

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA



T E S I S

**SINTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO DOPADAS
CON La, Ce, Pr Y Nd**

Que para obtener el grado de

QUÍMICO INDUSTRIAL

**P R E S E N T A
SERGIO LÓPEZ MARTÍNEZ**

**DIRECTOR DE TESIS
Dr. JOSÉ CONSTANTINO GONZÁLEZ CRISOSTOMO**

Tijuana, B. C.

Junio de 2019

Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

FOLIO No. 036


Tijuana, B. C., a 16 de mayo de 2019

C. Sergio López Martínez
Pasante de Químico Industrial
Presente


El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción Tesis

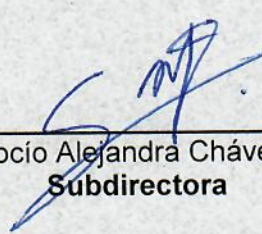
Es propuesto, por el Dr. José Constantino González Crisóstomo quien será el responsable de la calidad del trabajo que usted presente, referido al tema "Síntesis y caracterización de nanopartículas de ZnO dopadas con La, Ce, Pr y Nd.", el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

- I.- RESUMEN
- II.- INTRODUCCIÓN
- III.- PARTE EXPERIMENTAL
- IV.- DISCUSIÓN Y RESULTADOS
- V.- CONCLUSIONES
- VI.- REFERENCIAS
- VII. ANEXOS


Dr. José Constantino González Crisóstomo
Director de Tesis




Dr. José Luis González Vázquez
Director Provisional


Dra. Rocio Alejandra Chávez Santoscoy
Subdirectora

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

Se contó con apoyo financiero de la Universidad Autónoma de Baja California a través del proyecto *“materiales cerámicos Nanoestructurados con aplicaciones en las áreas de ingeniería, medio ambiente y de la salud Fase II”*.

Se llevó a cabo la investigación de *nanopartículas de óxido de zinc* dopadas con tierras raras, se seleccionaron Lantano, Cerio, Praseodimio y Neodimio por sus propiedades físicas y químicas, este proyecto de tesis tiene como finalidad utilizar los materiales cerámicos nanoestructurales obtenidos, en el área de energías renovables como energía solar fotovoltaica.

Como también agradezco infinitamente aquellas personas que colaboraron en este proyecto ya que sin ellos no hubiese podido ser realizado, al **Dr. Gerardo Cesar Díaz Trujillo**, a la **Dr. María Elena Villafuerte** y a mi tutor de tesis al **Dr. José Constantino González Crisostomo**.

Se desea hacer patente el agradecimiento a la **MC. Adriana Tejeda** por el apoyo brindado en soporte técnico en la caracterización mineralógica por medio de Difracción de Rayos X y al **Dr. Omar Novelo Peralta** por el apoyo en Microscopia Electrónica de Barrido.

Por último, agradecer al **M.C. Ethiel Zavala Flores** y a la **Dra. Verónica González Torres** por tomarse un tiempo dentro de sus actividades, para formar parte de mí comité de tesis.

ÍNDICE

	Página
Hoja de aprobación.....	ii
Agradecimientos.....	iii
Índice General.....	iv
Lista de abreviaturas y símbolos.....	vi
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas.....	ix
Resumen.....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Justificación.....	2
I.2 Hipótesis.....	3
I.3 Impactos.....	3
I.3.1 Impacto científico.....	3
I.3.2 Impacto tecnológico.....	3
I.3.3 Impacto ambiental.....	3
I.3.4 Impacto social.....	4
I.3.5 Impacto económico.....	4
I.4 Objetivos.....	5
I.4.1 Objetivo general.....	5
I.4.2 Objetivos específicos.....	5
I.5 Metas.....	5
II. GENERALIDADES.....	6
II.1 Nanotecnología.....	6
II.2 Nanomateriales.....	7
II.2.1 Tipos de nanomateriales.....	8
II.3 Óxido de zinc (ZnO).....	10
II.3.1 Propiedades del ZnO.....	12

II.3.2 Aplicaciones del ZnO.....	18
II.4 Características generales de La, Ce, Pr y Nd.....	28
II.5 Métodos de síntesis de nanopartículas de ZnO.....	29
III. EXPERIMENTAL.....	33
III.1 Disolventes.....	33
III.2 Reactivos.....	33
III.3 Metodología para la síntesis de $Zn_{(1-x)} M_{2/3x} O$ (M= La, Ce, Pr y Nd).....	33
III.4 Caracterización de las nanopartículas de $Zn_{(1-x)} M_{2/3x} O$ (M= La, Ce, Pr y Nd)	34
III.4.1 Espectroscopia de infrarrojo por transformadas de Fourier (FT-IR).....	34
III.4.2 Difracción de rayos X (XRD).....	35
III.4.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	36
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	38
IV.1 Caracterización de $Zn_{(1-x)} M_{2/3x} O$ (M= La, Ce, Pr y Nd).....	38
IV.1.1 Difracción de rayos X.....	38
IV.1.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	50
IV.1.3 Espectroscopia de infrarrojo por transformadas de Fourier (FT-IR).....	55
V. CONCLUSIONES.....	57
VI. REFERENCIAS.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

%	Porcentaje
°C	Grados centígrados
nm	nanómetros
MPa	Megapascales
GPa	Gigapascales
(s)	Sólido
(g)	gas

Símbolos griegos

~	Aproximadamente
Å	Angstrom
α	Alfa
β	Beta

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1. Escala nanométrica de los materiales.....	6
2. Nanotubos de carbono para almacenamiento por adhesión.....	8
3. Tipos de nanomateriales aplicados.....	9
4. Estructura cristalina del ZnO.....	12
5. Zinc en su forma óxido para uso en la medicina.....	19
6. Industria de pigmentos aplicada al zinc.....	19
7. Óxido de zinc en cosmetología.....	21
8. Sellador de óxido de zinc para uso dental.....	21
9. Adhesivo de óxido de zinc.....	22
10. Fertilizante foliar a base de ZnO.....	23
11. Sensor de ZnO para detectar gases como el H ₂ y CO.....	24
12. Cementos dentales de oxifosfato de zinc.....	26
13. Pigmentos anticorrosivos de zinc.....	27
14. Difracción de rayos X por un cristal.....	36
15. Componentes de la óptica del MEB convencional.....	37
16. Patrón de difracción de ZnO con La.....	39
17. Patrón de difracción de ZnO con Ce.....	42
18. Patrón de difracción de ZnO con Pr.....	44
19. Patrón de difracción de ZnO con Nd.....	47
20. Imágenes MEB del ZnO dopado con La, calcinado a 500 °C.....	50
21. Imágenes MEB del ZnO dopado con La, calcinado a 700 °C.....	51
22. Imágenes MEB del ZnO dopado con Ce, calcinado a 500 °C.....	52

23.	Imágenes MEB del ZnO dopado con Ce, calcinado a 700 °C.....	52
24.	Imágenes MEB del ZnO dopado con Pr, calcinado a 500 °C.....	53
25.	Imágenes MEB del ZnO dopado con Pr, calcinado a 700 °C.....	54
26.	Imágenes MEB del ZnO dopado con Nd, calcinado a 500 °C.....	54
27.	Imágenes MEB del ZnO dopado con Nd, calcinado a 700 °C.....	55
28.	Espectros IR por transformada de Fourier para las nanopartículas de ZnO dopadas con La, Ce, Pr y Nd, calcinadas a 500 y 700 °C.....	56

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>	<u>Página</u>
1. Producción de zinc en México 2014 al 2016.....	11
2. Reactivos.....	33
3. Principales picos del ZnO dopado con La y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	40
4. Principales picos del LaOCl y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	41
5. Principales picos del ZnO dopado con Ce y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	43
6. Principales picos del CeO ₂ sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	43
7. Principales picos del ZnO dopado con Pr y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	45
8. Principales picos del Pr ₁₂ O ₂₂ sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	46
9. Principales picos del PrOCl y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	46
10. Principales picos DRX del ZnO, en la muestra con Nd y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	48
11. Principales picos DRX del NdOCl, en la muestra con Nd y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).....	49

RESUMEN de la Tesis de Sergio López Martínez presentada como requisito parcial para la obtención del grado de QUÍMICO INDUSTRIAL, Tijuana, Baja California, México. Junio de 2019.

**SINTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO DOPADAS
CON La, Ce, Pr Y Nd**

Actualmente el cuidado del medio ambiente ha sido de interés para distintas investigaciones en uso de energías renovables, la nanotecnología siendo una de ellas es capaz de ofrecernos materiales nanoestructurados con amplias superficies de almacenamiento; el presente trabajo Síntesis y Caracterización de Nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) dopadas con La, Ce, Pr y Nd utiliza las propiedades intrínsecas del dopaje para el desarrollo de materiales conductores; utilizando el ZnO sintetizado por el método sol-gel, por sus propiedades semiconductor, térmicas, ópticas y reactividad con materiales en medio fluido como el estado sólido, teniendo aplicaciones en diferentes áreas de interés. El material obtenido fue caracterizado por espectroscopia de infrarrojo, difracción de rayos X y microscopia electrónica de barrido. Se obtuvieron nanopartículas de ZnO con tamaño medio de 36-40 nm y morfología hexagonal.

I. INTRODUCCIÓN

El ZnO ha sido ampliamente utilizado como catalizador, sensor de gas, material farmacéutico, recubrimiento antirreflejo, electrodo transparente para células solares, varistor, protector UV, entre otros. Adicionalmente, las nanopartículas de ZnO se incluyen en productos de cuidado personal tales como pasta de dientes, productos de belleza, protectores solares y textiles y asimismo por sus propiedades antisépticas, se usa para los tratamientos de la piel (Peveari, Pires, Gonçalves, & Serra, 2005). Además, el ZnO se utiliza actualmente como agente antimicrobiano en formulaciones a micro y a nanoescala. Numerosos informes indican una alta actividad para las partículas de menor tamaño que aquellas más grandes, debido a la alta relación área superficial a volumen, la cual proporciona una gran área para la interacción con las paredes de celulares de las bacterias. (Salas, Rosas, Galeas, Guerrero, & Debut, 2016).

El dopaje representa una barrera de protección de materiales como los metales frente a casos de corrosión. La baja durabilidad, y disminución del efecto anticorrosivo generan grandes pérdidas económicas en los sectores involucrados, pero si bien el proceso de corrosión es inevitable al ser un proceso natural, lo que se pretende es controlar su velocidad, a partir de compuestos a nivel nanométrico que permitan retrasar su efecto en el material. La aplicación de las nanopartículas a los recubrimientos ha sido objeto de estudios dirigidos a la producción de materiales con diferente composición química y con diferentes aplicaciones.

Las nanopartículas de ZnO pueden presentar diferentes comportamientos a causa de una mayor energía y área superficial, así como una banda prohibida, E_g , variable. Esta última propiedad permite las aplicaciones en diferentes áreas como optoelectrónica, cosméticos,

textil, catalizadores, cerámicos, películas finas, sensores de gas, aditivos de caucho, pigmentos, transistores y transductores.

En la literatura encontramos varios métodos adaptados para la preparación de nanopartículas de ZnO, como el método sol-gel, síntesis por precipitación, la síntesis química húmeda y química verde, método hidrotermal, entre otros.

I.1 Justificación

Actualmente el cuidado de medio ambiente es de particular interés, siendo esto un punto de partida para el presente trabajo, el cual analiza la búsqueda un método el cual sea factible y económico para el ahorro de energía y, al mismo tiempo, un cuidado al medio ambiente; la síntesis de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) dopado con tierras raras (La, Ce, Nd, Pr), permitirá la fabricación de paneles solares con capacidad de absorción de rayos ultravioleta. A la fecha se ha logrado encontrar, aplicar y diseñar una metodología que nos permite elaborar materiales cerámicos, así como el llevar a cabo una caracterización: Mineralógica (Difracción de rayos X) y Microestructural (Microscopía electrónica de barrido), de la forma que es posible lograr ubicar a nuestros materiales dentro del contexto de investigación científica para su posterior estimación de una aplicación tecnológica.

Dentro del proceso de elaboración, ha sido posible el poder implementar de igual forma, dicha metodología, para utilizar como materia prima toda aquella considerada convencional: nitratos y cloruros. Asimismo, el llevar a cabo una extensión en cuanto a técnicas de síntesis como sol-gel y pechini por citar un par de ellos, diversificando el tradicional aplicado en materiales cerámicos.

Actualmente se cuenta con el apoyo externo e interno de infraestructura (IIM-UNAM), por lo cual, ahora se pretende fortalecer dicha línea de investigación incrementando la aplicación de los materiales cerámicos.

I.2 Hipótesis

La obtención de nanopartículas de ZnO dopadas con tierras raras (M= La, Ce, Pr y Nd), con sistema $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$ de tamaño nanométrico, se pueden obtener mediante técnica sol-gel.

I.3 Impactos

I.3.1 Impacto científico

Generar una serie de nanopartículas de ZnO dopadas con tierras raras (M= La, Ce, Pr y Nd), con sistema $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$, que se encuentren dentro de la escala nanométrica (1-100 nm).

I.3.2 Impacto tecnológico

Promover nanopartículas de ZnO dopadas con tierras raras (M= La, Ce, Pr y Nd), con sistema $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$, para dirigir su aplicación como películas delgadas en celdas solares.

I.3.3 Impacto ambiental

El aprovechamiento de las nanopartículas de ZnO dopadas con tierras raras (M= La, Ce, Pr y Nd), de sistema $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$, para su aplicación en celdas solares, tendrá como resultado

la disminución de contaminación atmosférica, aunque durante su transporte e instalación en paneles de energía generan restos, es muy poco en comparación con los sistemas de fuente de energía convencionales.

I.3.4 Impacto social

Con el uso de nanopartículas de ZnO dopadas con tierras raras (M= La, Ce, Pr y Nd), de sistema $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$, mejorarán las condiciones de vida pues la ciudadanía ya no estará expuesta a los de residuos peligrosos y a las emisiones asociadas con el uso de combustibles fósiles para generación de energía. El uso de los sistemas de energía solar es capaz de suministrar energía a regiones en vías de desarrollo o menos accesibles las cuales pueden no tener los medios o infraestructura para utilizar energía proveniente de combustibles fósiles.

I.3.5 Impacto económico

La aplicación de nanopartículas de ZnO dopadas con tierras raras (M= La, Ce, Pr y Nd), de sistema $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$, como películas delgadas en celdas solares, traerá consigo una prosperidad socioeconómica sin precedentes en muchos países, ya que la inversión en sistemas de energía renovables produciría miles de empleos.

I.4 Objetivos

I.4.1 Objetivo general

Mediante la metodología sol-gel producir nanopartículas de $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$ (M= Ce, La, Nd, Pr), caracterizar el material obtenido por difracción de rayos x, microscopia electrónica de barrido y espectroscopia de infrarrojo.

I.4.2 Objetivos específicos

1. Utilizar la metodología sol-gel para generar nanomateriales.
2. Sintetizar nanopartículas de $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$ (M= Ce, La, Nd, Pr).
3. Evaluar la morfología de las nanopartículas sinterizadas tales como: estructura, composición, tamaño de partículas y/o cristales del material obtenido, por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM).
4. Identificar las fases cristalinas de las variantes rampas de temperatura, del material sinterizado por Difracción de Rayos X.

I.5 Metas

- ✚ Lograr materiales nanoestructurados $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$ (M= Ce, La, Nd, Pr).
- ✚ Aplicación al trabajo presentado.
- ✚ Obtener el grado de Químico Industrial.

II. GENERALIDADES

II.1 Nanotecnología

Lo nano, tanto si se refiere a la tecnología, a la ciencia o a la estatura de las personas, hace referencia a lo pequeño, según su etimología griega “nanos”, pequeño (Hernandez, 2008). Estos se pueden conformar con dimensiones que van de 1 y 100 nanómetros (Figura 1), presentando propiedades las cuales son únicas, diferenciándose de los materiales que son convencionales. Con una escala microscópica, poseen una misma propiedad en cuando a eléctricas, mecánicas, físicas y químicas; tomando en cuenta la diferencia que existe en el tamaño. Cuando se tiene una partícula la cual disminuye en gran medida su tamaño, debe ser proporcional al número de átomos que se encuentran en la superficie, frente al número total de átomos en la partícula, aumentando de una manera significativa. Por esta razón las partículas en una escala nano suele ser más duras y reactivas que las mismas partículas a una escala mayor. (Velazquez, 2009).

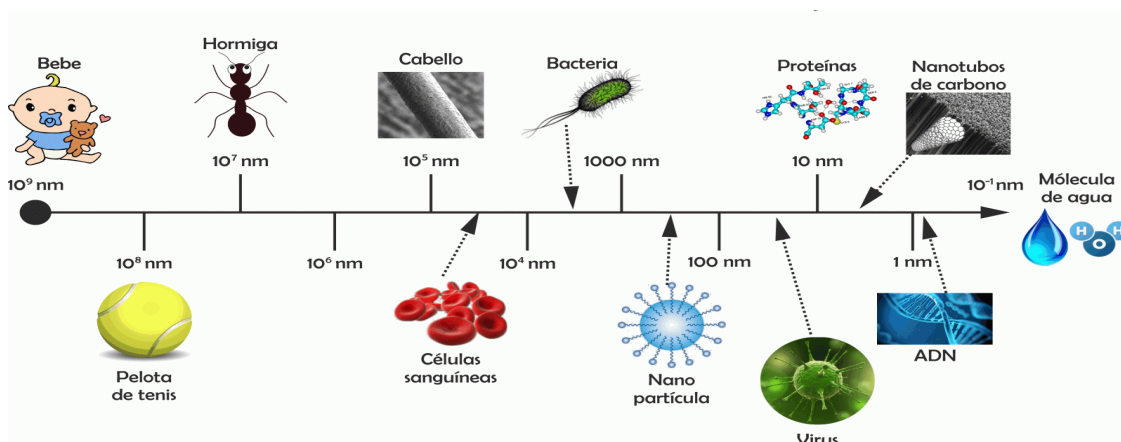


Figura 1. Escala nanométrica de los materiales.

(Fuente: <http://www.revistaconciencia.com/ver-articulo/fisica/una-mirada-al-universo-nanotecnologico>)

La nanotecnología necesita acudir a la mecánica cuántica no relativista porque su ámbito es aquél en que experimentalmente se empieza a notar la imposibilidad de conocer con exactitud, simultáneamente, la posición y el momento de las partículas. (Hernandez, 2008)

Por lo cual los paisajes de la nanotecnología son muy variados, pudiéndonos encontrar en la soledad de la superficie de una lámina de grafeno, como presenciando al paso de electrones a través de las partes nanométricas de un de un transistor de los que forman parte del procesador de nuestro teléfono móvil, o en medio de la frenética actividad del interior de una célula donde nanomaquinas efectúan tareas de manera automática, coordinándose mediante reacciones químicas. (Bermejo & Serena Domingo, 2017)

II.2 Nanomateriales

Los nanomateriales es capaz de ofrecernos superficies ampliadas, por lo cual muchísima capacidad de almacenamiento, por ejemplo, los microchips de las memorias pueden llegar a tener muchísima más capacidad de almacenamiento en su superficie, precisamente por ser mayor; el almacenamiento del hidrógeno es problemático y habrá que resolverlo bien para cuando se generalice su uso. Hoy se almacena comprimido, líquido, o adsorbido en hidruros metálicos. La adsorción (adhesión del hidrógeno a determinadas superficies) es lo que da la pista de cómo aprovechar la ampliación superficial que brinda la nanotecnología, para almacenar hidrógeno. Así, las dos formas alotrópicas del C que pueden ofrecer más superficie son los nanotubos (especie de superficies planas enrolladas sobre sí mismas, o superficies cilíndricas encapsuladas unas dentro de otras, pero siempre con estructuras atómicas hexagonales) (Figura 2), y los fullerenos (disposiciones atómicas esféricas conseguidas con

estructuras hexagonales combinadas con pentagonales, esta combinación es la que produce el curvado de la superficie). Se investiga no solo con el carbono, sino también con el boro y con moléculas órganoporosas, pero siempre en la misma línea de superficies extensas (la porosidad no es más que otra manifestación del mismo fenómeno superficial). (Hernandez, 2008)

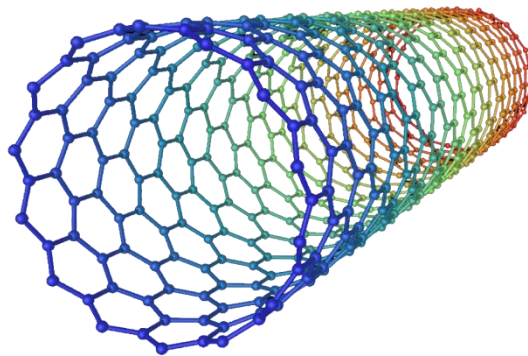


Figura 2. Nanotubos de carbono para almacenamiento por adhesión.
(Fuente:<http://meetthings.com/blog/wp-content/uploads/2015/05/Nanotubo-de-carbono.png>)

II.2.1 Tipos de nanomateriales

Los nanomateriales (Figura 3) se pueden clasificar en tres categorías:

Naturales.-Son los cuales son creados por la naturaleza, sin que exista una intervención humana. Esta incluye una muy amplia gama de materiales, los cuales contiene nanocomponentes que se encuentran en la atmosfera, un ejemplo de esto es la sal del mar que se obtiene mediante la evaporación del agua de mar pulverizada, el polvo del suelo, el polvo volcánico, los sulfatos de gases biogénicos.

Antropogénicos: son las cuales son creadas involuntariamente por el hombre, un ejemplo muy común es el hollín, el cual es una consecuencia que se tiene de la combustión de combustibles fósiles.

Manufacturados: Se diseñan y fabrican intencionalmente por el hombre, estos se sintetizan para un propósito el cual tiene que se especificó. (Bermejo & Serena Domingo, 2017)

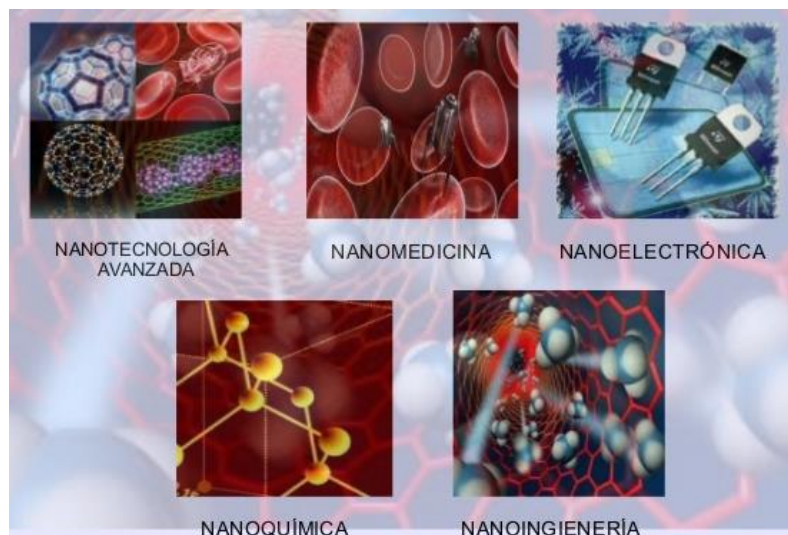


Figura 3. Tipos de nanomateriales aplicados.

(Fuente: <https://es.slideshare.net/1bachlajara/la-nanotecnologia-y-sus-aplicaciones-48669255>)

Los materiales nanoestructurados que generen materiales de altas prestaciones ha llevado a un desarrollo el cual se lleve a cabo mediante métodos químicos , los cuales pueden ser los siguientes, pirolisis por pulverización, reaccione combustión liquida, síntesis hidrotermal, atomización, método Pechini y por método sol-gel. Un método alternativo es solo químico en el cual se produce polvos nanométricos, utilizando ZnO, en donde la solución de inicio se tiene un complejo de zinc el cual descompone para la formación de polvo nanométricos de

óxido de zinc. Este método se puede dopar a continuación con otros óxidos y el producto puede ser un nanocomposite, las cuales son utilizadas como varistores con una morfología nanoestructurada la producción de polvos de óxido de zinc nanoestructurados en función del tipo de precursor, temperatura de síntesis y tiempo de goteo, para evaluar la influencia de estas condiciones sobre la estructura y morfología de los polvos obtenidos. (Savi, Rodrigues, & Bernardin, 2002)

II.3 Óxido de zinc

Yacimiento; la cinita (ZnO) esta confinada casi exclusivamente a los depósitos de zinc de Franklin New Jersey. (Klein & Cornelius S. Hurlbut, 2003). El Zinc (ver Tabla I), es el material metálico más empleado por su gran variedad de aplicaciones en diferentes sectores, el zinc se extrae en minas de profundidad el material se extrae y se tritura, mediante flotación se realiza un concentrado de 50 o 60 por ciento de contenido de zinc, el concentrado se transforma posteriormente en óxido de zinc por calentamiento. La extracción de zinc presenta un alto grado de concentración internacionalmente, ya que a seis países corresponden más del 70 por ciento de la producción mundial, la demanda de zinc ha incrementado desde 1990, en promedio 2.5 por ciento anual, y, cerca del 30 por ciento del consumo mundial del zinc se cubre mediante la recuperación de chatarra (Unidas & CFC, 2004).

Tabla 1. Producción de zinc en México 2014 al 2016.

		<u>2016</u>	<u>2015</u>	<u>2014</u>
Numero promedio de días de operación al año (*)		353	234	247
Total material minado y molido	(kt)	3,031	2,631	2,471
Zinc:				
Ley promedio de mineral de zinc	(%)	2.81	2.68	3.00
Recuperación promedio de zinc	(%)	86.93	87.88	89.73
Producción de concentrado de zinc	(kt)	140.0	115.0	124.0
Ley promedio de concentrado de zinc	(%)	52.96	53.81	53.74
Zinc en concentrado	(kt)	73.9	61.9	66.6

Leyenda: kt = miles de toneladas de zinc

(*) Promedio ponderado del número de días de operación anual en base al total de material minado y molido en las tres minas activas: Charcas, Santa Bárbara y Santa Eulalia.

(Fuente:<https://www.opportimes.com/grupo-mexico-busca-diversificar-los-clientes-produccion-zinc/>)

El óxido de zinc es insoluble en agua y etanol pero soluble en ácidos minerales diluidos y es un polvo fino, blanco o ligeramente amarillento. El ZnO es un metal de transición y un semimetal que podría reaccionar con ácidos y bases generando agua y sal, ya que este metal presenta propiedades intermedias entre los óxidos ácidos y básicos, puede comportarse como ambos. (Martinello Savi, Rodrigues, & Michael Bernardi, 2011)

Cristalografía: Hexagonal; 6mm. Los cristales son poco corrientes y terminan en uno de sus extremos por caras de una pirámide escarpada y por el otro extremo por un pedión (Figura 4). Normalmente el cristal es macizo con aspecto aplanado o granular. Composición y estructura: Zn 80.3 %, O 19.7 %, es frecuente encontrar Mn^{2+} que probablemente es el que colorea el mineral, puesto que el ZnO químicamente puro es blanco. El zinc se encuentra en empaquetamiento compacto hexagonal y cada oxígeno se encuentra dentro de un grupo tetraédrico de cuatro iones de zinc. (Klein & Cornelius S. Hurlbut, 2003)

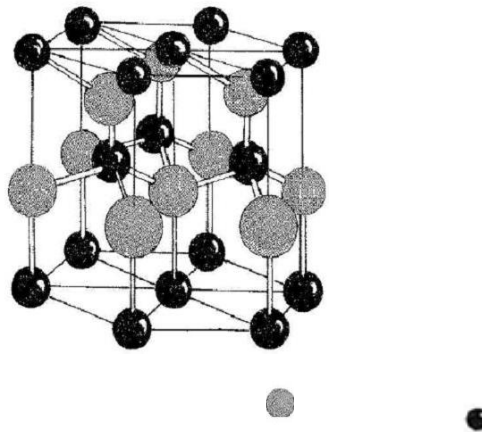


Figura 4. Estructura cristalina del ZnO.

(Fuente:http://1.bp.blogspot.com/ZTr1o3Ju8k/TfI8bDhKjDI/AAAAAAAAAAM/XUKFGv2N51c/s320/estructura-cristalina-del-zno_wurtzita.jpg)

II.3.1 Propiedades del ZnO

Es un material semiconductor que cristaliza en el sistema hexagonales relativamente barato, presentando baja toxicidad siendo muy efectivo en la protección contra los rayos UV. El ZnO es un excelente material para la fabricación de paneles solares porque absorbe los rayos ultravioleta (UV) y combate probables problemas asociados con la exposición al sol. (Martinello Savi, Rodrigues, & Michael Bernardi, 2011)

La diferencia de electronegatividades entre el zinc y el oxígeno produce un alto grado de ionicidad en su enlace, convirtiéndolo en uno de los compuestos más iónicos. Esto provoca una repulsión considerable entre sus nubes de carga, haciendo que su estructura cristalina más estable sea hexagonal tipo wurzita. En dicha estructura los átomos se encuentran suficientemente alejados para compensar dichas repulsiones. Así, cada átomo de zinc se encuentra rodeado por un tetraedro de cuatro átomos de oxígeno y viceversa. (Tena Zaera, 2004)

Propiedades térmicas

La elevada conductividad térmica, alto punto de fusión y bajo coeficiente de dilatación, fueron propiedades que permitieron su uso para ciertas aplicaciones industriales. Recientemente, aquellas propiedades relacionadas con la presión de vapor y la temperatura de disociación, han llegado a ser más importantes. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

La alta capacidad térmica de este compuesto, hace que absorba más calor y que por ejemplo en neumáticos la elevación de temperaturas debido al cambio brusco de marcha, velocidad y paradas sea mínima. El óxido de zinc, al ser sometido a tratamiento térmico, tiene que ser enriquecido en zinc puesto que el oxígeno se evapora antes que el zinc, este cambio de composición química modifica sus propiedades. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

Propiedades ópticas

El óxido de zinc es blanco a luz visible pero negro a la luz ultravioleta, proporciona mayor poder cubriente que cualquier otro pigmento blanco, esto debido a su alto índice de difracción

(2,00) y a su disponibilidad de tamaños de partículas pequeños. Como ya se mencionó anteriormente que el color de este compuesto es blanco presenta cambios pronunciados en el mismo cuando se calienta o se incorpora ciertas impurezas a sus cristales; los productores de este material han observado que se vuelve amarillo cuando se calienta a 300 C y se vuelve blanco al enfriar, estudios realizados en el tema han concluido que el color amarillo se debe al desplazamiento térmico de la banda de absorción en la región visible y no al cambio químico en la composición del óxido. Dicho desplazamiento térmico podría ser responsable del color verde azulado del ZnO a 900 o 1000 C, por sus propiedades termoluminiscentes. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

Propiedades Semiconductoras

Algunos óxidos metálicos presentan una pequeña diferencia de energía entre bandas (menor energía que los conductores) ocupadas y vacías de electrones de valencia, de tal manera que la conducción solo ocurrirá al aplicarle una energía externa que haga saltar los electrones débilmente ligado a la región del átomo, de un lugar a otro, debido a que la energía de enlace de este electrón es relativamente pequeña (0,001eV) se desliga fácilmente del átomo y se convierte en un electrón libre o de conducción, a eso se le conoce como semiconducción. (William D. Callister, 2007). Las cerámicas semiconductoras principalmente tipo óxido, puede lograr este método al dopar con determinados aditivos que las hacen semiconductoras a la corriente eléctrica, tal es el caso de ZnO, TiO₂, Al₂O₃, SiC. (Rodríguez M., Castro M., & Del Real R., 2006)

Reacciones en estado sólido

Debido a la reactividad de los polvos de óxido de zinc, pueden pensarse su utilización en un medio fluido como en estado sólido. Los Cristales de ZnO conforme se aumentan la temperatura reaccionan unos con otros, para formar partículas de mayor tamaño, con otros óxidos forman reacciones sólidas, muchas de las cuales tienen importantes aplicaciones.

Los recientes avances en el campo de las ferritas, refractarios corrosión metálica, semiconductores, óxidos metálicos sinterizados, polvos metálicos y catálisis. Han estimulado mucho los estudios como las partículas de solido se unen a temperaturas inferiores a su punto de fusión. Los fabricantes de cerámicas han utilizado este proceso durante siglos en la obtención de ladrillos y alfarería vidriada.

El óxido de zinc fosforescente convierte la luz ultravioleta, los rayos X y los rayos catódicos de la televisión en luz de varios colores.

Propiedades Electroluminiscentes

Los estudios de ZnO fosforescentes, han revelado, recientemente, un método nuevo y único de iluminación, la conversión directa de un campo eléctrico alterno, en luz fría o fluorescente. Este fenómeno consiste en la emisión constante de luz fría por un material fosforescente contenido entre dos electrodos sometidos a un voltaje alterno para ello se hicieron extensos estudios con combinaciones de óxido de zinc y sulfuro de zinc activado con cobre. Los resultados demostraron que cuando existe entre un 50 y 90 0/o de óxido de zinc en el material, se requiere una menor diferencia de potencial entre electrodos para producir luz fosforescente.

También se emplea la electroluminiscencia en el desarrollo de muchos dispositivos electrónicos, como unidades de televisión dimensional, reproducciones de fotograbado, en xerografía, y en amplificadores e intensificadores de luz. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

El ZnO no solo convierte la radiación de pequeña longitud de onda en luz visible, sino también realiza un fenómeno poco frecuente entre los materiales inorgánicos al convertir la radiación del espectro infrarrojo en luz visible.

Propiedades Catalíticas

Los óxidos metálicos experimentan procesos de desactivación al agua (hidrófobicos), y con diferentes orientaciones cristalinas presentan diferentes reacciones en el proceso de catálisis. (Morales Vargas). Las características electrónicas y las características superficiales del óxido de zinc se combinan para acelerar la velocidad de muchas reacciones químicas especialmente de aquellas de reformado de hidrocarburos, tal como la deshidrogenación de hidrocarburos alifáticos y su conversión de productos aromáticos no saturados o bien la hidrogenación de hidrocarburos no saturados, propiedad que usa la industria prolifera para la obtención de gasolinas de alto índice de octano.

Propiedades Fotoconductoras

Recientemente existe en el comercio máquinas de fotocopia y papel fotográfico basados en las propiedades fotoconductoras del ZnO. Young y Grieg de la Radio Corp. of America dieron a conocer recientemente un nuevo proceso revolucionario de fotografía que no utiliza plata. Conocido como "Electrofax" emplea una combinación de las propiedades

fotoconductoras y electroestáticas del ZnO. En el desarrollo de este proceso, descubrieron el fenómeno electrostático de este pigmento y el modo de cómo poder usarlo en conjunto con las propiedades fotoconductoras del óxido de zinc para producir una imagen fotográfica. Las propiedades electroestáticas del óxido de zinc se hicieron evidentes cuando los pigmentos se dispersaban en un aglomerante de resina. Tal dispersión puede considerarse como una pintura fotográfica. Este proceso revolucionario de fotografía emplea papel de imprimir convencional revestido con la pintura de óxido de zinc. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

Recientes investigaciones revelan que el óxido de zinc transforma los rayos de sol en energía química, de manera similar a la acción de la clorofila. Es la única materia inorgánica conocida que puede actuar de esta manera. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

Propiedades Químicas

El ZnO es un compuesto anfótero y soluble tanto en ácidos como en bases fuertes como en sales de amonio, debido a su alta reactividad forma gran número de derivados orgánicos e inorgánicos. Debido a su naturaleza químicamente neutro tiende a neutralizar algunos productos provenientes de la descomposición de ácidos, de este modo tiende a estabilizar la composición del medio durante el almacenaje. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

El óxido de zinc también reacciona para formar otros compuestos que mejoran la calidad del producto como es el caso de la vulcanización del caucho. Las propiedades químicas del ZnO podemos estudiarlas de una forma sistemática en función de las características de los diferentes reactivos utilizados: gases, ácidos orgánicos e inorgánicos, álcalis y sólidos reactivos.

El ZnO es fácilmente soluble en ácidos inorgánicos acuosos y también reacciona con ellos para formar sales neutras, tal como cloruro de zinc ($ZnCl_2$) o para producir compuestos complejos en que la proporción de ZnO al ácido es, generalmente, mayor o inferior al encontrado en las sales neutras. Entre éstas, el cloruro de zinc se usa, por ejemplo, en la manufactura de fibra vulcanizada. El sulfato de zinc otra sal neutra, fácilmente producida a partir del óxido de zinc, se emplea en la manufactura de seda artificial, ya que al reaccionar con la fibra de celulosa, aumenta sus propiedades físicas. Con el ácido fosfórico el óxido de zinc forma varios complejos. Las disoluciones para tratar superficies de chapa de acero, para automóviles y refrigeradores, antes de la pintura, están constituidos por complejos de fosfato de zinc. Estos reaccionan con el acero para formar un fosfato de hierro zinc, fuertemente adherente que proporciona una excelente base anticorrosiva para revestimientos orgánicos. El óxido de zinc forma también complejos con ácido crómico y sus sales siendo dos de los más importantes, el amarillo de zinc y el tetroxicromato de zinc. Desde el comienzo de la Segunda Guerra Mundial han aumentado mucho su uso tanto en pinturas, como en pigmentos inhibidores de la corrosión. Una nueva composición, conocida como (Navy WP-1), pintura imprimidora, se basa en un complejo de zinc producido por reacción del ácido fosfórico con tetroxicromato de zinc, en una matriz vinílica. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992).

II.3.1 Aplicaciones del ZnO

Medicina: Protección y alivio temporal de afecciones irritativas leves de la piel, como: escoceduras, irritaciones y erosiones superficiales de la piel provocadas por: quemaduras leves o superficiales, eritema solar, intertrigo.



Figura 5. Zinc en su forma óxido para uso en la medicina.

(Fuente: <https://cdn.hsnstore.com/blog/wp-content/uploads/2016/09/zinc-aumenta-testosterona.jpg>)

Pigmentos: La industria de la pintura, que sigue en importancia a la del caucho en el consumo anual de óxido de zinc, utiliza diferentes propiedades de este pigmento. El óxido de zinc tiene una elevada efectividad en el efecto barrera, sin embargo es importante verificar la estabilidad de la pintura en el envase ya que tiene elevada reactividad. (Calvo Carbonell, 2009).



Figura 6. Industria de pigmentos aplicada al zinc.

(Fuente: <https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/noSearchResult?Ntt=1654918>)

Actualmente, las pinturas de exteriores de casas llevan más óxido de zinc que cualquier otro pigmento blanco importante. Las investigaciones de Werthan de New Jersey Zinc Co., han establecido las siguientes propiedades de este compuesto, en tales revestimientos: Posee propiedades de autolimpieza. Cuando la película de pintura se seca al aire, una pequeña

cantidad de óxido de zinc reacciona con alguno de los productos de oxidación del aceite, para formar sales de zinc solubles en agua, que poseen una acción detergente, conservando limpia la película; Controla la desintegración en polvo y la erosión. Este pigmento reacciona con los ácidos grasos de los aceites para formar jabones de zinc insolubles, que aumentan la aglomeración y la resistencia de la película más que otros pigmentos; Las pinturas de óxido de zinc son resistentes al moho. El aceite de linaza y otros aceites vegetales empleados en pinturas, ofrecen un medio adecuado para la proliferación del moho, produciéndose manchas negras a menos que la pintura sea resistente a su desarrollo. Las pinturas con 30% de ZnO son muy resistentes al moho, no obstante, en lugares donde el moho abunda, como en regiones húmedas, las pinturas deben contener hasta 50 % de óxido de zinc. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992), (Casado, 2009)

El óxido de zinc adecuado se fabrica mediante evaporación de zinc metálico y oxidación de vapor de zinc con aire caliente. El humo o blanco de zinc se precipita en cámaras y se separa ahí en tres fracciones en función del tamaño de partículas; el grupo con mayor grado de fineza y de blanco se denomina sello blanco, siguiendo en grado de fineza decreciente el sello verde y el sello rojo, este último es barato es adecuado para la disolución de los colores. El blanco de zinc es muy apropiado para las técnicas al óleo del temple y de la acuarela. (Doerner, 2005)

Cosmetología: Se emplea en polvos faciales para atenuar su poder cubriente; además de ser astringente y antiséptico leve tiene propiedades suavizantes debido a esta propiedad se ha utilizado en terapias de irritaciones cutáneas leves. Debido a que el tamaño de partícula es considerablemente reducida permite extender las sustancias en capas más finas y así

proporcionar una cobertura física incrementada; en general. La reducción del tamaño de partícula se acompaña de un aumento de dispersión de luz, así se incrementa la opacidad del polvo y, por lo tanto, el poder cubriente óptico. (Wilkinson & Moore, 1990)



Figura 7. Óxido de zinc en cosmetología.

(Fuente: http://www.granvelada.com/15452-large_default/oxido-de-zinc-grado-cosmetico.jpg)

Odontología: Es utilizado para la inactivación de caries múltiples por su acción antibacteriana y debido a su baja solubilidad y contracción produce un sellado provisorio de la cavidad dental. (Barrancos Mooney & J.Barrancos, 2006)



Figura 8. Sellador de óxido de zinc para uso dental.

(Fuente: <https://ofertasdentales.com/operatoria-dental/52-oxido-de-zinc-con-endurecedor.html>)

Abrasivos: El ZnO se utiliza ampliamente como relleno activo del caucho y para mejorar la resistencia a la intemperie de las poliolefinas y poliésteres. (B. Sermour & Charles E. Carraher, 1995). Cuando en las soluciones de silicatos sódicos, que se utilizan como reactivo aglomerante en láminas y ruedas abrasivas vitrificadas se incorpora óxido de zinc para formar un silicato complejo, se produce un cemento duro y resistente al agua. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

Adhesivos: El óxido de zinc se emplea en gran variedad de adhesivos para mejorar la resistencia al agua y al envejecimiento. Las cintas quirúrgicas e industriales de caucho natural o sintético, pueden llevar hasta 30% de óxido de zinc, puesto que se ha demostrado que es el medio más eficaz de conservar sus propiedades adhesivas durante el almacenamiento. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992). El objetivo del óxido de zinc es servir como capa protectora que evite que la cinta absorba humedad y origine deterioros en los elementos estructurales que recubre. (Institute, 1958).



Figura 9. Adhesivo de óxido de zinc.

(Fuente: https://es.made-in-china.com/co_davidnjmedicom/product_Bandage-Plaster-Cotton-Zinc-Oxide-Adhesive-Plaster_eigenyhoy.html)

Agricultura: Un avance importante en los estudios sobre la nutrición de la planta, ha sido confirmar que ciertos elementos químicos en muy pequeña cantidad (oligoelementos), favorecen el crecimiento y la productividad de aquéllas. Debido a la falta de zinc asimilable las plantas pueden sufrir gran número de enfermedades tales como hojas cortas de los manzanos, hojas moteadas de los limones, amarillas en el nogal y brotes Blancos en el maíz. El zinc es esencial para el desarrollo armónico de toda célula viva. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992). Las nanopartículas metálicas de óxido de zinc, cobre y fierro ya sean puras o mezcladas con plata, están siendo estudiadas por su potencial agrícola como promotores de crecimiento, fertilizantes y antimicrobiales. (Mendez-Arguello, 2007). El desarrollo reciente es aplicarle una pequeña cantidad de ZnO a ciertos fertilizantes comerciales.



Figura 10. Fertilizante foliar a base de ZnO.
(Fuente: <http://www.cosmoagro.com/site/blog/cosmo-foliar-18-28-8/>)

Aislamiento eléctrico: Hay ciertos números de cerámicas que son semiconductoras, la mayoría de ellas son metales de transición que son semiconductores de tipo óxido de zinc, esta es empleada como sensor de gas, cuando varios gases son pasados a través de una cerámica policristalina, su resistencia eléctrica cambia, ajustando las posibles mezclas de gas, se pueden construir sensores de gas sin demasiao. (Velez Moreno, 2008)



Figura 11. Sensor de ZnO para detectar gases como el H₂ y CO.
(Fuente: http://saberesyciencias.com.mx/wp-content/uploads/2013/09/6_n19.jpg)

Asfalto: Normalmente el asfalto aplicado directamente al hierro galvanizado, zinc u otras superficies, forma una unión deficiente con tales metales, quedando sin protección en un pequeño período de tiempo a causa de que esas superficies están sometidas a un ataque corrosivo por los ácidos contenidos en los asfaltos. Estos ácidos pueden neutralizarse por reacción del óxido de zinc con aquéllos, a elevadas temperaturas, en presencia de aire o vapor. Los asfaltos, así tratados, no son corrosivos y proporcionan una adherencia prolongada a las superficies galvanizadas. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

Agentes blanqueadores: En el blanqueo de cera para pisos con peróxido de hidrógeno, el óxido de zinc ha demostrado ser un catalizador efectivo de la reacción. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992).

Catalizador: Un catalizador sólido está constituido por componente o fase activa, el soporte y un promotor o promotores; el componente activo es el responsable de acelerar la reacción

principal el ZnO se utiliza como catalizador en reacción redox para materiales tipo óxidos de metales de transición, sulfuros de metales de transición; en reacciones de hidrogenación, hidrogenolisis, oxigenación. (Izquierdo J. F., Cunil, Tejero, Iborra, & Fite, 2004)

Caucho: Los artículos de látex están muy presentes en nuestras vidas, ya que el latex es un material muy idóneo para fabricar diferentes productos, en casi prácticamente todos los artículos fabricados a partir de látex de caucho natural, se utilizan en combinación de otros compuestos, como el óxido de zinc, para retículas las cadenas de polímero que forman las partículas de caucho de las que se compone el látex. (Gimenez, Cabedo, & Larragon, 2008). De los miles de artículos de caucho, desde gorros de baño, hasta cables trasatlánticos, la mayoría de ellos contienen ZnO, no sólo como elemento activador de la vulcanización sino con el fin de mejorar otras propiedades especiales. Dado el desarrollo de la industria del caucho, con el importante crecimiento operado en la industria del automóvil, no es sorprendente que este producto ejerza una notable influencia sobre el mercado del ZnO. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992)

Cemento-Asbesto: El revestimiento vitrificado que mejora la apariencia y duración de estos materiales de construcción, es un silicato insoluble, formado por la reacción de óxido de zinc con una solución de silicato sódico. El asbesto se usa en muchos productos por su alta resistencia a la tensión, flexibilidad y resistencia a las sustancias químicas y a la descomposición térmica. El asbesto se usa en aislamiento, materiales a prueba de fuego, frenos para automóviles, cemento y materiales para tablas de pared para construcción,

materiales para pisos y para techos. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992), (Foundation & Project, 1972).

Cementos dentales: Durante muchas décadas los dentistas han hecho empastes con la pasta resultante de reaccionar el óxido de zinc, con ácidos orgánicos. El primer cemento dental fue el oxicloruro de zinc, obtenido a partir de óxido de zinc y ácido clorhídrico. Después de muchos años, el ácido clorhídrico fue sustituido por ácido fosfórico, para formar oxifosfato de zinc (Figura 11) que todavía está en uso. (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992). Un descubrimiento más reciente en este campo es la utilización de un ácido orgánico con óxido de zinc: el (Eugenol), del grupo del ácido carbólico (fenol) que reacciona con el ZnO para producir no sólo cementos dentales, sino también como paliativo y agente antibacterial para el tratamiento de caries dentales. A este cemento se lo utiliza en operatorio dental como sellador de conductos y restauraciones temporales. (Anusavice, 2004)



Figura 12. Cementos dentales de oxifosfato de zinc.

(Fuente: <http://almacendentaljorgehorta.com/odontologia/72-CEMENTO-OXIFOSFATO-DE-ZINC-LEE-SMITH.html>)

Cerámica: Uno de los mayores mercados para el óxido de zinc, es la industria cerámica a la que proporciona muchas propiedades convenientes a la gran variedad de artículos que fabrican, tales como vidrio, vidriados y esmaltes. (Martin Reyes, 2004). (Verdeja, Coque, & Nosti, 1992). En los vidrios, disminuye el tiempo de fusión y la temperatura de reblandecimiento, rebaja la viscosidad, eleva la resistencia química y el índice de refracción proporcionando elasticidad y bajo coeficiente de dilatación. Estas dos últimas propiedades son de particular importancia al reducir las causas de rotura procedentes de los choques mecánicos y de cambios de temperatura. En los vitrificantes, el óxido de zinc contribuye a aumentar el poder escorificante reduce la dilatación evita las grietas produciendo además brillo y blancura posee un efecto favorable sobre la elasticidad y endurecimiento permitiendo acabados perfectos. (Laboulaye, 2004). Otra aplicación del óxido de zinc en la industria cerámica son los esmaltes: Esmaltes de porcelana para hierro laminado o esmaltes vítreos para hielo colado y cuerpos cerámicos. Continuamente se están desarrollando nuevas aplicaciones de los esmaltes para aisladores y equipo eléctrico (Figura 13), donde el óxido de zinc proporciona una resistencia eléctrica alta, una gran tenacidad mecánica y una notable resistencia a los cambios de temperatura. (Lopez & Caivano, 2004)



Figura 13. Pigmentos anticorrosivos de zinc.

(Fuente: <https://www.dispivalonline.es/es/brillantes/2170-esmalte-antioxidante-liso-brillante-750-ml.html>)

II.4 Características generales del La, Ce, Pr y Nd

Lantano

Metal blanco plateado, suave, maleable, dúctil y muy reactivo; se oxida al ser expuesto al aire y adquiere un tono gris más oscuro. Reacciona directamente con los halógenos y con carbono, nitrógeno, boro, selenio, sílice, azufre y fósforo. Se obtiene de menas como los ortofosfatos, en los cuales aparece mezclado con otros minerales, incluidos algunos radiactivos, por lo que su manejo debe hacerse con muchas precauciones. Es muy usado en la iluminación para la industria cinematográfica, para la fotografía de estudio y en los proyectores. El isótopo ^{203}La es especialmente útil en la fabricación de cristales ópticos con cualidades especiales. En aleación con el hidrógeno, absorbe hasta 400 veces su volumen de gas, que retiene calor y así es parte de los sistemas de conservación de energía en la industria. (Sordo Ruiz, 2012)

Cerio

A 25°C es un metal de color gris hierro con un ligero lustre. Se oxida rápidamente al contacto con el aire y se descompone al contacto con el agua, con más rapidez mientras más elevada sea la temperatura del líquido. Es muy reactivo y por ello difícil de encontrar en su estado metálico; para obtenerlo, se emplea una reducción con calcio del fluoruro de cerio. Se emplea en aleaciones con fósforo para hacer encendedores. El cerio en su forma oxidada se utiliza como catalizador para los hornos domésticos que se limpian por sí solos. Se usa en la manufactura del vidrio en calidad de componente, de decolorante y de pilidor. También se usa como catalizador en la refinación del petróleo y tiene aplicaciones en la industria nuclear.

Praseodimio

Es un metal de color gris lustroso, maleable, dúctil y suave. En contacto con el aire reacciona para formarse un óxido verdoso, que se desmorona con facilidad. En 1931 se obtuvo en su forma pura y, por su actividad química, es necesario almacenarlo en una atmósfera inerte o sumergirlo en aceites minerales o incluso petrolato. Su obtención a escala industrial se realiza a partir de los ortofosfatos lantánidos, que se purifican por métodos complejos, el praseodimio en su forma óxido, es un material refractario, por lo que se usa en aleación con el hierro y el magnesio para hacer piedras para encendedores y visores que llevan en las caretas de plomo para soldadores. (Sordo Ruiz, 2012)

Neodimio

El neodimio se emplea en la fabricación de vidrios para la protección ocular, tiene gran poder magnético superior a los materiales magnéticos tradicionales, utilizado en aleaciones (Ne, Fe, B), con recubrimientos de protección debido a su gran tendencia a la corrosión. (Alarte, 2011)

II.5 Métodos de síntesis de nanopartículas de ZnO

En Sinterización. Consiste en un proceso de calentamiento de elementos comprimidos en un horno con atmósferas (presiones) controladas hasta una temperatura menor al punto de fusión según las características del material a sinterizar, pero lo suficientemente alta como para permitir la adhesión (fusión) de las partículas individuales del material. Antes de sinterizar el comprimido es frágil y su resistencia también llamada resistencia verde, es baja. La

resistencia y la naturaleza de la unión entre las partículas y, en consecuencia el compactado sinterizado, depende de los mecanismos de difusión, flujo plástico, evaporación de materiales volátiles al comprimido, recristalización, crecimiento de granos y contracción de poros. (S., 2002)

Existen diferentes tipos de sinterización

Sinterización por chispas: esta alternativa combina el proceso de prensado y el sinterizado, consiste en dos pasos básicos, 1) los polvos o un compacto verde preformado se colocan en un dado; y 2) los punzones superior e inferior, que también sirven como electrodos. (M.P., 1997)

Sinterización en fase líquida: esta técnica es de tipo sinterización alternativa, ya que implica a sistemas que involucran una mezcla de dos polvos metálicos, donde existe una diferencia de temperatura de fusión entre los dos metales. En este proceso se mezclan los dos polvos iniciales y luego se calienta a una temperatura lo suficientemente alta para fundir el metal con más bajo punto de fusión, el metal que fue fundido mojas perfectamente las partículas sólidas, creando una estructura densa con uniones fuertes entre los metales una vez solidificados. (M.P., 1997)

Termodinámica de la separación de cambios de fase: En una sustancia existen tres cambios de fases de una sustancia: sólida, líquida y gaseosa; la fase solida se caracteriza por enlaces rígidos entre átomos o moléculas, enlaces que en general se pueden estirar, doblar o romper, bajo muchas condiciones la fase solida se caracteriza también por tener una estructura cristalina. (K.C., 2006)

Las nanopartículas de ZnO son capaces de potenciar las capacidades físicas de diversos materiales por sus numerosas propiedades, entre las que destacan su actividad fotocatalítica, antimicrobiana y de protección UV. La síntesis de nanopartículas que tienen forma y tamaño uniforme a través de rutas de síntesis sencillas es el problema principal en la obtención de dichas nanopartículas. Durante la última década, los científicos han estado involucrados en el desarrollo de las nuevas rutas de síntesis que permitan el control preciso de la morfología y el tamaño de las nanopartículas. (Salas, Rosas, Galeas, Guerrero, & Debut, 2016)

Su síntesis puede ser posible a través de medios: líquido (método químico), sólido, o gaseoso. Debido a varias ventajas sobre los otros métodos, los métodos químicos son los métodos más populares debido a su bajo costo, la seguridad y las rutas de síntesis ecológicamente amigables, además de que este método proporciona un control riguroso del tamaño y la forma de las nanopartículas (Vaseem, Umar, & Hahn).

Para el caso del ZnO se han adoptado diferentes métodos de síntesis con diferentes parámetros y varias condiciones de crecimiento como la temperatura, la presión, la relación de hidrólisis, y precursores para lograr diferentes formas de nanopartículas de ZnO tales como nanoesferas, nanotubos, nanovarillas, nanocintas, nanohilos, nanoanillos, etc. Estos métodos incluyen: deposición química de vapor de metales orgánicos, síntesis hidrotérmica, evaporación térmica a través de un proceso de líquido vapor sólido asistida por un catalizador, y la oxidación de polvo de zinc metálico. Además, la síntesis de nanopartículas de ZnO depende en gran medida de si se van a utilizar en sistemas biológicos y/o no biológicos. En general, estos métodos se clasifican en dos rutas de síntesis de nanopartículas principales: en fase vapor y la síntesis en fase de solución (Salas, Rosas, Galeas, Guerrero, & Debut, 2016).

Las nanopartículas de ZnO se consideran no tóxicas, bioseguras y biocompatibles y se han encontrado en muchas aplicaciones biológicas de la cotidianidad, tales como vehículos de fármacos, cosméticos y como rellenos en materiales o dispositivos médicos. (Cioffi & Rai, 2012) Las nanopartículas de ZnO se han mantenido en la vanguardia debido a su durabilidad, alta selectividad y biocompatibilidad. Por último, adicionalmente a sus aplicaciones como sensores de gas, foto-detectores y demás aplicaciones fotocatalíticas, las nanopartículas de ZnO exhiben excelentes propiedades de bloqueo UV (Salas, Rosas, Galeas, Guerrero, & Debut, 2016).

III. EXPERIMENTAL

III.1 Disolventes

Butanol C_4H_9OH , ácido acético CH_3COOH , hidróxido de amonio NH_4OH

III.2 Reactivos

$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, $Pr(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ y $Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, la calidad fue proporcionada por la ficha técnica proporcionada por distribuido, como se puede apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2. Reactivos

Reactivo	Fabricante	Pureza (%)
$Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	Aldrich chemical company, inc.	98
$Pr(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	Aldrich chemical company, inc.	99.9
$Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	Aldrich chemical company, inc.	99.9
$La(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	J.T. Baker	99.9
$Nd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$	Aldrich chemical company, inc.	99.9

III.3 Metodología para la síntesis de $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$ (M= La, Ce, Pr y Nd)

Las nanopartículas de ZnO fueron preparadas por el método sol-gel. La composición inicial fue $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$ (M= La^{3+} , Ce^{3+} , Pr^{3+} y Nd^{3+} , $x= 0.05$). Los materiales dopados con tierras raras fueron obtenidos usando como precursores sales de nitratos de Zn y tierras raras. Las

sales fueron disueltas en agua destilada, una solución acuosa de hidróxido de amonio fue agregada gota a gota. El pH crítico de la reacción se mantuvo en 4. La reacción de condensación condujo a la formación de una estructura local polimérica dentro de las partículas de sol con una banda Zn (Ce/La/Nd/Pr)-O-Zn. Posteriormente se calentó a 80°C durante varias horas hasta que se gelificó completamente para obtener partículas de gel homogéneas más pequeñas. Estas partículas de gel secas se calcinaron a 500 y 700°C durante 3 horas para eliminar los grupos inorgánicos.

III.4 Caracterización de las nanopartículas de $Zn_{(1-x)}M_{2/3x}O$ (M= La, Ce, Pr y Nd)

III.4.1 Espectroscopia de infrarrojo por transformadas de Fourier (FT-IR)

La espectrofotometría de infrarrojo es una de las mejores herramientas para resolver problemas de estructura molecular y de identificación química. A pesar de que los compuestos orgánicos son los más estudiados también los compuestos inorgánicos que contienen cationes o aniones poliatómicos dan lugar a espectros infrarrojos útiles. La región infrarroja del espectro se extiende entre la del visible y la de las microondas y abarca aproximadamente desde 750 nm hasta unos 1000 μm . (D & Eugene, 1990)

Las subdivisiones más comunes en el espectro infrarrojo, se dividen en tres regiones para poner de manifiesto las diferentes clases de información molecular que se pueden obtener y para enfatizar las diferencias básicas entre los instrumentos adecuados de cada región. (D & Eugene, 1990)

En el infrarrojo próximo la mayoría de las bandas de absorción son debidas a armónicos de las vibraciones de tensión del hidrogeno, particularmente útiles para el análisis cuantitativo

de varios grupos funcionales. En la región del infrarrojo fundamental se obtiene gran cantidad de información cualitativa y cuantitativa acerca de los grupos funcionales y de la estructura molecular, a esta región del infrarrojo es a la que normalmente se hace referencia cuando no se califica el término infrarrojo. Los materiales ópticos y los otros componentes instrumentales utilizados en esta región difieren de los usados en las regiones del visible y del infrarrojo próximo. La mayoría de los instrumentos de infrarrojo cubren el intervalo de 2.5 a 1.5 μm . La región del infrarrojo lejano ofrece información, principalmente, acerca de las transiciones rotacionales, modos vibracionales de las redes cristalinas y vibraciones del esqueleto de moléculas grandes. (D & Eugene, 1990)

III.4.2 Difracción de rayos X (XRD)

Descubiertos por Röntgen en 1895, los Rayos X son una herramienta que ha proporcionado nuevas dimensiones a diversas actividades humanas, no solamente a las Ciencias de la Salud sino también a la Ciencia en general y al desarrollo tecnológico que abarca la pequeña y la gigantesca Ciencia. La radiación X tal y como se produce en un tubo de rayos X se llama Brems strah lung o radiación de frenamiento. Se genera cuando una carga en movimiento experimenta una aceleración como ocurre con los electrones del tubo de rayos X al chocar contra la superficie del anticátodo, donde son frenados interiormente hasta el final de su recorrido. La distribución espectral de la radiación de frenamiento es análoga a la del cuerpo negro. Superpuesta a esta radiación continua existen unas líneas (imágenes de la rendija del espectrómetro) cuya estructura depende de la naturaleza del anticátodo. Se trata del espectro característico. (León Garzón, 2011)

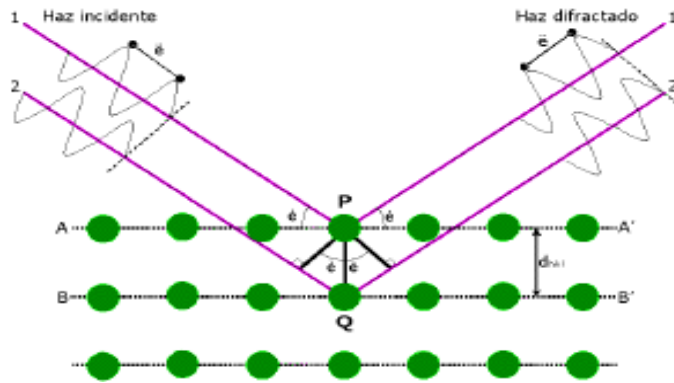


Figura 14. Difracción de Rayos X por un cristal

(Fuente: <http://cienciayrestauracion.blogspot.com.es/2013/10/la-difraccion-de-rayos-x-drx.html>)

III.4.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La microscopia electrónica de barrido produce imágenes con electrones con radiaciones emitidas o reflejadas por el espécimen del mismo lado que recibe el haz electrónico generalmente se observa una superficie de un objeto opaco de haz, (Vazquez Nin & Echevarria, 2000). Precisamente, un haz de electrones acelerados por un alto potencial eléctrico (25.000 Voltios) constituye la fuente de radiación de un microscopio electrónico de barrido (SEM por Scanning Electron Microscope).

Las imágenes de un microscopio electrónico se obtienen mediante la detección, procesamiento y visualización de las señales resultantes de las interacciones entre un haz de electrones de alta energía con la materia. Estas interacciones pueden proporcionar información sobre topografía, composición y estructura cristalográfica. Todos los microscopios electrónicos de barrido constan de un cañón electrónico en una columna de alto vacío, del orden de 10^{-5} mm de Hg, en la cual se genera un haz de electrones de alta energía (5 - 30 kV). Este haz es colimado por una serie de lentes electrónicas y focalizado sobre la muestra analizada. Los detectores registran las señales originadas por la interacción entre el

haz de electrones y la muestra, que son procesadas y visualizadas en el sistema final de observación (monitor o pantalla de computadora). El microscopio electrónico de barrido no forma una imagen real del objeto sino que construye una imagen virtual a partir de alguna de las señales emitidas por la muestra. La imagen se visualiza en un tubo de rayos catódicos donde las bobinas de deflexión del haz están sincronizadas con el barrido del haz de electrones en el microscopio. Modulando la intensidad del haz del tubo de rayos catódicos se obtiene finalmente un registro punto a punto en la pantalla que es precisamente la imagen electrónica proporcionada por el microscopio, Figura, (Ipohorski & Bozzano, 2013).

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que la información mediante la cual se forma la imagen en un microscopio electrónico de barrido proviene de variaciones de una dada señal. Para corrientes de haz bajas, las fluctuaciones estadísticas en su intensidad comienzan a influir en la calidad de la imagen y a cobrar importancia frente a las fluctuaciones de los detectores o amplificadores de la señal. Es decir que debajo de un cierto valor de la corriente o de la sección del haz, el ruido electrónico enmascara la mejora teórica de la resolución (Ipohorski & Bozzano, 2013).



Figura 15. Componentes de la óptica del MEB convencional.
(Fuente: <http://almez.pntic.mec.es/~jrem0000/dpbg/1bch/tema1/micros-barr.JPG>)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 Caracterización de $Zn_{(1-x)} M_{2/3x} O$ (M= La, Ce, Pr y Nd)

Se sintetizaron una serie de materiales a base de ZnO dopados con diferentes tierras raras: La, Ce, Pr y Nd. Esta serie de materiales denomina $Zn_{(1-x)} M_{2/3x} O$ (M= La^{3+} , Ce^{3+} , Pr^{3+} y Nd^{3+} , $x= 0.05$).

Los materiales sintetizados en la presente investigación se caracterizaron mediante diferentes técnicas, con el objetivo de determinar sus principales propiedades cristalinas y morfológicas. Solo se realizó caracterización por difracción de rayos X (XRD), microscopia electrónica de barrido (MEB) y Espectroscopia de Infrarrojo (FT-IR).

IV.1.1 Difracción de rayos X

La figura 16 muestra los difractogramas realizados al ZnO dopado con La y calcinado a 500 y 700 °C. Se confirma la existencia de dos fases cristalinas presentes, como lo son ZnO y LaOCl. EL ZnO es de tipo zincita (ficha JCPDS 00-036-1451), con estructura cristalina hexagonal, con picos bien definidos, intensos y finos debido a la alta cristalinidad de la zincita.

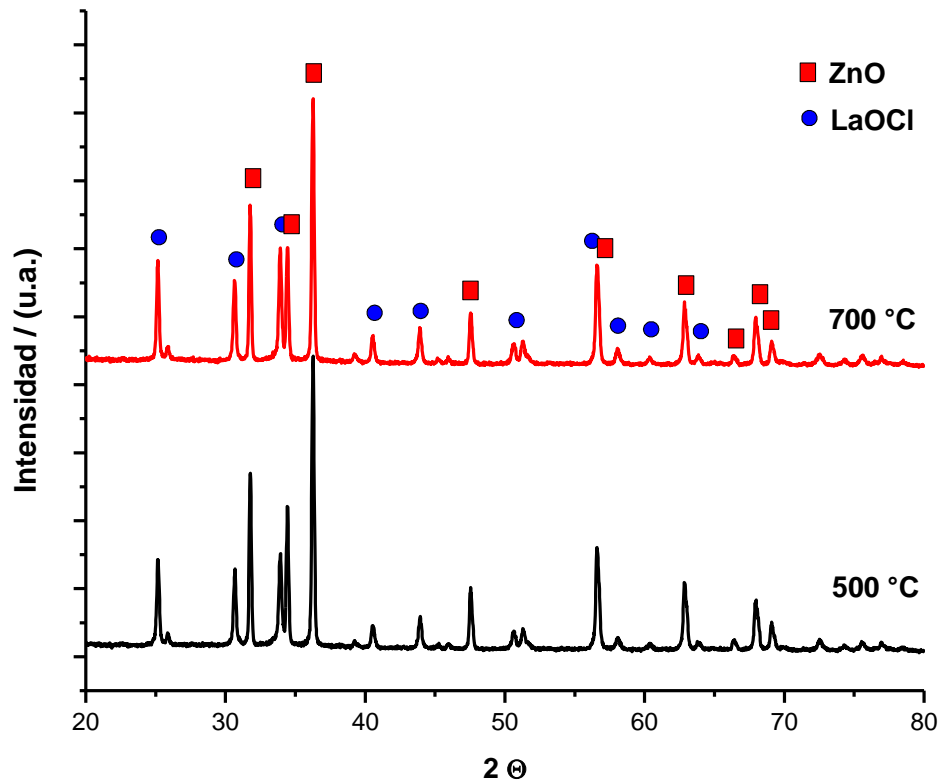


Figura 16. Patrón de difracción de ZnO con La.

De los patrones de difracción de los diferentes sistemas se calculó el tamaño de grano que justifica la naturaleza cristalina del ZnO, se utilizó la ecuación de Debye-Scherrer, la cual establece que el tamaño de grano es inversamente proporcional al ancho medio del pico máximo de difracción y al coseno del ángulo del pico máximo, de acuerdo a:

$$\tau = \frac{K\lambda}{B\cos(\theta_B)}$$

Donde λ es la longitud de onda de la radiación de los rayos X (1.54056), θ_B es el ángulo de Bragg, $k = 0.94$ y B es el ancho medio del pico considerado para al cálculo (FWHM).

Los cálculos realizados a partir de los datos experimentales mostrados en la figura 16 y mediante la aplicación de la ecuación de Debye-Scherrer, se muestran en las tablas 3 y 4.

Tabla 3. Principales picos DRX del ZnO dopado con La y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinado a 500 °C						
Pico (2θ)	31.765	36.262	47.554	56.609	62.670	67.958
FWHM	0.192	0.204	0.237	0.291	0.316	0.341
Tamaño de cristal (nm)	44.933	42.800	38.259	32.386	30.742	29.344
Muestra calcinada a 700 °C						
Pico (2θ)	31.772	36.257	47.548	56.606	62.876	67.949
FWHM	0.194	0.208	0.242	0.301	0.306	0.345
Tamaño de cristal (nm)	44.470	41.976	37.467	31.310	31.782	29.002

Con el valor del FWHM en radianes junto con la longitud de onda de la emisión de rayos X para el cobre de 0.154056 nm, permite obtener los tamaños de partícula calculados para cada pico y promediando estos resultados se obtuvo que el tamaño medio de partícula es de 36 nm para el ZnO dopado con La de las muestras calcinadas a 500 y 700 °C.

La tabla 4 muestra los resultados del tamaño de cristal del LaOCl, tanto los picos principales, como el ancho a mitad de altura y el tamaño de partícula calculado para cada uno de estos picos.

Tabla 4. Principales picos DRX del LaOCl y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinado a 500 °C					
Pico (2θ)	25.151	30.670	40.547	43.927	56.609
FWHM	0.217	0.212	0.272	0.257	0.283
Tamaño de cristal (nm)	39.178	40.585	32.521	34.813	33.302
Muestra calcinada a 700 °C					
Pico (2θ)	25.158	30.649	40.532	43.910	56.606
FWHM	0.201	0.217	0.254	0.265	0.316
Tamaño de cristal (nm)	42.298	39.648	34.824	33.760	29.824

En base al resultado de rayos X, y promediando los tamaños de partícula calculados para cada pico principal, se determinó que el tamaño medio de partículas para el LaOCl es de 36 nm.

La figura 17 muestra los difractogramas realizados a las muestras de ZnO dopado con Ce, calcinadas a 500 y 700 °C. Confirmándose la presencia de dos fases cristalinas, el ZnO y el CeO₂. El ZnO es de tipo zincita (ficha JCPDS 00-036-1451), con estructura cristalina hexagonal, el CeO₂ (ficha JCPDS 03-065-5923), con estructura cristalina cubica centrada en las caras.

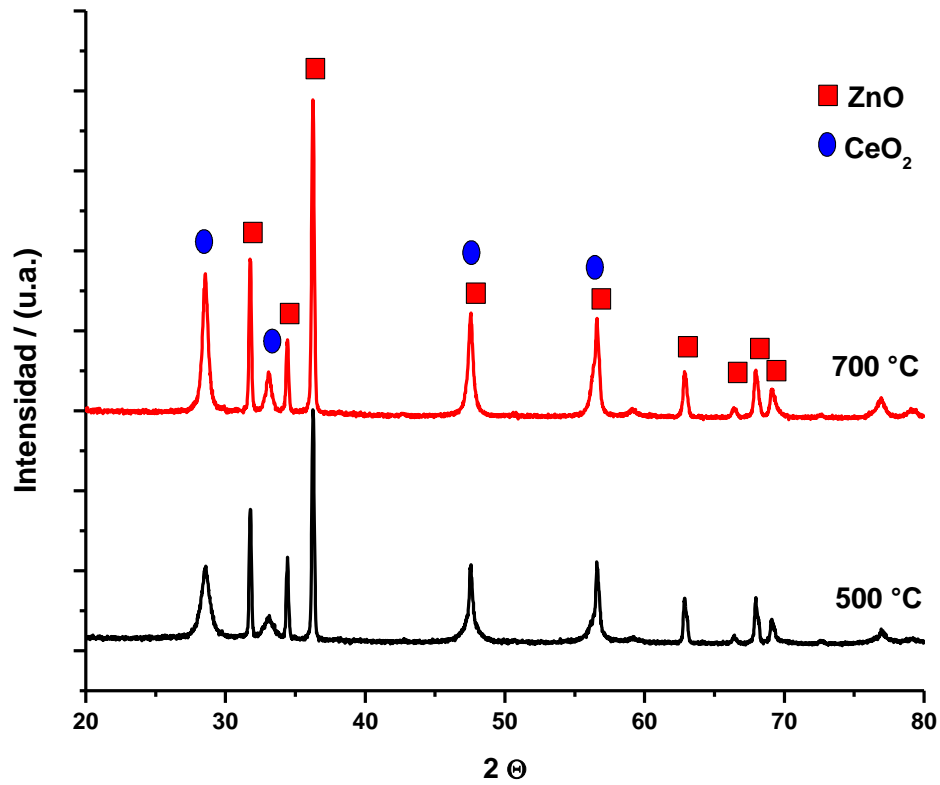


Figura 17. Patrón de difracción de ZnO con Ce.

De los datos obtenidos del espectro de rayos X, se obtuvo el tamaño de cristal del ZnO a 500 y 700 °C, como se observa en la Tabla 5. Promediando los tamaños de partícula calculados para cada pico principal, se determinó que el tamaño medio de partículas de ZnO es de 40 nm.

Tabla 5. Principales picos DRX del ZnO, en la muestra con Ce y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinada a 500 °C					
Pico (2θ)	31.771	34.436	36.268	62.872	67.959
FWHM	0.195	0.184	0.197	0.311	0.298
Tamaño de cristal (nm)	44.242	47.212	44.322	31.270	33.578
Muestra calcinada a 700 °C					
Pico (2θ)	31.769	34.428	36.252	62.890	67.962
FWHM	0.203	0.202	0.218	0.313	0.368
Tamaño de cristal (nm)	42.498	43.004	40.050	31.073	27.191

La tabla 6 muestra los tamaños de partícula para el CeO₂ obtenidos con los picos principales del DRX y el ancho a mitad de altura.

Tabla 6. Principales picos DRX del CeO₂ y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinada a 500 °C			
Pico (2θ)	--	33.113	59.188
FWHM	--	0.641	0.591
Tamaño de cristal (nm)	--	13.505	16.146
Muestra calcinada a 700 °C			
Pico (2θ)	28.547	33.109	59.136
FWHM	0.444	0.397	0.355
Tamaño de cristal (nm)	19.284	21.805	26.873

De los datos mostrados en la tabla 6, se observó que el tamaño medio de partícula para el CeO_2 calculado según sus principales picos es de 15 nm para la muestra calcinada a 500 °C, mientras que para la muestra calcinada a 700 °C hubo un incremento del tamaño de partícula hasta 23 nm.

La figura 18 muestra el difractograma de la muestra de ZnO dopada con Pr, cuyos picos característicos de difracción concuerdan con la fase de zincita (ficha 00-036-1451), presenta una estructura cristalina hexagonal. Se pueden observar picos de difracción bien definidos.

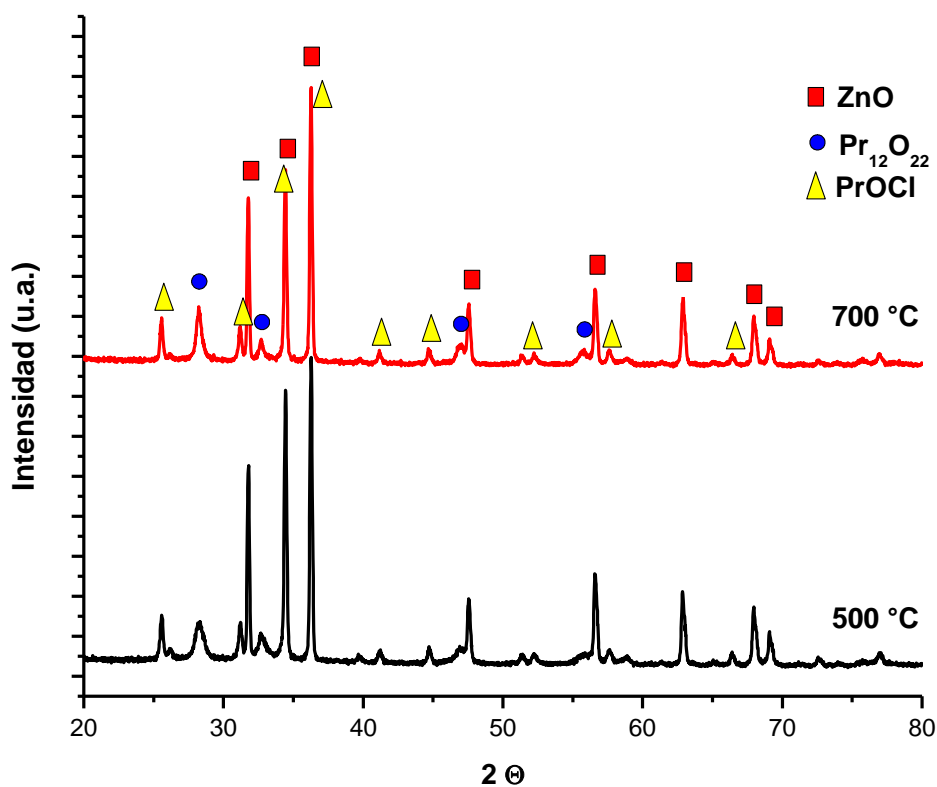


Figura 18. Patrón de difracción de ZnO con Pr

Además se identificó óxido de praseodimio (β -Pr₁₂O₂₂), ficha 01-089-0573, con estructura cristalina monoclinica, oxocloruro de praseodimio (PrOCl), ficha 01-085-0948, con estructura cristalina tetragonal.

En la tabla 7 se muestran los tamaños de cristal de los picos principales, para el ZnO de la muestra con Pr, además del FWHM.

Tabla 7. Principales picos DRX del ZnO, dopado con Pr y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinada a 500 °C				
Pico (2θ)	31.773	36.270	62.870	67.954
FWHM	0.192	0.205	0.290	0.323
Tamaño de cristal (nm)	44.933	42.592	33.534	30.978
Muestra calcinada a 700 °C				
Pico (2θ)	31.774	36.258	62.887	67.965
FWHM	0.186	0.201	0.285	0.332
Tamaño de cristal (nm)	46.383	43.438	34.125	30.140

Se observó que el tamaño medio de partícula para el ZnO calculado según sus principales picos es de 38 nm a 500 °C, mientras que a 700 °C el tamaño medio de partícula es de 39 nm.

En la tabla 8 se muestran los tamaños de cristal para el β -Pr₁₂O₂₂, calculados con los correspondientes picos principales y el FWHM.

Tabla 8. Principales picos DRX del Pr₁₂O₂₂, en la muestra con Pr y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinada a 500 °C		
Pico (2θ)	28.288	32.677
FWHM	0.735	0.458
Tamaño de cristal (nm)	11.642	18.880
Muestra calcinada a 700 °C		
Pico (2θ)	28.250	32.685
FWHM	0.387	0.276
Tamaño de cristal (nm)	22.110	31.330

De estos datos pudo calcularse el tamaño medio de las partículas de β-Pr₁₂O₂₂, que en la muestra calcinada a 500 °C fue de 15 nm y en la muestra calcinada a 700 nm fue de 27 nm

En la tabla 9 se muestra la información correspondiente de los picos principales, FWHM y tamaño de partícula calculado con cada uno de los picos para el PrOCl.

Tabla 9. Principales picos DRX del PrOCl, y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinada a 500 °C				
Pico (2θ)	25.583	41.203	44.723	57.611
FWHM	0.223	0.319	0.263	0.356
Tamaño de cristal (nm)	38.157	27.789	34.115	26.599
Muestra calcinada a 700 °C				
Pico (2θ)	25.563	41.174	44.697	57.614
FWHM	0.223	0.202	0.252	0.299
Tamaño de cristal (nm)	38.155	43.880	35.601	31.670

De los datos obtenidos del DRX, y promediando los tamaños de partícula calculados para cada pico principal, se determinó que el tamaño medio de partículas en la muestra calcinada a 500 °C es de 32 nm, mientras que para la muestra calcinada a 700 °C es de 37 nm.

El patrón de difracción para la muestra de ZnO dopado con Nd se muestra en la figura 19. Ambas muestras revelan picos intensos característicos con la fase cristalográfica de la zincita (ficha JCPDS 00-36-1451), con estructura cristalina hexagonal. También se identificó una fase de oxicloruro de neodimio (NdOCl, ficha 01-085-1198), con estructura cristalina tetragonal.

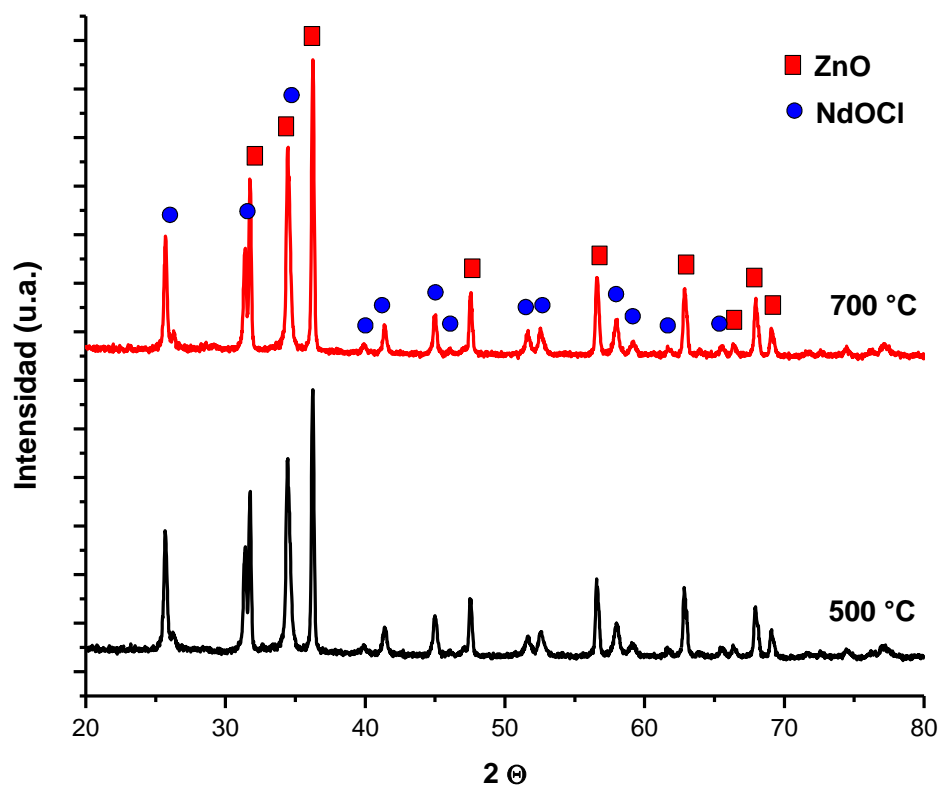


Figura 19. Patrón de difracción de ZnO con Nd.

En la tabla 10 se muestran los valores obtenidos de tamaño de cristal obtenidos con los principales picos del XRD de la figura 19 y el FWHM de los picos de difracción de la zincita.

Tabla 10. Principales picos DRX del ZnO, en la muestra con Nd y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinada a 500 °C				
Pico (2θ)	36.242	56.585	62.852	67.935
FWHM	0.212	0.281	0.299	0.347
Tamaño de cristal (nm)	41.183	33.535	32.521	28.832
Muestra calcinada a 700 °C				
Pico (2θ)	36.245	56.596	62.862	67.946
FWHM	0.209	0.295	0.321	0.338
Tamaño de cristal (nm)	41.774	31.945	30.294	29.602

El tamaño medio de partícula para la zincita calculado con los principales picos mostrados en la tabla 10 es de 34 nm para la muestra calcinada a 500 °C, y de 33 nm para la muestra calcinada a 700 °C.

Los resultados de tamaño de partícula para el NdOCl, se muestran en la tabla 11, con el uso de los principales picos de difracción de la figura 19.

Tabla 11. Principales picos DRX del NdOCl, en la muestra con Nd y sus respectivos anchos a mitad de altura (FWHM).

Muestra calcinada a 500 °C			
Pico (2θ)	41.416	45.004	57.986
FWHM	0.320	0.315	0.428
Tamaño de cristal (nm)	27.721	28.513	22.165
Muestra calcinada a 700 °C			
Pico (2θ)	41.401	44.983	57.975
FWHM	0.285	0.302	0.373
Tamaño de cristal (nm)	31.124	29.738	25.431

De los datos obtenidos del XRD, y promediando los tamaños de partícula calculados con cada uno de los principales picos, se pudo determinar el tamaño medio de las partículas de NdOCl, siendo de 26 nm para la muestra calcinada a 500 °C y de 29 nm para la muestra calcinada a 700 °C.

IV.1.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

A continuación se muestran las imágenes obtenidas por MEB para las nanopartículas de ZnO dopado con La, Ce, Pr y Nd obtenidas durante la realización de este trabajo.

La figuras 20 y 21 muestran las nanopartículas de ZnO dopadas con La, tratadas a 500 y 700 °C respectivamente, a diferentes aumentos. Se presentan partículas irregulares con aglomerados de partículas, por lo que se puede corroborar la presencia de nanopartículas.

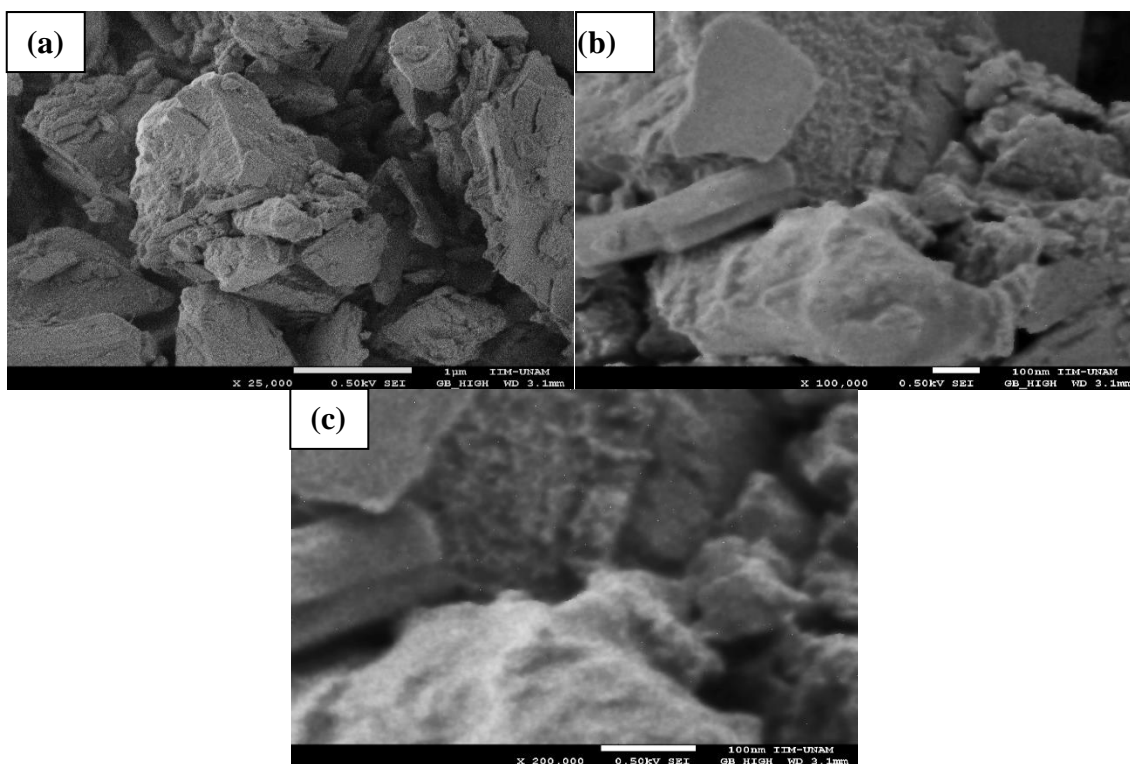


Figura 20. Imágenes MEB del ZnO dopado con La, calcinado a 500 °C.

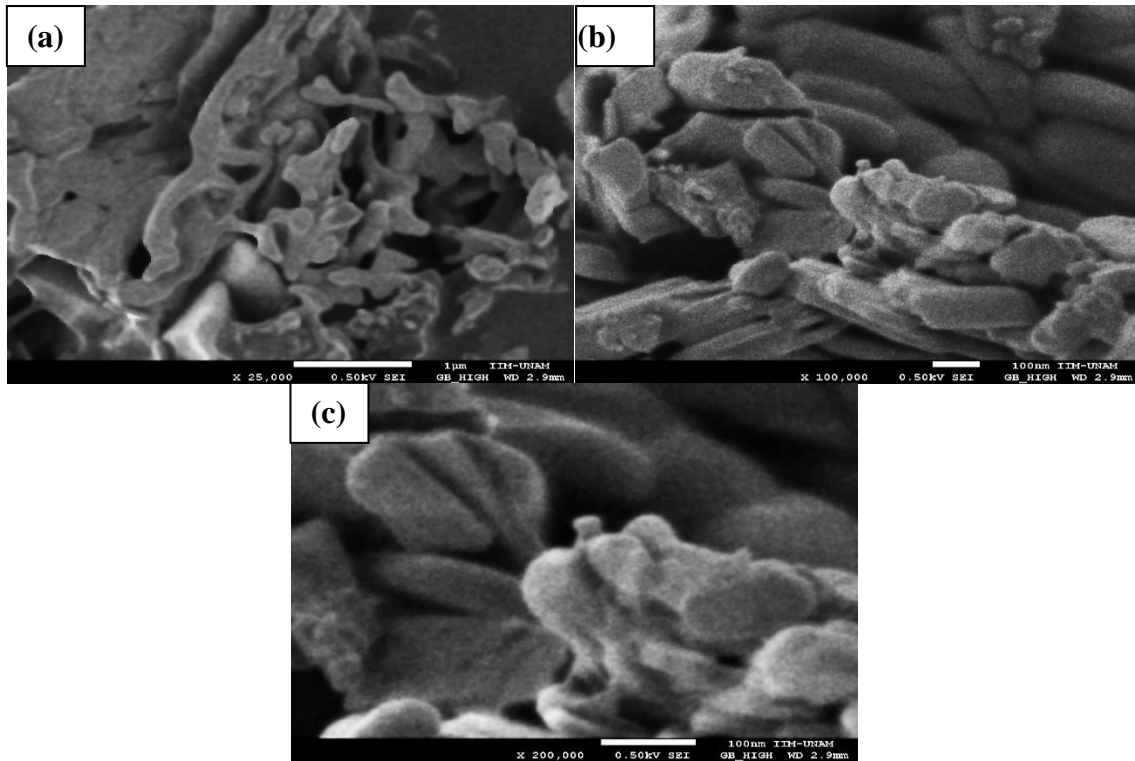


Figura 21. Imágenes MEB del ZnO dopado con La, calcinado a 700 °C.

Las figuras 22 y 23 muestran las nanopartículas de ZnO dopadas con Ce, tratadas a 500 y 700 °C, respectivamente. En la figura 22 se observan nanopartículas bien definidas, aglomeradas de tipo globular.

En la figura 23 se observa la presencia también de nanopartículas aglomeradas de tipo globular.

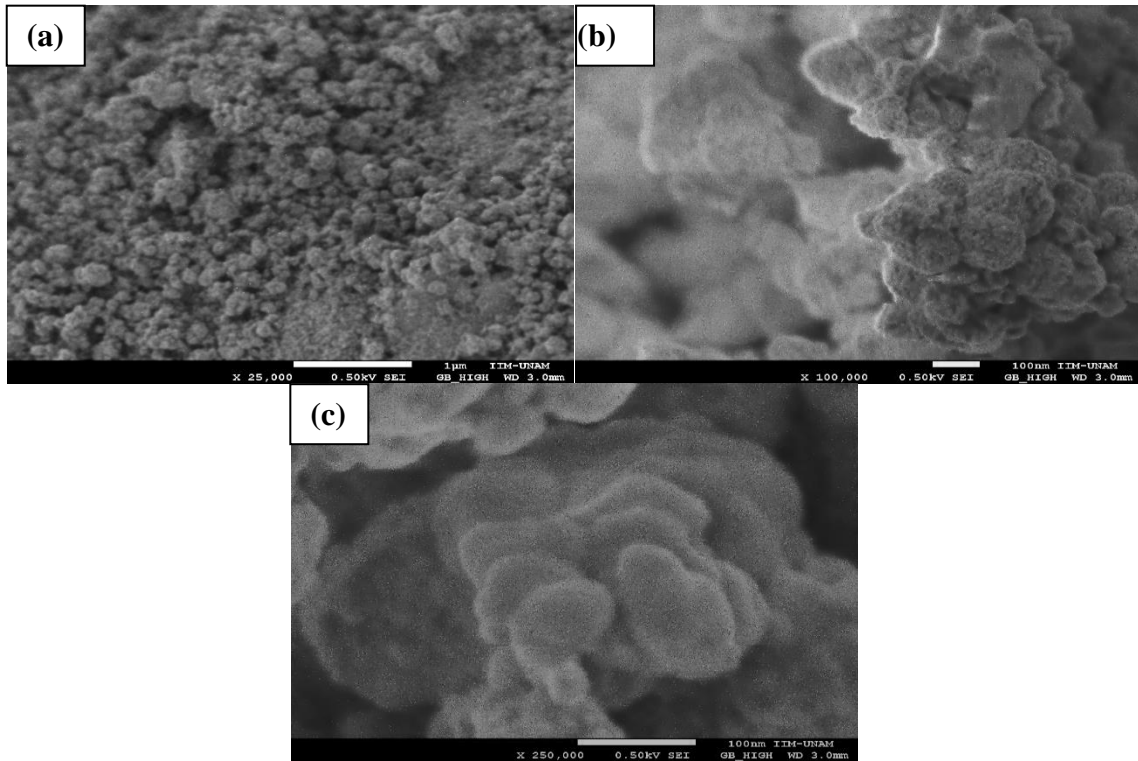


Figura 22. Imágenes MEB del ZnO dopado con Ce, calcinado a 500 °C.

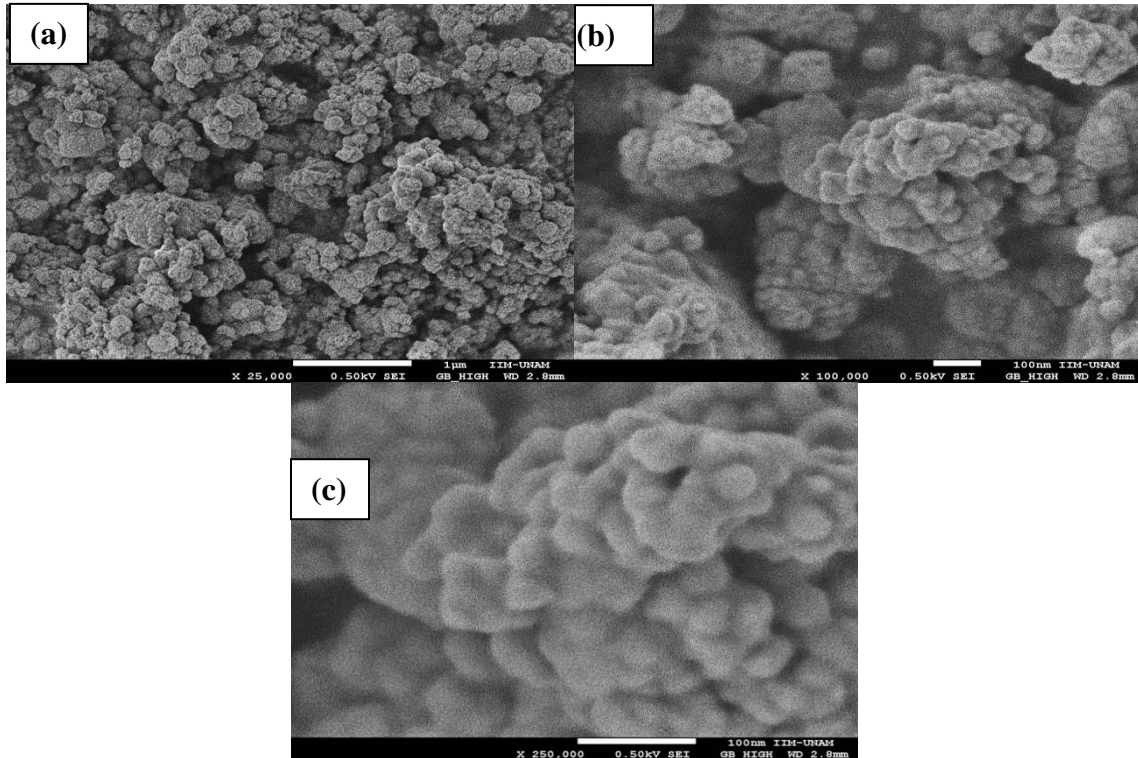


Figura 23. Imágenes MEB del ZnO dopado con Ce, calcinado a 700 °C.

Las micrograffías SEM de las nanopartículas de ZnO en polvo con Pr y Nd como dopante (Figuras 24-27) muestran que la mayoría de éstas presentan una morfología de hojuela y además se agregan. La agregación de partículas o la formación de nanopartículas más grandes se deben a la alta energía superficial de las nanopartículas. Se puede observar que el tamaño de las nanopartículas de ZnO está en el rango nanométrico, al menos en una de sus dimensiones.

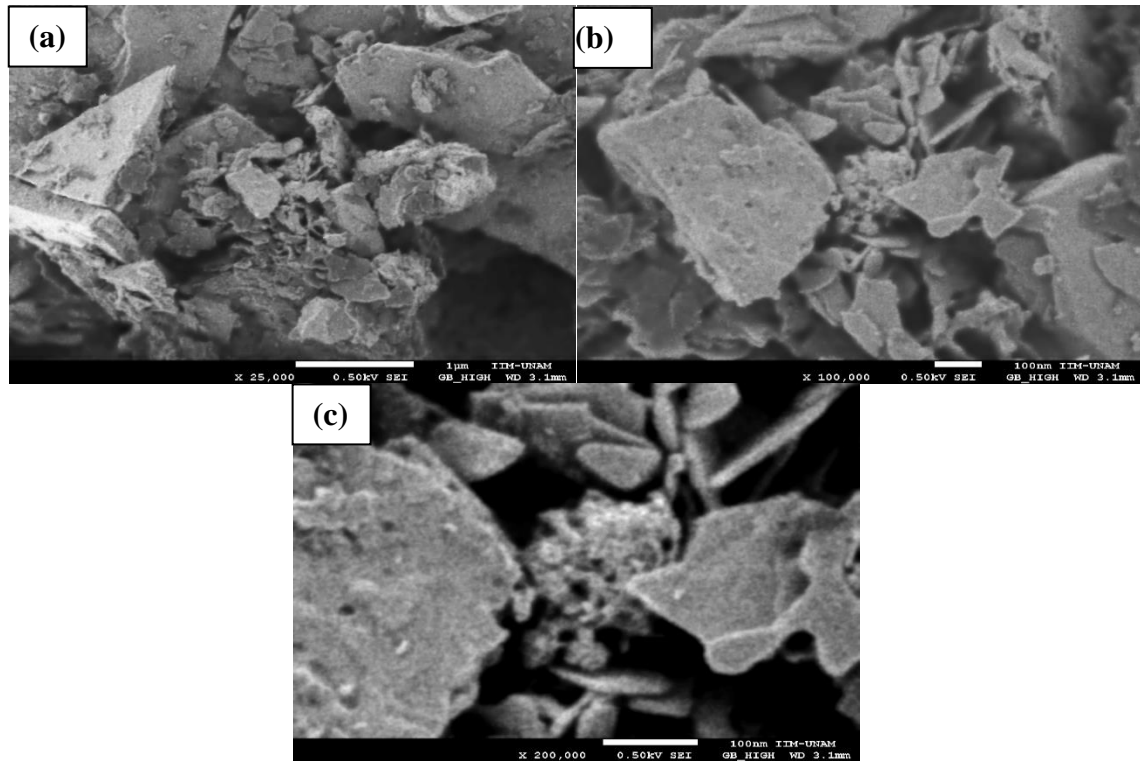


Figura 24. Imágenes MEB del ZnO dopado con Pr, calcinado a 500 °C.

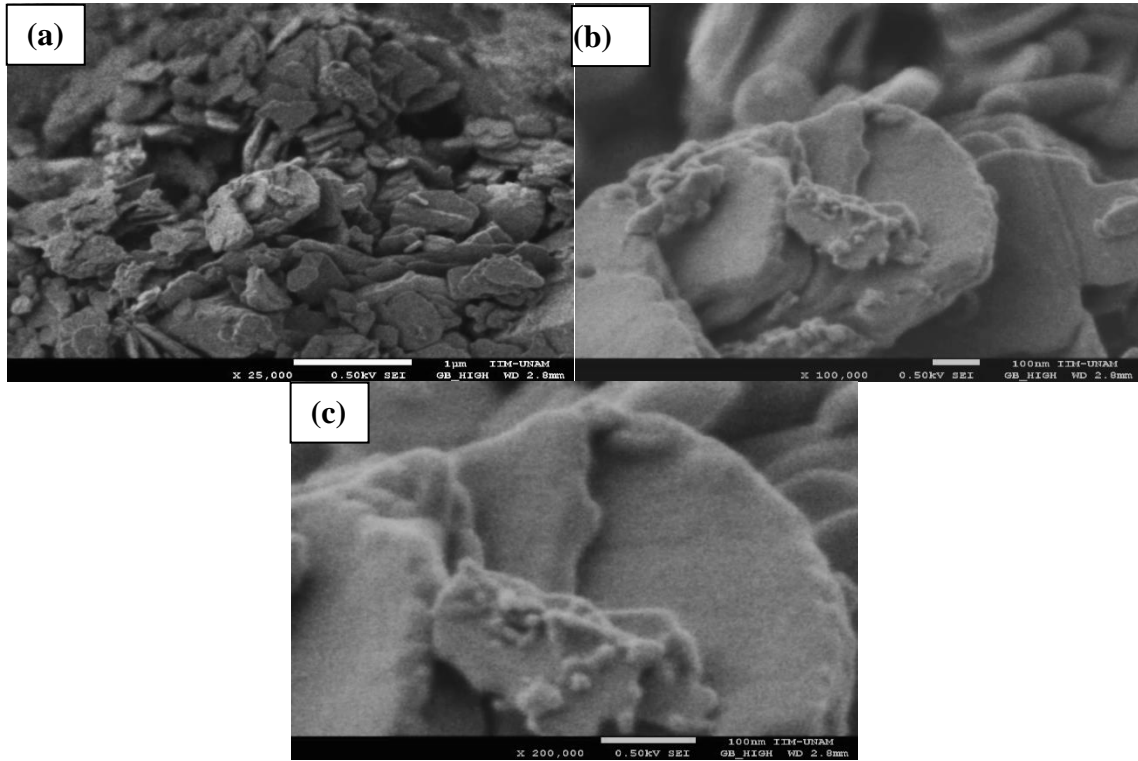


Figura 25. Imágenes MEB del ZnO dopado con Pr, calcinado a 700 °C.

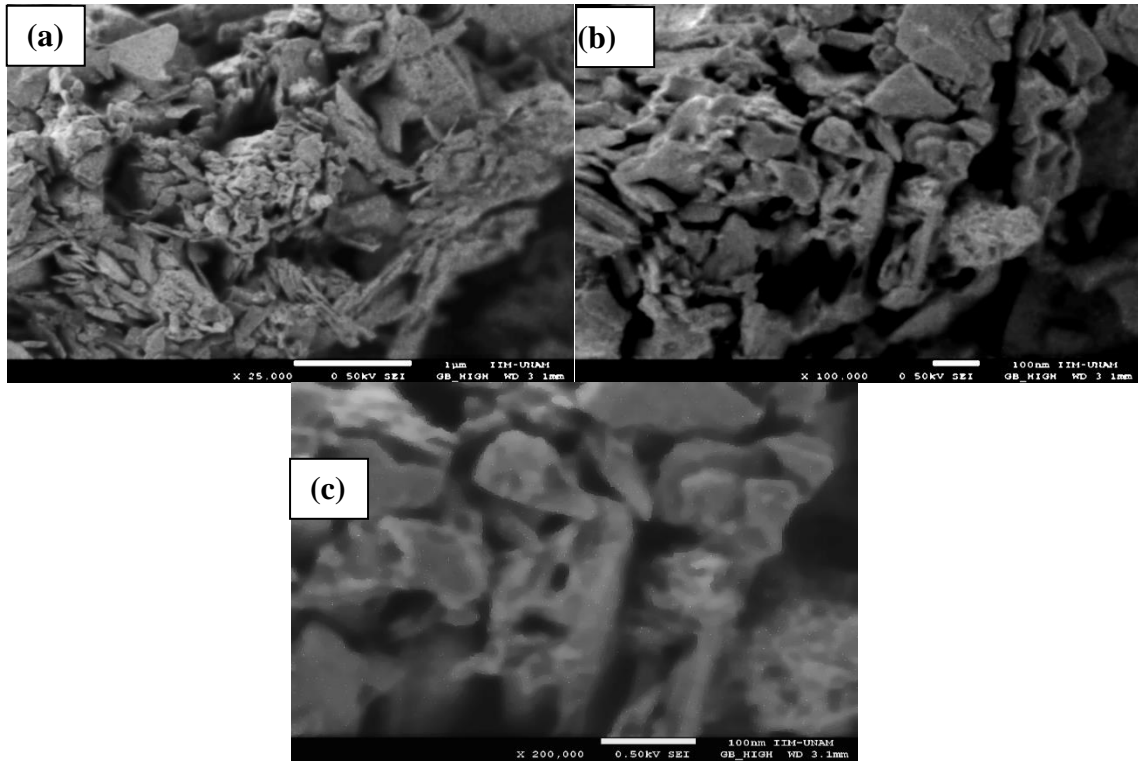


Figura 26. Imágenes MEB del ZnO dopado con Nd, calcinado a 500 °C.

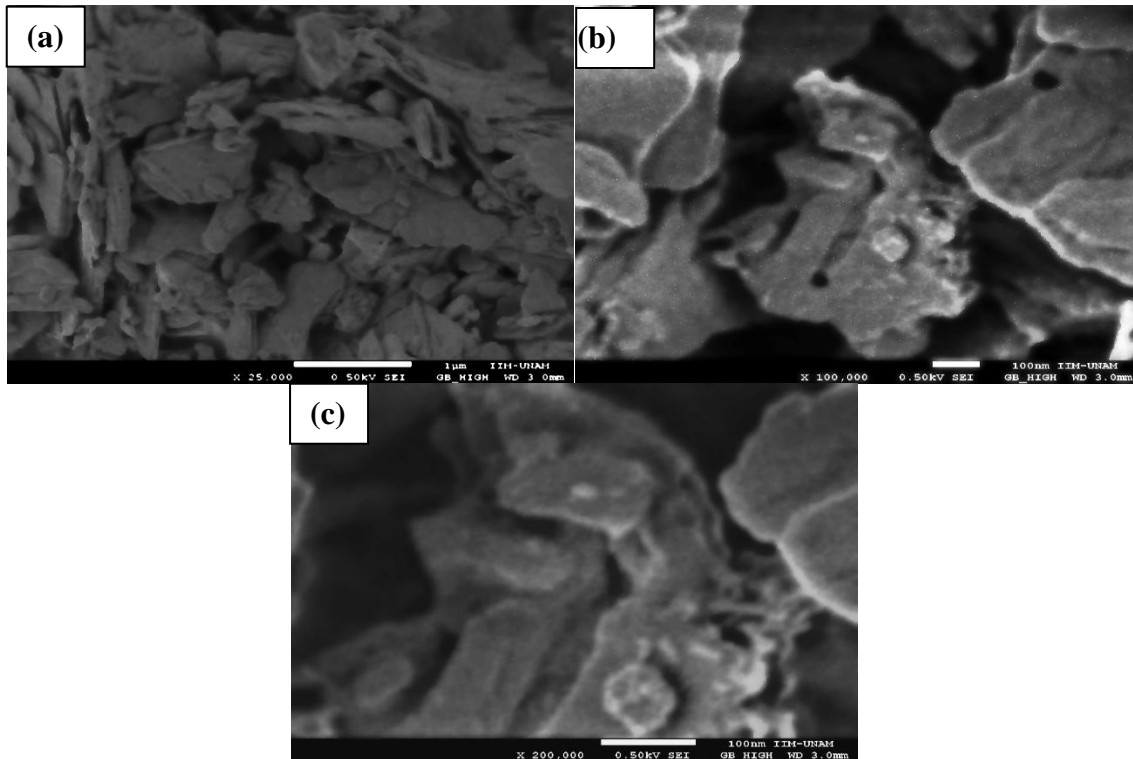


Figura 27. Imágenes MEB del ZnO dopado con Nd, calcinado a 700 °C.

IV.1.3 Espectroscopia de infrarrojo por transformadas de Fourier (FT-IR)

El análisis infrarrojo por transformada de Fourier realizado a las muestras, para identificar el enlace Zn-O, se muestra en la Figura 28. La primera banda se observa a partir de los 400 cm^{-1} a 500 cm^{-1} que corresponde a las vibraciones del enlace Zn-O de las nanopartículas. La muestra ZnO-Ce a 500 °C presenta una banda a 3486 cm^{-1} que corresponde a la vibración del enlace O-H provocado por la humedad en la muestra, además de los pequeños picos alrededor de 2300 cm^{-1} indican la presencia de enlaces O=C=O, por la absorción de CO_2 del aire, debido a la porosidad de este material. Los picos que se presentan a 1396 y 1516 cm^{-1} corresponden a los enlaces C=O.

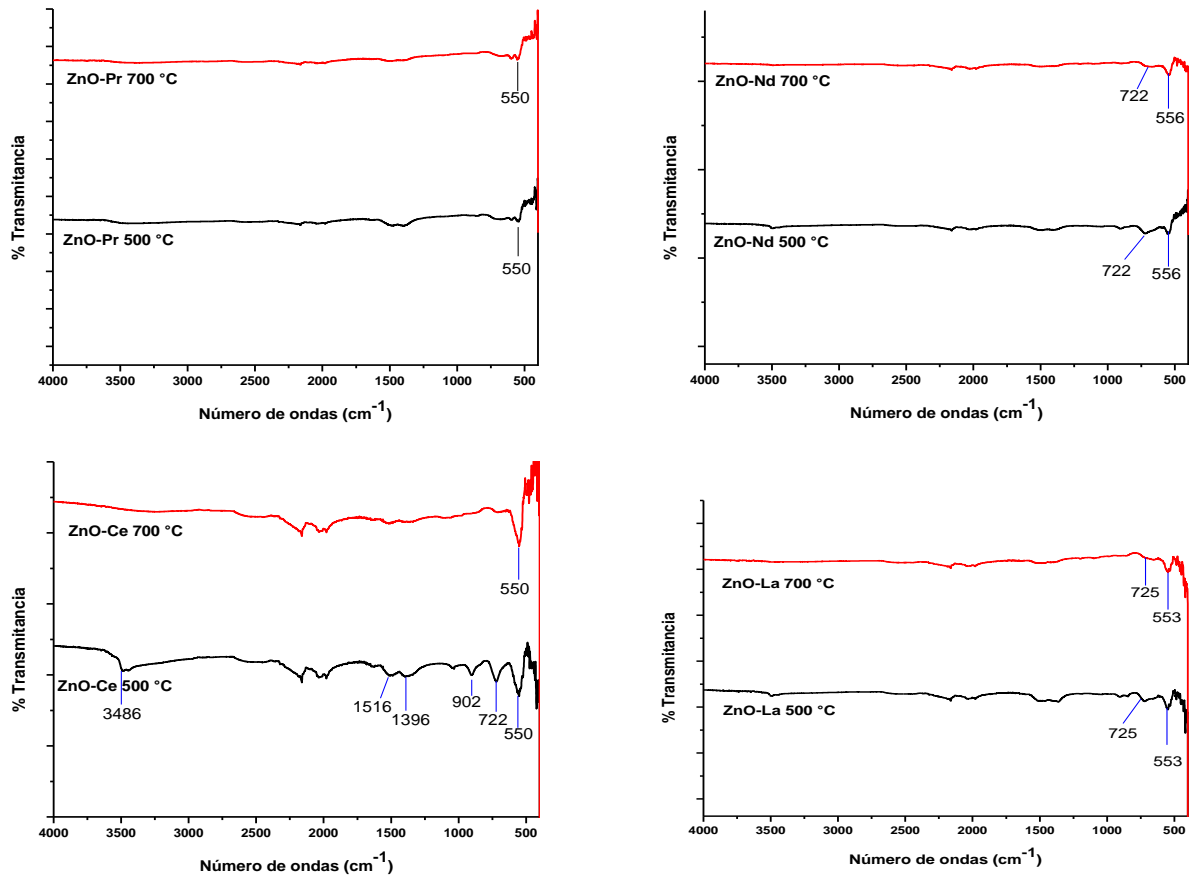


Figura 28. Espectros IR por transformada de Fourier para las nanopículas de ZnO dopadas con La, Ce, Pr y Nd, calcinadas a 500 y 700 °C.

V. CONCLUSIONES

Se decidió utilizar el método sol-gel para la síntesis de las nanopartículas de ZnO dopadas con La, Ce, Pr y Nd, debido a que es un método rápido y confiable para obtener materiales nanoparticulados.

Los difractogramas de las distintas nanopartículas, mostraron picos característicos para el ZnO con estructura hexagonal de tipo zincita y de acuerdo a la ecuación de Debye-Scherrer, el tamaño medio de cristalito fue aproximadamente de 36-40 nm.

Los resultados obtenidos por microscopia electrónica de barrido presentaron una morfología esférica para las dopadas con Ce, mientras que para las nanopartículas dopadas con La, fueron de tipo globular y para las dopadas con Pr y Nd fueron de tipo hojuela con cierto grado de agregación.

Por los resultados obtenidos, se concluye que el método sol-gel es ideal para la síntesis de nanopartículas de ZnO dopadas con tierras raras.

VI. REFERENCIAS

- Alarte, J. M. (2011). *El mundo de los imanes*. España: Bubok Publishing .
- Anusavice, H. J. (2004). *Phillips Ciencia de los materiales dentales*. Florida: Elsevier Imprint.
- B. Sermour, R., & Charles E. Carraher, J. (1995). *Introducción a la química de los polímeros*. Barcelona: Reverte, S.A.
- Barrancos Mooney, J., & J.Barrancos, P. (2006). *Operatoria dental: integracion clinica*. Buenos Aires: Panamericana.
- Bermejo, M. B., & Serena Domingo, P. (2017). *Los riesgos de la nanotecnología* . Madrid: Los libros de la catarata.
- Calvo Carbonell, J. (2009). *Pinturas y recubrimientos: introduccion a su tecnología*. Madrid: Ediciones Diaz de Santos, S.A.
- Casado, E. Á. (2009). *Embellecimiento de superficies*. España: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Cioffi, N., & Rai, M. (2012). *Nano-Antimicrobials: Progress and prospects*. Heidelberg, Alemania.
- D, O., & Eugene. (1990). *Métodos ópticos de análisis*. España: Editorial Reverte, S.A.
- Dastjerdi, R., & Montazer, M. (2010). "A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: focus on antimicrobial properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 5-18.
- Doerner, M. (2005). *Los materiales de pintura y su empleo en el arte*. España: Reverté.
- Foundation, N., & Project, S. T. (1972). *Quimica: Investigaciones de laboratorio Fase IA*. Barcelona: Reverte, S.A.
- Gimenez, E., Cabedo, L., & Larragon, J. M. (2008). *Nuevos retos en materiales poliméricos*. España: Universitat Jaume.
- Guerrero, V. H. (s.f.). *Uso de Nanopartículas de ZnO en tejidos de algodón para mejorar sus propiedades de proteccion ultravioleta*. Escuela Politecnica Nacional, Ecuador.
- Hernandez, J. d. (2008). Sobre la nanotecnología. *Anales de mecánica y electricidad*, 54-59.
- i, F. (s.f.).
- Institute, N. A. (1958). *Entretenimiento y reparacion de aviones*. Barcelona: Reverte, S.A.
- Ipohorski, M., & Bozzano, P. B. (2013). Microscopía Electrónica de Barrido en la Caracterización de Materiales. *Ciencia e Investigación*, 43-53.

- Izquierdo, J. F., & Cunil, f. (s.f.).
- Izquierdo, J. F., Cunil, F., Tejero, J., Iborra, M., & Fite, C. (2004). *Cinética de las reacciones químicas*. Barcelona: Edicions de la Universitat de Barcelona.
- K.C., R. (2006). *Termodinamica*. Mexico: Pearson.
- Klein, C., & Cornelius S. Hurlbut, J. (2003). *Manual de minerología, volumen 2; cuarta edición*. España: Reverte, S.A.
- Laboulaye, C. (2004). *Diccionario de artes y manufacturas, de agricultura, de minas, etc.* Madrid: Librería española.
- León Garzón, R. (2011). Los rayos X característicos: una revisión. *iMedPub Journals*, 1-3.
- Lopez, M. A., & Caivano, J. L. (2004). *Color: ciencia, artes, proyecto y enseñanza*. Buenos aires: Noboku.
- M.P., G. (1997). *Fundamento de manufactura moderna materiales, procesos y sistemas*. Estado de Mexico: Pearson Prencite Hall.
- Martin Reyes, G. (2004). *Breve historia de la alquimia*. España: ISBN.
- Martinello Savi, B., Rodrigues, L., & Michael Bernardi, A. (2011). Síntesis de Nanopartículas de ZnO por el Proceso Sol-Gel. *Ceramic and Glass Materials Group*, 2-3.
- Martinello, B., & Rodrigues, L. (s.f.).
- Medrano Marquez, J. A., Gonzalez Ajuech, V. L., & Diaz de Leon Santiago, V. M. (2017). *Mantenimiento: técnicas y aplicaciones industriales*. Mexico: Editorial Patria.
- Mendez-Arguello, B. e. (2007). Promoción del crecimiento en plantas de *Capsicum annum* por nanopartículas de óxido de zinc. *Revista de Investigacion de la Universidad de la Salle Bajío*, 143.
- Morales Vargas, M. V. (s.f.). Desarrollo de Nanomateriales para su aplicación como catalizadores en Reacciones de Valorización de Bioetanol. *Tesis (Doctoral) 2017*. Escuela Internacional de Doctorado, Ciudad de Mexico.
- Peveari, C., Pires, A. M., Gonçalves, R. R., & Serra, O. A. (2005). Synthesis, structural and morphological characterization of CeO₂—ZnO nanosized powder systems from Pechini's method. *Eclat. Quím. vol.30 no.1 São Paulo*.
- Rodriguez M., J., Castro M., L., & Del Real R., J. C. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*. Madrid (España): Vision Net.
- S., K. &. (2002). *Manufactura, ingeniería y Tecnología*. Edo. de Mexico: Pearson.
- Salas, G., Rosas, N., Galeas, S., Guerrero, V., & Debut, A. (2016). Síntesis de Nanopartículas de ZnO por el Método de Pechini. *Revista Politécnica*, vol.38.

- Savi, B. M., Rodrigues, L., & Bernardin, A. (2002). SÍNTESIS DE NANOPARTÍCULAS DE ZnO. *Qualicer*, 2-4.
- Senner, A. (1994). *Principios de Electrotecnia*. España-Barcelona: Reverte.
- Sordo Ruiz, M. (2012). *Tabla Periódica de los Elementos: Ilustrada*. Mexico: Ediciones Larousse, S.A. de C.V.
- Tena Zaera, R. (2004). *El Oxido de Zinc: Crecimiento Cristalino Mediante Transporte en Fase Gaseosa y Caracterizacion de Propiedades Fisicas*. España: Servei de Publicacions.
- Unidas, N., & CFC. (2004). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Comercio y Desarrollo Fondo Comun para los Productos Basicos*. Nueva York: Naciones unidas.
- Vaseem, M., Umar, A., & Hahn, Y.-B. (s.f.). Metal Oxide Nanostructures and Their Applications. *ZnO Nanoparticles: Growth, Properties, and Applications*. American Scientific Publishers, Clifornia, E.U.
- Vazquez Nin, G., & Echevarria, O. (2000). *Introducción a la Microscopía Electrónica Aplicada a Las Ciencias Biológicas*. Mexico: Fondo de Cultura Económica.
- Velazquez, A. M. (2009). *Una revolucion en miniatura Nanotecnologia al Servicio de la humanidad*. Valencia: MAite Simon.
- Velez Moreno, L. M. (2008). Materiales industriales: Teoría y aplicaciones. *Instituto Tecnoligico Metropolitano*, 132.
- Verdeja, L., Coque, P. G., & Nosti, M. H. (1992). El Oxido de Zinc: Propiedades y Aplicaciones . *RDM Revista de Minas*, 87-95.
- Wilkinson, J., & Moore, R. (1990). *Cosmetología de Harry*. Madrid: Ediciones Dias de Santos S.A.
- William D. Callister, J. (2007). *Introducción a la Ingeniería de los Materiales 2*. España : Reverté.