea defectos en la red cristalina. La formación de defectos mejora las propiedades ópticas, estructurales y luminiscentes de la red huésped. Según las características luminiscentes de los iones dopantes, los fósforos podrían usarse como dispositivos de iluminación, dosímetros, centelladores, dispositivos de visualización y sensores.

Hay dos hechos comunes a todas las formas de luminiscencia: la excitación de átomos o moléculas con transferencia de electrones a estados excitados (transición 1) de la Figura 12(a) y la transición radiativa al estado fundamental mediante la emisión luminiscente de un fotón (transición 2).

I. Si la desexcitación es espontánea y rápida el efecto se llama fluorescencia, y cesa al cesar el estímulo y este proceso es independiente de la temperatura. La

sustancia en la que se produce fluorescencia recibe el nombre de **fluorescente**. Los llamados tubos fluorescentes que se utilizan en la iluminación doméstica e industrial se basan en este fenómeno.

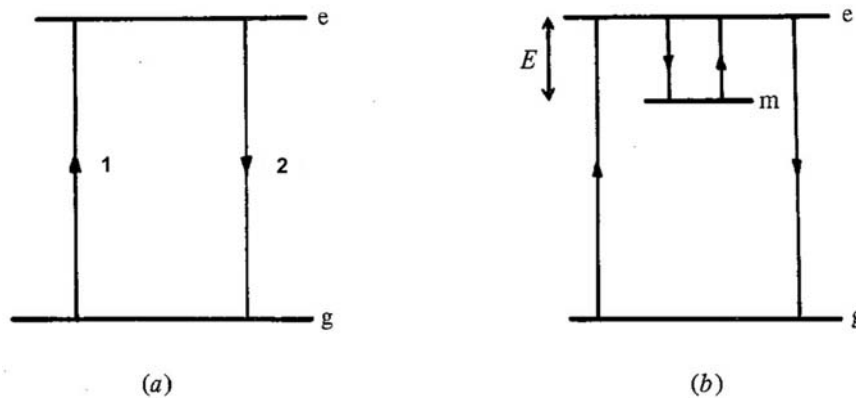


Figura 12. Transiciones de energía involucrados en la producción de (a) fluorescencia y (b) fosforescencia. Fuente: [66]

II. Si la desexcitación es lenta, se denomina fosforescencia y continúa al cesar el estímulo. Hay sustancias o materiales cuyos átomos pueden permanecer en un estado excitado durante un tiempo apreciable que puede ser incluso de algunas horas. Esto es debido a la presencia de un nivel metaestable m en la banda de energía prohibida entre e (estado excitado) y g (estado fundamental). Un electrón excitado de g a e ahora puede quedar atrapado en m donde permanecerá hasta que se le dé suficiente energía E (energía de activación, profundidad de la trampa) para regresar a e desde donde puede experimentar una transición normal de regreso a g , con la subsiguiente emisión de luz. Así, el retraso observado en la fosforescencia corresponde al tiempo que el electrón pasa en la **trampa** de electrones m . (Figura 12 b). [66]. Estos materiales son denominados **fosforescentes** y pueden emitir luz en la oscuridad durante algún tiempo después de haber sido excitados. [7]. La trampa es una impureza o defecto de red que tiene la capacidad de atrapar portadores de carga y constituye un papel muy importante

en las propiedades eléctricas y ópticas de semiconductores y luminiscentes materiales.

3.2.3 Termoluminiscencia (TL)

En este trabajo, nos enfocamos en la TL o más acertadamente llamada luminiscencia estimulada térmicamente (TSL, por sus siglas en inglés). La TL es el fenómeno de emisión de luz de un sólido, el cual debe ser un semiconductor o aislante, cuando es calentado y fue previamente expuesto a radiación electromagnética o ionizante como rayos X, γ , UV, partículas α y β . [33]

La termoluminiscencia es una técnica muy popular y versátil, utilizada en ramas de arqueología, medicina, geología, biología, estado sólido, química orgánica, comprobación de concentraciones de defectos en materiales y dosimetría de radiación. La mayor parte del interés por la termoluminiscencia en la primera mitad de este siglo se centró en la aparición de TL en la naturaleza. Muchos minerales naturales exhiben termoluminiscencia después de la irradiación. Si se presentan trazas de material radiactivo de forma natural, este efecto se puede utilizar para la datación de muestras arqueológicas y geológicas. [61]

Durante las medidas de TL la emisión de luz se produce en un proceso de 3 etapas irradiación (absorción), calentamiento y recombinación. Antes de la irradiación, un cristal ya posee defectos que pueden actuar como trampas de electrones y huecos. Durante la irradiación, parte de la energía de esa radiación puede ser absorbida y electrones y huecos creados por ionización, los electrones son excitados hacia la banda de conducción. La mayoría de los electrones excitados se recombinarán rápidamente con los iones de la red, pero solo un pequeño porcentaje quedarán atrapados en esos defectos, almacenando parte de la energía absorbida en forma de carga eléctrica atrapada. La energía almacenada se libera en condiciones de aumento constante de la temperatura, en un rango de temperatura donde la luminiscencia es brillante, y hasta un nivel de temperatura en el que todas las cargas se han excitado térmicamente fuera de sus niveles metaestables y la luminiscencia desaparece por

completo (Figura 13). La intensidad de la luz emitida como resultado de este proceso de recombinación es directamente proporcional a la dosis de radiación recibida por el material y, por lo tanto, proporciona los medios para estimar la dosis de irradiaciones desconocidas. [33,41]

3.2.3.1 Curvas de emisión TL

Si la intensidad de la luz emitida se representa en función de la temperatura (o del tiempo), los gráficos resultantes se denominan curvas de brillo, que proporciona una poderosa herramienta para determinar las características de la trampa. La trampa es una impureza o defecto de red que tiene la capacidad de atrapar portadores de carga y constituye un papel muy importante en las propiedades eléctricas y ópticas de los materiales semiconductores y luminiscentes. Las curvas de brillo tienen uno o varios máximos llamados picos de brillo y son función de varias trampas de nivel de energía (Figura 13). Estas emisiones de luminiscencia permitirán el análisis termoluminiscente de las muestras de Zeolitas [105]

Una vez que la muestra se calienta para obtener la emisión de luz, el material no volverá a exhibir termoluminiscencia simplemente enfriándolo y volviendo a calentarlo. Para obtener de nuevo una termoluminiscencia, es necesario exponer la muestra a radiación otra vez. Los fósforos termoluminiscentes eficientes tienen una alta concentración de trampas de electrones y huecos, proporcionada por defectos estructurados e impurezas, por tal motivo la TL es una propiedad que es extremadamente sensible a los cambios en la estructura del cristal [41]. Muchos factores, como la estructura cristalina, la brecha de banda, el proceso de síntesis, el tamaño del cristal, las imperfecciones de la red y principalmente las impurezas en los sólidos, son responsables de la TL. [101,97]. Por lo tanto, es factible describir la TL con la estructura de bandas, en términos de bandas de valencia y de conducción, separadas entre sí por un espacio prohibido en el que los defectos se representan como sitios localizados a diferentes profundidades (estados metaestables), por debajo

de la banda de conducción y por arriba de la banda de valencia, donde los portadores de carga libre de cualquier signo pueden estar atrapados. [41]

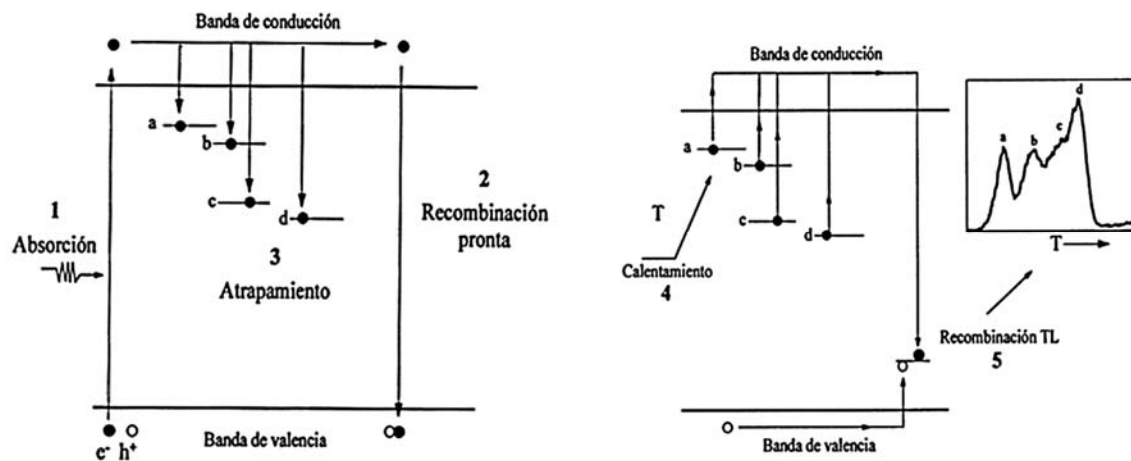


Figura 13. Esquema del proceso TL. Muestra los efectos producidos por la irradiación y el calentamiento en un sólido cristalino irradiado. Fuente: [101]

3.2.3.2 Modelos matemáticos para termoluminiscencia

Los mecanismos físicos de la termoluminiscencia pueden ser modelados a través de una serie de ecuaciones diferenciales no lineales acopladas. Se han aplicado varios modelos matemáticos para describir el proceso de TL que surgió en los materiales. El método más sencillo, fue propuesto en 1945, por Randall y Wilkins que representa matemáticamente cada pico en una curva de brillo, su tratamiento matemático se basó en el modelo de banda de energía (Figura 14) y produce la conocida expresión de primer orden ($b=1$). Este modelo asume que la liberación térmica de un electrón desde los centros de trampa es seguida por una recombinación con un hueco en los centros de recombinación, y que el reatrapamiento de electrones es imposible. [2,41]

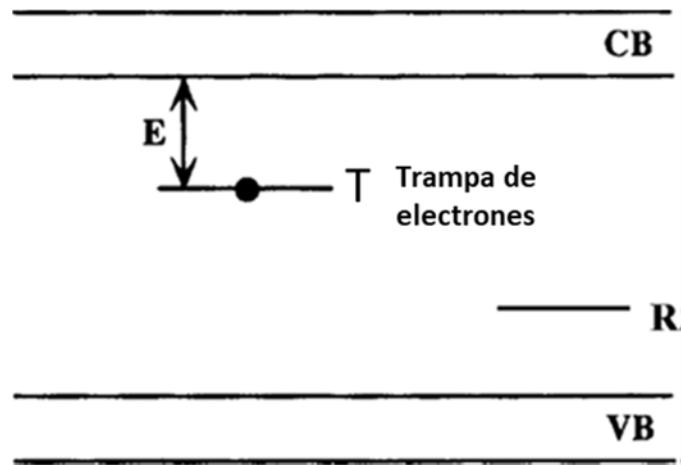


Figura 14. Esquema que se usa para el tratamiento teórico del modelo simple, Randall y Wilkins. Fuente: [41]

Entre las bandas deslocalizadas, banda de conducción, CB, y banda de valencia, VB, se consideran dos niveles localizados (estados metaestables), uno actuando como trampa, T, y el otro actuando como centro de recombinación, R. La distancia entre la trampa T y el fondo del CB se denomina energía de activación o profundidad de trampa: E. Esta energía es la energía necesaria para liberar una carga, es decir, un electrón, que queda atrapado en T. La Ecuación 2 describe la forma de un pico de brillo TL cuando la probabilidad de reatrapamiento es insignificante (cinética de primer orden). [66]

$$I(T) = csn_0 \exp\left(\frac{-E}{kT}\right) \exp\left[\left(\frac{-s}{\beta}\right) \int_{T_0}^T \exp\left(\frac{-E}{kT'}\right) dT'\right]$$

Ecuación 2. Ecuación de randall y wilkins

Donde: [78]

N = la concentración total de trampas en el cristal (m^{-3}),

$n(t)$ = la concentración de trampas llenas en el cristal (en m^{-3}) en el tiempo t ,

$n_h(t)$ = la concentración de huecos atrapados en el centro de recombinación (m^{-3}),

n_0 = la concentración inicial de trampas llenas en el tiempo $t = 0$,

E = la energía de activación o profundidad de trampa (eV),

k = constante de Boltzmann (eVK^{-1}),

t = tiempo (s),

T = la temperatura absoluta (K),

β = razón de calentamiento,

T_0 = temperatura en el tiempo $t = 0$ (K),

s = una característica constante de la trampa de electrones, llamada "factor de frecuencia preexponencial" o "frecuencia de intento de escape" (s^{-1}). Este parámetro es proporcional a la frecuencia de las colisiones del electrón con los fonones de la red. Normalmente, los valores máximos de s corresponden a los valores de la frecuencia de vibración de la red, es decir, $10^{12} - 10^{14} s^{-1}$.

n = concentración de electrones atrapados en el tiempo t (m^{-3})

b = el orden cinético, un parámetro con valores típicamente entre 1 y 2

s' = factor preexponencial efectivo para la cinética de orden general ($m^{3(b-1)} s^{-1}$).

Esta expresión se puede evaluar por medio de integración numérica, y produce una curva en forma de campana (curva de brillo), como en la Figura 15, con una intensidad máxima a una temperatura característica T_M . La intensidad de la luz emitida es igual a la tasa de recombinación de huecos y electrones en el centro de recombinación. [41]

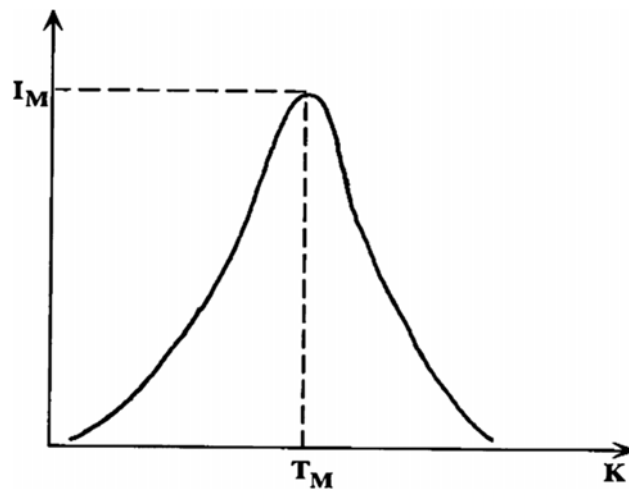


Figura 15. T_M y curva de brillo. Fuente: [41]

Algunas observaciones se pueden hacer en la Ecuación 1:

– $I(T)$ depende de tres parámetros E , s y b (llamados parámetros cinéticos)

- E tiene valores alrededor de $20kT$ en el rango de ocurrencia de picos TL,
- $\exp(-E/kT)$ es del orden de 10^{-7} ,
- cuando T es ligeramente mayor que T_0 , el argumento de la segunda función exponencial es aproximadamente igual a la unidad y disminuye al aumentar la temperatura. $I(T)$ está entonces dominado por la primera exponencial y aumenta muy rápidamente a medida que aumenta la temperatura. A una determinada temperatura, T_M , el comportamiento de las dos funciones exponenciales se anula: a esta temperatura se produce la temperatura máxima,
- por encima de T_M , la disminución de la segunda exponencial es mucho más rápido que el aumento de la primera exponencial y $I(T)$ disminuye hasta que las trampas están totalmente vacías.

La Figura 16 muestra en un diagrama esquemático el aumento en la temperatura T de la muestra, la emisión simultánea de luz $I(t)$ y la correspondiente disminución en la concentración n_h de huecos atrapados [78].

La forma de la curva de emisión varía de un material para otro y depende de factores como la velocidad de calentamiento en el proceso de lectura TL, la dosis de radiación, y la concentración de trampas. La presencia de dos o más picos TL en la misma curva de emisión TL revela la existencia de más de un tipo de trampa. La forma y posición del pico o picos nos puede dar una idea inicial del orden de cinética y la profundidad energética de la trampa.

Mientras que el modelo de cinética de segundo orden ($b=2$) considera que se dan dos posibilidades a los electrones tras la liberación térmica: recombinarse con huecos o volver a atraparlos. 1948, Garlick y Gibson, en sus estudios sobre fosforescencia, asumieron que el electrón que escapa de la trampa tiene la misma probabilidad de volver a quedar atrapado o de recombinarse con un hueco en un centro de recombinación. La Ecuación 3 describe la forma de un pico de brillo TL cuando la probabilidad de reatrapamiento y recombinación del electrón que escapa de la trampa es igual. [41]

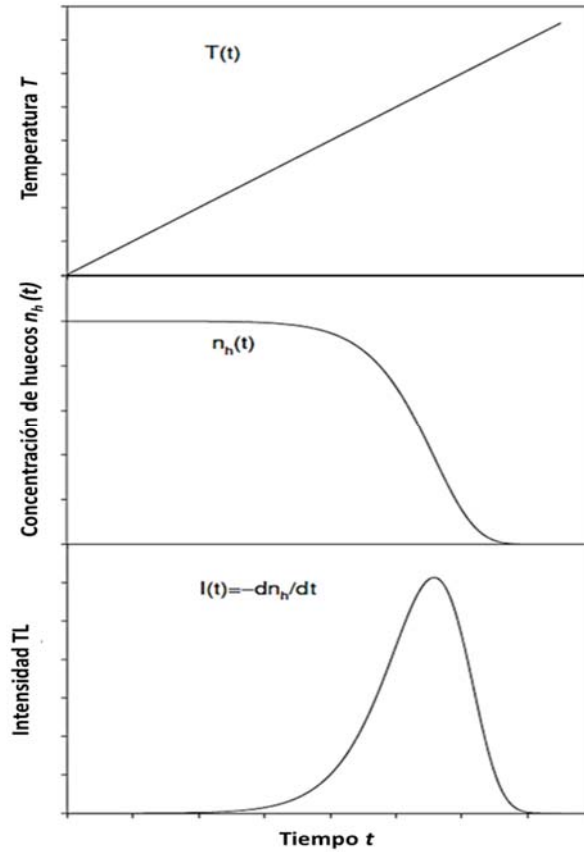


Figura 16. Temperatura $T(t)$, la intensidad de termoluminiscencia $I(t)$, y la concentración de huecos atrapados $n_h(t)$ en el centro de recombinación RC en función del tiempo t . Se utiliza una razón de calentamiento lineal β durante el experimento. Fuente: [78]

$$I(T) = \frac{n_0^2 s' \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)}{\left[1 + \frac{s' n_0}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]^2}$$

Ecuación 3. Ecuación de Garlick y Gibson

La Figura 17 muestra una comparación de los picos de brillo de TL para cinéticas de primer y segundo orden de un solo tipo de trampa. En el caso de la cinética de segundo orden la emisión de luz se “retrasa” por el reatrapamiento de los electrones en la

trampa T; este retraso se muestra principalmente durante la parte descendente de la curva de brillo TL. [78]

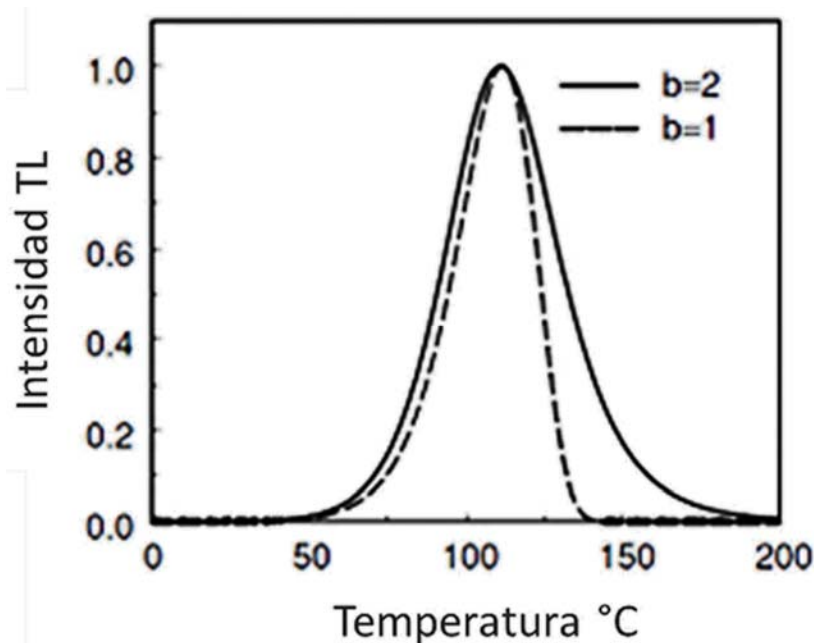


Figura 17. Comparación esquemática de picos de brillo TL para cinéticas de primer y segundo orden. Los parámetros utilizados son $E = 1 \text{ eV}$, $s = 10^{12} \text{ s}^{-1}$, $n_0 = N = 10^3 \text{ m}^{-3}$. Fuente: [78]

La importancia de la termoluminiscencia para la dosimetría de la radiación radica en el hecho de que la cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis absorbida por el material irradiado. Entonces, la dosimetría termoluminiscente (DTL) resulta ser un método establecido para la dosimetría de la radiación

3.3. Dosimetría Termoluminiscente

La dosimetría de termoluminiscencia ha estado disponible para dosimetría de radiación ionizante por cerca de 100 años. La variedad de materiales y sus diferentes formas físicas permiten la determinación de diferentes calidades de radiación en un amplio rango de dosis absorbida. Las principales ventajas de los detectores TL son su pequeño tamaño físico y que no se requieren cables ni equipos auxiliares durante la evaluación de la dosis. Por lo tanto, la dosimetría termoluminiscente es un buen método para la medición de dosis puntuales en maniqués, así como para la

dosimetría in vivo por ejemplo en pacientes durante el tratamiento con radioterapia. Además, los dosímetros TL (TLD) son fáciles de transportar y se pueden enviar por correo. Esto los hace muy adecuados para la intercomparación de dosis administradas en diferentes instituciones. [4,61]

En general, los TLD reconocidos se utilizan en varios campos para aplicaciones de monitoreo de radiación. Comercialmente, muchas clases de TLD están disponibles en forma de óxido, fluoruro, sulfato como $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (TLD-900), Al_2O_3 (TLD-500), $\text{LiF}:\text{Mg,Cu,P}$ (TLD-700H), etc. Diferentes TLD convencionales se utiliza para diferentes campos de radiación en función de su idoneidad para dosimetría de radiación alta y baja. En las últimas décadas, se han investigado varios materiales de TLD, tratando de aumentar la eficacia de los materiales de TLD existentes. Por lo tanto, investigadores de todo el mundo realizan esfuerzos continuos en el desarrollo de nuevos materiales TLD. Hoy en día hay una serie de materiales disponibles que se han estado estudiando para posibles TLD, incluyen fluoruros, sulfatos, boratos, sulfuros de elementos alcalinos y alcalinotérreos, fosfatos, aluminatos, etc. Cada material tiene sus propias desventajas, por lo que debe corregirse o reemplazarse por otro material después corregir las limitaciones. [18]

El fenómeno de Termoluminiscencia se puede observar en muchos materiales, sin embargo, sólo unos pocos cumplen con los requisitos para ser utilizados en la dosimetría de las radiaciones ionizantes como materiales dosimétricos (TLD). En general, los fósforos TLD exhiben una alta concentración de trampas, son altamente eficientes, tienen un desvanecimiento insignificante, tienen una distribución de trampa simple y tienen buena resistencia contra factores ambientales perturbadores como la humedad y los gases orgánicos e inorgánicos.

En la siguiente tabla se muestran algunos resultados sobre mediciones de emisión termoluminiscente de aluminosilicatos naturales y sintéticos que han sido reportados por varios autores (Tabla IV). La mayoría de los reportes, las de curvas TL tienen valores de TM muy bajos o muy altos. Se han hecho pocos intentos de incluir un estudio dosimétrico más amplio de los materiales como aluminosilicatos naturales e

inclusive sintéticos, y casi ninguno incluye mediciones del decaimiento de la señal de TL (capacidad de almacenar la energía). Los fósforos de almacenamiento tienen la función de registrar información sobre la dosis y la distribución de la radiación, y se han utilizado para detectores de radiación. Los detectores de radiación que registran la dosis de radiación acumulada durante un cierto período de tiempo a menudo se denominan dosímetros, el almacenamiento es como elemento sensor principal. Aún es escaso el número de trabajos que se refieren al interés de la zeolita natural para fines dosimétricos y al estudio de sus propiedades termoluminiscentes usando radiación ionizante.

Tabla IV. Tipos de material y radiación, ubicación de picos de TL de aluminosilicatos sintéticos y naturales reportados por varios autores.

Autores	Material	Tipo de radiación	TM de los Picos TL (°C)	Linealidad TL	Fading
Murthy et al. (1989)	Zeolita natural (Heulandita)	β	-	No	No
Correcher et al. (2013) (2019)	Albite natural (NaAlSi ₃ O ₈) TT a 960°C. Brasil	UV β (10Gy)	330 y 440 180 y 260	No No	No No
Tiwari et al. (2016)	Sintético: CaSrAl ₂ SiO ₇ :Ce	UV	121	No	No
Sharma et al. (2018)	Sintético: CaSrAl ₂ SiO ₇ :Dy	UV	141	No	No
Dogan (2019)	Jadeite natural (NaAlSi ₂ O ₆) Turquía	β (10-900 Gy)	120, 160, 250, 307 y 430	100-700 Gy	No
Ovhal et al. (2021)	Sintético: NaAlSi ₂ O ₆ : Dy Na ₆ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ : Eu	Haz de iones O ⁶⁺	150	Si	No
Saraswathi et al. (2022)	Sintético: Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ :Dy	γ (50 Gy-5kGy)	177 y 285	100-3 kGy	No
Richhariya et al. (2022)	Sintético: Ca ₂ Al ₂ SiO ₇ :Ce Sr ₂ Al ₂ SiO ₇ : Ce	UVC	140 y 116	Si	Si (50%, 8 días)

Fuentes: [71,21,22,101,94,75,28,75,90,85,85,90,102]

3.3.1. Características de los TLDs

Se requieren varias propiedades para desarrollar un fósforo para TLD con respecto a una aplicación específica. Ha habido muchos estudios sobre fósforos que podrían usarse como dosímetros. La búsqueda de nuevos y mejores materiales TL está en pleno apogeo. El fósforo TL no debe ser tóxico para uso médico, alimentario y dosimetría ambiental, debe exhibir una buena estabilidad térmica debe ser mecánicamente fuerte, químicamente inerte y resistente a la radiación. Las propiedades principales más necesarias es la equivalencia de tejido, desvanecimiento insignificante, picos de brillo simples bien separados y linealidad del rango de dosis de μGy a MGy , reproducibilidad, además de respuesta a dosis altas o sensibilidad, facilidad de obtención. En dosimetría de radiación, los TLD son uno de los medios de caracterización más eficientes en un rango de dosis de radiación. Las propiedades anteriores no pueden ser recompensadas con un solo tipo de fósforo TL y, por lo tanto, los investigadores aún están buscando desarrollar materiales TLD de alta energía. Se están introduciendo nuevos materiales que permiten una mayor sensibilidad y linealidad en la respuesta de TL. A continuación, vamos a mencionar algunas de estas propiedades. [33,41,18,44]

Curva de emisión.

Se requiere una curva de TL simple (con un pico aislado). Si varios picos están presentes, el protocolo de calentamiento del dosímetro es complicado. La curva representa la emisión de la señal TL en función de la temperatura de calentamiento del material TL, siendo una característica del material TL. La forma y posición del pico o picos nos puede dar una idea inicial del orden de cinética y la profundidad energética de la trampa.

Así también, es importante tener una alta sensibilidad, es decir, una alta señal de la emisión TL por unidad de dosis absorbida. La alta sensibilidad es importante para su uso en dosimetría personal y médica, así como en el monitoreo de radiación ambiental. Por tanto, si dos materiales de la misma masa se irradian a la misma dosis, la que tenga la mayor respuesta TL tiene mayor sensibilidad.

Linealidad- Dependencia con la dosis

Se requiere un amplio intervalo en el que la intensidad de la luminiscencia es lineal con la dosis absorbida. La linealidad, es el término utilizado en la dosimetría de las radiaciones ionizantes para observar el efecto de la dosis en el material. En la práctica se recomienda el uso de dosímetros TL en la región donde la respuesta es proporcional a la dosis recibida (región lineal). La respuesta TL en función de la dosis no debe variar en más del 10% para dosimetría médica. En la mayoría de los materiales, el intervalo lineal es limitado por la superlinealidad y la saturación (decaimiento) de la intensidad de TL en dosis altas. El rango útil está determinado por la dependencia lineal de la dosis.

Reproducibilidad

La reproducibilidad del sistema de dosimetría (DTL) (detector + equipo lector + procesos de irradiación) se puede definir como la repetibilidad del valor número de cada evento o ciclo de lectura de análisis de un material TL después de varios ciclos de uso bajo las mismas condiciones. Es decir, que debe obtenerse siempre la misma lectura al irradiar un mismo dosímetro a la misma dosis un determinado número de veces borrando térmicamente en cada ocasión.

Desvanecimiento de la señal TL (Fading)

El fading, significa la disminución o pérdida de la respuesta TL de un material en función del tiempo después de la irradiación. La estabilidad de la señal TL es una consideración importante en la elección de un material. Bajo desvanecimiento, significa, la capacidad de almacenar información dosimétrica durante mucho tiempo. La capacidad de almacenar la energía de la radiación es importante en la dosimetría de luminiscencia y generalmente se asocia con la presencia de activadores (es decir, átomos de impurezas y defectos estructurales) que actúan como niveles de atrapamiento para los electrones libres generados por la excitación. La TL está directamente relacionada con la estructura de bandas de los sólidos y, en particular, con los efectos de las impurezas y las irregularidades de la red. [41]

3.3.2 Aplicaciones prácticas

La Dosimetría de las radiaciones ionizantes es una ciencia que se encarga de la medida de la dosis que un material o tejido absorbe al ser expuesto a las radiaciones ionizantes presentes en un campo de radiación. De acuerdo con la literatura, los materiales de TLD se pueden aplicar en diversos propósitos de aplicación, como dosimetría personal, dosimetría ambiental, aplicación médica, dosimetría espacial, aplicación forense, radiación clínica, sistemas biológicos y bioquímicos, radioterapia, monitoreo de otras radiaciones ionizantes, radiología de diagnóstico, etc. La dosimetría TL establece la relación entre la señal y la dosis absorbida. Los dispositivos TL se utilizan para varias aplicaciones de monitoreo de radiación. Además, los TLD han encontrado una aplicación cada vez mayor con los avances en el área de dosímetros termoluminiscentes sólidos y la instrumentación para leerlos. [47]. A continuación, se mencionan algunas de las áreas de aplicación donde se involucran dosis altas (> 100 Gy) [96].

a) Dosimetría ambiental

Actualmente, los investigadores se están enfocando en el desarrollo de nuevas técnicas para el monitoreo de la radiación ambiental. Actualmente, los dosímetros de estado sólido se utilizan ampliamente en las instalaciones nucleares y radiológicas para determinar las dosis de radiación externa y seguir el límite de dosis público. En esta área de la dosimetría para la medición de la radiación, existe el desafío de comparar los cambios de dosis causados por la radiación artificial con la radiación ambiental natural. En los últimos años, una nueva investigación ha creado conciencia entre las personas sobre el impacto ambiental potencial de la exposición a la radiación. También se expresa la preocupación por la radiación artificial junto con la radiación natural en el mundo.

b) Dosimetría retrospectiva

La dosimetría retrospectiva es una de las herramientas más importantes de la dosimetría emergente, la cual se utiliza sin ningún esquema de medición de dosis. La principal dosimetría retrospectiva se basa en la idea de medir la actividad inducida por neutrones. El uso de este método facilita la medición de la fluencia de neutrones local real en la vasija del reactor. En condiciones en las que no se dispone de datos de vigilancia directa de la radiación, los datos de radiación se pueden obtener a partir de técnicas computacionales utilizando materiales luminiscentes en víctimas de accidentes. La técnica TL se ha aplicado con eficacia en la medición de la dosis de radiación en varios sitios de explosión de bombas, como Hiroshima y Nagasaki (Japón), Nevada (EE. UU.), Planta de energía nuclear de Chernobyl.

c) Aplicaciones Médicas

La radiación ionizante se utiliza con fines diagnósticos y terapéuticos en la medicación. Envuelve una amplia gama de diversas radiaciones y la mayoría de las aplicaciones utilizan fotones como rayos X (radiología de diagnóstico, radioterapia) o rayos gamma (medicina nuclear, radioterapia). Las aplicaciones normales en este campo incorporan neutrones para la investigación de la composición corporal y protones o neutrones para radioterapia. Los dos objetivos principales de la dosimetría en un clima clínico son la protección radiológica regular y la confirmación de la calidad. Si bien no se pueden aplicar estimaciones de restricción para limitar la dosis a los pacientes, las contemplaciones de seguridad radiológica en realidad se aplican con respecto a la mejora de los procedimientos. Es fundamental evaluar las dosis de radiación a los pacientes en operaciones para determinar el riesgo relacionado con la exposición.

d) Dosimetría espacial

La complejidad del entorno en el espacio hace difícil cuantificar la dosis de radiación. La radiación fuera del sistema solar es causada por rayos cósmicos

galácticos de varios eventos cósmicos y protones atrapados dentro de la atmósfera terrestre, lo que dificulta medir la dosis efectiva total en astronautas en órbita terrestre baja (LEO). Además, existe el potencial de radiación de varios eventos en el sistema solar, que pueden irradiar los astronautas, aunque estos eventos son generalmente raros. En la actualidad, la tecnología y la experiencia para la determinación de la radiación en el espacio son limitadas y aún existe incertidumbre sobre los efectos potenciales y el riesgo asociado de dicha exposición. El objetivo actual de la investigación es tener tales instrumentos, que puedan medir completamente la radiación que cae sobre los astronautas. La radiación en el espacio se puede determinar con la ayuda de detectores pasivos como TLD

IV. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 Materiales

Las muestras de zeolita natural evaluadas en este trabajo provienen del municipio de Divisaderos, Sonora, en el noroeste de México. Se utilizó agua destilada a lo largo de los experimentos; para investigar sus principales características dosimétricas por termoluminiscencia.

4.2 Métodos

4.2.1 Obtención y preparación de la zeolita

La zeolita utilizada en este trabajo fue obtenida de depósitos minerales del municipio de Divisaderos, Sonora. Las muestras fueron recolectadas y llevadas al laboratorio donde se realizó el proceso de preparación y caracterización. Para preparar la zeolita, primero se seleccionaron rocas con zeolita con menor cantidad de impurezas a simple vista. Posteriormente, aquellas que visualmente tenían una superficie más limpia y con una región blanca-beige (color característico de la zeolita), son las que se

utilizaron, para finalmente realizar el raspado de la superficie en esta región de la muestra (rocas) para la obtención de la muestra de interés (Figura 18).



Figura 18. Rocas con mineral de zeolita, recolectadas del municipio de Divisaderos, Sonora. Fuente: autor

Se usaron alrededor de 10 gr de zeolita, posteriormente la zeolita natural fue pretratada mecánicamente, primero triturada en un mortero de ágata y luego utilizando un molino de bolas planetario (Fritsch modelo Pulverisette 6) bajo condiciones de molienda controladas como velocidad de rotación (y tiempo de molienda para que se conserve la cristalinidad durante el proceso de reducción de tamaño. Los materiales resultantes se transfirieron a un vaso de precipitados con agua destilada bajo agitación magnética y se calentaron a 70 °C durante 4 h para eliminar cualquier impureza soluble en agua [31,31,108]. El agua sobrenadante se separó por métodos de decantación y centrifugación, el precipitado se lavó dos veces con agua destilada y finalmente se secó en estufa a 80 °C. Este procedimiento se representa de forma esquemática en la Figura 19.

4.2.2 Tratamiento térmico de la zeolita.

Para preparar un material TL para aplicaciones dosimétricas, es necesario realizar un proceso de tratamiento térmico, generalmente llamado recocido. Este proceso se lleva a cabo en horno, calentando las muestras TL hasta una temperatura dada, manteniéndolas a esta temperatura por un tiempo determinado y luego enfriando las muestras hasta temperatura ambiente. [97].

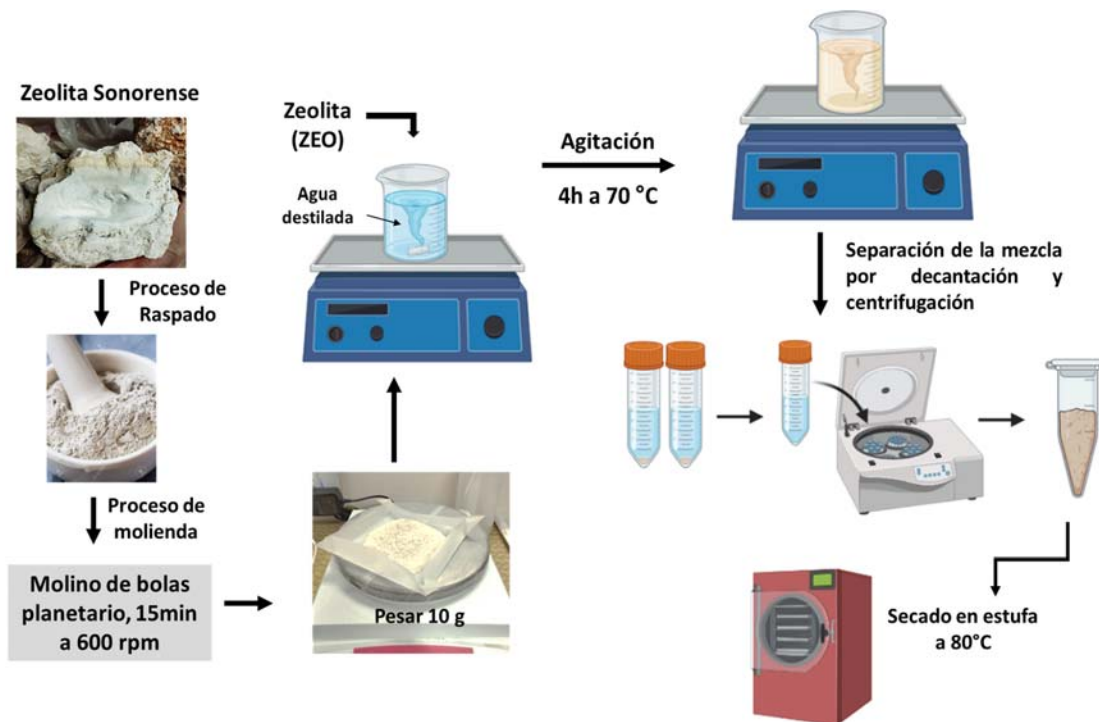


Figura 19.- Esquema de los pasos de preparación de la muestra de zeolita. Fuente: autor.

El objetivo de este tratamiento térmico es para encontrar una buena combinación de temperatura y tiempo para estabilizar los niveles de trampa y obtener la mayor reproducibilidad de la respuesta TL. La muestra de zeolita fue colocada un crisol de alúmina, dentro de una mufla marca Terlab y el material se calcinó a 400 °C en atmósfera de aire durante 24 h. Este horno tiene una un sistema de control de temperatura programable, de tal forma que podemos inferir que la velocidad de calentamiento, el tiempo y la temperatura en cada tratamiento térmico y el enfriamiento fue controlado (Figura 20). Este material se denominó ZEOTT para estudios posteriores.



Figura 20. Mufla marca Terlab, con panel de control programable. Fuente: autor.

4.2.3 Caracterización de los materiales obtenidos

4.2.3.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

En el MEB, una fuente de electrones se enfoca (en el vacío) en una sonda fina que se traza sobre la superficie de la muestra. A medida que los electrones penetran en la superficie, ocurren varias interacciones que pueden resultar en la emisión de electrones o fotones desde (o a través) de la superficie, cada punto que el haz incide en la muestra se mapea directamente en un punto correspondiente en la pantalla [109]. Esta técnica se realizó durante el experimento para observar la zeolita, debido a que tiene una gran profundidad de campo logra producir imágenes de alta resolución para observar lo que se conoce como morfología del material. La morfología y el análisis elemental cualitativo de la zeolita fue estudiada usando el MEB (JEOL JSM, 5410LV) equipado con analizador de espectroscopía de energía dispersiva (EDS) operado a 15 kV (Figura 21).

Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS).

Este espectro de rayos X consta de una serie de picos representativos del tipo y la cantidad relativa de cada elemento en la muestra. El número de conteos en cada pico

puede convertirse adicionalmente en concentración de peso elemental ya sea por comparación con estándares o por cálculos sin estándares. [109]. La energía de cada fotón de rayos X es característica de cada elemento que lo produce. El analizador del sistema de microanálisis del EDS recoge los rayos X, los analiza y grafica según su energía, los identifica automáticamente y los marca con el símbolo del elemento responsable del pico. Los datos se comparan con un estándar conocido o generado por la computadora y produce un análisis cuantitativo mostrando la composición elemental de la muestra. EDS se utiliza para evaluación e identificación de materiales, determinación de contaminantes en una muestra, control de calidad de materiales.



Figura 21. Microscopio electrónico de barrido equipado con un analizador EDS marca JEOL. Fuente: Autor

4.2.3.2 Difracción de rayos X (DRX)

El patrón de difracción se utiliza para identificar las fases cristalinas de la muestra y para medir sus propiedades estructurales, incluida la deformación (que se mide con gran precisión), el tamaño y la orientación de los cristalitas (pequeñas regiones cristalinas). DRX también puede caracterizar defectos e identificar las fases cristalinas

del material. [109]. Los patrones de DRX de las zeolitas fueron registradas en un difractómetro marca Bruker (D8 ADCANCE eco) (Figura 22) operado a 40 kV de tensión y 25 mA con radiación Cu-K α . Las mediciones de DRX se realizaron en el intervalo del ángulo de Bragg 2θ ($5^\circ \leq 2\theta \leq 70^\circ$) a temperatura ambiente.



Figura 22. Difractómetro de rayos X marca Bruker (D8 ADCANCE eco). Fuente: autor

4.2.3.3 Termoluminiscencia

El equipo de lectura es sencillo, consta de un sistema para calentar los dosímetros en forma controlada y un dispositivo para medir la luz emitida (por lo general un TFM) y transformarla en una señal fácilmente integrable. La termoluminiscencia se observa en condiciones de aumento constante de la temperatura. En los experimentos habituales de termoluminiscencia, el sistema TL se irradia a temperatura ambiente y luego se calienta a través de un rango de temperatura donde la luminiscencia es brillante, hasta un nivel de temperatura en el que todas las cargas se han excitado térmicamente fuera de sus niveles metaestables y la luminiscencia desaparece por completo. [41]. El experimento de TL fue obtenido en un lector RISØ TL/OSL modelo TL-DA-20 equipado con una fuente de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Las curvas de brillo se obtuvieron usando una razón de calentamiento lineal de 5°C/s desde la temperatura ambiente

hasta 400°C en atmósfera de N₂. La cantidad de muestra utilizada fue de 25 mg de Zeolita, en cada medición. La Figura 23 muestra el equipo RISø TL/OSL utilizado.

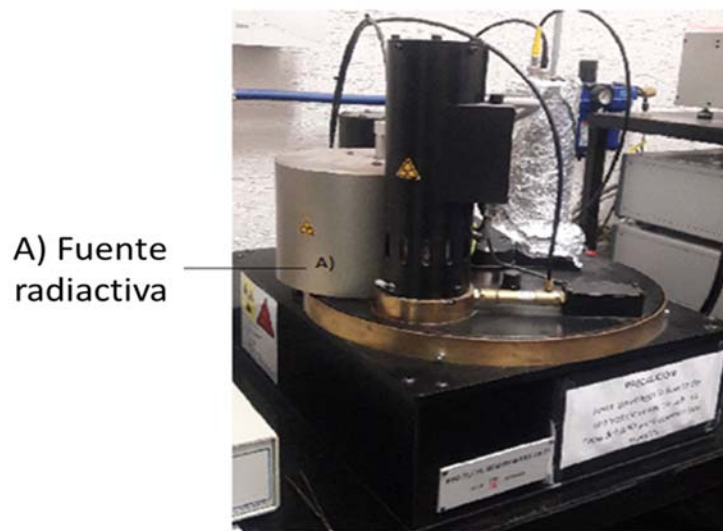


Figura 23. Lector RISø TL/OSL modelo TL-DA-20 equipado con una fuente de ⁹⁰Sr/⁹⁰Y. Fuente: autor

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Preparación de la muestra

La muestra de zeolita recolectada presentó un color blanquecino, después de la obtención de la muestra de ZEOTT preparada en las condiciones antes mencionadas, presentó un color café claro; se evaluarán sus propiedades dosimétricas por termoluminiscencia ya que se puede presumir que el material preparado es estable y con alta sensibilidad en su respuesta luminiscente.

5.2 Caracterización de los materiales obtenidos

Se llevó a cabo la caracterización de la zeolita tratada térmicamente para evaluar sus propiedades estructurales y su respuesta termoluminiscente.

5.2.1 Análisis estructural

La DRX se llevó a cabo para identificar la estructura cristalina de la muestra de ZEOTT. En la Figura 24, como puede verse, todas las reflexiones intensas coinciden con la Base de Datos Cristalográfica de la tarjeta no. 96-900-9306, que corresponde a la Chabazita-Ca con fórmula química $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ representada por las líneas verticales. Los patrones XRD de $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ [9,9,42] pertenecen a una estructura trigonal que se muestra insertada en la Figura 24 (código CIF 9009305 [32]) obtenida de la base de datos crystallographic Open Data. Además, el patrón de difracción muestra alta intensidad y picos agudos que indican la naturaleza cristalina del material [49] y no aparecen picos de difracción referidos a fases cristalinas adicionales, confirmando la formación de Zeolita pura con estructura trigonal $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Las líneas generales en los patrones XRD de las muestras preparadas coinciden con la formación de nanocrystal durante el proceso de molienda. A partir del patrón XRD, el tamaño promedio de cristal (D) de las muestras de ZEOTT se calculó de acuerdo con la ecuación de Debye-Scherrer [79]: $D = K\lambda / (\beta \cos \theta)$, donde K= constante de Scherrer, 0.89, λ = longitud de onda de rayos X, β = ancho completo a la mitad de la altura máxima (FWHM) en radianes, y θ es el ángulo de difracción en grados. El tamaño promedio de cristal obtenido fue de 42,31 nm.

5.2.2 Análisis morfológico

La morfología de la muestra ZEOTT ($\text{Ca}(\text{Si}_4\text{Al}_2)\text{O}_{12}$) se obtuvo utilizando el microscopio electrónico de barrido. Las micrografías que se muestran en la Figura 25 son imágenes MEB representativas de la muestra de ZEOTT. Como se muestra en la Figura 25(b), la muestra de chabazita tiene un cristal muy bien definido, aunque algunas partículas de tamaño micro pueden observarse en las micrografías, las partículas principales tienen tamaños menos de 100 nm con formas irregulares y no uniformes (características de la chabazita) (Figura 25a).

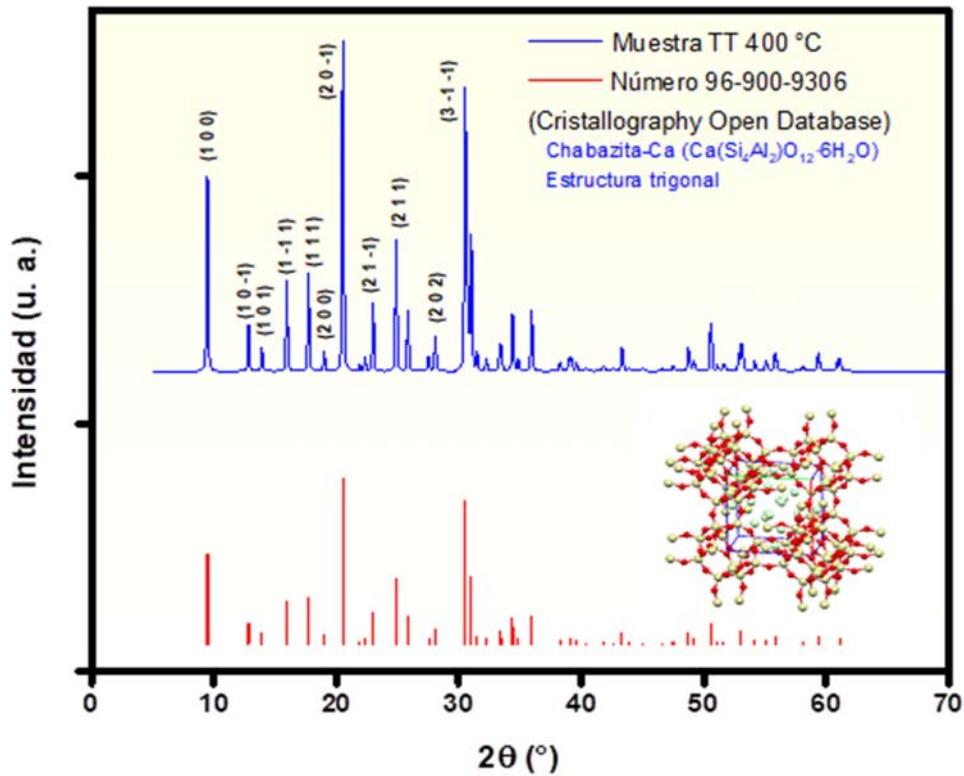


Figura 24. Patrones DRX de la muestra ZEOTT. Fuente: autor

La composición química de la muestra se determinó mediante EDS, como se muestra en la figura 25(c). Se puede observar las señales de los elementos Ca, Si, Al y O que sugieren la presencia de los elementos correspondientes en las muestras de ZEOTT, como se observó en DRX. La señal de C se atribuye a la cinta de carbón utilizada para la observación de la muestra.

5.3. Propiedades termoluminiscentes de la zeolita

Varios materiales termoluminiscentes tienen alta cristalinidad, lo cual permite obtener señales intensas de TL [89]. En base a los resultados obtenidos de la difracción de rayos X, la muestra de Zeolita fue analizada para probar el fenómeno de TL.

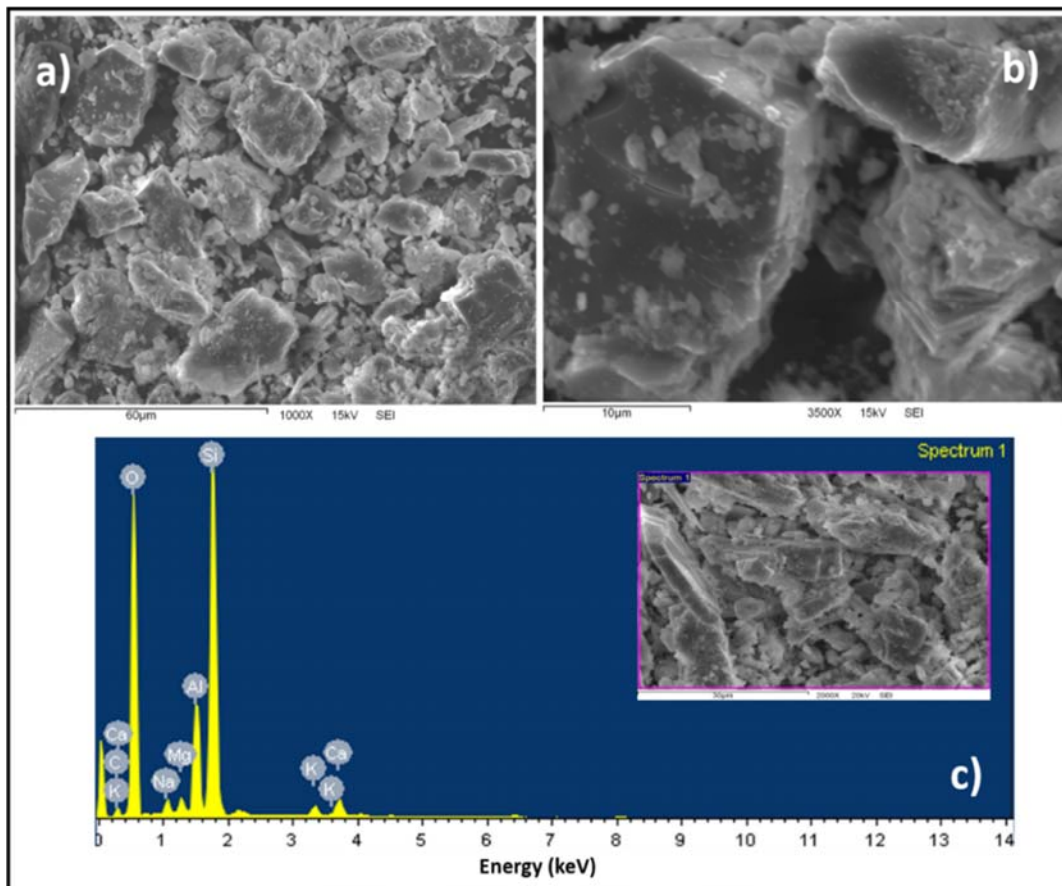


Figura 25. (a-b) Imágenes de MEB a diferentes magnificaciones y (c) Espectro EDS de la muestra de Zeolita. Fuente: autor

5.3.1 Curvas de emisión termoluminiscente

En la Figura 26 se muestra la curva de brillo TL de la muestra ZEOTT después de ser expuesta a una dosis de 690 Gy irradiada con partículas beta. En ella, podemos observar un pico máximo cerca de los 174°C y un hombro prominente a 280°C. La intensidad luminiscente y la forma de la curva de brillo están asociadas con la dosis de radiación absorbida [111]. La curva de brillo de la ZEOTT reúne todas las características para ser evaluado como un dosímetro, debido a que el máximo a 174°C no es afectado por la temperatura ambiente [1]. Por lo tanto, la zeolita puede almacenar información cuando ha sido expuesta a la radiación ionizante y por la posición máximo termoluminiscente, es posible ser evaluada para aplicaciones

dosimétricas [11,27]. Los resultados de la respuesta termoluminiscente de zeolita sintética han sido reportados por varios autores, aunque ninguno se enfoca en la dosimetría de radiación [16,16,57,57,105,111,90].

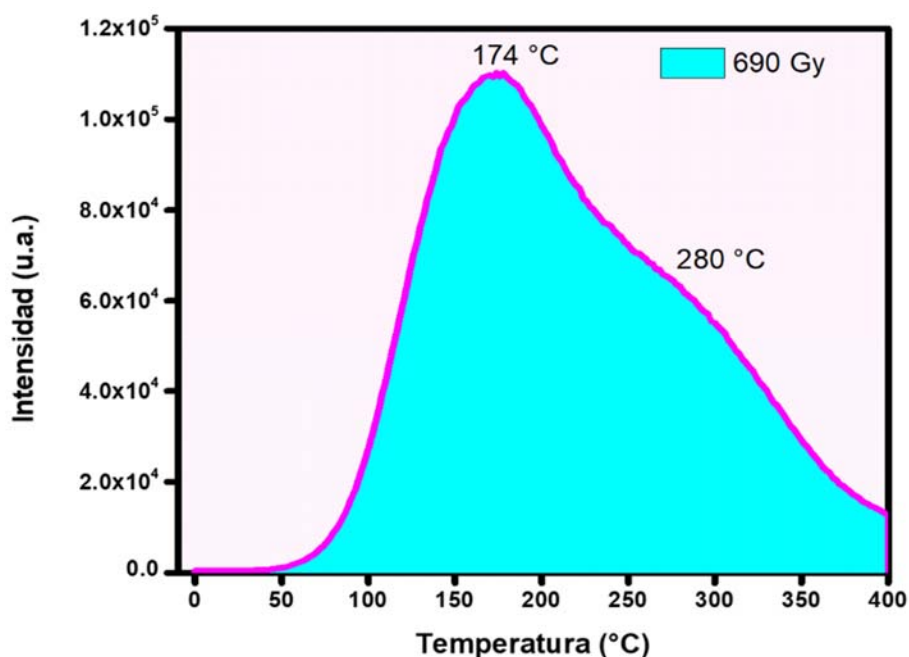


Figura 26. Curva de brillo TL de la Chabazita obtenida después de ser expuesta a 690 Gy irradiada con partículas beta. Fuente: autor

En dosimetría de radiación, la cantidad de luz emitida durante el calentamiento es proporcional a la dosis absorbida y está estrechamente relacionada con la concentración de la carga almacenada. Es útil para medir la cantidad total de luz emitida al calentar un material a una temperatura lo suficientemente alta como para vaciar todas las trampas llenas que, a partir de una observación simple, mide efectivamente la cantidad total de carga almacenada. En la Figura 27 se muestra las curvas de TL de la chabazita después de ser expuesta a diferentes dosis de radiación desde 5 Gy hasta 7017 Gy.

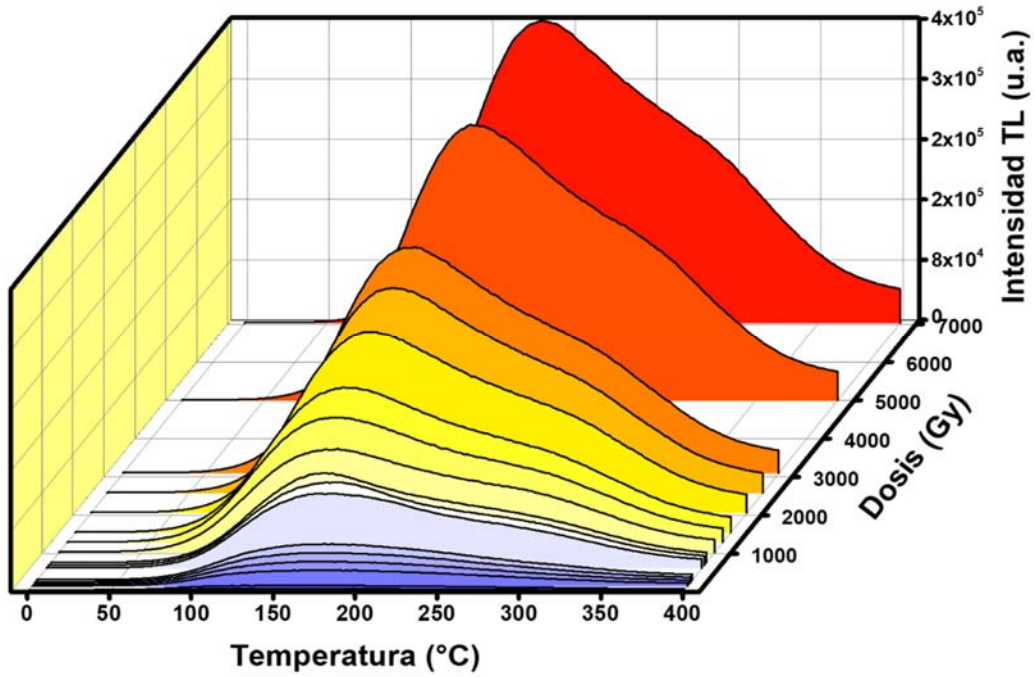


Figura 27. Curva de TL de Zeolita de Divisaderos, Sonora después de ser expuesta a irradiación de partículas beta en el rango 5 a 7017 Gy. Fuente: autor

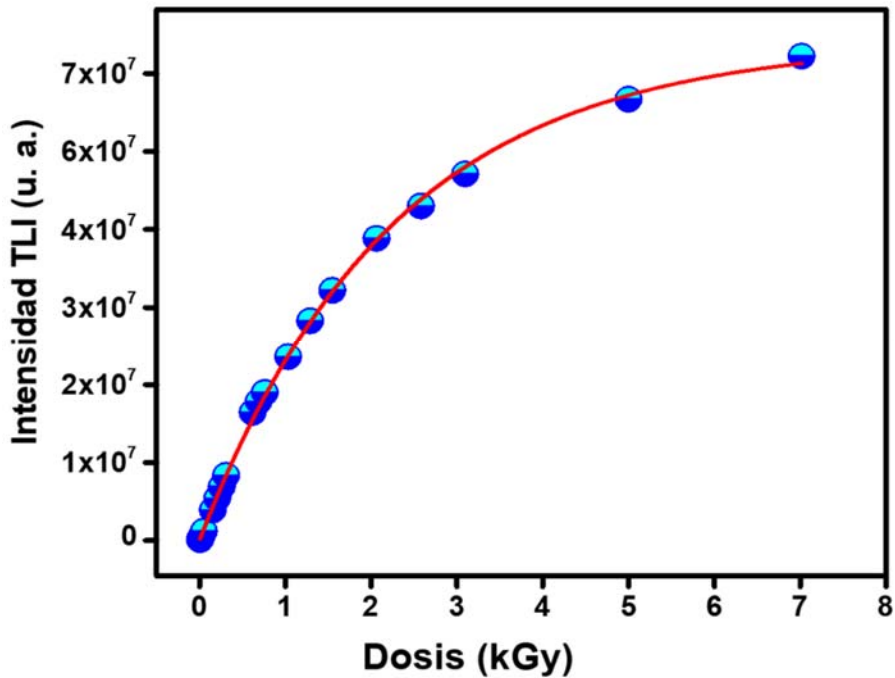


Figura 28. ITL como función de la dosis, de la muestra ZEOTT después de la irradiación con partículas beta en el rango de 5 a 7017 Gy. Fuente: autor

Como se puede observar, la intensidad de TL incrementa conforme aumenta la dosis de radiación y muestra un máximo TL a bajas dosis (hasta 300 Gy), sin embargo, cuando las dosis son altas (por encima de 600 Gy) un hombro aparece a 280°C. El máximo a 5 Gy se localiza a 118°C y cambia su posición a altas temperaturas conforme incrementa la dosis. En el rango de 25 a 690 Gy, la posición de TL permanece en 174°C, sin embargo, por encima de 690 Gy la TL máxima cambia a altas temperaturas, el cual coincide con la aparición del hombro a 280°C. Esto sugiere que están involucrados algunos estados de atrapamiento con procesos cinéticos de diferente orden. [15,59].

En la Figura 28 se muestra la intensidad de TL integrada (ITL) como función de dosis de irradiación. La intensidad de TL exhibe un comportamiento que tiende a saturación para dosis mayores a 1000 Gy. A pesar de ello, una dependencia sublineal se muestra en el rango de 5 a 690 Gy.

Para una mejor visualización de la dependencia sublineal, la Figura 29(a) muestra la curva de brillo TL de la muestra de zeolita expuesta a diferentes dosis en el rango de 5 a 690 Gy de irradiación de partículas beta, y la Figura 29(b) muestra el ITL en función de la dosis con una pendiente de 1.01(en escala log-log), que indica un comportamiento lineal. Por lo tanto, el rango de aplicación más adecuado de la muestra de ZEOTT es entre 5 hasta 690 Gy y no es necesariamente una calibración adicional al determinar una dosis de radiación.

Las aplicaciones de dosis altas con dosis superiores a 10^2 Gy incluyen reactores nucleares [68,68], industria alimentaria [34,34], tratamiento de aguas agrícolas [1], esterilización [39] e ingeniería aeroespacial [54]. La muestra de zeolita natural estudiada en este trabajo presenta propiedades prometedoras como dosimetría de alta dosis. Si bien el resultado antes mencionado indicó que a dosis superiores a 690 Gy hay evidencia de saturación; la muestra ZEOTT también podría usarse como dosímetro de radiación en el rango de 1000 a 7017 Gy a través de una calibración adicional, por ejemplo, con un ajuste exponencial. Algunos de los dosímetros disponibles en el mercado no cubren todo el rango de dosis, especialmente a altas

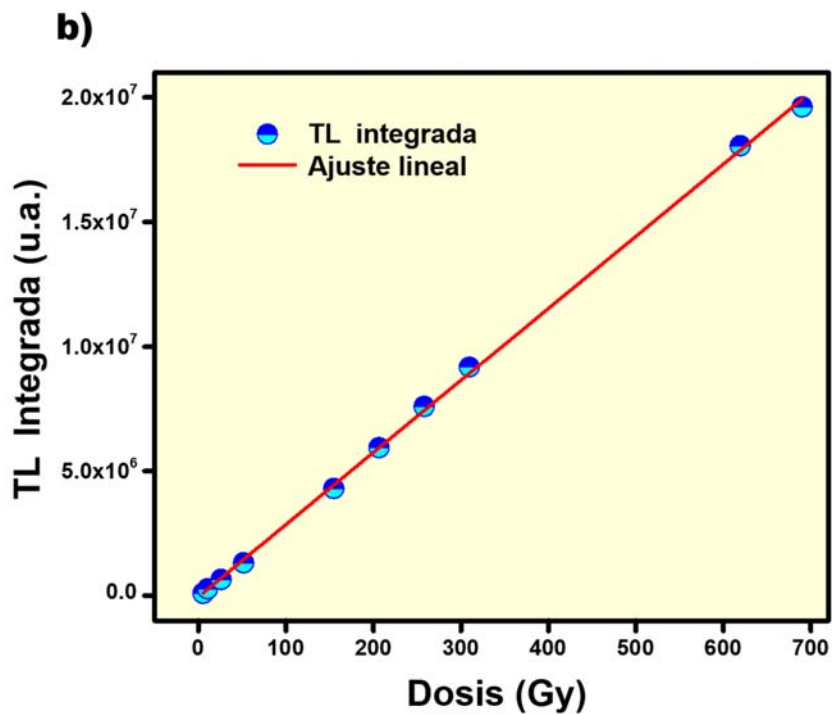
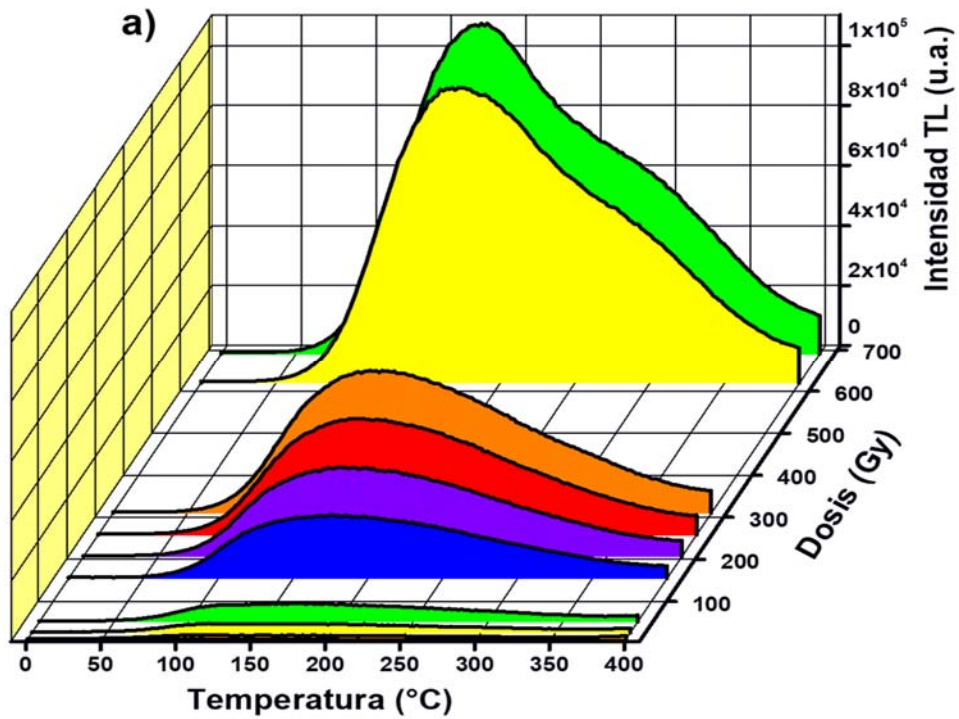


Figura 29. Curvas de emisión TL (a) y ITL como función de la dosis (b) de la muestra ZEOTT en el rango de 5 a 690 Gy, correspondiente al rango lineal. Fuente: autor

dosis de radiación, por lo que es importante buscar nuevos materiales TL [18]. Por ejemplo, el dosímetro comercial más utilizado (TLD-100) se utiliza en un rango de dosis de $10\mu\text{Gy}$ a 10 Gy [3], donde está claramente limitado a aplicaciones de alta dosis de radiación. En el mismo sentido, existen otros dosímetros comerciales como el TLD-200 ($0.1\mu\text{Gy}$ - 10 Gy) y el TLD 600 ($10\mu\text{Gy}$ - 20 Gy) que se utilizan típicamente para aplicaciones de dosimetría clínica y personal [10,10,58,73]. El $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ (TLD 400) es un dosímetro con un rango de hasta 100 Gy y se utiliza en aplicaciones de dosimetría ambiental [27,27,58]. Durante mucho tiempo, los científicos se han centrado en el desarrollo de TLDs para dosis bajas [96], pero los dosímetros que pueden cubrir aplicaciones con dosis altas también son importantes en campos tecnológicos [94].

5.3.2 Pruebas de reproducibilidad

La reproducibilidad es una característica esencial en la dosimetría termoluminiscente. La Figura 30 muestra la curva de brillo TL de la muestra ZEOTT expuesta a 300 Gy de partículas beta en 10 ciclos consecutivos de irradiación-lectura, mostrando una variación aparente. El recuadro insertado en la Figura 30 muestra el ITL normalizado a través de diez ciclos repetidos de lectura de irradiación, donde la primera y la décima lectura difieren debajo de un 2,3% y una desviación estándar (σ) de 0.006, la cual es muy similar a la inicial.

La muestra ZEOTT presenta una buena estabilidad fisicoquímica debido a que no presenta cambios durante usos repetidos de ciclos de irradiación-lectura [40,78]. Cabe destacar que no se requirió el recocido inicial pre-irradiación para asegurar esta reproducibilidad, lo que permitió no realizar el tratamiento térmico entre cada lectura de TL (como en el caso del dosímetro TLD-100) [88,88]

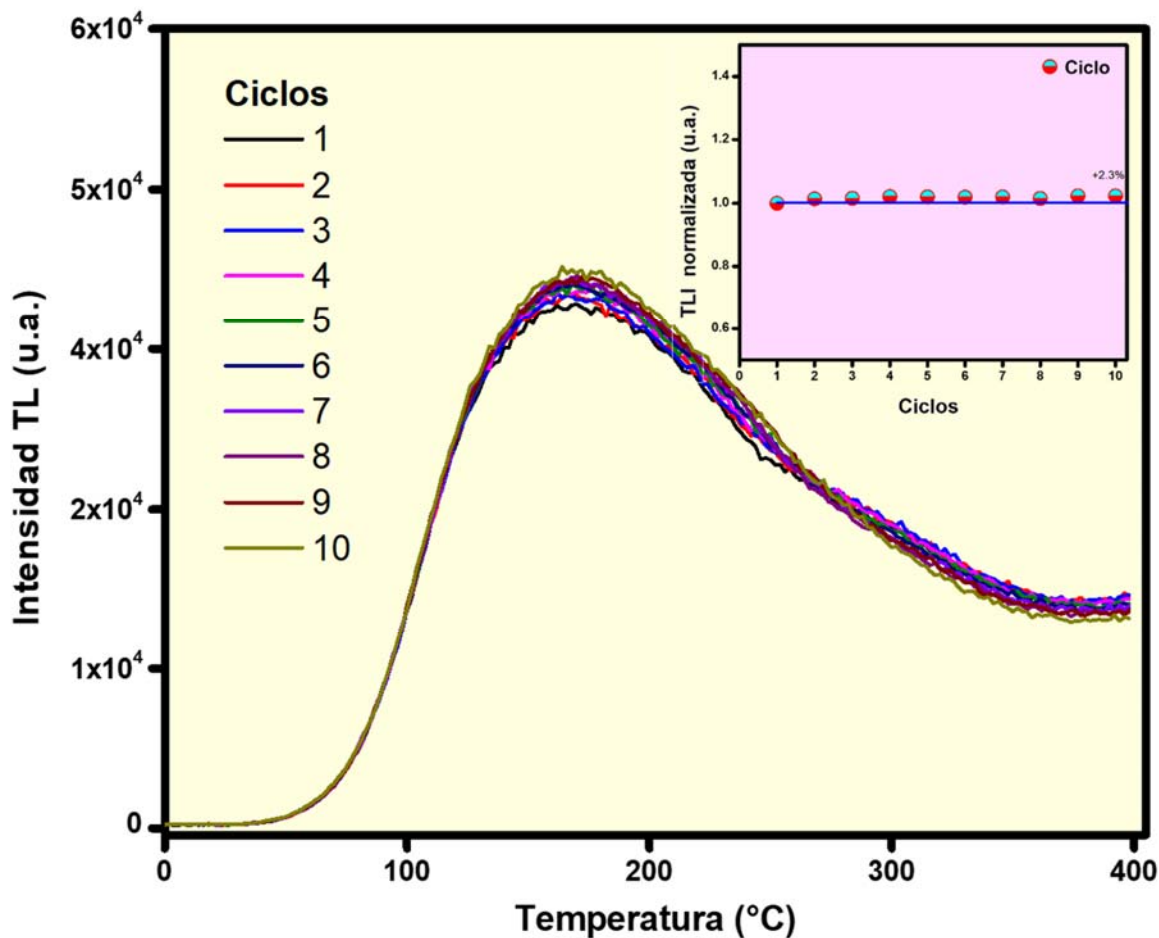


Figura 30. Curvas de emisión TL de la muestra de ZEOTT expuesta a 300 Gy de irradiación de partículas beta con diez ciclos sucesivos de irradiación-lectura. El recuadro muestra el ITL normalizado de cada curva de brillo TL. Fuente: autor

5.3.3 Curvas de desvanecimiento (Fading) TL

Una característica crítica de los materiales termoluminiscentes es la capacidad de almacenar energía desde la exposición a la radiación y mantenerla hasta la lectura. El comportamiento del desvanecimiento de la señal TL nos da información acerca de la estabilidad de la señal de TL como función del tiempo transcurrido después de la irradiación. El desvanecimiento de la TL de la muestra ZEOTT fue evaluado a una dosis de 690 Gy a diferentes tiempos de lectura (desde 1 hasta 72 horas).

La Figura 31(a) muestra la curva de brillo TL registrada a diferentes tiempos de almacenaje. El porcentaje de desvanecimiento hasta el tiempo de 1 hr fue de ~15% y después de 72 hr fue ~ 50%. La mayor parte del desvanecimiento de TL puede estar asociado con las trampas superficiales que dan lugar a la emisión de TL a temperaturas inferiores a 150 °C [48,58,89]. La Figura 31(b) muestra el porcentaje de señal de TL obtenido de la ITL de cada curva de brillo de TL de la Figura 31(a). Como se ve en la Fig. 31(b), la señal de TL después de 24-72 h tiende a un comportamiento asintótico por tiempos más prolongados. Este comportamiento se debe principalmente a la información que almacenan los estados de trampa estables [58]. Esta característica se considera adecuada para una determinación confiable de las dosis absorbidas en los dosímetros almacenados después de la irradiación. Se espera que a partir de las 24 h en adelante sea un tiempo apropiado entre la irradiación y su correspondiente lectura TL ya que, en la práctica, transcurren tiempos más largos entre la exposición del dosímetro a la radiación y la lectura de TL para determinar la dosis. Este estudio sugiere la aplicación potencial de la zeolita natural en dosimetría TL para radiación ionizante.

b)

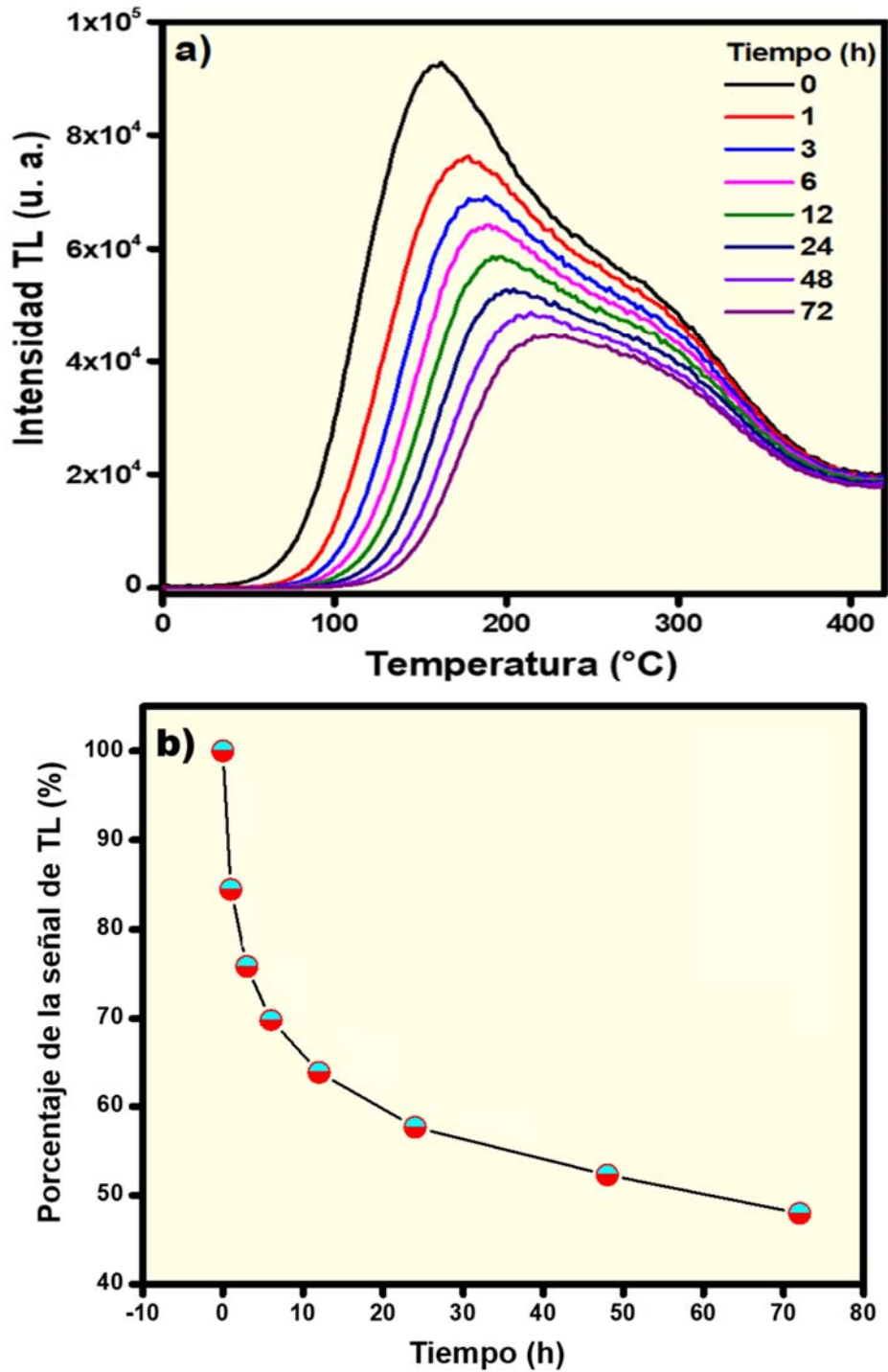


Figura 31. Curvas de fading TL de la Zeolita expuestas a 690 Gy irradiada con partículas beta obtenida después de diferentes tiempos de almacenamiento (a) y el comportamiento de la intensidad de TL entre el tiempo transcurrido (b). Fuente: autor

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En este trabajo reportamos por primera vez las propiedades termoluminiscentes de la Zeolita natural (Chabazita-Ca) obtenida del Desierto de Sonora para su aplicación como dosímetro de radiación. La DRX de la muestra ZEOTT corresponde a $\text{Ca}(\text{Si}_4\text{Al}_2)\text{O}_{12}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ que pertenece a una estructura trigonal. La composición de elementos de la muestra ZEOTT se validó a través de espectros EDX. La curva de brillo TL de ZEOTT después de ser expuesta a una dosis de 690 Gy muestra un máximo ubicado alrededor de 174 °C y un hombro a 280 °C. La muestra ZEOTT se expuso a radiación de partículas beta de 5 a 7017 Gy y mostró un comportamiento lineal en la región de 5 a 690 Gy. Se observó un desvanecimiento de la señal de TL de alrededor de ~50% después de tres días. La muestra ZEOTT presenta una buena estabilidad fisicoquímica debido a que no presenta cambios durante diez ciclos repetidos de irradiación-lectura. Además, al ser una zeolita natural, tiene las ventajas de bajo costo, alta disponibilidad y fácil manejo. A partir de los resultados, concluimos que la zeolita natural es un material fósforo TL con características atractivas para el desarrollo de detectores y dosímetros de alto rendimiento para radiación ionizante. Se debe continuar con la investigación de las propiedades termoluminiscentes de la zeolita natural, ya que representan una gran oportunidad para sus aplicaciones.

6.2 Recomendaciones

1. Llevar a cabo la determinación de los parámetros cinéticos, y a su vez poder realizar una deconvolución de las curvas de brillo TL de la zeolita.
2. El tratamiento térmico o calcinación a una temperatura adecuada es una estrategia alternativa para mejorar la estabilidad de defectos, a veces produce una variación morfológica, una transición de fase y/o una transformación estructural, de tal forma que sea posible aumentar la eficiencia luminiscente; pues es sabido que los centros

responsables por la emisión TL alcanzan su estabilidad después de diferentes tratamientos térmicos. Se recomienda investigar el efecto del tratamiento térmico sobre la estructura cristalina, y las propiedades luminiscentes de la chabazita Sonorense.

3. Realizar procesos de dopaje de la muestra de zeolita natural, usando diferentes tipos de impurezas (metales de transición y/o elementos de tierras raras), Así mismo variar su concentración en la matriz de zeolita, los cuales ayudaran aumentando la cantidad de defectos en el material y a su vez la eficiencia termoluminiscente.

VII. REFERENCIAS

1. Abdel-Razek, Y.A., 2016. Thermoluminescence dosimetry using natural calcite. *J. Taibah Univ. Sci.* 10, 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.jtusci.2015.08.002>
2. Abdel Rahman, R.O., Hung, Y.T., 2020. Application of ionizing radiation in wastewater treatment: An overview. *Water (Switzerland)* 12. <https://doi.org/10.3390/w12010019>
3. Abraheem, A. Z., Khamis, F., & Abdulla, Y. A. (2021). TL Characteristics and Dosimetric Aspects of Mg-Doped ZnO. *European Journal of Applied Physics*, 3(1), 43-47)
4. Akter, Y., Rahman, A.M., Sahadath, M.H., Yeasmin, S., Hassan, N., Banik, S., Hossain, Z., 2022. Thermoluminescence Responses of TLD–100 Subject to Low Dose Irradiation. *Dhaka Univ. J. Appl. Sci. Eng.* 6, 59–63. <https://doi.org/10.3329/dujase.v6i2.59219>
5. Alajerami, Y.S.M., Hashim, S., Ramli, A.T., Saleh, M.A., Kadni, T., 2013. Thermoluminescence characteristics of the $\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3\text{-H}_3\text{BO}_3$ glass system co-doped with CuO and MgO. *J. Lumin.* 143, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2013.04.023>
6. Alajlani, Y., Oglakci, M., Kaynar, U.H., Ayvacikli, M., Portakal-Uçar, Z.G., Topaksu, M., Can, N., 2021. Thermoluminescence study and evaluation of trapping

- parameters of samarium doped barium silicate phosphor. *J. Asian Ceram. Soc.* 9, 268–280. <https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1864898>
7. Aramburu, X.O., & Bisbal, J.J. (Eds.). (2009). *Radiaciones ionizantes. Utilización y riesgos I* (Vol. 1). Univ. Politèc. de Catalunya
 8. Araujo, S. M. M., & Torres, P. J. R. (2002). Radiaciones ionizantes y efectos sobre la materia. *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, (12), 31-39
 9. Armbruster, T., Gunter, M.E., 2001. Crystal structures of natural zeolites. *Rev. Mineral. Geochemistry* 45, 1–67. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.1>
 10. Aşlar, E., Şahiner, E., 2022. A thermoluminescence study of CaF₂:Dy under different types of irradiation sources towards environmental dosimetric applications. *J. Lumin.* 249. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119012>
 11. Azorin Nieto, J., 2016. Present status and future trends in the development of thermoluminescent materials. *Appl. Radiat. Isot.* 117, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.11.111>
 12. Bergoc, R. M., Cocca, C., Martín, G., Cricco, G., Rivera, E., Caro, R. A., & Menossi, C. 1998. Dosimetría de fuentes beta utilizadas en medicina nuclear y biomedicina. Presentado en el VI Congreso Argentino de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear. Buenos Aires, Argentina
 13. Bhatt, B.C., Kulkarni, M.S., 2014. Thermoluminescent phosphors for radiation dosimetry. *Defect Diffus. Forum* 347, 179–227. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.347.179>
 14. Bootjomchai, C., Laopaiboon, R., 2014. Thermoluminescence dosimetric properties and effective atomic numbers of window glass. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms* 323, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.01.008>
 15. Bos, A.J.J., 2017. Thermoluminescence as a research tool to investigate luminescence mechanisms. *Materials* (Basel). 10. <https://doi.org/10.3390/ma10121357>

16. Byron, H., Norrbo, I., Lastusaari, M., 2021. A zeolite-free synthesis of luminescent and photochromic hachmanites. *J. Alloys Compd.* 872, 159671. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159671>
17. Cardona, M., & Peter, Y. Y. (2005). *Fundamentals of semiconductors* (Vol. 619). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
18. Chopra, V., Dhoble, N. S., Dhoble, S. J., & Poelman, D. (2022). New challenges in radiation dosimetry and possible materials. In *Radiation Dosimetry Phosphors* (pp. 509-524). Woodhead Publishing.) (Kortov, V., 2007. *Materials for thermoluminescent dosimetry: Current status and future trends*. *Radiat. Meas.* 42, 576–581. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.067>)
19. Cochemé, J.J., Lassauvagerie, A.C., Gonzalez-Sandoval, J., Perez-Segura, E., Münch, P., 1996. Characterisation and potential economic interest of authigenic zeolites in continental sediments from NW Mexico. *Miner. Depos.* 31, 482–491. <https://doi.org/10.1007/BF00196129>
20. Cogollo P, R., Salcedo Q, J., & Gutierrez F, O. (2013). Dosimetric and thermoluminescent characteristics of sintered samples based on $\text{Li}_2\text{OAl}_2\text{O}_3\text{nSiO}_2$ systems.
21. Correcher, V., & Garcia-Guinea, J. (2013). UV-induced blue thermoluminescence of annealed Na-rich aluminosilicates. *Radiation measurements*, 56, 244-247.
22. Correcher, V., García-Guinea, J., Boronat, C., & Gómez-Ros, J. M. (2019). Radiation effect on the UV-green thermally stimulated luminescence emission of a natural Na-rich aluminosilicate. *Radiation Physics and Chemistry*, 164, 108383.
23. Costafreda Mustelier, J. L., Martín Sánchez, D. A., Costafreda Velázquez, J. L., Prado Govea, R., Iván Tobón, J., Álvarez Gutiérrez, Y., & Gajardo Cubillos, A. (2018). *Las zeolitas naturales de Iberoamérica*
24. Cruz-Vázquez, C., Bernal, R., BurrueI-Ibarra, S.E., Cota-Valenzuela, E., Brown, F., Grijalva-Monteverde, H., Castaño, V.M., 2015. Thermoluminescence of β -Irradiated ZnS–ZnO Phosphors. *J. Electron. Mater.* 44, 3477–3480. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3809-2>

25. Cruz-Vázquez, C., Bernal, R., Burruel-Ibarra, S.E., Grijalva-Monteverde, H., Barboza-Flores, M., 2005. Thermoluminescence properties of new ZnO nanophosphors exposed to beta irradiation. *Opt. Mater. (Amst)*. 27, 1235–1239. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2004.11.016>
26. Curi, A. (s. f.). *Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros*. Recuperado 14 de septiembre de 2022, de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017
27. Danilkin, M., Lust, A., Kerikmäe, M., Seeman, V., Mändar, H., Must, M., 2006. CaF₂:Mn extreme dosimeter: Effects of Mn concentration on thermoluminescence mechanisms and properties. *Radiat. Meas.* 41, 677–681. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.04.020>
28. Dogan, T., 2019. Comparison of the thermoluminescence kinetic parameters for natural alkali-rich aluminosilicates minerals. *Appl. Radiat. Isot.* <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.04.029>
29. Dusselier, M., Davis, M.E., 2018. Small-Pore Zeolites: Synthesis and Catalysis. *Chem. Rev.* 118, 5265–5329. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00738>
30. Dutta, P., & Wang, B. (2019). Zeolite-supported silver as antimicrobial agents. *Coordination Chemistry Reviews*, 383, 1-29.
31. Eberle, S., Börnick, H., Stolte, S., 2022. Granular Natural Zeolites: Cost-Effective Adsorbents for the Removal of Ammonium from Drinking Water. *Water (Switzerland)* 14. <https://doi.org/10.3390/w14060939>
32. F., Mazzi; E., G., 1983. The tetrahedral framework of chabazite. *N Jahrb Miner. Mh* 461–480.
33. Fartode, S.A., Fartode, A.P., Dhoble, S.J., 2019. A review: Thermoluminescence dosimetric application for phosphor. *AIP Conf. Proc.* 2104. <https://doi.org/10.1063/1.5100411>
34. Feliciano, C.P., 2018. High-dose irradiated food: Current progress, applications, and prospects. *Radiat. Phys. Chem.* 144, 34–36. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.11.010>

35. Flakus, F. N. (1982). Detecting and Measuring Ionizing Radiation- A Short History. IAEA bulletin, 23(4), 31-36
36. Flores-lópez, N.S., Castro-rosas, J., Ramírez-bon, R., Mendoza-córdova, A., Larios-rodríguez, E., 2012. Synthesis and properties of crystalline silver nanoparticles supported in natural zeolite chabazite 1028, 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2012.05.080>
37. Frame, P. W. (2004). A history of radiation detection instrumentation. Health physics, 87(2), 111-135
38. FRIZZERA, I. V. D. (2007). Radiaciones no ionizantes. Comisión Nacional de Telecomunicaciones, Buenos Aires
39. Fu, P.S., Wang, J.C., Lai, P.L., Liu, S.M., Chen, Y.S., Chen, W.C., Hung, C.C., 2021. Effects of gamma radiation on the sterility assurance, antibacterial ability, and biocompatibility of impregnated hydrogel macrosphere protein and drug release. Polymers (Basel). 13. <https://doi.org/10.3390/polym13060938>
40. Furetta, C., 2003. Handbook of thermoluminescence /, World Scientific.
41. Furetta, C., & Kitis, G. (2004). Models in thermoluminescence. Journal of materials science, 39(7), 2277-2294
42. Gatta, G.D., Lotti, P., 2018. Systematics, crystal structures, and occurrences of zeolites, Modified Clay and Zeolite Nanocomposite Materials: Environmental and Pharmaceutical Applications. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814617-0.00001-3>
43. Gil-Tolano, M.I., Meléndrez, R., Lancheros-Olmos, J.C., Castaneda, B., Soto-Puebla, D., Chernov, V., Pedroza-Montero, M., Barboza-Flores, M., 2014. AG, TL, and IRSL dosimetric properties in X-ray irradiated HPHT diamond crystals. Phys. Status Solidi Appl. Mater. Sci. 211, 2359–2362. <https://doi.org/10.1002/pssa.201431227>
44. González, P.R., Furetta, C., Calvo, B.E., Gaso, M.I., Cruz-Zaragoza, E., 2007. Dosimetric characterization of a new preparation of BaSO₄ activated by Eu ions. Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 260, 685–692. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.04.155>

45. Gowda, S., Krishnaveni, S., Yashoda, T., Umesh, T.K., Gowda, R., 2004. Photon mass attenuation coefficients, effective atomic numbers and electron densities of some thermoluminescent dosimetric compounds. *Pramana - J. Phys.* 63, 529–541. <https://doi.org/10.1007/BF02704481>
46. Graulis, S., Chateigner, D., Downs, R.T., Yokochi, A.F.T., Quirós, M., Lutterotti, L., Manakova, E., Butkus, J., Moeck, P., Le Bail, A., 2009. Crystallography Open Database - An open-access collection of crystal structures. *J. Appl. Crystallogr.* 42, 726–729. <https://doi.org/10.1107/S0021889809016690>
47. Gupta, K. K., Lu, C. H., & Dhoble, S. J. (2022). Low Zeff phosphors for radiation dosimetry. In *Radiation Dosimetry Phosphors* (pp. 189-210). Woodhead Publishing.
48. Hernández-Pérez, T.C., Bernal, R., Cruz-Vázquez, C., Brown, F., Mendoza-Córdova, A., Salas-Juárez, C.J., Avilés-Monreal, R., 2018. Afterglow dosimetry performance of beta particle irradiated lithium zirconate. *Appl. Radiat. Isot.* 138, 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.10.027>
49. Holder, C.F., Schaak, R.E., 2019. Tutorial on Powder X-ray Diffraction for Characterizing Nanoscale Materials. *ACS Nano* 13, 7359–7365. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b05157>
50. Holger, P., 2011. Match! - Phase Analysis using Powder Diffraction.
51. Horowitz, Y.S., 2014. Thermoluminescence dosimetry: State-of-the-art and frontiers of future research. *Radiat. Meas.* 71, 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2014.01.002>
52. Hoyos Serrano, M., & Flores Patty, L. P. (2013). Tipos de Radiación, Aplicaciones, Beneficios y Riesgos. *Revista de Actualización Clínica Investiga*, 37, 1798
53. Hugo Figueiredo, Cristina Quintelas, 2014. Tailored zeolites for the removal of metal oxyanions: Overcoming intrinsic limitations of zeolites, *Journal of Hazardous Materials* 274 287—299
54. Jemison, M., Olabisi, R., 2021. Biomaterials for human space exploration: A review of their untapped potential. *Acta Biomater.* 128, 77–99. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.04.033>

55. Kesraoui-Ouki, S., Cheeseman, C. R., & Perry, R. (1994). Natural zeolite utilisation in pollution control: A review of applications to metals' effluents. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology*, 59(2), 121-126.
56. Khamis, F., Arafah, D.E., 2021. Dead Seasalt as a thermoluminescent phosphor for beta irradiation dosimetry. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 127, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04463-3>
57. Kodama, N., Tanii, Y., Yamaga, M., 2000. Optical properties of long-lasting phosphorescent crystals Ce³⁺-doped Ca₂Al₂SiO₇ and CaYAl₃O₇. *J. Lumin.* 87, 1076–1078. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(99\)00543-8](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(99)00543-8)
58. Kortov, V., 2007. Materials for thermoluminescent dosimetry: Current status and future trends. *Radiat. Meas.* 42, 576–581. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.02.067>
59. Kulkarni, P.P., Gavhane, K.H., Bhadane, M.S., Bhoraskar, V.N., Dahiwalé, S.S., Dhole, S.D., 2020. Investigation of the photoluminescence and novel thermoluminescence dosimetric properties of NaGdF₄:Tb³⁺ phosphors. *Mater. Adv.* 1, 1113–1124. <https://doi.org/10.1039/d0ma00247j>
60. Kurudirek, M., Çelik, A., 2012. A simple method to determine effective atomic numbers of some compounds for multi-energetic photons. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.* 689, 75–78. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.06.029>
61. Kron, T. (1995). Thermoluminescence dosimetry and its applications in medicine-- Part 2: History and applications. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 18(1), 1-25.
62. La aplicación de Zeolita en la producción avícola: Revisión. (s. f.). <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/904/899>
63. Leroy, C., & Rancoita, P. G. (2011). Principles of radiation interaction in matter and detection. World Scientific.

64. Linda S. Campbell and B.E. Davies. 1997 Experimental investigation of plant uptake of caesium from soils amended with clinoptilolite and calcium carbonate. *Plant and Soil* 189: 65–74
65. Masoudian, S.K., Sadighi, S., Abbasi, A., 2013. Synthesis and characterization of high aluminum zeolite X from technical grade materials. *Bull. Chem. React. Eng. Catal.* 8, 54–60. <https://doi.org/10.9767/bcrec.8.1.4321.54-60>
66. McKeever, S. W. S., & Sholom, S. (2021). Trap level spectroscopy of disordered materials using thermoluminescence: an application to aluminosilicate glass. *Journal of Luminescence*, 234, 117950
67. Melesio, R., Ramírez, M., Ceja, E., Gómez, P., & Bueno, A. (2013). Zeolita Natural. Alternativa Ecológica y Económica para la Agricultura de temporal en México, México
68. Michael, O., Michal, M., Izabela, A., Pawel, K., Jan, D., Patrick, P., Emilie, D., 2013. Measurement of the High Gamma Radiation Dose Using the MEMS Based Dosimeter and Radiolysis Effect. 24rd Micromechanics Microsystems Eur. Work. 31–35.
69. Montes-Gutiérrez, J.A., Alcantar-Peña, J.J., de Obaldia, E., Zúñiga-Rivera, N.J., Chernov, V., Meléndrez-Amavizca, R., Barboza-Flores, M., Garcia-Gutierrez, R., Auciello, O., 2018. Afterglow, thermoluminescence and optically stimulated luminescence characterization of micro-, nano- and ultrananocrystalline diamond films grown on silicon by HFCVD. *Diam. Relat. Mater.* 85, 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.03.031>
70. Morante, F. (2005). Obtención de Zeolita Sintética Clinoptilolita en Condiciones de Laboratorio | Morante | Revista Tecnológica - ESPOL. <http://200.10.150.204/index.php/tecnologica/article/view/244/186>
71. Murthy, K. V., Joshi, T. R., & Joshi, R. V. (1989). Thermoluminescent characteristics of natural zeolites (heulandite $\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). *Bulletin of Electrochemistry*; (India), 5(9).

72. Murthy, K.V.R., 2014. Thermoluminescence and its applications: A review. Defect Diffus. Forum 347, 35–73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.347.35>
73. Necmeddin Yazici, A., Chen, R., Solak, S., Yegingil, Z., 2002. The analysis of thermoluminescent glow peaks of CaF₂:Dy (TLD-200) after β -irradiation. J. Phys. D. Appl. Phys. 35, 2526–2535. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/35/20/311>
74. Nikiforov, S. V., Menshenina, A.A., Konev, S.F., 2019. The influence of intrinsic and impurity defects on the luminescent properties of zirconia. J. Lumin. 212, 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.03.062>
75. Ovhal, D. A., Chopra, V., Dhoble, N. S., & Dhoble, S. J. (2021). Thermoluminescence study of sodium aluminosilicate phosphors. Journal of Molecular Structure, 1225, 129135.
76. Ozturk, S., Ozer, M., Bulur, E., Salamov, B.G., 2015. Plasma Generation in a Gas Discharge System with Irradiated Porous Zeolite. IEEE Trans. Plasma Sci. 43, 1839–1844. <https://doi.org/10.1109/TPS.2015.2422579>
77. Paredes Melesio, R., María Ramírez, A., Osuna Ceja, E. S., Alamilla Gómez, P., & Mandujano Bueno, A. (2013). Zeolita Natural. Alternativa ecológica y económica para la agricultura de temporal en México. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Andres_Maria-Ramirez/publication/336132417_Zeolita_Natural_Alternativa_ecologica_y_economica_para_la_agricultura_de_temporal_en_Mexico/links/5d915736458515202b748e9f/Zeolita-Natural-Alternativa-ecologica-y-economica-para-la-agricultura-de-temporal-en-Mexico.pdf
78. Pagonis, V., Kitis, G., Furetta, C., 2006. Numerical and practical exercises in thermoluminescence, Numerical and Practical Exercises in Thermoluminescence. <https://doi.org/10.1007/0-387-30090-2>
79. Patterson, A.L., 1939. The scherrer formula for X-ray particle size determination. Phys. Rev. 56, 978–982. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978>
80. Portakal-Uçar, Z.G., Akca, S., Balci-Yegen, S., Yüksel, M., Dogan, T., Souadi, G.O., Parlak, O., Topaksu, M., Can, N., 2020. Thermoluminescence of β -particle

- induced Bern-4M muscovite. *Radiat. Phys. Chem.* 174, 108974.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108974>
81. Prabir Dutta, Bo Wang, 2019, Zeolite-supported silver as antimicrobial agents, *Coordination Chemistry Reviews* 383. 1-29
82. ¿Qué es la radiación? (s.f). OIEA. <https://www.iaea.org/es/newscenter/que-es-la-radiación>
83. Rahman, R.O.A., El-Kamash, A.M., Hung, Y.T., 2022. Applications of Nano-Zeolite in Wastewater Treatment: An Overview. *Water (Switzerland)* 14. <https://doi.org/10.3390/w14020137>
84. Reeve, P. J., & Fallowfield, H. J. (2018). Natural and surfactant modified zeolites: A review of their applications for water remediation with a focus on surfactant desorption and toxicity towards microorganisms. *Journal of environmental management*, 205, 253-261
85. Richhariya, T., Brahme, N., Bisen, D. P., Badapanda, T., Tiwari, K., & Chandrawanshi, E. (2022). Analysis of thermoluminescence glow curve and evaluation of trapping parameters of cerium activated $M_2Al_2SiO_7$ (M= Ca and Sr) phosphor for TLD application. *Materials Chemistry and Physics*, 287, 126273.
86. Rivera, T., 2012. Thermoluminescence in medical dosimetry. *Appl. Radiat. Isot.* 71, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.04.018>
87. Rosell, M., Galloso, R., & Calvo, B. (2006). Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 117(4), 783-792
88. Sadeghi, M., Sina, S., Faghihi, R., 2015. Investigation of LiF, Mg and Ti (TLD-100) reproducibility. *J. Biomed. Phys. Eng.* 5, 217–222.
89. Salas-Juárez, C., Cruz-Vázquez, C., Avilés-Monreal, R., Bernal, R., 2017. Afterglow based detection and dosimetry of beta particle irradiated ZrO_2 . *Appl. Radiat. Isot.* <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.10.026>
90. Saraswathi, A. V., Prabhu, N. S., Naregundi, K., Sayyed, M. I., Murari, M. S., Almuqrin, A. H., & Kamath, S. D. (2022). Thermoluminescence investigations of

- $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7:\text{Dy}^{3+}$ phosphor for gamma dosimetry applications. *Materials Chemistry and Physics*, 281, 125872.
91. Scher, N., Bonvalot, S., Le Tourneau, C., Chajon, E., Verry, C., Thariat, J., Calugaru, V., 2020. Review of clinical applications of radiation-enhancing nanoparticles. *Biotechnol. Reports* 28, e00548. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00548>
 92. Sengar, P., Borbón-Nuñez, H.A., Salas-Juárez, C.J., Aguilar, E.M., Cruz-Vázquez, C., Bernal, R., Hirata, G.A., 2017. β -Irradiated thermoluminescence response of nanocrystalline $\text{YAGG}:\text{Pr}^{3+}$ for radiation dosimetry. *Mater. Res. Bull.* 90. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.03.001>
 93. Seniwal, B., Freitas, L.F., Mendes, B.M., Lugaõ, A.B., Katti, K. V., Fonseca, T.C.F., 2021. In silico dosimetry of low-dose rate brachytherapy using radioactive nanoparticles. *Phys. Med. Biol.* 66. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/abd671>
 94. Sharma, S., Brahme, N., Bisen, D. P., Dewangan, P., Tigga, S., Tiwari, G., & Khare, A. (2018). Study on photoluminescence and thermoluminescence properties of UV-irradiated $\text{CaSrAl}_2\text{SiO}_7:\text{Ce}^{3+}$ phosphors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 1412-1419.
 95. Shivaramu, N.J., Lakshminarasappa, B.N., Coetsee, E., Swart, H.C., 2022. Thermoluminescent materials for high-energy dosimetry, in: *Radiation Dosimetry Phosphors*. Elsevier, pp. 211–251. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85471-9.00002-6>
 96. Sinclair, S.A., Pech-Canul, M.I., 2022. Development feasibility of TLD phosphors and thermoluminescent composite materials for potential applications in dosimetry: A review. *Chem. Eng. J.* 443, 136522. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136522>
 97. Sikalidis, C. (Ed.). (2011). *Advances in ceramics: Synthesis and characterization, processing and specific applications*. BoD–Books on Demand.
 98. Sowunmi, A.R., Folayan, C.O., Anafi, F.O., Ajayi, O.A., Omisanya, N.O., Obada, D.O., Dodoo-Arhin, D., 2018. Dataset on the comparison of synthesized and commercial zeolites for potential solar adsorption refrigerating system. *Data Br.* 20, 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.07.040>

99. Sun, T., Seff, K., 1994. Silver Clusters and Chemistry in Zeolites. *Chem. Rev.* 94, 857–870. <https://doi.org/10.1021/cr00028a001>
100. Tamrakar, R.K., Bisen, D.P., Sahu, I.P., Brahme, N., 2014. UV and gamma ray induced thermoluminescence properties of cubic $Gd_2O_3:Er^{3+}$ phosphor. *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 7, 417–429. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.07.003>
101. Tiwari, G., Brahme, N., Sharma, R., Bisen, D. P., Sao, S. K., & Sahu, I. P. (2016). $Ca_2Al_2SiO_7:Ce^{3+}$ phosphors for mechanoluminescence dosimetry. *Luminescence*, 31(8), 1479-1487.
102. Tiwari, Ratnesh, Vikas Dubey, and Sanjay J. Dhoble, 2018. (eds.) Emerging synthesis techniques for luminescent materials. IGI Global
103. Tran, Y. T., Lee, J., Kumar, P., Kim, K. H., & Lee, S. S. (2019). Natural zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part B: Engineering*, 165, 354-364
104. V. Correcher, J. Garcia-Guinea, 2013, UV-induced blue thermoluminescence of annealed Na-rich aluminosilicate, *Radiation measurements*, 56, 244-247
105. Van Dijken, A., Meulenkamp, E. A., Vanmaekelbergh, D., & Meijerink, A. (2000). The kinetics of the radiative and nonradiative processes in nanocrystalline ZnO particles upon photoexcitation. *The Journal of Physical Chemistry B*, 104(8), 1715-1723
106. Vidya Saraswathi, A., Prabhu, N.S., Naregundi, K., Sayyed, M.I., Murari, M.S., Almuqrin, A.H., Kamath, S.D., 2022. Thermoluminescence investigations of $Ca_2Al_2SiO_7:Dy^{3+}$ phosphor for gamma dosimetry applications. *Mater. Chem. Phys.* 281, 125872. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125872>
107. Vizcaino Ramon, B. (1998, 5 octubre). Identificación y Caracterización de la Zeolita Natural Tipo Clinoptilolita. UANL. Recuperado 4 de octubre de 2022, de <http://eprints.uanl.mx/652/1/1020124779.PDF>
108. Wang, S., Peng, Y., 2010. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chem. Eng. J.* 156, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>

109. Watts, J. F. (1993). Encyclopedia of materials characterization: C. Richard Brundle, Charles A. Evans Jr and Shaun Wilson (Eds) Butterworth-Heinemann, Stoneham, USA, 1992, ISBN 0-7506-9168-9, 750pp.£ 75
110. Welsh, J.S., 2007. Beta decay in science and medicine. *Am. J. Clin. Oncol. Cancer Clin. Trials* 30, 437–439. <https://doi.org/10.1097/01.coc.0000258753.09234.0c>
111. Wu, H., Fei, G.T., Ma, X.L., Hu, Z.M., Gao, X.D., Wei, Y.S., Zhang, J., De Zhang, L., 2019. Eu²⁺-Activated Green-Emitting Phosphor Obtained from Eu³⁺ Ions doping Zeolite-3A in Air Surroundings and Its Efficient Green Light-Emitting Diodes. *Nanoscale Res. Lett.* 14. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3130-8>
112. Yasmin, S., Khandaker, M.U., Rozaila, Z.S., Rashid, M.A., Bradley, D.A., Sani, S.F.A., 2020. Thermoluminescence features of commercial glass and retrospective accident dosimetry. *Radiat. Phys. Chem.* 168, 108528. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108528>
113. Ye, S., Sun, J., Yi, X., Wang, Y., Zhang, Q., 2017. Interaction between the exchanged Mn²⁺ and Yb³⁺ ions confined in zeolite-Y and their luminescence behaviours. *Sci. Rep.* 7, 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep46219>
114. Yeritsyan, H., Sahakyan, A., Harutyunyan, V., Nikoghosyan, S., Hakhverdyan, E., Grigoryan, N., Hovhannisyanyan, A., Atoyan, V., Keheyanyan, Y., Rhodes, C., 2013. Radiation-modified natural zeolites for cleaning liquid nuclear waste (irradiation against radioactivity). *Sci. Rep.* 3, 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep02900>
115. Zhydachevskii, Y., Morgun, A., Dubinski, S., Yu, Y., Glowacki, M., Ubizskii, S., Chumak, V., Berkowski, M., Suchocki, A., 2016. Energy response of the TL detectors based on YAlO₃:Mn crystals. *Radiat. Meas.* 90, 262–264. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.12.001>

IX. ANEXO

Artículo publicado relacionado con la tesis de licenciatura:

“Thermoluminescence radiation dosimetry in Sonoran zeolite exposed to beta particle irradiation”

Autores: S.E. Burruel-Ibarra, Ch.J. Salas-Juarez, M.I. Gil-Tolano, **J.P. Ramos-Velazquez**, J.I. Soria-Hernandez, A.R. Garcia-Haro, J. Alvarado-Ibarra, F. Brown-Bojorquez, R. Moreno-Corral, R. Melendrez.

Revista: Radiation Physics and Chemistry

Radiation Physics and Chemistry 203 (2023) 110631



Contents lists available at ScienceDirect

Radiation Physics and Chemistry

journal homepage: www.elsevier.com/locate/radphyschem



Thermoluminescence radiation dosimetry in Sonoran zeolite exposed to beta particle irradiation

S.E. Burruel-Ibarra^{a,*,†}, Ch.J. Salas-Juarez^{b,†}, M.I. Gil-Tolano^c, J.P. Ramos-Velazquez^a, J.I. Soria-Hernandez^a, A.R. Garcia-Haro^d, J. Alvarado-Ibarra^a, F. Brown-Bojorquez^a, R. Moreno-Corral^a, R. Melendrez^c

^a Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, Mexico

^b Dirección de Lenguas Extranjeras, Posgrado e Investigación, Universidad Kino A.C, Hermosillo, Sonora, Mexico

^c Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, Mexico

^d Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, 83000, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:
Zeolite
Thermoluminescence
Beta particle irradiation
Dosimeter

ABSTRACT

In this work, we report the thermoluminescence (TL) response of a zeolite (Chabazite-Ca) from Divisadero Sonora region northwestern Mexico and its performance in dosimetry applications. X-ray diffraction, scanning electron microscopy, and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy were performed to obtain the structural, morphological, and elemental composition of the prepared zeolite samples. Zeolite samples were exposed to beta particle irradiation in the dose range from 5 to 7017 Gy. The TL glow curves of zeolite display a broad curve shape indicating the overlap of several TL glow peaks. The TL glow curve shows a maximum emission located at ~174 °C and a prominent shoulder at 200 °C. The TL signal increases as the dose increases, keeping a linear dependence from 5 to up 690 Gy. A remarkable reproducibility of integrated TL response in 10 irradiation- TL readout cycles was observed, indicating zeolite samples are reusable. The fading signal is around ~50 % in 3 days. The reported results suggest that Sonoran zeolites have potential applications as detectors and dosimeters for ionizing radiation.