

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA



T E S I S

**ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y MORFOLÓGICO DE NANOPARTÍCULAS
DE SnO_2 DOPADAS CON La, Ce, Pr Y Nd**

Que para obtener el grado de

QUÍMICO INDUSTRIAL

P R E S E N T A

DULCE LIZBETH RÍOS ÁLVAREZ

DIRECTOR DE TESIS

Dr. JOSÉ CONSTANTINO GONZÁLEZ CRISOSTOMO

Tijuana, B. C.

Mayo de 2019

Universidad Autónoma de Baja California

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

FOLIO No. 035

Tijuana, B. C., a 12 de abril de 2019

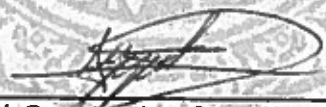
C. Dulce Lizbeth Rios Alvarez
Pasante de Químico Industrial
Presente

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

Opción Tesis

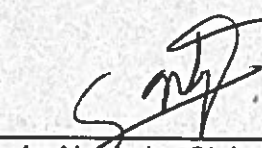
Es propuesto, por el Dr. José Constantino González Crisóstomo quien será el responsable de la calidad del trabajo que usted presente, referido al tema "Análisis microestructural y morfológico de nanopartículas de SnO_2 dopadas con La, Ce, Pr y Nd.", el cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el 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

DEDICATORIA

Gracias a mis padres principalmente que siempre han creído en mí por sobre todas las cosas, por el apoyo moral como económico que siempre me brindaron para hoy lograr lo que siempre he deseado, superarme en esta vida, seguir preparándome académicamente hasta lograr mi objetivo deseado “este es un pequeño paso para mí, pero no menos que los que están por venir”

Gracias a cada uno de mis maestros que me ayudaron a fortalecer mi proceso educativo y gran parte de la persona que soy hoy en día, ya que con todas sus enseñanzas y consejos pude aprender a leer y escribir tanto como aprender un mecanismo de reacción, análisis fisicoquímicos, balances químicos, manejo de equipos de laboratorio, termodinámica, etc.

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 estaño 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** por sus consejos, voto de confianza, sabiduría, enseñanza, entereza y demasiada paciencia me supo guiar en este proyecto tan importante para mí.

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 mi comité de tesis.

ÍNDICE

	Página
Hoja de aprobación.....	ii
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice General.....	v
Lista de abreviaturas y símbolos.....	vii
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	x
Resumen.....	xi
 I. INTRODUCCIÓN.....	 1
I.1 Justificación.....	3
I.2 Hipótesis.....	4
I.3 Impactos.....	4
I.3.1 Impacto científico.....	4
I.3.2 Impacto tecnológico.....	5
I.3.3 Impacto ambiental.....	5
I.3.4 Impacto social.....	5
I.3.5 Impacto económico.....	5
I.4 Objetivos.....	6
I.4.1 Objetivo general.....	6
I.4.2 Objetivos específicos.....	6
I.5 Metas.....	6
 II. GENERALIDADES.....	 7
II.1 Nanotecnología.....	7
II.2 Nanomateriales.....	8
II.2.1 Identificación de un nanomaterial.....	9
II.2.2 Medición de la exposición a los nanomateriales.....	10

II.2.3 Efectos a la salud por los nanomateriales.....	11
II.2.4 Efectos al medio ambiente por los nanomateriales.....	12
II.2.5 Evaluación de riesgos de los nanomateriales.....	12
II.2.6 Tipos de nanomateriales.....	14
II.2.6.1 Nanocompuestos.....	14
II.2.6.2 Nanocapas.....	14
II.2.6.3 Materiales nanoporosos.....	15
II.2.6.4 Basados en metales.....	16
II.2.6.5 Basados en carbono.....	18
II.2.1.5 Nanocompositos.....	25
II.3 Dióxido de estaño (SnO ₂).....	28
II.3.1 Estructura cristalina.....	29
II.3.2 Aplicaciones.....	30
II.4 Métodos de síntesis de nanopartículas de SnO ₂	33
II.4.1 Nanopartículas de SnO ₂ dopadas con diferentes metales.....	34
III. EXPERIMENTAL.....	36
III.1 Disolventes.....	36
III.2 Reactivos.....	36
III.3 Metodología para la síntesis de Sn _(1-x) M _{4/3x} O ₂ (M= Ce, La, Nd y Pr).....	37
III.4 Caracterización de las nanopartículas de Sn _(1-x) M _{4/3x} O ₂ (M= Ce, La, Nd y Pr).....	38
III.4.1 Espectroscopia de infrarrojo por transformadas de Fourier (FT-IR).....	38
III.4.2 Difracción de rayos X (XRD).....	39
III.4.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	41
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
IV.1 Caracterización de Sn _(1-x) M _{4/3x} O ₂ (M= Ce, La, Nd y Pr).....	44
IV.1.1 Difracción de rayos X.....	44
IV.1.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	47
IV.1.3 Espectroscopia de infrarrojo por transformadas de Fourier (FT-IR).....	50
V. CONCLUSIONES.....	55

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. Aplicaciones de la nanotecnología.....	8
2. Nanomateriales.....	9
3. Clasificación de nanomateriales.....	10
4. Principales vías de exposición de nanomateriales.....	11
5. Fuentes comunes de nanopartículas en el medio ambiente.....	12
6. Material nanoporoso.....	15
7. Nanomateriales basados en metales.....	16
8. Soluciones de quantum dots de CdSe de diferentes tamaños.....	17
9. Nanobiotecnología uso de nanopartículas basadas en metales.....	18
10. Formas alotrópicas del carbono.....	19
11. Ilustración de fullereno C ₆₀	21
12. Ilustración de un nanotubo de carbono.....	23
13. Ilustración esquemática del grafeno.....	25
14. Propiedades de un nanocomposito polimérico.....	27
15. SnO ₂ en su forma natural “casiterita”.....	29
16. Estructura cristalina del SnO ₂	30
17. Usos de la nanocatálisis.....	32
18. Tipos de nanosensores y su aplicación en agroindustria.....	33
19. Proceso Sol-gel.....	34
20. Difracción de rayos X.....	40
21. Porta muestras y equipo de difracción de rayos X.....	41
22. Microscopio electrónico de barrido.....	42

23.	Equipo de microscopía electrónica de barrido.....	43
24.	Patrón de difracción de las muestras de SnO ₂ con Ce.....	44
25.	Patrón de difracción de las muestras de SnO ₂ con Nd.....	45
26.	Patrón de difracción de las muestras de SnO ₂ con Pr.....	46
27.	Patrón de difracción de las muestras de SnO ₂ con La.....	47
28.	Imágenes MEB de las nanopartículas de SnO ₂ dopadas con Ce.....	48
29.	Imágenes MEB de las nanopartículas de SnO ₂ dopadas con La.....	48
30.	Imágenes MEB para las nanopartículas de SnO ₂ con Nd a 500 °C.....	49
31.	Imágenes MEB para las nanopartículas de SnO ₂ con Pr a 500° C.....	50
32.	Espectro FT-IR de SnO ₂ -La.....	51
33.	Espectro FT-IR de SnO ₂ -Pr.....	52
34.	Espectro FT-IR de SnO ₂ -Nd.....	53
35.	Espectro FT-IR de SnO ₂ -Ce.....	54

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
1.	Tipos de nanocompuestos.....	14
2.	Reactivos.....	36
3.	Moles utilizados de reactivos.....	37

RESUMEN de la Tesis de Dulce Lizbeth Ríos Álvarez presentada como requisito parcial para la obtención del grado de QUÍMICO INDUSTRIAL, Tijuana, Baja California, México. Mayo de 2019.

ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y MORFOLÓGICO DE NANOPARTÍCULAS DE SnO₂ DOPADAS CON La, Ce, Pr y Nd

Las nanopartículas de óxido de estaño (SnO₂) con lantánidos (Ce, Nd, Pr y La), respectivamente, se prepararon utilizando el método Sol-Gel, el cual es un método muy sencillo basado en la formación de materiales sólidos, como lo es el SnO₂ que es óxido conductor transparente (TCO). Las características de las nanopartículas de SnO₂ se obtuvieron mediante diferentes equipos como lo son difracción de rayos X (DRX) el cual determina por medio de difracción de rayos X la estructura cristalina e identifica las fases del compuesto ya sean cristalinas o amorfas, microscopía electrónica de barrido (SEM) nos arroja imágenes de micrografía electrónica de barrido emisión de campo, lo cual nos indica el tamaño aproximado de las nanopartículas y un análisis morfológico y espectroscopia infrarroja transformada por Fourier (FT-IR) este se emplea en la caracterización de diferentes compuestos para identificar los grupos funcionales presentes en las muestra.

El enfoque principal de la sinterización de nanopartículas de SnO₂ con Ce, La, Nd y Pr, es su caracterización como se menciona anteriormente y así mismo enfocarlo en energía fotovoltaica, estas son energías alternativas con un mejor potencial y amigable con el ambiente.

I. INTRODUCCIÓN

La nanotecnología ha despertado gran interés en diversos campos industriales, como la electrónica, el sector de alimentos, la industria cosmética, la medicina, entre otros. Los desarrollos tecnológicos en estos campos exigen que se realicen mediciones con un enfoque holístico, en el cual se asegure metrológicamente la cadena de suministro a nanoescala, en busca de aumentar la confiabilidad de las mediciones, siendo este el punto de partida para el ajustado control sobre los procesos de transformación industrial.

Teniendo en cuenta el auge de la nanotecnología y su impacto económico, tecnológico y social en el sector industrial y académico, se hace necesario asegurar el resultado de mediciones realizadas a magnitudes fisicoquímicas influyentes en la calidad de un producto a nanoescala.¹

Los nanomateriales son una clase de materiales novedosos, ya sean cerámicos, metálicos, semiconductores, polímeros, o combinaciones de estos, donde sus dimensiones se encuentran entre 1 y 100 nm. La investigación y desarrollo de nuevos materiales constituye una actividad básicamente multidisciplinar que requiere el concurso de la Física, la Química y la Ingeniería, que en la actualidad ha adquirido unos niveles muy elevados de conocimiento tanto científico como tecnológico. Este hecho hace posible el diseño de materiales con composición y propiedades muy específicas que, en su caso, pudieran ser requeridos para el correcto desarrollo de las tecnologías emergentes.²

¹ Jorio, A. Dresselhaus M. S. Nanometrology Links State of the Art Academic Research and Ultimate Industry Needs for Technological Innovation. *MRS Bulletin*. 988-993. **2011**

² Perez-Taborda, J. A. Landázuri, H. R. Jimenénez García, F. N. Caicedo Angulo, J. C. Análisis Estructural y Morfológico de Películas de Nitruro de Aluminio Obtenidas por Deposición de Láser Pulsado. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 20-2. 107-115. **2010**.

Hoy día, la ingeniería de los materiales requiere de una caracterización metrológica exacta, a través de la cual se permitan identificar propiedades como: tipología de superficies, desgaste de material (abrasivo, adhesivo, por fricción, por fatiga o por una combinación de los desgastes mencionados). Por otro lado, para apoyar la nanometrología se han desarrollado herramientas que permiten medir la distribución de los tamaños de los materiales. a través de instrumentos como el láser, sistemas ópticos, espectrometría y microscopía, siendo esta instrumentación el punto de partida y el referente para garantizar la calidad de los productos y control durante el proceso de elaboración de los nanomateriales y nanodispositivos.³

El óxido de estaño (SnO_2) se trata de un material semiconductor tipo n perteneciente al grupo de los *TCO* (óxidos conductores transparentes, por sus siglas en inglés).

El SnO_2 es un compuesto ampliamente utilizado en aplicaciones tecnológicas. El óxido de estaño es un material semiconductor transparente con gran estabilidad química y mecánica. Tiene una fase estable conocida como casiterita, SnO_2 , y otra denominada romarchita, SnO . Los principales yacimientos del mineral de estaño se encuentran en Brasil, Perú y Bolivia. Al igual que el óxido de cinc, el SnO_2 es un semiconductor con banda prohibida ancha y presenta una adecuada combinación de propiedades químicas, electrónicas y ópticas que lo hacen útil como material para sensores de gas, varistores, dispositivos optoelectrónicos, electrodos electrocatalíticos y celdas fotovoltaicas, catalizadores aunque no haya recibido la suficiente atención.

Las propiedades eléctricas de los cerámicos policristalinos de SnO_2 dependen fuertemente de la química de los defectos que ellos contengan, los cuales son determinadas por el método de

³ Chang C. Bukkapatnam, S. Komanduri R. Sensing and Informatics in Laser-Based Nanomanufacturing Processes. En: Nof S.Y., Weiner A.M. & Cheng G.J. Laser and Photonic System. *Design and Integration*. New York. 201-234. **2014**.

síntesis del polvo cerámico, así como la temperatura y la atmósfera utilizada para realizar el tratamiento térmico del compuesto. Diferentes métodos de síntesis han sido utilizados para obtener SnO₂ puro o dopado.⁴

La densidad teórica del óxido de estaño es de 6,95 g.cm⁻³ y bajo ciertas condiciones de sinterización se han obtenido densidades del 98% de la densidad teórica con composiciones que contienen alrededor del 98% en peso de SnO₂.

El dióxido de estaño, SnO₂, cristaliza en una estructura tipo rutilo tetragonal, con valores parámetros de red $a = 474$ pm y $c = 319$ pm. Es un semiconductor con una banda prohibida, “gap” de energía, bastante ancha con la banda de valencia, derivada del orbital 2p del oxígeno, completamente llena y la banda de conducción, derivada del orbital 5s del estaño, vacía; el valor del “gap” a 0 K es de aproximadamente 3,7 eV por lo que el SnO₂ estequiométrico, a temperatura ambiente, sería un buen aislado.⁵

I.1 Justificación

.Los nanomateriales son especiales por muchos motivos, entre los que destaca su tamaño. Son hasta 10 000 veces más pequeños que el grosor de un cabello humano y es su diminuto tamaño el que los hace tan valiosos para todo tipo de usos prácticos. Los nanomateriales llevan años utilizándose con muy diversos fines, pero también se encuentran en la naturaleza como en las nubes de ceniza de los volcanes, en la brisa marina y en el humo de una fogata, la nanotecnología ha permitido a los humanos crear materiales que incluyen nanoformas ya

⁴ Alejandra M. Jorge R. Síntesis SnO₂ altamente reactivo utilizando como precursor etilhexanoato de estaño. *ingeniería e investigación*. V29.1. **2009**

⁵ Jorio, A. & Dresselhaus, M. Nanometrology Sees Progress in Synthesis, Optics and Microscopy. *MRS Bulletin*. 972. **2008**

que tienen ventajas que no se encuentran en sustancias de un tamaño mayor a 100 nanómetros.⁶

El método sol-gel nos permite elaborar nanomateriales. Se lleva a cabo una caracterización del nanomaterial obtenido: Mineralógica (Difracción de Rayos X), Microestructural (Microscopia Electrónica de Barrido), de tal forma que es posible lograr ubicar a nuestros materiales dentro del contexto de investigación científica para su posterior estimación de una aplicación tecnológica o científica.

Durante el proceso de elaboración se implementó dicha metodología utilizando como materia prima $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Esto se llevó a cabo por el método sol-gel, para la caracterización de los materiales se cuenta con el apoyo externo de la Universidad Nacional Autónoma de México. Dicho todo esto para fortalecer e incrementar la investigación de las aplicaciones de estos nanomateriales.

I.2 Hipótesis

La obtención de nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ ($\text{M} = \text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}$ y Pr), se pueden obtener mediante el proceso sol-gel utilizando como materia prima $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

I.3 Impactos

I.3.1 Impacto científico

Sintetizar Nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ ($\text{M} = \text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}$ y Pr) que se encuentren dentro de la escala nanométrica (1-100 nm).

⁶ <https://www.toxicologia.org.ar/importantes-los-nanomateriales/>

I.3.2 Impacto tecnológico

Promover nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr) para dirigir su aplicación como películas delgadas en celdas solares.

I.3.3 Impacto ambiental

El uso de nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr) tendrá como resultado una baja resistividad y alta transmitancia de las películas de SnO_2 dopado para su aplicación en celdas solares, ya que es una energía “sana” para el ecosistema.

I.3.4 Impacto social

Con el uso de nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr) se mejorarán las condiciones de vida de los habitantes, con la reducción de afecciones respiratorias causados por la quema de combustibles fósiles utilizados usualmente en la producción de electricidad.

I.3.5 Impacto económico

La aplicación de Nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr) en celdas solares. El mantenimiento de los paneles solares es realmente bajo. Con una limpieza al año es suficiente, además, cuentan con tiempo de vida útil de 25-40 años, convirtiendo a este tipo de productos en la mejor alternativa a largo plazo.

I.4 Objetivos

I.4.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología para la síntesis de Nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr) por el proceso Sol-Gel, caracterizar las nanopartículas obtenidas por espectroscopia de infrarrojo, difracción de rayos-X y microscopia electrónica de barrido.

I.4.2 Objetivos específicos

1. Sintetizar las Nanopartículas $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr).
- 2.- Utilizar el método Sol-gel sintetizar las nanopartículas.
3. Evaluar la morfología en cuanto a su estructura, composición y tamaño de partícula y/o cristal de los materiales sinterizados por Microscopia Electrónica de Barrido
4. Identificar las fases cristalinas de las variedades de materiales sinterizados por medio de Difracción de Rayos X (XRD).

I.5 Metas

- Obtener las Nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr).
- Presentar el trabajo de investigación en un congreso nacional.
- Obtener el grado de Químico Industrial.

II GENERALIDADES

II.1 Nanotecnología

“Nanotecnología” se usó por primera vez en el año de 1974 por el científico japonés Norio Tamiguchi. Todo comenzó cuando Richard Feynman Premio Nobel de Física en 1965, seis años después diera su célebre charla inaugural del congreso anual de la Sociedad Americana de Física, el 29 de diciembre de 1959. Con el sugestivo título de “There’s Plenty of Room at the Bottom”, Feynman hizo una invitación a observar la infinidad de posibilidades que se abrirían para la elaboración de nuevos materiales si existiesen las herramientas necesarias para manipular, átomo a átomo, los componentes de la materia. La nanotecnología corresponde al siguiente paso en la evolución tecnológica, una nueva era con imponentes cambios que transformarán la sociedad. La nanotecnología ya no puede considerarse como una simple visión de futuro, tal y como lo ha sido hasta finales del siglo XX.⁷

La nanotecnología como ciencia empezó en 1981, con el descubrimiento del Microscopio de Efecto Túnel por parte de Heinrich Rohrer y Gerd Binnig, dos científicos del laboratorio IBM de Zúrich, que permite estudiar y manipular las moléculas a escala atómica, descubrimiento por el cual recibieron el Premio Nobel de Física en 1986.⁸

Nanotecnología, es el estudio y desarrollo de sistemas en escala nanométrica, “nano” es un prefijo del Sistema Internacional de Unidades que viene del griego νᾶνος que significa enano, y corresponde a un factor 10^9 , la nanotecnología estudia la materia desde un nivel de resolución nanométrico, entre 1 y 100 Nanómetros aproximadamente, la Nanotecnología promete soluciones a múltiples problemas que enfrenta actualmente la humanidad, como los

⁷ Reyes Alvarado.A. Pedraza Camarg. G. Prieto, P. Nanomateriale. Qou Vais.Una agenda Prospectiva Para el Centro de Excelencia de Nuevos Materiales. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* XXXII. 123. **2008**

⁸http://www.euroresidentes.com/futuro/nanotecnologia/historia_nanotecnologia.htm

ambientales, energéticos, de salud llamada nanomedicina, y muchos otros, sin embargo estas nuevas tecnologías pueden conllevar a riesgos y peligros si son mal utilizados.⁹



Figura 1. Aplicaciones de la nanotecnología (George, 2015)

II.2 Nanomateriales

Estos materiales nanométricos tienen en al menos una de sus dimensiones una escala de 1-100 nm. Tienen una gran utilidad en el área de salud, cosmética, electrónica, textiles, ambiental, alimentos, etc. Los nanomateriales deben tener un especial cuidado al ser manejados ya que el tamaño de la partícula es tan pequeño que entra directo a los pulmones, como también infieren sus propiedades físicas y químicas en factibles riesgos medioambientales, cada nanomaterial necesita su propia valoración de riesgo posibles a exposiciones ya que no todos actúan igual o contienen las mismas propiedades.

⁹<https://www.nanotecnologia.cl/que-es-nanotecnologia/>

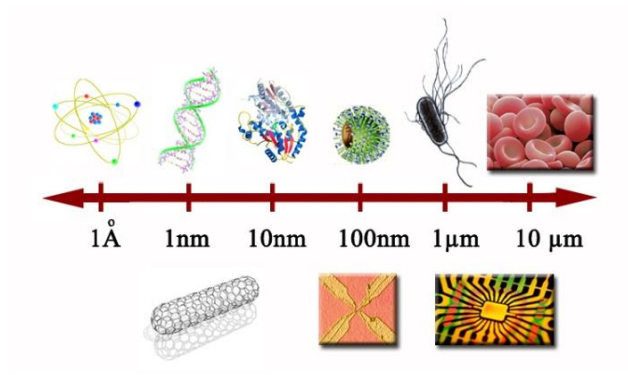


Figura 2. Nanomateriales. (MatsOlof, 19 January 2009)

II.2.1 Identificación de un nanomaterial

Se puede identificar a los nanomateriales por sus propiedades físicas como lo son forma, tamaño, distancia entre altura y anchura, superficie específica, si se adhieren una a otras, textura superficial, capacidad de disolver, etc. También se pueden identificar por sus propiedades químicas por ejemplo pureza, química de la superficie, estado de la materia, estructura molecular, composición, impurezas, atracción de moléculas ya sea de agua o aceites.

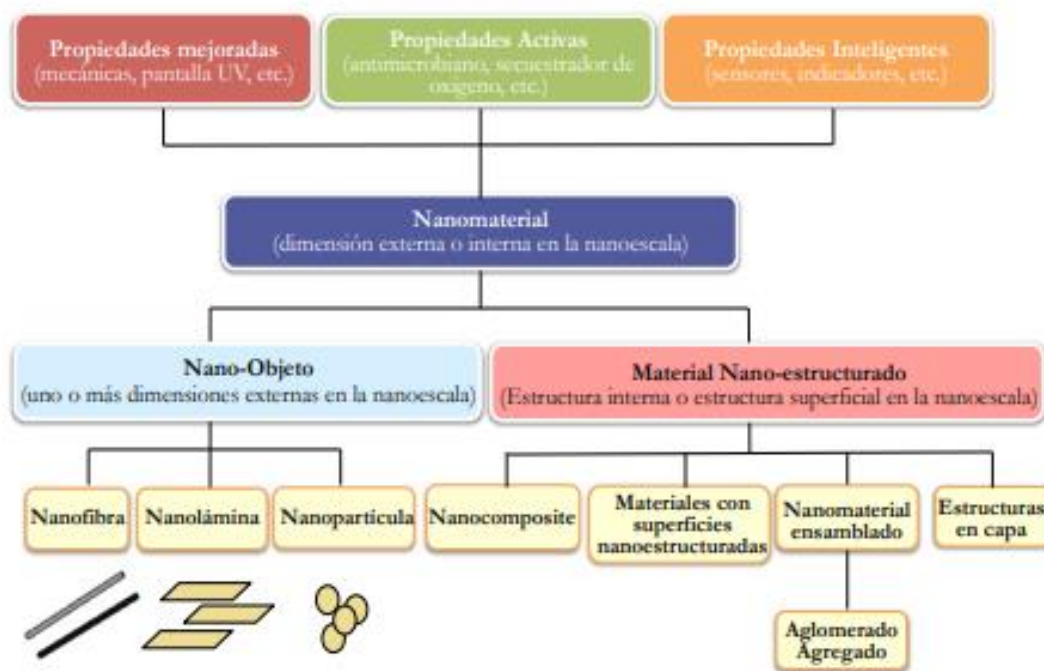


Figura 3. Clasificación de nanomateriales (adaptado de ISO TS27687 2008)

II.2.2 Medición de la exposición a los nanomateriales

Para medir la exposición de estos nanomateriales van de la mano con el carácter de exposición, unos de las tácticas más utilizadas son para las partículas que se encuentran en el aire. Las técnicas actuales para evaluar la exposición a nanopartículas son aptas para el control personal o de espacios, para un uso continuado o puntual, y para la caracterización básica de muestras. Sin embargo, los datos de las exposiciones aéreas son escasos y son pocos los estudios llevados a cabo fuera del lugar de trabajo, si es que los hay.

II.2.3 Efectos a la salud por los nanomateriales

Interacciones entre nanopartículas fabricadas con sistemas biológicos así como de efectos en la salud. En sistemas experimentales de laboratorio pueden propiciar la formación de cúmulos proteínicos fibrosos que pueden ser similares a los que aparecen en algunas enfermedades, incluidas enfermedades cerebrales. Las partículas aéreas pueden provocar efectos en los pulmones, pero también en el corazón, provocar daños genéticos, ya sea directamente o por inflamación y en la circulación sanguínea, similares a los ya conocidos provocados por partículas de polución aérea. El efecto dependerá de la suerte que corran las nanopartículas en el cuerpo. Tan solo pequeñas dosis de estas nanopartículas escapan de los pulmones o del intestino, pero una exposición prolongada puede implicar que un gran número de ellas se distribuyan por el cuerpo. La mayoría permanecen retenidas en el hígado o el bazo, pero algunas parece que llegan a todos los tejidos y órganos. También es posible que penetren en el cerebro a través de las membranas nasales.

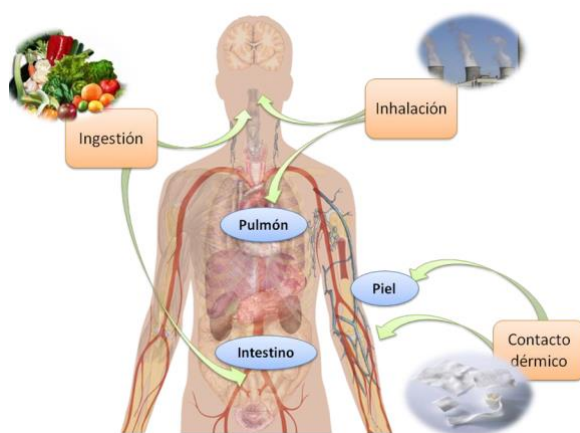


Figura 4. Principales vías de exposición de nanomateriales((INSHT), 2015)

II.2.4 Efectos al medio ambiente por los nanomateriales

Al igual que otros contaminantes, pueden pasar de un organismo a otro y posiblemente ir subiendo en la cadena trófica. Debido a su diversidad, los nanomateriales tienen una gran variedad de efectos. Algunos matan bacterias o virus. Los experimentos han demostrado posibles efectos dañinos en invertebrados y peces, incluidos efectos en el comportamiento, la reproducción y el desarrollo.



Figura 5. Fuentes comunes de nanopartículas en el medio ambiente (Smita et al, 2012)

II.2.5 Evaluación de riesgos de los nanomateriales

Incluye el desarrollo de métodos para medir la exposición e identificar peligros. Los mayores riesgos potenciales proceden de las nanopartículas libres e insolubles, ya estén dispersas en un líquido o en forma de polvo. La evaluación de riesgos requiere un examen detallado de las propiedades, incluidas:

- Tamaño de partícula
- Área de superficie
- Estabilidad
- Propiedades de superficie
- Solubilidad
- Reactividad química

Las comparaciones con peligros existentes conocidos pueden contribuir a la evaluación de riesgos. Entre otras, aquellas con partículas finas transportadas por el aire, o con las fibras de asbesto. El enfoque recomendado para evaluar los riesgos de los nanomateriales sigue siendo la evaluación de riesgos de cuatro etapas propuesta por el CCRSERI en 2007. Un programa de la OCDE está elaborando informes sobre la identificación de peligros de 14 nanomateriales comunes. Estos incluirán propiedades físicas y químicas, efectos medioambientales, toxicología en mamíferos y seguridad del material. Esta incluirá la estimación de la exposición en el uso normal, el abuso, el desecho y reciclaje de productos conteniendo nanomateriales.¹⁰

¹⁰ Prof. Jim Bridges. Dr. Wim De Jong. Dr. Thomas Jung. Prof. Konrad Rydzynski. *European Commission. Risk Assessment of Products of Nanotechnologies*. 33-50. **2009**

II.2.6 Tipos de nanomateriales

II.2.6.1 Nanocompuestos

Un nanomaterial compuesto o nanocompuesto es un material compuesto o multifásico donde una de las fases tiene una, dos o tres dimensiones de menos de 100 nanómetros. En el más amplio sentido de esta definición, se pueden incluir medios porosos, coloides, geles y copolímeros; pero es más común la combinación de un sólido a granel que actúa como matriz y una fase nano-dimensional dispersada en la matriz. Las propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, ópticas, electroquímicas, catalíticas, etc. del nanomaterial compuesto se diferencian notablemente de los materiales componentes por separado.

Tabla 1. Tipos de nanocompuestos (celemin, 2014)

Tipos de nanocompuestos	
CLASE	EJEMPLO
METAL	Fe-Cr/Al ₂ O ₃ , Ni/Al ₂ O ₃ , Co/Cr, Fe/MgO, Al/CNT, Mg/CNT.
CERAMICO	Al ₂ O ₃ /SiO ₂ , SiO ₂ /Ni, Al ₂ O ₃ /TiO ₂ , AlO ₃ /SiC, Al ₂ O ₃ /CNT.
POLIMERO	Termo plásticos/termoestables, polímero/silicatos en capas, poliéster/TiO ₂ , polímero/CNT, polímero/doble capa de hidróxidos.

II.2.6.2 Nanocapas:

Existe una amplia gama de nanodispersiones en sol-gel pre-diseñadas para cubrir necesidades concretas, llamadas nanocapas, que pueden ser aplicadas fácilmente en spray para conseguir superficies activas con nuevas capacidades. Las nanocapas pueden ser utilizadas en vidrios, plásticos, metales, maderas, textiles, fibras, cerámicos, piedras y mármoles, Cuando se

aplican ofrecen propiedades innovadoras a las superficies sobre las que se depositan, para hacer que sean autolimpiables, descontaminantes, con foto protección ultravioleta, hidrófobas ó hidrófilas, oleofobas, anti-bacterianas y luminiscentes.

II.2.6.3 Materiales nanoporosos:

Los materiales nanoporosos (figura 6) vendrían a ser como esponjas, pero con poros nanométricos, materiales en donde los poros ocupan una gran fracción de su volumen total y presentan una significativa cantidad de superficie por gramo. Un material tan poroso en un área lo tan pequeña posible sirve para, por un lado, porque muchas reacciones ocurren más rápido sobre determinadas superficies, y por otro, porque podemos rellenar los poros con lo que queramos: polímeros, metales o diferentes tipos de moléculas lo que lleva a descubrir peculiares comportamientos del material. Esta posibilidad de combinación de materiales abre las puertas a una variedad asombrosa de aplicaciones.

Aplicaciones: Catalizadores para reducir la emisión de contaminantes, aislantes, en aplicaciones medioambientales como purificación de aguas, eliminación de contaminantes, atrapadas y eliminación de metales pesados, células solares orgánicas, supercondensadores para almacenar energía, almacenamiento de gases.

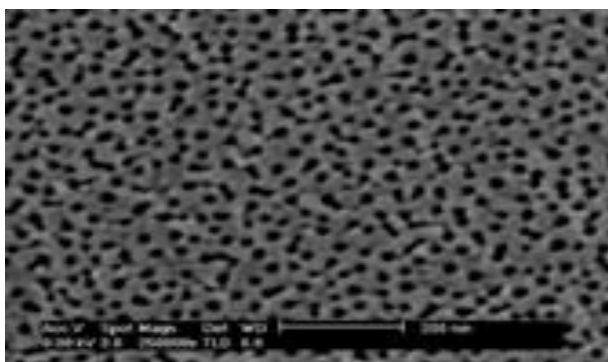


Figura 6. Material nanoporoso(ÁNGELES, 2012)

II.2.6.4 Nanomateriales basado en metales

Estos nanomateriales incluyen puntos cuánticos, nanopartículas de oro, plata y óxidos metálicos como el dióxido de titanio.



Figura 7. Nanomateriales basados en metales
(castillo, INTRODUCCIÓN A LOS NANOMATERIALES, 2012)

Puntos cuánticos

Los robots de tamaño microscópico que patrullan por el torrente sanguíneo — llevando moléculas de fármacos o detectando virus y células cancerosas se acerca a la realidad con los puntos cuánticos o 'átomos artificiales'. Son nanoestructuras creadas en el laboratorio que ahora empiezan a llegar al mercado. Los puntos cuánticos o átomos artificiales son nanoestructuras creadas en el laboratorio que miden millonésimas de milímetro. Inventadas hace casi dos décadas, tienen un sinfín de aplicaciones en áreas tan variadas como las telecomunicaciones, la computación cuántica, la seguridad o la biomedicina. Los puntos cuánticos están hechos de una variedad de diferentes componentes, tales como cadmio selenio. La firma Quantum Dots Corp controla un número de patentes para la producción de puntos cuánticos. El punto cuántico es llamado en ocasiones transistor de un solo electrón, bit cuántico; se podría definir como una partícula de materia tan pequeña que la adición de un único electrón produce cambios en sus propiedades. El atributo cuántico sirve para recordar que el comportamiento del electrón en tales estructuras debe ser descrito en términos

de la teoría cuántica. Estructuras hechas de unos pocos cientos de átomos también son puntos cuánticos, por sus características se trabaja a escala manométrica. La presencia de un único electrón en tales estructuras puede ser utilizada para almacenar información. Lo especial es que, en ellos, los electrones están obligados a permanecer atrapados, confinados en las tres dimensiones, y eso genera curiosos fenómenos cuánticos. En concreto, los electrones se disponen en el punto como en un único átomo, de ahí el apodo átomos artificiales. Y de ahí, también, el que la materia estructurada en puntos cuánticos tenga propiedades que pueden ser controladas a voluntad. Una de ellas es que, al ser iluminados, los puntos cuánticos reemiten luz en una longitud de onda muy específica y que depende del tamaño del punto cuántico. Cuanto más pequeños sean los puntos, menor es la longitud de onda y más acusadas las propiedades cuánticas de la luz que emiten. El resultado es que se puede diseñar de antemano un punto cuántico para la longitud de onda que se desee.



Figura 8. Soluciones de quantum dots de CdSe de diferentes tamaños((INSHT), 2015)

Las nanopartículas son entidades, generalmente de forma esférica, con dimensiones entre 1 y 100 nm. La obtención de nanopartículas metálicas estables en solución ha sido un área muy activa de investigación. Las más comúnmente sintetizadas y estudiadas son las de metales nobles: oro, plata, platino y paladio fundamentalmente. Las nanopartículas de metales nobles

y, más específicamente, las nanopartículas de oro (AuNPs), exhiben unas excelentes propiedades físicas, químicas y biológicas, que son intrínsecas a su «tamaño nanométrico». Destacan especialmente sus peculiares e inesperadas propiedades fototérmicas, por las que al ser activadas en presencia de luz láser, desprenden calor, actuando como auténticos «nano-calefactores». La preparación de nanopartículas metálicas cobró recientemente gran interés debido a las particularidades de sus propiedades ópticas, magnéticas, eléctricas y catalíticas. Muchas de estas propiedades y sus posibles aplicaciones son fuertemente influenciadas por el tamaño y la forma de las mismas: esferas, barras, discos, prismas, etc. Es por eso que en los últimos tiempos se desarrollaron distintas técnicas de preparación de nanopartículas tendientes a controlar las características morfológicas del producto obtenido; estas incluyen métodos físicos y químico.

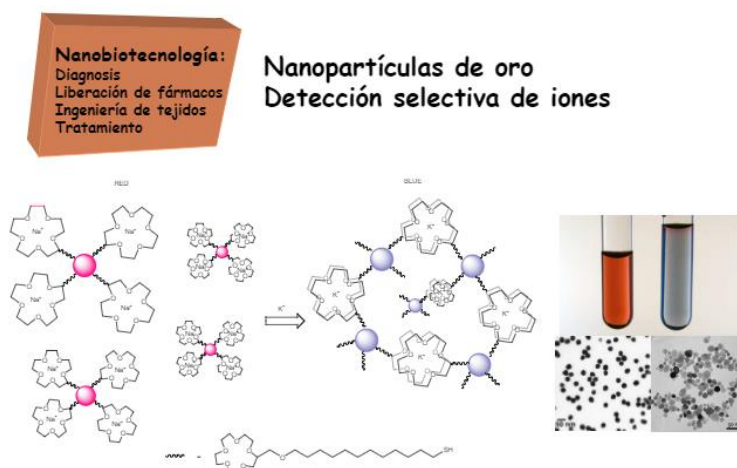


Figura 9. Nanobioteconología uso de nanopartículas basadas en metales. (Monge, 2017)

II.2.6.5 Basados en carbono

Estos nanomateriales están compuestos mayoritariamente por carbono y suelen adoptar formas como esferas huecas, elipsoides o tubos. Los nanomateriales de carbono con forma

elipsoidal o esférica se conocen como fullerenos, mientras que los cilíndricos reciben el nombre de nanotubos. Estas partículas tienen muchas aplicaciones posibles, incluido el desarrollo de recubrimientos y películas mejoradas, materiales más ligeros y resistentes y diversas aplicaciones en el campo de la electrónica.

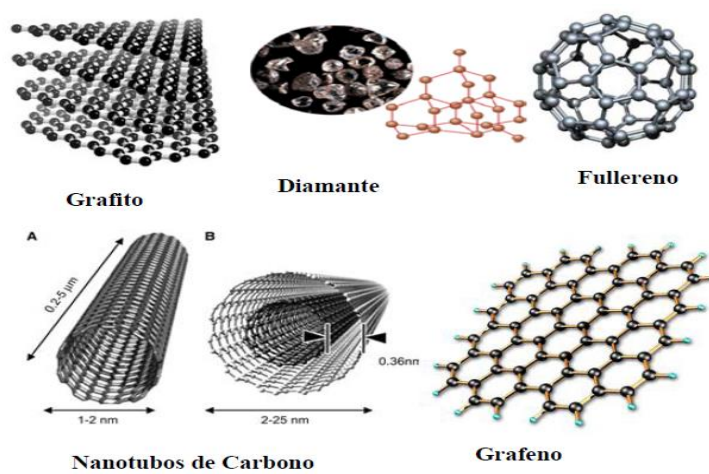


Figura 10. Formas alotrópicas del carbono (Ruiz, 2017)

Fullerenos

Los fullerenos son la tercera forma más estable del carbono, tras el diamante y el grafito. El primer fullereno se descubrió en 1985 y se han vuelto populares entre los químicos, tanto por su belleza estructural como por su versatilidad para la síntesis de nuevos compuestos, ya que se presentan en forma de esferas, elipsoides o cilindros. Los fullerenos esféricos reciben a menudo el nombre de buckyesferas y los cilíndricos el de buckytubos o nanotubos. Reciben este nombre de Buckminster Fuller, que empleó con éxito la cúpula geodésica en la arquitectura. El hallazgo casual del fullereno se produjo al irradiar un disco de grafito con un

láser y mezclar el vapor de carbono resultante mediante una corriente de helio. Cuando se examinó el residuo cristalizado, se encontraron moléculas constituidas por 60 átomos de carbono. Intuyendo que estas moléculas tenían una forma semejante a la cúpula geodésica construida con motivo de una Exposición Universal en Montreal en 1967 por el arquitecto Buckminster Fuller, fueron nombradas como Buckminsterfullerenos o más comúnmente como fullerenos. El fullereno es un reactivo habitual en muchas reacciones orgánicas como por ejemplo en la reacción de Bingel, descubierta en 1993

Propiedades

Los fullerenos no son muy reactivos debido a la estabilidad de los enlaces tipo grafito, y son también muy poco solubles en la mayoría de disolventes. Entre los disolventes comunes para los fullerenos se incluyen el tolueno y el disulfuro de carbono. Las disoluciones de buckminsterfullereno puro tienen un color púrpura intenso. El fullereno es la única forma alotrópica del carbono que puede ser disuelta. Los investigadores han podido aumentar su reactividad uniendo grupos activos a las superficies de los fullerenos. El buckminsterfullereno no presenta "superaromaticidad", es decir, los electrones de los anillos hexagonales no pueden deslocalizar en la molécula entera.

El Buckminsterfullereno o fullereno de C₆₀. Se trata de un fullereno formado por 60 átomos de carbono (C₆₀), en el que ninguno de los pentágonos que lo componen comparten un borde; si los pentágonos tienen una arista en común, la estructura estará desestabilizada. La estructura de C₆₀ es la de una figura geométrica truncada y se asemeja a un balón de fútbol, constituido por 20 hexágonos y 12 pentágonos, con un átomo de carbono en cada una de las esquinas de los hexágonos y un enlace a lo largo de cada arista.

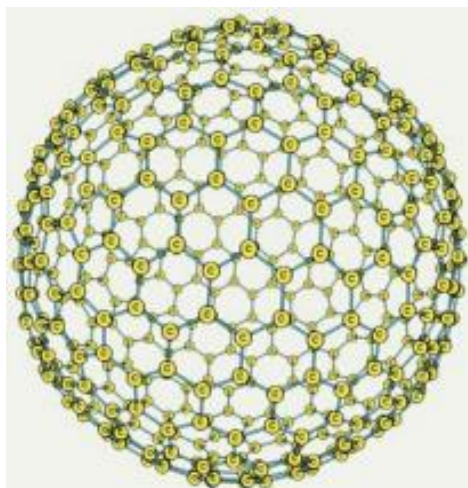


Figura 11. Ilustración de fullereno C60 ((INSHT), 2015)

El **C36** es inestable para empezar, de ahí su apodo de "stickyball". Debido a su capacidad para enlazarse con otros átomos, la molécula C36 podría producir nuevas sustancias estables por medio de su inusual estructura, resultando en útiles propiedades ópticas y electrónicas. Entre las propiedades alcanzables puede ser la superconductividad. Zetl opino que en contraste con la molécula C60 la C36 en teoría sugiere que la molécula más pequeña ", debe ser aún mejor en un superconductor de temperatura." Zetl también especuló que C36 podría "ser interesante por razones médicas." Por ejemplo, podría ser capaz de extraer toxinas del torrente sanguíneo. Los Buckyballs son buenos en robo de compuestos llamados "radicales libres" que impiden la capacidad de auto-regeneración en células.

Aplicaciones tecnológicas: Lubricantes, Superconductores, Imágenes Médicas, Catálisis química, Dispositivos de Grabación Ventajas de la molécula C36, Mayor reactividad química que la molécula C60 y Altas temperaturas de transición de superconductividad.

Nanotubos de carbono

En 1889 el primer antecedente descrito sobre la producción de filamentos carbonosos a partir de vapor se debe a Hugues y Chambers, que patentaron en EE.UU un procedimiento para la fabricación de filamentos de carbono utilizando como gases precursores hidrógeno y metano en un crisol de hierro. En 1952 y L. V. Radushkevich y V. M. Lukyanovich, publicaron imágenes claras de 50 tubos de carbono de diámetro nanométrico en el diario oficial de química física en la Unión Soviética. Los nanotubos de carbono son una forma alotrópica del carbono, como el diamante, el grafito o los fullerenos. Su estructura puede considerarse procedente de una lámina de grafito enrollada sobre sí misma. Dependiendo del grado de enrollamiento y la manera como se conforma la lámina original, el resultado puede llevar a nanotubos de distinto diámetro y geometría interna. Los nanotubos conformados como si las esquinas de un folio se uniesen por sus extremos formando un canuto, se denominan nanotubos monocapa, o SWNTs. Existen también nanotubos cuya estructura se asemeja a la de una serie de tubos concéntricos, incluidos unos dentro de otros a modo de "muñecas matriuska" y lógicamente de grosores crecientes desde el centro a la periferia. Estos últimos son los nanotubos multicapa o MWNTs. Se conocen derivados en los que el tubo está cerrado por media esfera de fullereno, y otros que no están cerrados. Los nanotubos están siendo estudiados activamente, como los fullerenos por su interés fundamental para la química y por sus aplicaciones tecnológicas. Es, por ejemplo, la primera sustancia conocida por la humanidad capaz de sustentar indefinidamente su propio peso, una condición necesaria para la construcción de un ascensor espacial.

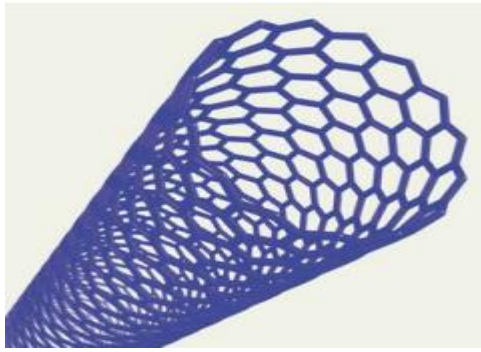


Figura 12. Ilustración de un nanotubo de carbono ((INSHT) I. N., 2015)

Aplicaciones Estructurales Debido a las propiedades mecánicas de los tubos de carbono, se han propuesto interesantes aplicaciones tan variadas como:

- Ropa.
- Chaquetas militares: que sean muy resistentes y a la vez informen del estado del individuo que las lleva.
- Hormigón: Para incrementar la resistencia a la tensión.
- Polietileno: Para aumentar su elasticidad.
- Equipamiento deportivo: Para aumentar su fuerza y disminuir su peso.
- Volantes de inercia
- Puentes

Grafeno

En el año 2004 se descubrió el grafeno, hace ocho años se aisló por primera vez. Del grafito, el mismo de las minas del lápiz de su mesa, salió casi por casualidad una fina lámina con la

ayuda de una cinta aislante. Sin embargo, la ciencia no entiende de casualidades, así que el material se caracterizó, se vieron sus propiedades y aplicaciones. Fibra óptica y computadoras decenas de veces más rápidas, paneles solares o sensores de todo tipo son algunas de las posibilidades que ofrece de este material fino, resistente, flexible, transparente y superconductor por citar algunos de sus prodigios. uno de esos descubrimientos que pocas veces suceden en la ciencia, dicen algunos. Sus vastas propiedades prometen dejar una nueva generación de dispositivos electrónicos decenas de veces más rápidas, pequeñas o incluso plegables. Es un material bidimensional que cuenta con sólo un átomo de grosor. Su estructura laminar plana de grafito está compuesta de átomos de carbono que forman una red hexagonal. Su apariencia puede parecer frágil y delicada ya que a simple vista el grafeno es como una tela transparente y flexible, se trata de un material extremadamente resistente que además sirve de conductor de electricidad.

Propiedades:

- autoenfriamiento.
- Alta conductividad térmica y eléctrica.
- Alta elasticidad y dureza.
- Resistencia (200 veces mayor que la del acero).
- El grafeno puede reaccionar químicamente con otras sustancias para formar compuestos con diferentes propiedades, lo que dota a este material de gran potencial de desarrollo.
- Soporta la radiación ionizante.
- Es muy ligero, como la fibra de carbono, pero más flexible.
- Menor efecto Joule; se calienta menos al conducir los electrones.

- Consume menos electricidad para una misma tarea que el silicio.
- Genera electricidad al ser alcanzado por la luz.

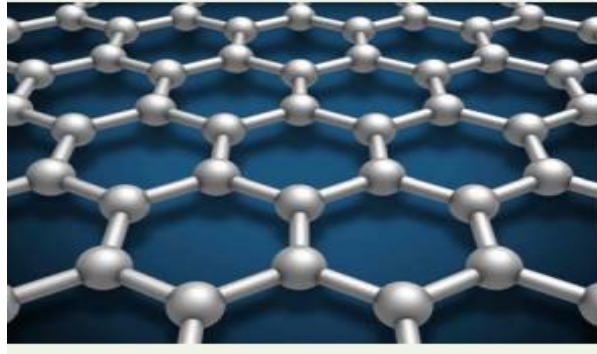


Figura 13. Ilustración esquemática del grafeno ((INSHT) I. N., 2015)

II. 2.1.5 Nanocompositos

Los nanocompositos son materiales compuestos en los que al menos una dimensión de las partículas dispersadas en la matriz polimérica tiene dimensiones del orden del nanómetro (10^{-9} m). Las dimensiones tan pequeñas de las partículas conducen a una elevada superficie interfacial. Los nanocompositos: son materiales formados por nanofases; o sea, con una microestructura compuesta por granos/cristalitos o partículas con dimensiones nanométricas. Su definición puede ser ampliada para abarcar la larga variedad de sistemas

1D (unidimensional)

2D (bidimensional)

3D (tridimensional)

Y materiales amorfos, que integran componentes distintos mezclados a escala nanométrica.

El tipo general de materiales orgánicos / inorgánicos de nanocompositos es una área de investigación de rápido crecimiento. Las propiedades de los materiales nanocompositos dependen no solo de las propiedades de sus patrones individuales sino también de su morfología y de sus características interfaciales.

Los nanocompositos de pueden clasificar de la siguiente manera:

1. Nanocompositos de matriz cerámica
2. Nanocompositos de matriz metálica
3. Nanocompositos de matriz polímero

Nanocompositos de matriz cerámica

En este tipo de compuestos, la mayor parte del volumen está ocupado por una cerámico, un compuesto del grupo de los óxidos, nitruros, boruros y siliciuros etc. En la mayoría de los casos, los nanocompositos de matriz cerámica incluyen un metal como el segundo componente. Idealmente ambos componentes, el metálico y la cerámica, finamente están mutuamente dispersos a fin de obtener las propiedades nanoscópicas particulares. Los nanocompositos obtenidos a partir de estas combinaciones demostraron una mejora de sus propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas, así como tribológicas, resistencia a la corrosión y otras propiedades protectoras. El diagrama de fase binario de la mezcla metal cerámica debe ser considerado en el diseño de nanocompositos y deben tomarse medidas para evitar una reacción química entre ambos componentes. También debe considerarse que el componente metálico puede reaccionar fácilmente con la cerámica y con ello perder su carácter metálico. Esto no es una restricción fácilmente observable, ya que la preparación del componente cerámico generalmente requiere temperaturas elevadas de proceso. Por lo tanto, la medida más segura es elegir cuidadosamente las fases no miscibles de metales y cerámicas.

Nanocompositos de matriz polimerica

Este tema se centrará en los nanocompositos de matriz polimérica y partículas inorgánicas. Dentro de este grupo existen varios tipos de nanocompositos, dependiendo de cuantas dimensiones de las partículas se encuentran en el rango nanométrico:

- a) Si las tres dimensiones son del orden del nanómetro, se tienen nanopartículas.
- b) Dos dimensiones en la escala nanométrica y la tercera mayor: nanotubos.
- c) Una sola dimensión en el rango nanométrico: nanoláminas.

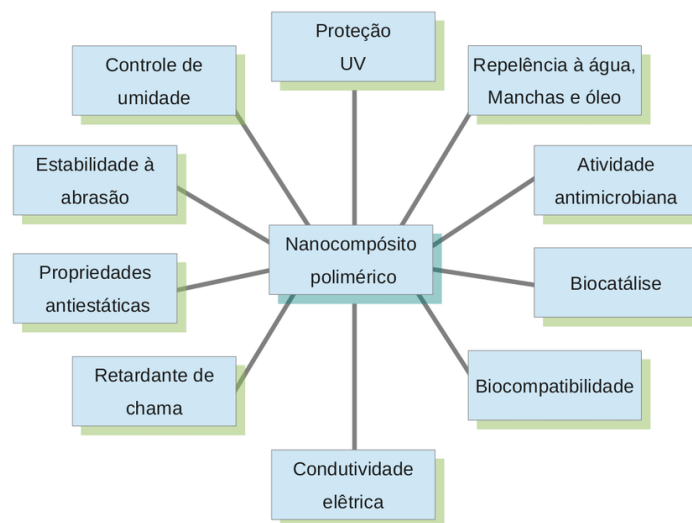


Figura 14. Propiedades de un nanocomposito polimerico (Valencia G. , 2017)

Nanocompositos de matriz metalica

Los nanocompositos de matriz metálica también se pueden definir como compuestos reforzados de matriz metálica. Este tipo de compuestos se puede clasificar como materiales reforzados continuo y no continuo. Uno de los nanocompositos más importante son los compositos de matriz metálica reforzados con nanotubos de carbono de donde están surgiendo nuevos materiales que se están desarrollando para tomar ventaja de la alta

resistencia y alta conductividad eléctrica de los nanotubos de carbono. Es fundamental para la realización de CNT-MMC con propiedades óptimas son el desarrollo de técnicas sintéticas que sean:

- a) Económicamente producible
- b) Proporcionen una dispersión homogénea de nanotubos en la matriz metálica
- c) Den lugar a una fuerte adhesión interfacial entre la matriz metálica y los nanotubos de carbono. Adicionalmente, a los compuestos de matriz metálica con nanotubos de carbono, los materiales compuestos de matriz metálica reforzados con nitruro de boro o nitruro de carbono son nuevas áreas de investigación de nanocompositos de matriz metálica.¹¹

II.3 Dióxido de estaño (SnO₂)

El óxido de estaño (SnO₂) es un material semiconductor transparente con gran estabilidad química y mecánica. Tiene una fase estable conocida como casiterita, SnO₂, y otra denominada romarchita, SnO. Los principales yacimientos del mineral de estaño se encuentran en Brasil, Perú y Bolivia. El SnO₂ es un semiconductor con banda prohibida ancha y presenta una adecuada combinación de propiedades químicas, electrónicas y ópticas que lo hacen útil como material para sensores de gas, varistores, dispositivos optoelectrónicos, electrodos electrocatalíticos y celdas fotovoltaicas, sensor de gas, varistor y de humedad.

Las propiedades eléctricas de los cerámicos policristalinos de SnO₂ dependen fuertemente de la química de los defectos que ellos contengan, los cuales son determinadas por el método de

¹¹ Diaz del Castillo Rodriguez, F. Introduccion a los Nanomateriales. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan. p. 68. **2012**.

síntesis del polvo cerámico, así como la temperatura y la atmósfera utilizada para realizar el tratamiento térmico del compuesto.¹²

Este es un compuesto el cual su estructura es en forma de tetragonal, lo cual es mejor entendible como estructura de capas. Como lo que se necesita en este caso es un material semiconductor se dopara con lantánidos considerados metales para una mejor conducción.¹³



Figura 15. SnO₂ en su forma natural “casiterita” (EcuRed, 2013)

II.3.1 Estructura cristalina

El SnO₂ sólo tiene una fase estable, la casiterita, ésta cristaliza en una estructura tetragonal y su grupo espacial es el P42/mnm. La celda unitaria contiene seis átomos en total, dos de estaño y cuatro de oxígeno. En la figura18 se muestra la estructura cristalina del SnO₂, donde el estaño se sitúa en el centro de la celda unitaria y a su alrededor se distribuyen seis átomos de oxígeno. El estaño se localiza en (0,0,0) y ($\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$) y el oxígeno en $\pm(u, u, 0)$ y $\pm(\frac{1}{2}+u, \frac{1}{2}-$

¹² Alejandra-M.Jorge-E.Síntesis SnO₂ altamente reactivo utilizado como precursor etilhexanoato de estaño. *Ing.inv.* Volumen 29.1. **2009**

¹³ A. Montenegro N. Cerón; M. Ponce. M.S. Castro J.A. Varela J.E. Rodríguez, Respuesta eléctrica de películas gruesas del sistema SnO₂-TiO₂ conformadas con polvos cerámicos obtenidos a través del método pechini. *Bol. Soc. Esp. Ceram.* 46. 316-321. **2007**

$u, 1/2$), donde el parámetro u toma el valor de 0.307. Los parámetros de red son: $a = b = 4.7365$ Å y $c = 3.2010$ Å [xxx].¹⁴

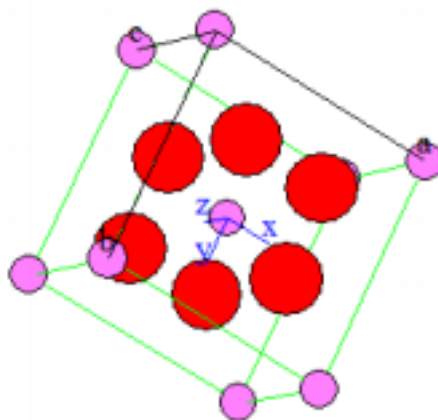


Figura 16. Estructura cristalina del SnO₂ (V, 2016)

II.3.2 Aplicaciones

El desarrollo en el campo de las nanopartículas cerámicas ha tenido gran efecto en varias áreas de investigación entre las que se destaca la fisicoquímica de las superficies, la adsorción destructiva. El SnO₂ es un óxido de gran interés tecnológico en el cual destacan sus aplicaciones más comunes como lo son conductor a alta temperatura, electrodo transparente para películas delgadas, sensor de gas, sensores de humedad, celdas fotovoltaicas, pilas de litio varistor, en el área de medicina, almacenamiento de datos magnéticos, en imágenes por resonancia magnética, dispositivos optoelectrónicos, resistencias, realización de pantallas de cristal líquido, recubrimientos que ahorran energía, recubrimientos antiestáticos y catalizador, aunque no haya recibido la suficiente atención en este último campo.¹⁵

¹⁴ Felipe.V.Síntesis y Estudio del Óxido de Estaño Micro y Nanoestructurados;tesis grado doctorado.centro de investigación de .ateriles avanzados.25.2016

¹⁵ Adolfo M.Jose A.Jorge R.síntesis de nanoparticulas de SnO₂y su uso en la conformación de varistores. Facultad de ingeniería.grupo CYTEMAC. Departamento de física/FACENED.Universidad del cauca.34.2006

Medicina: En el campo de la medicina, la nanotecnología tiene aplicaciones en la administración de fármacos.¹⁶ El uso de nanopartículas de SnO₂ en medicina es una de las direcciones que la nanotecnología está tomando en este tiempo. .¹⁷

Energía Renovable: Tal vez el mayor desafío para la sociedad y la humanidad es la forma de satisfacer nuestra creciente demanda de seguridad energética. Aunque la principal fuente de energía en la Tierra se deriva del sol, los pasos fundamentales para la conversión de energía, tales como la transferencia de carga, las reacciones químicas, la transformación de estructuras moleculares, etc. se producen en la nanoescala. El desarrollo de la nanotecnología tiene el potencial de revolucionar los métodos de producción de energía. Algunas de las nuevas áreas prometedoras para el uso de la nanotecnología es este campo son:

- ✚ Captar energía del sol y la biomasa.
- ✚ Almacenar energía en forma de pilas.
- ✚ Baterías, sensores.
- ✚ Catalizadores avanzados para la conversión de energía.

Catálisis: Una de las áreas más lucrativas para un nanotecnólogo es la catálisis. La catálisis química se beneficia significativamente de las nanopartículas, debido a la gran relación superficie-a-volumen. Esto es fácil de entender de los principios geométricos que la relación área superficial a volumen es inversamente proporcional al tamaño de una partícula. Una variedad de reacciones químicas tienen lugar en la superficie de un catalizador, y por lo tanto

¹⁶ Rosi, N. L.; Mirkin, C. A. Nanostructures in Biodiagnostics. *Chem. Rev.* 105. 1547-1562. **2005**.

¹⁷Huang, X.; El-Sayed, I. H.; Qian, W.; El-Sayed, M. A. Cancer Cell Imaging and Photothermal Therapy in the Near-Infrared Region by Using Gold Nanorods. *J. Am. Chem. Soc.* 128. 2115-2120. **2006**.

cuanto mayor sea el área superficial, más activo es el catalizador. Los catalizadores de nanoescala abren el camino a numerosos procesos innovadores capaces de ser más eficientes. La aplicación potencial de las nanopartículas de SnO_2 en la catálisis oscila entre las celdas de combustible para los convertidores catalíticos y dispositivos fotovoltaicos. Las nanopartículas de SnO_2 , pueden ser usadas como catalizadores en:

- ✚ Convertidores catalíticos de automóviles para la eliminación de gases nocivos y tóxicos, tales como monóxido de carbono y óxido de nitrógeno.
- ✚ Equipos de generación de energía para evitar la contaminación ambiental provocada por la quema de gasolina y el carbón.



Figura 17. Usos de la nanocatálisis (TARRILLO, 2013)

Sensores: Sensores hechos de materiales nanocristalinos son extremadamente sensibles a un cambio en su entorno. Algunas de las aplicaciones para los sensores de materiales

nanocristalinos son detectores de gas, detectores de hielo en las alas de aviones y sensores del motor de automóvil..¹⁸

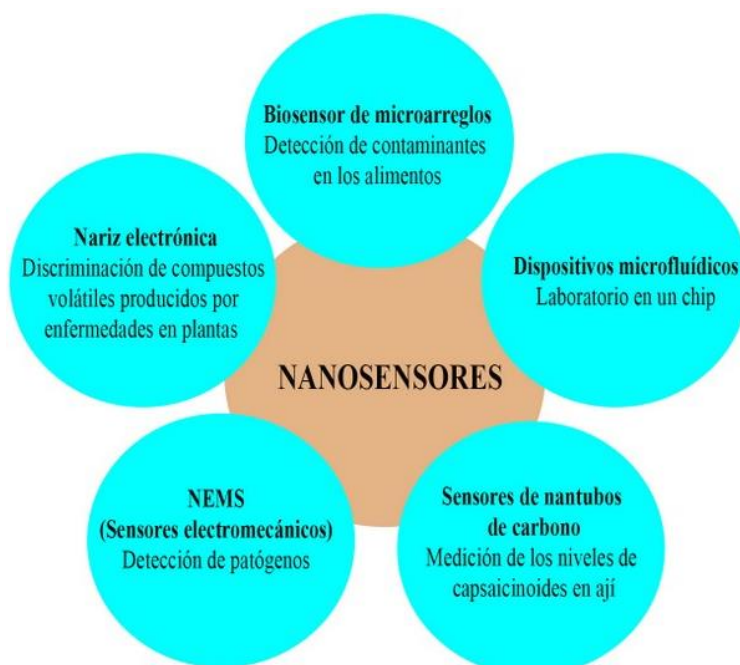


Figura 18. Tipos de nanosensores y su aplicación en agroindustria (Adaptado de Sozer y Kokini 2009).

II.4 Métodos de síntesis de nanopartículas de SnO₂

Diferentes métodos de síntesis han sido utilizados para obtener SnO₂ puro o dopado, siendo los más importantes: el método de precipitación homogénea, precipitación controlada, precursor polimérico y reacciones en estado sólido a través de la descomposición de carbonatos entre otros.

Otro método de síntesis ampliamente utilizado para la obtención de polvos cerámicos es el denominado sol-gel, proceso en fase líquida, muy versátil para obtener materiales cerámicos y vítreos. En general, el proceso sol-gel implica la transición de un sistema en un estado líquido, denominado “sol”, suspensión coloidal de partículas sólidas muy pequeñas, a una

¹⁸An, X., Op. cit., p. 1062

fase sólida, denominada "gel", sólido constituido por al menos dos fases, entre ellas la fase líquida atrapada e inmovilizada por la fase sólida. Los precursores principalmente usados para la preparación del "sol" son sales inorgánicas de metal o compuestos metal-orgánicos tales como los alcóxidos. En un proceso típico sol-gel, el precursor experimenta una serie de reacciones de hidrólisis y policondensación en la solución y que llevan a la formación de una suspensión coloidal. La transformación posterior de sol a gel permite obtener materiales cerámicos en diversas formas, dependiendo de su aplicación.¹⁹

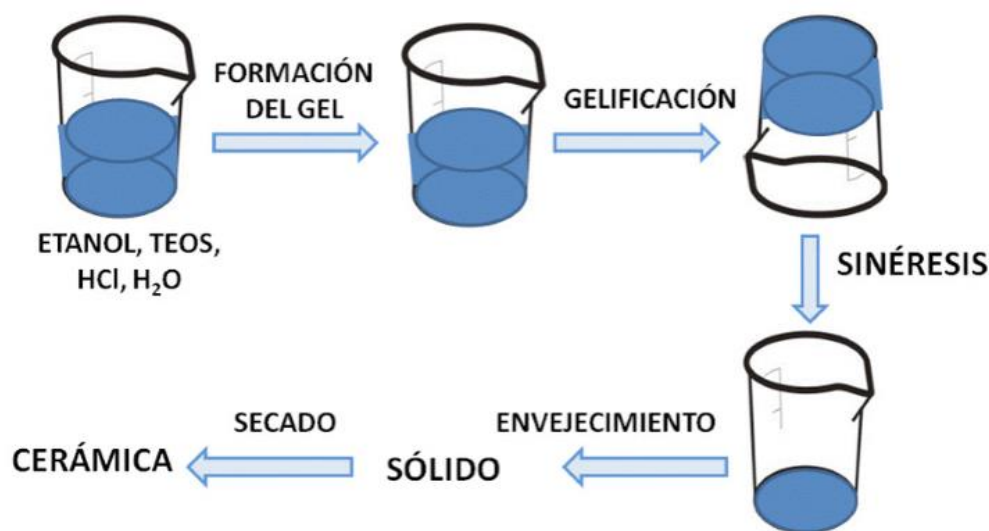


Figura 19 .Proceso Sol-Gel (hierro, 2017)

II.4.1 Nanopartículas de SnO₂ dopadas con diferentes metales

Para modificar o controlar las propiedades superficiales del SnO₂ se suelen introducir aditivos, usualmente metales nobles. Los efectos más importantes de esta adición son el aumento de sensibilidad, así como la disminución de la temperatura a la que se presenta el

máximo de sensibilidad. Todos estos efectos surgen del aumento de actividad catalítica que se produce al añadir metales nobles.

Uno de los materiales más investigados actualmente es el SnO_2 , ya que es un material barato que posee una gran capacidad de detección de gases reductores. Actualmente, gran parte de la investigación está dirigida a la búsqueda del incremento de la sensibilidad, selectividad y estabilidad de estos materiales y, en este sentido, uno de los puntos cruciales es la presencia de dopantes, que son metales que, añadidos en bajas concentraciones al SnO_2 , son capaces de mejorar estas propiedades. Así, se ha visto que esta mejora de propiedades es especialmente importante cuando estos dopantes se añaden en forma de nanoclústers en la superficie del SnO_2 y, como esta adición depende del método usado, una de las cuestiones cruciales es la búsqueda de métodos económicos, sencillos y eficaces de adición de estos dopantes.

Influencia de los dopantes Para modificar o controlar las propiedades superficiales del SnO_2 se suelen introducir aditivos, usualmente metales nobles. En general, cuando se añaden metales nobles, se espera que éstos formen clústers en la superficie del SnO_2 , según cuál sea el metal añadido, su concentración y el gas interaccionante, estos clústers estarán en forma metálica u oxidada. En cualquier caso, el contacto del aditivo con el óxido semiconductor crea una barrera que está completamente caracterizada por la afinidad electrónica del semiconductor, la función trabajo del metal y la densidad de estados superficiales del semiconductor. Las tres contribuciones crean una barrera Schottky a través de la formación de una región de depleción en la superficie del semiconductor en contacto con el clúster.

Eventualmente, los 173 estados superficiales creados por la presencia del aditivo pueden fijar el nivel de Fermi del semiconductor al del aditivo²⁰

III EXPERIMENTAL

III.1 Disolventes

Hidróxido de amonio (NH_4OH) y butanol ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$)

III.2 Reactivos

$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, la calidad fue proporcionada por la ficha técnica proporcionada por distribuidor de Estados Unidos Norteamericanos, como se puede apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2. Reactivos

Reactivo	Fabricante	Pureza (%)
$\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Aldrich chemical company, inc.	98
$\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Aldrich chemical company, inc.	99.9
$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Aldrich chemical company, inc.	99.9
$\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	J.T. Baker	99.9
$\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Aldrich chemical company, inc.	99.9

²⁰ <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/2743/Tol1226.pdf>

III.3 Metodología para la síntesis de $\text{Sn}_{(1-x)} \text{M}_{4/3x} \text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr)

Las nanopartículas de SnO_2 fueron preparadas por el método sol-gel. La composición inicial fue $\text{Sn}_{(1-x)} \text{M}_{4/3x} \text{O}_2$ (M= Ce^{3+} , La^{3+} , Nd^{3+} y Pr^{3+} , $x= 0.05$) (Tabla 3). Después 6.496 g de cloruro de estaño ($\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y la apropiada cantidad de nitrato de cerio/lantano/neodimio/praseodimio fueron disueltos 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 $\text{Sn}(\text{Ce/La/Nd/Pr})\text{-O-Sn}$. Posteriormente, el sol resultante se filtró usando agua destilada para eliminar los iones cloruro del sistema, y 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.

Tabla 3. Moles utilizados de reactivos

Composición de	
Reactivo	Moles
$\text{Sn Cl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.01853
$\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.2804×10^{-3}
$\text{Sn Cl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.018544
$\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.2883×10^{-3}
$\text{Sn Cl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.01852
$\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.287×10^{-3}
$\text{Sn Cl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.01850
$\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.2853×10^{-3}

III.4 Caracterización de las nanopartículas de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr)

Todas las muestras sinterizadas fueron caracterizadas por difracción de rayos X (XRD), microscopia electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de infrarrojo por Transformadas de Fourier (FT-IR).

III.4.1 Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)

La utilización de instrumentos con transformada de Fourier presenta varias ventajas frente a la espectroscopia de infrarrojo convencional. La potencia de radiación que alcanza el detector es mucho mayor que en los instrumentos dispersivos y por tanto se observan unas relaciones señal/ruido muy superior. También se caracterizan por sus altas resoluciones ($< 0.1 \text{ cm}^{-1}$) y por la elevada exactitud y reproducibilidad en la determinación de frecuencias. Además, todos los elementos de la fuente llegan al detector a la vez, lo que permite obtener un espectro completo en un breve período de tiempo. La principal diferencia con la espectroscopia convencional es que un espectro obtenido experimentalmente, está compuesto de m medidas individuales de transmitancia con sus frecuencias o longitudes de onda espaciadas por igual, y denominadas elementos de resolución. Un espectro completo de 1500 elementos de resolución puede registrarse en un tiempo similar al que se precisa para observar un solo elemento por espectroscopia convencional.

Para las aplicaciones de nanomateriales, la Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se emplea comúnmente para usar la expresión de bandas espectrales características para revelar conjugación nanomaterial-biomolécula.

III.4.2 Difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos X proporciona un medio cómodo y práctico para identificar compuestos cristalinos en sus diferentes fases, y para obtener informaciones; tales como tamaño de microcristales, parámetros de red, etc. Cuando los rayos X se dispersan por el medio ordenado de un cristal, tienen lugar interferencias (tanto constructivas como destructivas) entre los rayos dispersados, ya que las distancias entre los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación. Como resultado se produce la difracción. La condición para que la interferencia sea constructiva viene dada por la ley de Bragg:

$$2 d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda$$

Donde:

n es un número entero.

λ es la longitud de onda de los rayos X.

d es la distancia entre los planos de la red cristalina.

θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

La longitud de onda incidente depende del elemento que se utiliza como blanco en la fuente de rayos X. Normalmente se utiliza el Cu cuya radiación $K\alpha$ tiene una longitud de onda de 1.5406Å. La geometría más usual de los difractómetros de polvo es la Bragg-Brentano vertical. En ella, la muestra se coloca en posición horizontal rotando distintos ángulos θ mientras que el detector lo hace hasta 2θ respecto a la dirección de incidencia. Por eso este tipo de difracción se denomina también $\theta - 2\theta$.

Con los difractogramas de rayos X es posible también estimar el tamaño medio de los microcristales si su diámetro es inferior a 2000 Å. Para ello se utiliza la fórmula de Scherrer.

$$\beta = \frac{k \cdot \lambda}{FWHM(S) \cdot \cos \theta}$$

Donde:

β es el tamaño promedio del cristal.

k es el factor de forma del cristal y su valor es de 1.

λ es la longitud de onda de la radiación utilizada (Cu).

θ es la posición del pico de difracción.

$FWHM(S)$ es el ancho a la altura media del pico de difracción de la muestra.

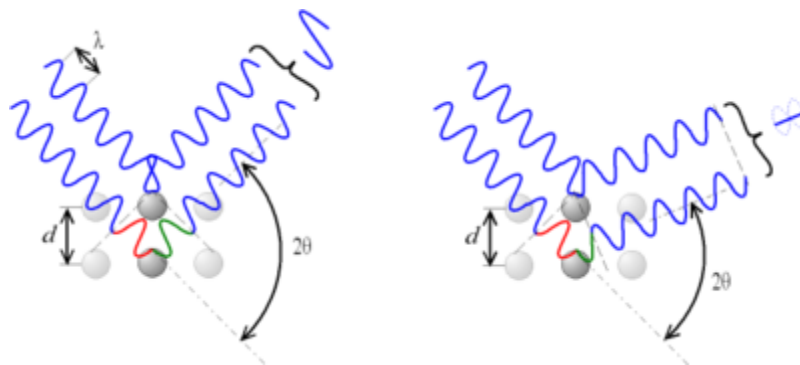


Figura 20. Difracción de rayos X. (Garcia, 2014)



Figura 21. Porta muestras y equipo de difracción de rayos X

III.4.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido consiste en hacer incidir un haz de electrones cuya energía está en el rango de los rayos X, el cual recorre mediante líneas paralelas la superficie de la muestra, provocando un desprendimiento de electrones, además de otras señales, que recogidas en un detector dan información sobre la topografía de la muestra. A diferencia del microscopio electrónico de transmisión, no se producen imágenes "reales", sino que, al desplazar el haz de electrones sobre la superficie, se recogen las señales emitidas punto por punto, obteniéndose así un "mapa" de dicha superficie. La señal de los electrones varía gradualmente con los cambios locales de la pendiente de la superficie, dando información de la topografía superficial. Teniendo en cuenta que durante todo el proceso los electrones están continuamente bombardeando la muestra, es necesario que éstas sean conductoras para dar continuidad al paso de corriente. Por esta razón, las muestras aislantes suelen ser recubiertas con una fina película de carbón, oro o una aleación de oro. El microscopio de barrido electrónico presenta principalmente dos ventajas frente al microscopio Óptico: por un lado, la resolución y por otro la profundidad de campo, lo que permite que las imágenes obtenidas tengan calidad tridimensional.

El microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FE SEM) que se utilizó para la caracterización de las muestras, consiste de una columna electrón-óptica, sistema de vacío y electrónica. Proporciona aumentos desde 25X hasta 1,000,000X con un 1nm de resolución, lo que permite observar la morfología fina de nanoestructuras.

El FE SEM JEOL JSM-7600F combina dos tecnologías; una columna electrónica con detectores dentro del lente objetivo y un cañón de emisión de campo térmico. Estas juntas producen ultra alta resolución, un amplio intervalo de corrientes de haz de electrones (desde 1pA hasta 200nA) y voltajes de aceleración desde 0.1 KV hasta 30 KV. La fuente de electrones es un emisor de ZRO/W, que se calienta hasta aproximadamente 1600°C.

La información principal que se puede obtener del estudio de un espécimen por medio del SEM consisten en: observación de topografía superficial, tamaño de micropartícula, composición química (por elemento) puntual, lineal y por mapeo.

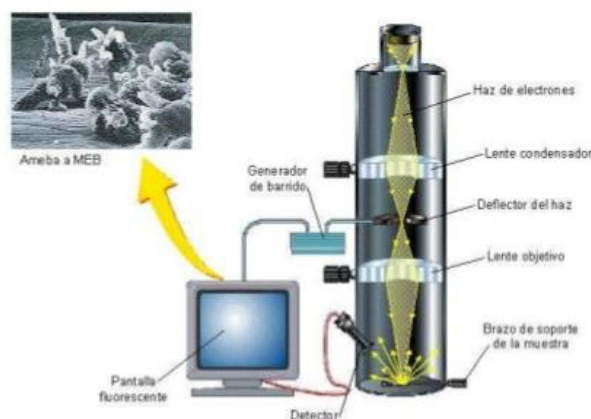


Figura 22. Microscopio electrónico de barrido (Difraccion de rayos X, 2015)



Figura 23. Equipo de microscopia electrónica de barrido.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 Caracterización de $\text{Sn}_{(1-x)}\text{M}_{4/3x}\text{O}_2$ (M= Ce, La, Nd y Pr)

IV.1.1 Difracción de rayos X

La estructura cristalina se determinó por medio de Difracción de Rayos X, en las siguientes figuras se observan los difractogramas que permiten identificar de manera clara la presencia de fases en el compuesto SnO_2 con Ce, La, Pr y Nd calcinado a 500° y 700°C .

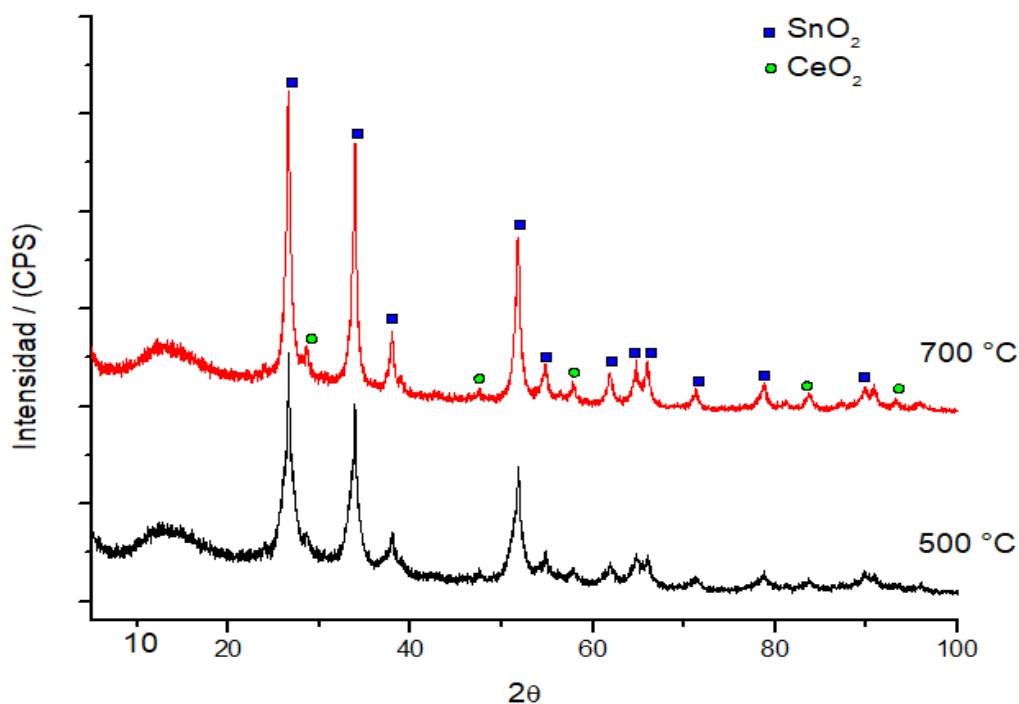


Figura 24. Patrón de difracción de las muestras de SnO_2 con Ce.

La figura 24 muestra los patrones de DRX de las nanopartículas de SnO_2 dopadas con Ce, obtenidas a 500 y 700°C . Las líneas de difracción están asignadas a fases cristalinas tetragonales de SnO_2 (JCPDS tarjeta No. 010880287), fases cristalinas cubica de CeO_2 (JCPDS tarjeta No. 0655923) y una fase amorfa que se presenta de 10 - $20^\circ 2\theta$.

La presencia de picos amplios indica que el SnO_2 tiene un tamaño cristalino muy pequeño, o partículas de SnO_2 de naturaleza semicristalina. También nos muestra que los picos se hacen gradualmente más agudos a medida que aumenta la temperatura, lo que nos indica que la partícula creció en tamaño

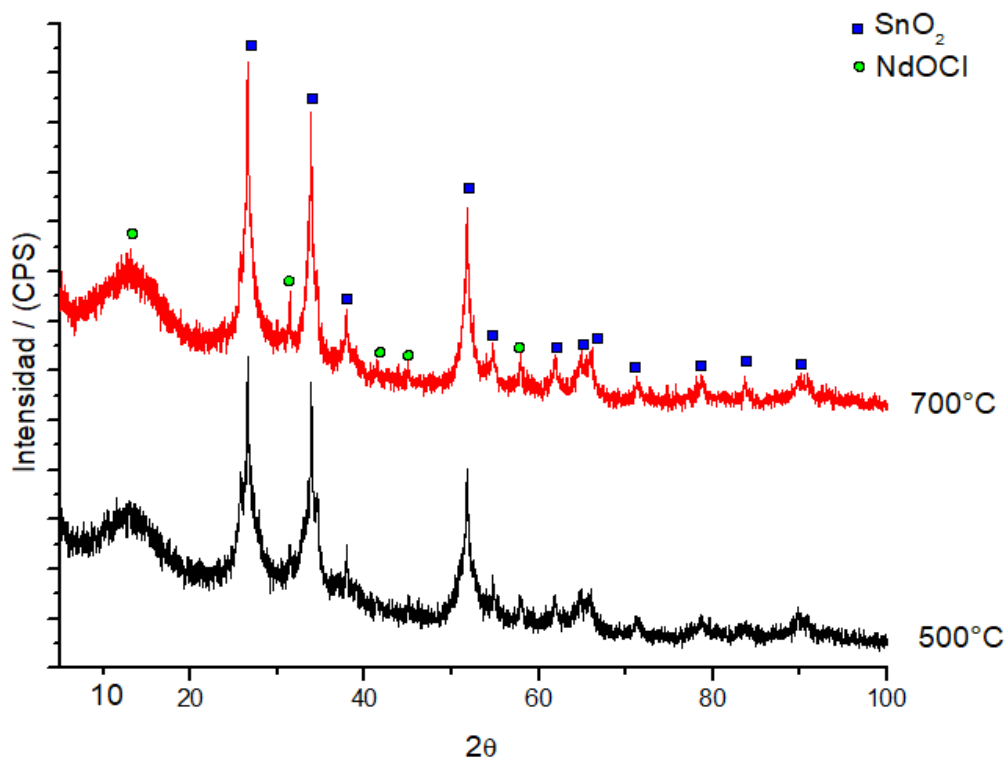


Figura 25. Patrón de difracción de las muestras de SnO_2 con Nd.

La figura 25 muestra los patrones de DRX de las nanopartículas de SnO_2 dopadas con Nd, obtenidas a 500 y 700 °C. Se muestra que los picos presentes en el patrón son fases cristalinas tetragonales de óxido de estaño con un patrón de referencia (JCPDS tarjeta No. 010880287) y fases cristalinas tetragonal de NdOCl (JCPDS tarjeta No. 01085.1198). También se observa

que los picos de SnO_2 se vuelven más amplios, esto se debe a que tiene un tamaño cristalino muy pequeño, o partículas de SnO_2 de naturaleza semicristalina.

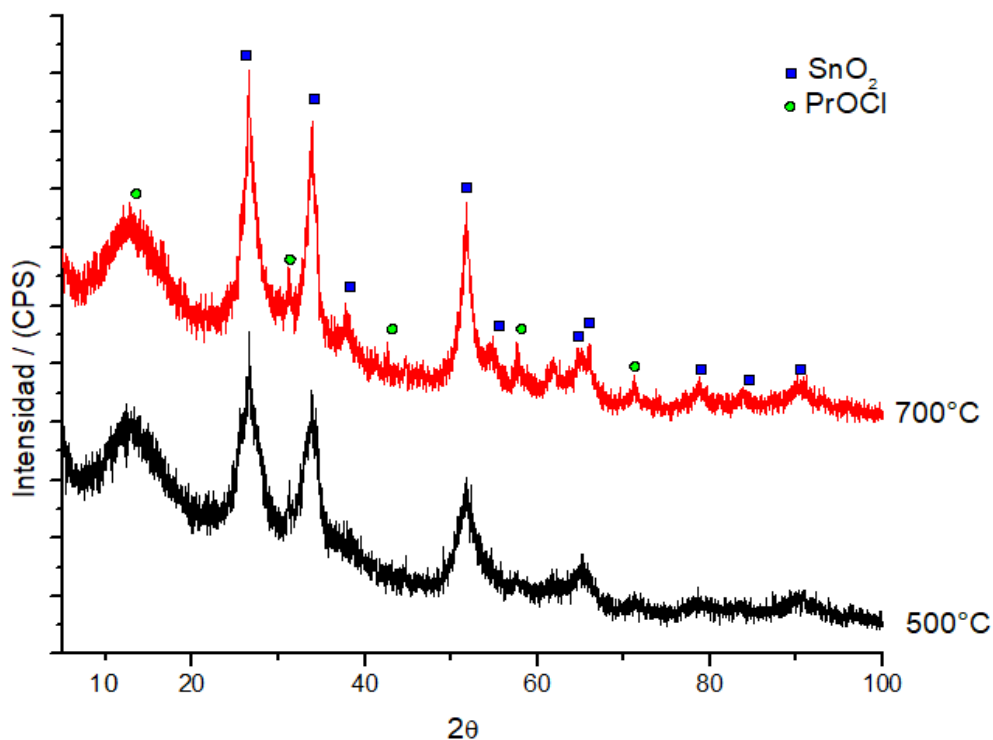


Figura 26. Patrón de difracción de las muestras de SnO_2 con Pr.

La figura 26 muestra los patrones de DRX de las nanopartículas de SnO_2 dopadas con Pr, obtenidas a 500 y 700 °C. Todos los picos de difracción están bien asignados a fases cristalinas tetragonales de SnO_2 (JCPDS tarjeta No. 010880287) y fases cristalina tetragonal de PrOCl (JCPDS tarjeta No. 010850948). La presencia de picos amplios indica que el SnO_2 tiene un tamaño cristalino muy pequeño, o partículas de SnO_2 de naturaleza semicristalina y se vuelven más agudos al incrementar la temperatura ya que la partícula creció en tamaño.

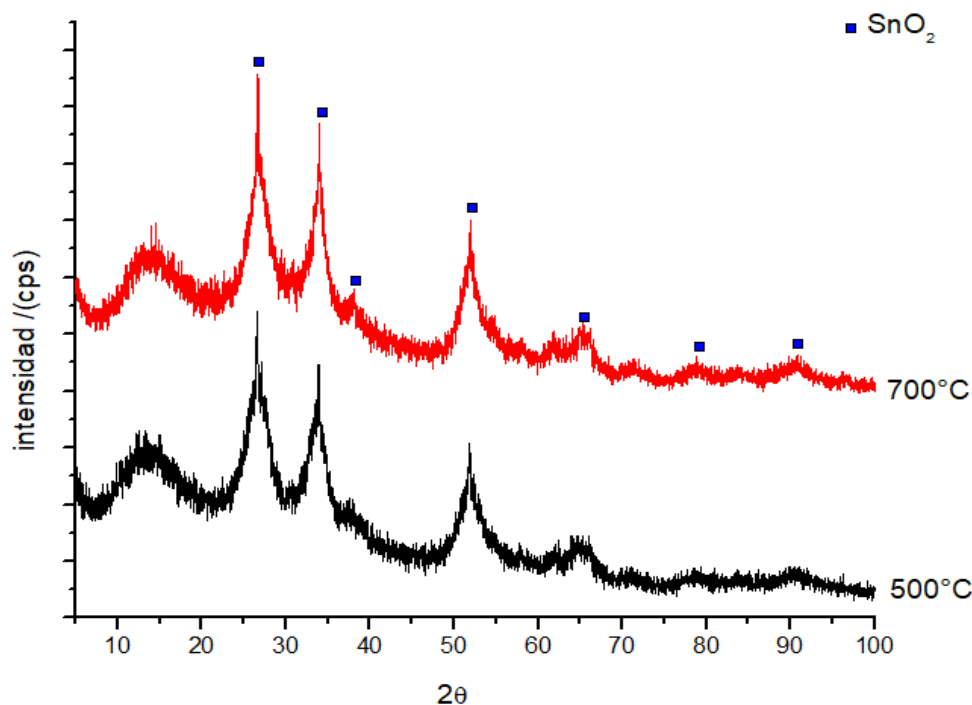


Figura 27. Patrón de difracción de las muestras de SnO₂ con La.

En la figura 27 se muestran los patrones DRX de las muestras de SnO₂ dopadas con La, calcinadas a 500 y 700 °C. Estas líneas de difracción están establecidas a fases cristalinas tetragonales de SnO₂ (JCPDS tarjeta No. 010880287) y a una zona amorfa que se encuentra entre 10-20 2θ. La presencia de picos amplios indica que el SnO₂ tiene un tamaño cristalino muy pequeño, o partículas de SnO₂ de naturaleza semicristalina.

IV.1.2 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Se tomaron imágenes de micrografía electrónica de barrido (MEB) de emisión de campo (FE MEB), que se utilizó para la caracterización de las muestras, consiste de una columna electrón-óptica, sistema de vacío y electrónica. Con aumentos de 25X, 50X y 100 X con un 1nm de resolución, lo que permite observar topografía superficial y determinación de tamaño de nanopartícula.

El FE SEM JEOL JSM-7600F combina dos tecnologías; una columna electrónica con detectores dentro del lente objetivo y un cañón de emisión de campo térmico. Estas juntas producen ultra alta resolución, un amplio intervalo de corrientes de haz de electrones (desde 1pA hasta 200nA), se utilizó un voltaje de aceleración de 1.00 KV. La fuente de electrones es un emisor de ZRO/W, que se calienta hasta aproximadamente 1600°C.

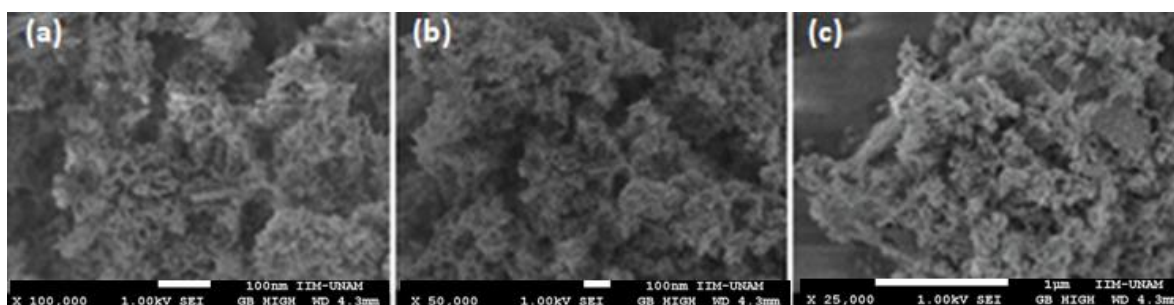


Figura 28. Imágenes MEB de las nanopartículas de SnO₂ dopadas con Ce.

La figura 28 muestra las imágenes MEB de las nanopartículas de SnO₂ dopadas con Ce a 500 °C. Se aprecia un material homogéneo, con un tamaño de partículas dentro del rango manométrico (1-100 nm).

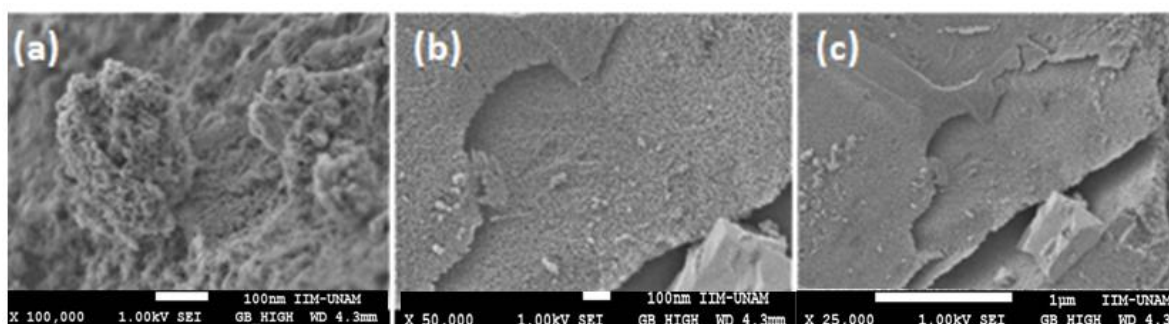


Figura 29. Imágenes MEB de las nanopartículas de SnO₂ dopadas con lantano.

La figura 29 muestra las micrografías de nanopartículas de SnO₂ calcinadas a 500 °C. Las nanopartículas de SnO₂ presentan un tamaño de 10-20 nm.

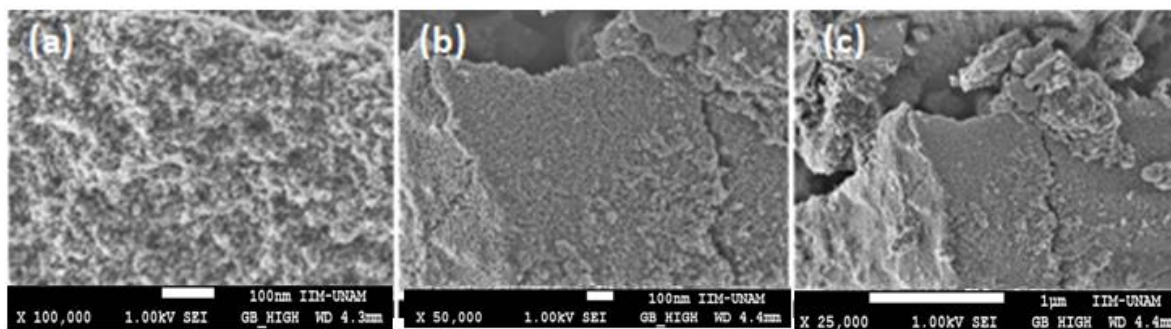


Figura 30. Imágenes MEB para las nanopartículas de SnO₂ con Nd a 500° C.

En las figuras 30 y 31 muestran las micrografías MEB para nanopartículas de SnO₂ dopadas con neodimio y praseodimio, respectivamente, calcinadas a 500 °C. Es evidente que las nanopartículas de SnO₂ son ultra finas, el tamaño de éstas nanopartículas son de aproximadamente 10-20 nm, con un voltaje de aceleración de 1KV donde: (a) aumento de X100,000, (b) aumento de X50,000, (c) aumento de 25,000. Las nanopartículas de SnO₂ consisten en partículas tetragonales uniformes. Esto está de acuerdo con los resultados obtenidos del análisis XRD.

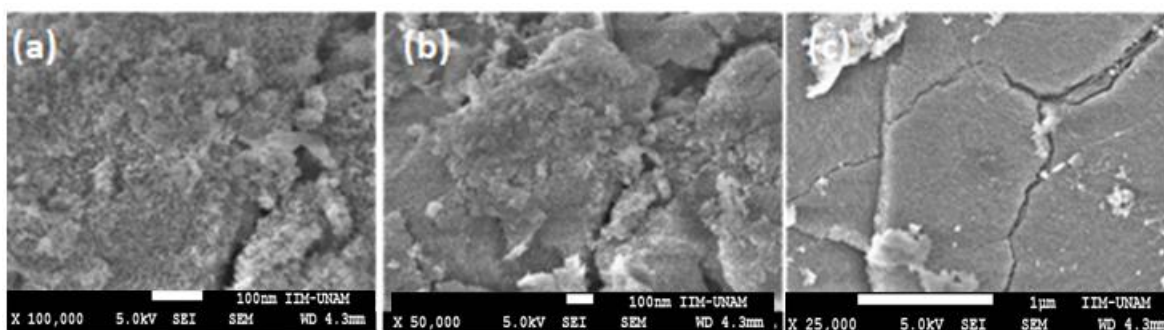


Figura 31. Imágenes MEB para las nanopartículas de SnO₂ con Pr a 500° C.

IV.1.3 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformadas de Fourier (FT-IR)

Las nanopartículas de SnO₂ se caracterizaron por espectroscopia de Infrarrojo con el fin de identificar los grupos funcionales, los enlaces Sn-O. En la figura 32, 33, 34 y 35 se muestran los espectros de IR de las nanopartículas de SnO₂ dopadas con lantano, praseodimio, neodimio y cerio respectivamente. Los cuatro espectros de IR son muy similares, se observa la presencia de picos a 3356-3661 cm⁻¹ y 1634-1655 cm⁻¹ que se atribuyen a la vibración de un hidroxilo (-OH), debido al hecho de que el SnO₂ retuvo cierta cantidad de agua adsorbida del ambiente. La banda a aproximadamente 2161-2359 cm⁻¹ resultó de la adsorción e interacción de dióxido de carbono atmosférico con agua acordando a la literatura. La banda de vibración antisimétrica del enlace Sn-O se encuentra asignada en un rango de 400-700 cm⁻¹, pero no se observaron las señales debido a la calibración del equipo, que se encuentra calibrado para obtener espectros IR de 700-400 cm⁻¹. El incremento de la temperatura de calcinación redujo la intensidad de la banda de los grupos -OH.

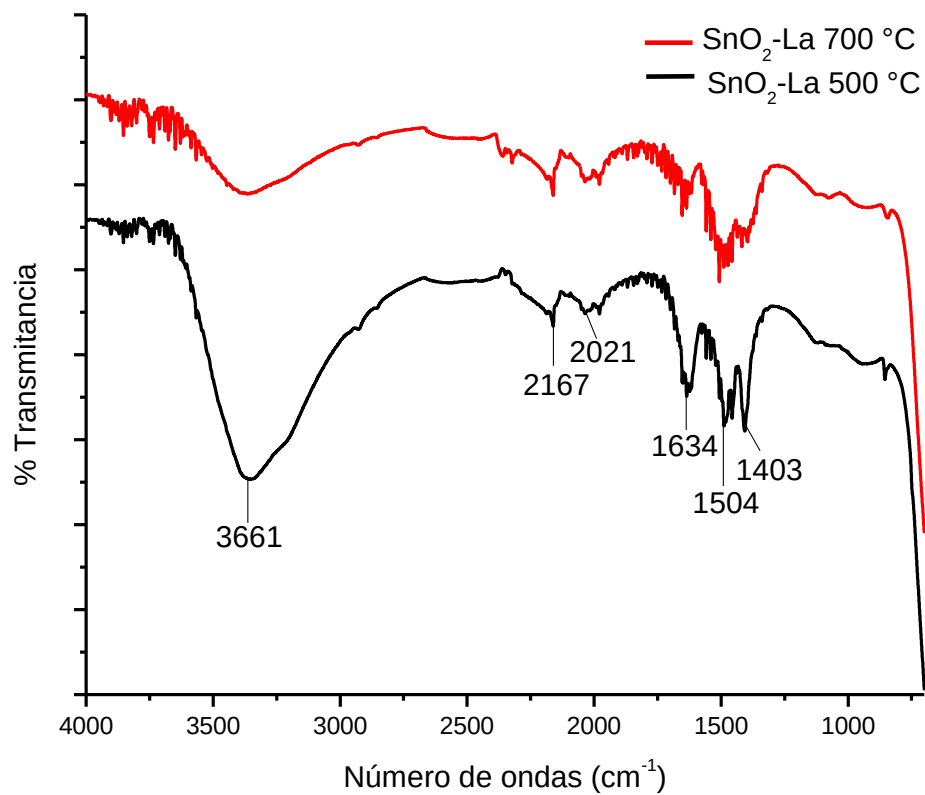


Figura 32. Espectro FT-IR de SnO₂-La

En la figura 32 se presenta el espectro FT-IR de SnO₂ dopado con lantano y presenta una señal a 3661 cm⁻¹ atribuible al enlace Sn-OH. La señal a 1634 cm⁻¹ es atribuida a las vibraciones de las moléculas de H₂O absorbidas.

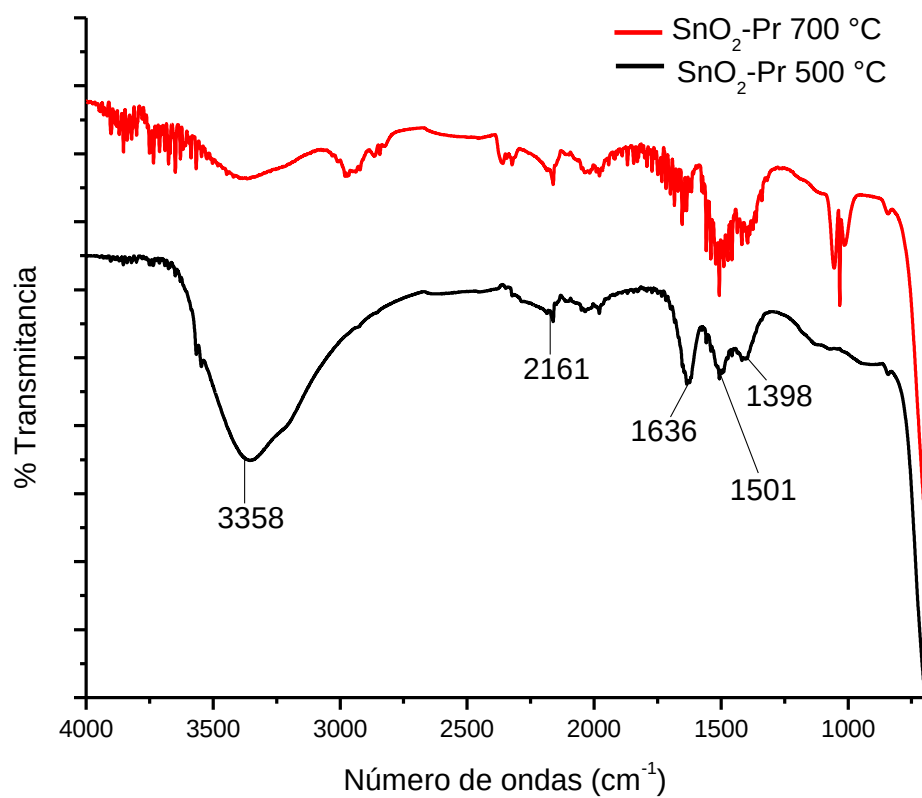


Figura 33. Espectro FT-IR de SnO₂-Pr

En la figura 33 se presenta el espectro FT-IR de SnO₂ dopado con praseodimio, se identificó la señal Sn-OH a 3358 cm⁻¹ para el enlace Sn-OH.

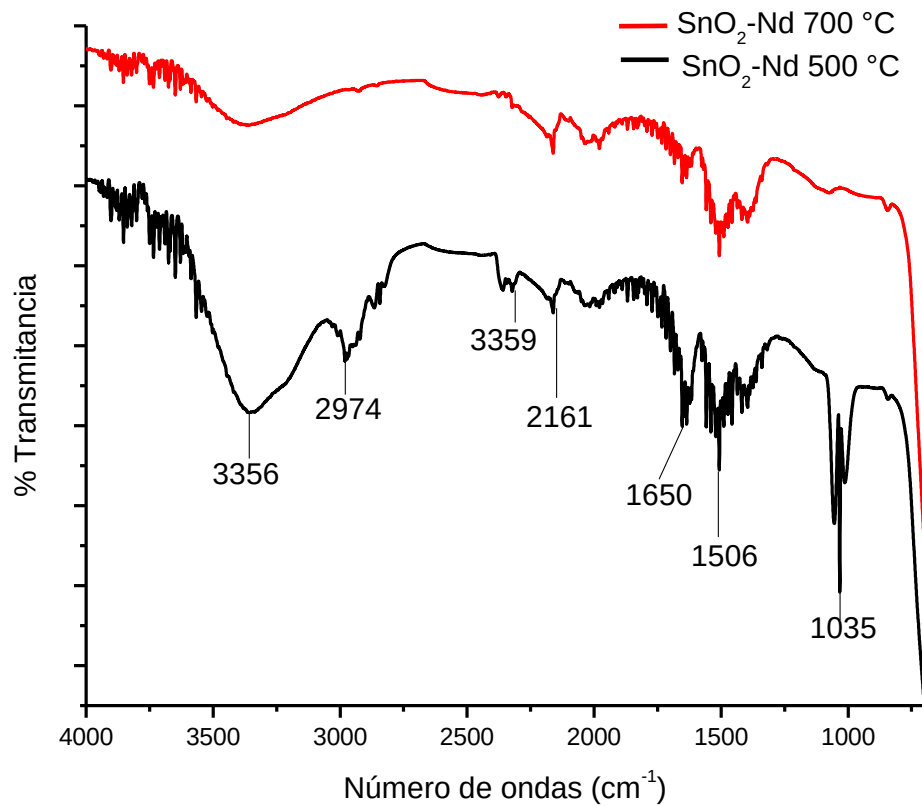


Figura 34. Espectro FT-IR de $\text{SnO}_2\text{-Nd}$

La figura 34 muestra el espectro FT-IR de SnO_2 dopado con neodimio, a 3356 cm^{-1} indica la presencia del enlace Sn-OH. La señal a 1650 cm^{-1} es atribuida a la vibración de las moléculas de H_2O absorbidas. A 1035 cm^{-1} es asignada a la vibración de diferentes tipos de grupos –OH de la superficie.

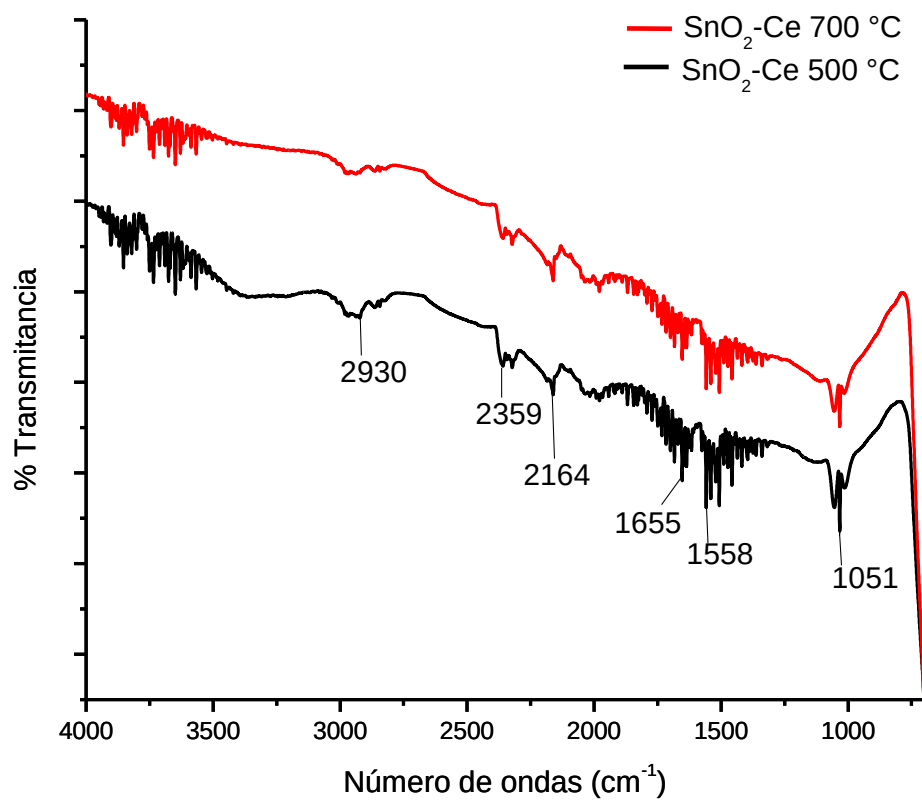


Figura 35. Espectro FT-IR de SnO₂-Ce

El espectro de infrarrojo de la figura 35 muestra una señal poco intensa a 3300 cm⁻¹ asignada a la vibración del enlace Sn-OH, las señales a 2359 y 2164 cm⁻¹ son de humedad y dióxido de carbono del ambiente. La señal de 1655 cm⁻¹ es atribuible también al grupo hidroxilo (-OH) del enlace Sn-OH.

V. CONCLUSIONES

Las nanopartículas de SnO_2 fueron sintetizadas por el método sol-gel con diferentes lantánidos (Ce, La, Nd, Pr) a diferentes concentraciones que van desde 0.0012804-0.0012883 moles. Las nanopartículas sintetizadas de SnO_2 con Ce, La, Nd y Pr se caracterizaron por DRX, FT-IR y SEM. Es evidente que las nanopartículas de SnO_2 son ultra finas, el tamaño de éstas nanopartículas son de aproximadamente 10-20 nm, las cuales tienen una forma tetragonal unirme, esto de acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis DRX el cual determina por medio de difracción de rayos X la estructura cristalina e identifica las fases del compuesto ya sean cristalinas o amorfas, SEM nos arroja imágenes de micrografía electrónica de barrido emisión de campo, lo cual nos indica el tamaño aproximado de las nanopartículas y un análisis morfológico y FT-IR este se emplea en la caracterización de diferentes compuestos para identificar los grupos funcionales presentes en las muestra.

Las partículas de SnO_2 que se pueden usar de manera eficiente para muchas aplicaciones, las más comunes son conductor a alta temperatura, electrodo transparente para películas delgadas, sensor de gas, sensores de humedad, celdas fotovoltaicas, pilas de litio varistor, en el área de medicina, almacenamiento de datos magnéticos, en imágenes por resonancia magnética, dispositivos optoelectrónicos, resistencias, realización de pantallas de cristal líquido, recubrimientos que ahorran energía, recubrimientos antiestáticos y catalizador.

Por lo tanto, el método sol-gel ofrece una ruta simple, síntesis de bajo costo, pero efectiva para la síntesis de tamaño uniforme del cristalito.