

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“Funcionalización controlada de nanopartículas de ZnO biogénicas con APTES: Mejoras en carga superficial, tamaño, estructura y propiedades ópticas”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Forma: Artículo científico

Autores:

Erick Daniel Briceño Dioses

Grisel Alessandra Meza Infantes

Asesor:

Dr. David Angel Asmat Campos

0000-0003-1144-1322

Trujillo - Perú

2025

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Magda Rosa Velasquez Marin
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	Irma Geralda Horna Hernandez
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	David Angel Asmat Campos
	Nombre y Apellidos

Informe de Similitud



9% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía

Exclusiones

- ▶ N.º de fuentes excluidas
- ▶ N.º de coincidencia excluida

Fuentes principales

- 8%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, quienes con su amor, esfuerzo y ejemplo me enseñaron a nunca rendirme. A mi familia, por acompañarme en silencio, por sus palabras de aliento y por estar siempre, incluso cuando no lo decía. Y finalmente, me lo dedico a mí, por haber llegado hasta aquí con determinación, por cada noche en vela, cada duda superada y cada paso firme hacia este logro.

Grisel Alessandra Meza Infantes.

Dedico este trabajo a mis padres, por su amor, ejemplo y apoyo incondicional, pilares fundamentales en mi formación personal y profesional. A mi hermano y a toda mi familia, por su constante aliento y motivación para seguir adelante.

Erick Daniel Briceño Dioses.

Agradecimiento

Al culminar esta tesis, no podemos más que expresar nuestra profunda gratitud a todas las personas que formaron parte de este proceso. Este trabajo no solo representa el cierre de una etapa académica, sino también el resultado de muchos esfuerzos, aprendizajes y momentos de crecimiento personal. Asimismo, agradecemos al Ing. Eduardo Rurush y a todo el equipo técnico del Centro de Investigación Avanzada en Agroingeniería (CIAA) y del Laboratorio de Investigación en Nanotecnología de la UPN por su asistencia en momentos oportunos y por los valiosos consejos brindados a partir de su experiencia. Agradecemos especialmente al Dr. David Asmat, por su invaluable orientación, paciencia y compromiso durante el desarrollo de esta tesis. Su guía académica, sus observaciones oportunas y su disposición constante fueron fundamentales para dar forma y solidez a este trabajo. Gracias por su confianza y por motivarnos a ir siempre un paso más allá.

Tabla de contenidos

JURADO EVALUADOR.....	2
Informe de Similitud.....	3
Dedicatoria	4
Agradecimiento	5
Índice de tablas	7
Índice de Figuras.....	8
Resumen.....	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	14
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES	31
REFERENCIAS.....	32

Índice de tablas

Tabla 1.....	15
--------------	----

Índice de Figuras

Figura 1.....	21
Figura 2.....	24
Figura 3.....	26
Figura 4.....	28
Figura 5.....	30

Resumen

En este estudio, se sintetizaron nanopartículas de óxido de zinc biogénicas (ZnO NPs) mediante una ruta de química verde y posteriormente se funcionalizaron con 3-aminopropiltietoxisilano (APTES) bajo condiciones controladas. Se evaluó una serie de cinco formulaciones (A-E) para investigar el impacto de los parámetros de síntesis sobre las propiedades fisicoquímicas, estructurales y ópticas.

La caracterización estructural mediante difracción de rayos X (XRD) confirmó la preservación de la estructura cristalina wurtzita en todas las muestras, sin evidencia de fases secundarias ni distorsión cristalográfica. La espectroscopia Raman reveló variaciones en la intensidad del modo E_2 (high), lo que indica distintos grados de cristalinidad y densidad de defectos según las concentraciones de APTES y ácido acético. Notablemente, el modo de segundo orden $2E_2$ (low) se utilizó como indicador de confinamiento de fonones y esfuerzo interfacial.

La espectroscopia UV-Vis mostró una capacidad de ajuste del band gap entre 1.78 y 2.27 eV, correlacionada con la modificación superficial e integridad estructural. Los análisis de dispersión de luz dinámica (DLS), potencial Z (Z-potencial) y movilidad electroforética revelaron que la formulación D logró una estabilidad coloidal superior ($Z = -500.69$ mV, diámetro hidrodinámico = 26.5 nm), consiste con un alto entrecruzamiento del silano y repulsión por carga superficial. En contraste, la muestra control presentó una marcada agregación ($Z = -0.34$ mV, diámetro = 108 nm), lo que resalta la importancia de la funcionalización química para estabilizar nanomateriales.

Estos resultados demuestran que la funcionalización con APTES modula eficazmente las propiedades superficiales y ópticas de las ZnO NPs, permitiendo su uso a

medida en aplicaciones como optoelectrónica, fotocatalisis y actividad antimicrobiana. La formulación D resulto ser la más prometedora, combinando alta cristalinidad, tamaño de partícula reducido, excelente estabilidad coloidal y un band gap favorable.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La funcionalización de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO NPs) ha emergido como una estrategia importante en la nanotecnología, debido a la versatilidad que estas partículas ofrecen en diversas aplicaciones. La funcionalización se refiere a la modificación de la superficie de las nanopartículas para optimizar su interacción con otros compuestos. A través de este proceso, se pueden introducir grupos funcionales que mejoren sus propiedades de dispersión en medios orgánicos, facilitando así su integración en diversas aplicaciones industriales y ambientales (Fatiqin et al., 2024), (Hardani et al., 2025). Se ha documentado que la incorporación de grupos polares o hidrofílicos en la superficie del ZnO puede aumentar su solubilidad en disolventes orgánicos, conduciendo a una mayor estabilidad de las nanopartículas (Dobrucka & Długaszewska, 2016), (Hajos et al., 2025). Un enfoque común para la funcionalización del ZnO es el uso de agentes de capping, que no solo estabilizan las nanopartículas, sino que también pueden conferir nuevas propiedades funcionales (Otilia Cintează & Antonia Tănase, 2021). Los polímeros, como el polietileno glicol (PEG) y el ácido poliláctico (PLA), se han utilizado para modificar las superficies de las ZnO NPs, facilitando su dispersión y mejorando su biocompatibilidad para aplicaciones en liberación controlada de fármacos (Ashraf et al., 2015). Sin embargo, uno de los problemas que se presenta es que las ZnO NPs, tras ser sometidas a procesos de calcinación, pueden perder compatibilidad al ser aplicadas en medios orgánicos. Este fenómeno se debe a que la calcinación a altas temperaturas tiende a modificar las estructuras cristalinas y la morfología de las nanopartículas, dando lugar a una mayor agregación y pérdida de propiedades específicas (SAADI et al., 2024), (Ashraf et al., 2015). Por ello, la funcionalización se convierte en una necesidad imperante para asegurar que estas nanopartículas puedan ser utilizadas efectivamente en sistemas en los que se requiere interacción con compuestos orgánicos. Los cambios estructurales provocados por la calcinación pueden resultar en la creación de defectos dentro de la red cristalina del ZnO. Según investigaciones, estos defectos pueden influir tanto en las propiedades ópticas como en la reactividad de las nanopartículas, afectando su rendimiento en aplicaciones como la fotocatalisis (Ferreira et al., 2021), (Zeng et al., 2010). En este sentido, se ha documentado que la modificación de la superficie de estas nanopartículas a través de la funcionalización puede mejorar su dispersión en disolventes orgánicos y optimizar su actividad fotocatalítica

(Cheng Keong et al., 2017),(Rana et al., 2016). Esto es especialmente relevante para aplicaciones que implican reacciones químicas en fases líquidas, donde la homogeneidad y estabilidad de las nanopartículas son cruciales para el éxito del proceso (González-Crisostomo et al., 2021). La aplicación de técnicas de funcionalización ha mostrado ser efectiva para mejorar las propiedades superficiales de las ZnO NPs. Por ejemplo, se han explorado agentes de capping que ayudan a estabilizar y dispersar las nanopartículas en medios orgánicos, previniendo su aglomeración (Javed et al., 2016). Estos agentes no solo ayudan a mantener la morfología de las nanopartículas después de la calcinación, sino que también pueden introducir grupos funcionales que facilitan la unión con otros compuestos orgánicos, ampliando su potencial uso en campos como la biomedicina, la detección de contaminantes y la degradación de tintes en aguas residuales (Rana et al., 2016). Es por ello que, la funcionalización de ZnO NPs no solo es importante para mantener sus características deseables, sino que también abre nuevas posibilidades para su integración en aplicaciones sofisticadas. Si bien estudios previos han explorado estrategias de funcionalización para mejorar la dispersión, la estabilidad o la actividad fotocatalítica, pocos han evaluado de forma sistemática el efecto combinado de la síntesis biogénica, los defectos inducidos por la calcinación y la funcionalización con APTES sobre las propiedades fisicoquímicas e interfaciales de las nanopartículas de ZnO. En particular el impacto de estos parámetros sobre el potencial zeta, el tamaño de partícula y la compatibilidad en medios orgánicos sigue siendo poco explorado (Gheisi et al., 2014), (Razouq et al., 2023), (Hsu et al., 2014). En tal sentido, esta investigación evalúa el efecto de la funcionalización con APTES (3-aminopropiltriethoxisilano) y otros parámetros de síntesis sobre las propiedades fisicoquímicas de ZnO NPs sintetizadas por ruta biogénica, con énfasis en la mejora del potencial zeta, la reducción del tamaño de partícula y la compatibilidad en medios orgánicos, contribuyendo al desarrollo de estrategias sostenibles en la modificación superficial de nanomateriales. Cabe destacar que la metodología de síntesis verde empleada en este estudio presenta características que la hacen potencialmente escalable para aplicaciones industriales y biomédicas. El procedimiento se lleva a cabo bajo condiciones suaves de temperatura y presión, utiliza reactivos accesibles y ambientalmente benignos, y no requiere de equipos especializados ni atmósferas controladas, lo que facilita su implementación a mayor escala. Estas ventajas ya han sido reportadas en la síntesis verde de nanopartículas de ZnO, donde se ha logrado mantener la reproducibilidad y el control del tamaño incluso en procesos a escala piloto. Sin embargo, para aplicaciones biomédicas, serían necesarios pasos

adicionales de purificación, estandarización y validación, con el fin de cumplir los requisitos regulatorios en cuanto a biocompatibilidad, esterilidad y toxicidad. En conjunto, los resultados obtenidos y la simplicidad del método sugieren que esta ruta de síntesis verde funcionalizada con APTES posee un alto potencial para ser trasladada a contextos industriales y biomédicos, siempre que se realicen las adaptaciones correspondientes (Mohanasundaram & Saral A., 2025), (Udayagiri et al., 2024). Este trabajo aporta conocimientos novedosos al correlacionar la síntesis biogénica y las estrategias de funcionalización con el comportamiento estructural y coloidal de las ZnO NPs, proporcionando enfoques sostenibles y eficaces para modificar sus propiedades con fines de aplicaciones avanzadas.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

Síntesis biogénica de ZnO NPs

Se utilizó el extracto optimizado de *Asparagus officinalis* como reductor orgánico (T° 25 °C, t: 5 min ultrasonido, 62% OH, TPC: 6277.94 μ g GAE/g d.m, AC: 10728.4 μ g Trolox/g d.m), con base en la metodología trabajada en nuestro grupo de investigación por Asmat-Campos, et al (Asmat-Campos et al., 2025). Para la síntesis de las ZnO NPs, se empleó acetato de zinc dihidratado ($Zn(O_2CCH_3)_2 \cdot 2H_2O$) (Merck, CAS 5970-45-6) a una concentración de 0.166 M como precursor. La solución se agitó magnéticamente en una placa calefactora hasta alcanzar una temperatura de 70 °C, la cual se mantuvo durante 15 minutos. Posteriormente, se añadió de forma gradual 20 mL del extracto optimizado de tocón de espárrago (T), bajo agitación constante a 600 rpm, continuando el proceso durante 4 horas. Finalizada esta etapa, las muestras se sometieron a calcinación en un horno tipo mufla a 700 °C durante 4 horas. El polvo blanco obtenido se molió manualmente en un mortero y se almacenó para su uso posterior.

Funcionalización controlada de ZnO NPs

Para la funcionalización de ZnO NPs con (3-aminopropil)triethoxisilano (APTES), se diseñaron cinco formulaciones experimentales (Tabla 1) en las que se mantuvo constante la masa de ZnO (0.2 g), mientras se variaron las proporciones de etanol, ácido acético y APTES. Las concentraciones fueron calculadas en términos de porcentaje peso/volumen (% p/v) para el ZnO y porcentaje volumen/volumen (% v/v) para los componentes líquidos. El procedimiento consistió, en todos los casos, en una etapa inicial de dispersión de las ZnO NPs en etanol durante 10 minutos a temperatura ambiente. En las muestras (A) y (B), el agente silano (APTES) se añadió directamente tras la dispersión, manteniéndose la mezcla

en agitación durante 8 horas a temperatura ambiente. En las muestras (C), (D) y (E), previo a la incorporación del APTES, se añadió ácido acético a la dispersión de ZnO NPs en etanol y se agitó durante 20 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, se añadió el APTES y se mantuvo la mezcla bajo las mismas condiciones (8 horas, temperatura ambiente). Durante la síntesis y funcionalización de las nanopartículas de ZnO, la reacción se llevó a cabo en condiciones ligeramente ácidas debido a la adición de ácido acético como parte del procedimiento, con un pH aproximado de 4.8. Este medio ácido favorece la hidrólisis del APTES en silanoles (Si-OH) reactivos, lo que permite su posterior condensación sobre la superficie de las nanopartículas. Al mismo tiempo, las condiciones ácidas limitan parcialmente el crecimiento excesivo de los cristales de ZnO, ayudando a mantener su tamaño dentro de la escala nanométrica. A continuación, se presentan las condiciones específicas de cada formulación:

Tabla 1. Composición y parámetros de síntesis ZnO NPs

Muestra	ZnO NPs (% w/v)	Etanol (% v/v)	Ácido Acético (% v/v)	APTES (% v/v)	Parámetros de síntesis
(A)	1.1	98.9	-	1.1	Dispersión: ZnO NPs + etanol (10 min, temperatura ambiente) Funcionalización: APTES (8 h, temperatura ambiente)
(B)	0.66	99.34	-	0.99	Dispersión: ZnO NPs + etanol (10 min, temperatura ambiente) Funcionalización: APTES (8 h, temperatura ambiente)
(C)	1.1	98.78	0.11	1.1	Dispersión: ZnO NPs + etanol (10 min, temperatura ambiente) Modificación: Ácido Acético (20 min, temperatura ambiente) Funcionalización: APTES (8 h, temperatura ambiente)
(D)	0.66	99	0.33	0.99	Dispersión: ZnO NPs + etanol (10 min, temperatura ambiente) Modificación: Ácido Acético (20 min, temperatura ambiente) Funcionalización: APTES (8 h, temperatura ambiente)
(E)	1.1	98.67	0.22	0.67	Dispersión: ZnO NPs + etanol (10 min, temperatura ambiente) Modificación: Ácido Acético (20 min, temperatura ambiente) Funcionalización: APTES (8 h, temperatura ambiente)

Caracterizaciones de ZnO NPs

Las propiedades ópticas de las ZnO NPs se evaluaron mediante espectrofotometría UV-Vis utilizando un espectrofotómetro Shimadzu (modelo UV-1900, Tokyo, Japón) en el rango de longitud de onda de 400 - 700 nm. El análisis estructural se realizó por difracción de rayos X (DRX) utilizando un difractómetro Rigaku Miniflex, empleando la geometría Bragg-Brentano en modo spinner. Los datos se recolectaron en un intervalo de 2θ entre 25° y 80° , con un tamaño de paso de $0,026^\circ$. La caracterización vibracional y de fases se llevó a cabo mediante espectroscopía Raman utilizando un microscopio confocal WITec (modelo Alpha 300R, Alemania), con una fuente láser de 532 nm, aplicando la muestra en estado seco sobre un portaobjetos de aluminio. Finalmente, el análisis del tamaño de partícula, la distribución y el potencial Z se efectuó mediante dispersión dinámica de luz (DLS), movilidad electroforética y análisis de potencial Z utilizando el equipo HORIBA SZ-100V2, proporcionando información detallada sobre la estabilidad coloidal y las características de superficie de las nanopartículas. Para los análisis de dispersión de luz dinámica (DLS), potencial zeta y movilidad electroforética, cada muestra fue medida mediante 20 corridas consecutivas con el fin de asegurar la confiabilidad estadística y considerar posibles fluctuaciones en el comportamiento coloidal. Los valores reportados corresponden al promedio y desviación estándar de dichas mediciones. En el caso de las espectroscopias UV-Vis y Raman, se registró un espectro representativo por muestra, ya que estas técnicas, al ser no invasivas y realizadas sobre suspensiones homogéneas o películas secas, respectivamente, ofrecen resultados altamente reproducibles bajo condiciones controladas, y los escaneos repetidos no mostraron variaciones significativas.

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la caracterización estructural, óptica y espectroscópica de las ZnO NPs funcionalizadas con (3-aminopropil)triethoxisilano (APTES). Las distintas formulaciones fueron diseñadas variando la concentración de ZnO NPs, APTES y ácido acético, con el objetivo de evaluar el efecto de estos parámetros sobre la eficiencia de funcionalización, la estabilidad coloidal y las propiedades fisicoquímicas del sistema. Las nanopartículas sintetizadas fueron caracterizadas mediante espectroscopía Raman confocal, espectroscopía UV-Vis y otras técnicas complementarias, permitiendo establecer correlaciones entre las condiciones de síntesis y la respuesta espectral de las muestras. El análisis se centra particularmente en las modificaciones estructurales inducidas por el tratamiento superficial con APTES, así como en la influencia del entorno químico sobre la dispersión óptica y la intensidad de las señales características, lo cual nos ha permitido profundizar en la comprensión de los mecanismos de funcionalización y aportar información importante para el diseño de nanosistemas con propiedades ajustadas a aplicaciones específicas.

La caracterización óptica de las ZnO NPs funcionalizadas con APTES fue realizada mediante espectroscopía UV-Vis en la región de 400 - 700 nm, con el objetivo de evaluar los efectos de la funcionalización sobre la absorbancia del sistema. En la Figura 1 (a) se presentan los espectros de absorbancia correspondientes a las cinco formulaciones sintetizadas, mientras que la Figura 1 (b) muestra el espectro del control, es decir, las ZnO NPs sin funcionalizar. En todos los casos funcionalizados se observa una banda característica de absorción centrada alrededor de los 429.2 nm, atribuida a la transición electrónica fundamental del ZnO desde la banda de valencia a la banda de conducción. Esta banda de absorción, típica de las ZnO NPs, se encuentra levemente desplazada respecto a la absorción

de materiales masivos (~370 nm), lo cual es indicativo del tamaño nanométrico de las partículas y de un posible efecto de confinamiento cuántico moderado, junto con la influencia del entorno superficial inducido por la presencia del silano.

Los estudios han demostrado que las ZnO NPs generalmente presentan un pico de absorción en un rango de longitud de onda entre 310 y 460 nm. Por ejemplo, uno de los informes señala que la absorción máxima se encuentra alrededor de 361 nm cuando estas nanopartículas se sintetizan en presencia de almidón (Yadav et al., 2006). Otro trabajo menciona que el pico de absorción específico alcanzó hasta 320 nm (Jayachandran et al., 2021), mientras que otros estudios establecen que los picos se localizan entre 330 y 460 nm, con un pico característico observado en 374 nm (Selim et al., 2020). Un trabajo preliminar vinculado a la aplicación de ZnO NPs en matrices bipoliméricas reportó la existencia de un pico característico en 382 nm (Asmat-Campos et al., 2025). Estas longitudes de onda son indicativas de la excitación del electrón en la banda de valencia hacia la banda de conducción, siendo una característica importante del comportamiento semiconductor de ZnO (Selim et al., 2020).

Es importante notar que el valor de la longitud de onda de absorción puede desviarse dependiendo del método de síntesis y las condiciones ambientales. Por ejemplo, la síntesis verde de ZnO NPs con extractos de plantas ha reportado picos de absorción que muestran un ligero desplazamiento hacia el azul desde el rango de absorción de las partículas macroscópicas, que es de aproximadamente 377 nm en el material de ZnO en su forma macroscópica. Esto se atribuye al aumento de la energía de excitación debido al tamaño de las partículas y su naturaleza cuasi bidimensional (Mohammed et al., 2023). Además, se ha observado que la variación en la morfología y la superficie de las nanopartículas, como las generadas bajo condiciones controladas de pH o temperatura, también influye en la posición

de los picos de absorción (Rojas Labastida et al., 2024). Un estudio concluyó que el proceso y los reactivos utilizados para la síntesis son determinantes en el tamaño y, por ende, en la longitud de onda de absorción que presentan las ZnO NPs en estado disperso (Talam et al., 2012).

El análisis comparativo de la intensidad de absorbancia revela diferencias sustanciales entre las muestras. La muestra (C), compuesta por 1.10% p/v de ZnO NPs, 1.10% v/v de APTES y 0.11% v/v de ácido acético, presentó la mayor absorbancia en el rango de interés, alcanzando un valor máximo cercano a 3.1 u.a. Esta elevada respuesta óptica es probablemente facilitada por la acción catalítica moderada del ácido acético durante la hidrólisis del APTES. La alta absorbancia también refleja una mayor concentración efectiva de nanopartículas dispersas, lo que implica una mínima sedimentación o aglomeración.

En comparación, las muestras (E) y (D), que también incluyeron ácido acético (0.22% y 0.33% v/v respectivamente), mostraron valores de absorbancia igualmente elevados, pero ligeramente inferiores a (C), lo que indica que, aunque la presencia del ácido favorece la funcionalización, su exceso puede provocar fenómenos de sobrecondensación del agente silano o inducir cierta inestabilidad coloidal. Estas condiciones podrían favorecer interacciones intermoleculares no deseadas o una reorganización superficial que limite la exposición óptica de las nanopartículas. Por otro lado, la muestra (B), con una menor concentración de ZnO NPs (0.66% p/v) y sin ácido acético, mostró una absorbancia intermedia, correspondiente a una menor densidad de nanopartículas en suspensión, coherente con los parámetros de síntesis. La menor absorbancia observada en esta formulación también puede relacionarse con una cobertura incompleta del silano o con una dispersión subóptima. Finalmente, la muestra (A), a pesar de contener 1.10% p/v de ZnO

NPs y 1.10% v/v de APTES, presentó la absorbancia más baja entre todas las formulaciones (~0.2 a.u.). Esta baja respuesta óptica sugiere una funcionalización ineficiente en ausencia de ácido acético, lo que podría haber conducido a una hidrólisis incompleta del APTES, a una agregación de las nanopartículas o incluso a la precipitación parcial del sistema.

La comparación entre el espectro UV-Vis de la muestra control (ZnO NPs sin funcionalización) y los espectros correspondientes a las nanopartículas funcionalizadas con APTES revela diferencias considerables tanto en la intensidad de absorbancia como en la forma espectral. El espectro del control exhibe una banda característica de absorción con un máximo alrededor de 375-400 nm, atribuible a la transición de banda prohibida del ZnO, la cual es típica de nanopartículas semiconductoras con buena cristalinidad y mínima presencia de defectos superficiales. En contraste, las muestras funcionalizadas muestran una absorción significativamente mayor, con un desplazamiento del máximo de absorbancia hacia longitudes de onda más largas, centrado en aproximadamente 429.2 nm. Este corrimiento hacia el rojo indica una modificación en el entorno electrónico de las nanopartículas, presumiblemente debido a la interacción entre los grupos funcionales del APTES y la superficie del ZnO. La aparición de una banda más amplia y más intensa sugiere también la presencia de agregación parcial o la formación de una capa orgánica alrededor del núcleo inorgánico, lo cual afecta la dispersión óptica del sistema. Este fenómeno es consistente con un aumento en el índice de refracción local y con la posible introducción de defectos superficiales asociados a la funcionalización. Asimismo, el aumento sostenido de absorbancia en el rango visible, especialmente en las muestras con mayor concentración de ZnO y APTES (como la muestra C), podría estar relacionado con procesos de dispersión más intensos o con transiciones electrónicas asociadas a defectos estructurales inducidos por la funcionalización. Esto confirma que la incorporación de APTES altera significativamente

las propiedades ópticas de las nanopartículas, evidenciando una modificación efectiva de la interfaz orgánico-inorgánica. En conjunto, estas observaciones respaldan la hipótesis de que el proceso de funcionalización no solo modifica la carga superficial y estabilidad coloidal, sino que también induce cambios medibles en la respuesta espectral del material, lo cual es relevante para su aplicación en sistemas optoelectrónicos o biosensores.

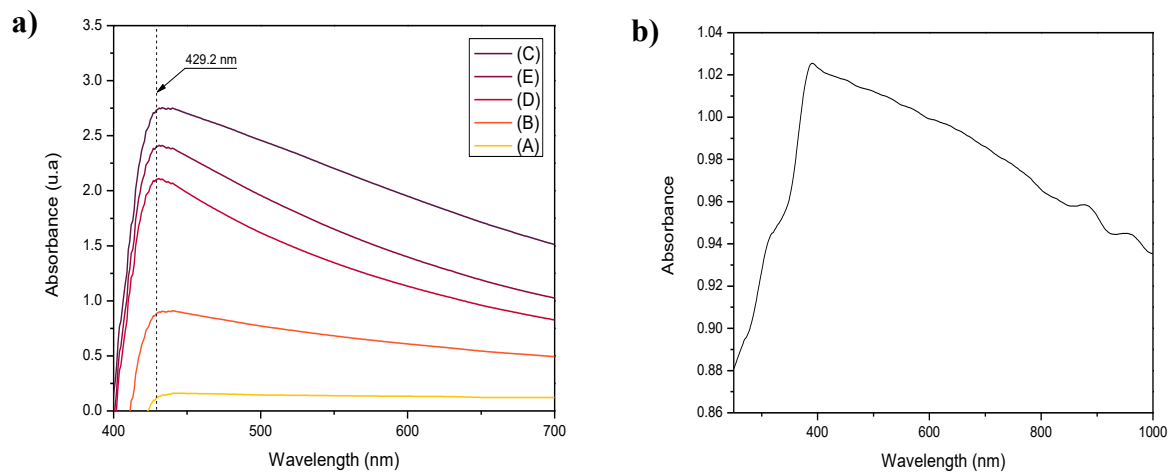


Figura 1. Espectros UV Vis de las zonas ZnO NPs funcionalizadas (a), y control (b)

La determinación de la energía de banda prohibida (band gap) mediante el análisis de los espectros UV-Vis, procesados según la relación de Tauc para transiciones directas permitidas $(ahv)^2$ vs. hv , proporciona información importante sobre las modificaciones electrónicas inducidas por la funcionalización superficial de las ZnO NPs. En la Figura 2, se presentan los resultados de este análisis para las cinco muestras funcionalizadas (A-E), así como el valor correspondiente a la muestra control (ZnO NPs sin funcionalización), resumido en la tabla insertada.

El valor de band gap para el ZnO NPs sin modificar es de 1.78 eV, considerablemente menor que los valores típicamente reportados para ZnO nanocristalino puro (generalmente entre 3.2 y 3.4 eV) (Viswanatha et al., 2004), (Chundawat et al., 2022), lo cual sugiere una alta densidad de defectos superficiales, impurezas residuales o efectos de confinamiento cuántico alterados, posiblemente debido al método de síntesis empleado. Tras la funcionalización con APTES, se observa un aumento progresivo en la energía de banda

prohibida, alcanzando un máximo de 2.27 eV en la muestra (E). Este incremento sistemático del band gap indica una modificación significativa del entorno electrónico de las nanopartículas. La tendencia observada puede atribuirse a varios factores interrelacionados. En primer lugar, la interacción de los grupos silano del APTES con la superficie del ZnO podría estar reduciendo la densidad de defectos superficiales (como vacancias de oxígeno o zinc), disminuyendo así los estados electrónicos intermedios que tienden a reducir la energía de transición. En segundo lugar, la presencia de la capa orgánica puede inducir un confinamiento espacial adicional o alterar la constante dieléctrica local, modulando la distribución de carga en la interfaz y afectando las bandas de conducción y valencia. El efecto de esta modificación es más pronunciado en las muestras funcionalizadas con mayor proporción de APTES, siendo la muestra (E) la que presenta el mayor band gap (2.27 eV), seguida por (D) con 2.15 eV. Esta correlación sugiere una dependencia directa entre el grado de funcionalización y la alteración de la estructura electrónica. En contraste, la muestra (C) muestra un valor relativamente bajo (1.94 eV), lo que podría estar relacionado con una funcionalización parcial o no homogénea, o con la formación de agregados que disminuyen la eficiencia del recubrimiento superficial.

Cabe destacar que la muestra (A), cuyo punto de intersección en la gráfica principal no es claramente visible, fue analizada con mayor detalle mediante una ampliación localizada, donde se observa un band gap de 2.07 eV. Esta observación, aunque sutil en el gráfico general, reafirma la necesidad de evaluar con precisión las regiones de absorción más bajas para sistemas con baja absorción óptica inicial.

Desde una perspectiva aplicada, la variación observada en los valores del band gap entre las ZnO NPs funcionalizadas y la muestra control representa un factor determinante en la selección de su uso en distintas áreas tecnológicas. Un band gap más bajo, como el registrado en la muestra control (1.78 eV), favorece la absorción en la región visible del espectro electromagnético, lo cual puede ser ventajoso para aplicaciones en fotocatalisis, fotodegradación de contaminantes o en dispositivos fotovoltaicos, donde se requiere un aprovechamiento eficiente de la luz solar. Sin embargo, esta disminución del band gap también puede estar asociada a la presencia de defectos estructurales o niveles de trampa, que podrían favorecer procesos de recombinación no radiativa y, por tanto, disminuir la eficiencia de conversión energética. Por el contrario, los valores más altos de band gap observados en las nanopartículas funcionalizadas (hasta 2.27 eV) sugieren una mayor

calidad estructural y posible pasivación de defectos superficiales, lo cual es deseable para aplicaciones optoelectrónicas, sensores UV, o dispositivos semiconductores donde se requiere una elevada estabilidad térmica y química. En este sentido, la modulación del band gap a través de la funcionalización con APTES no solo permite controlar las propiedades electrónicas del material, sino también direccionar su aplicabilidad hacia contextos específicos con mayores exigencias de rendimiento y estabilidad. Los cambios observados en el band gap de las nanopartículas de ZnO tras la funcionalización refleja modificaciones sutiles en su estructura electrónica y en sus estados superficiales, lo cual influye directamente en sus potenciales funcionalidades. Específicamente, una ligera disminución del band gap (como se observó en nuestras muestras funcionalizadas en comparación al control) sugiere una mejora en la absorción de la luz visible, lo cual resulta ventajoso para aplicaciones fotocatalíticas, ya que permite una utilización más eficiente del espectro solar. Por el contrario, un band gap más amplio en la muestra control mantiene una mayor capacidad de absorción en el UV, lo que la hace más adecuada para aplicaciones de filtrado ultravioleta, donde se desea una mínima interacción con la luz visible. Por tanto, las nanopartículas funcionalizadas, con su band gap reducido y una mayor reactividad superficial debido a los grupos APTES, podrían exhibir una eficiencia fotocatalítica mejorada (por ejemplo, en la degradación de contaminantes o en actividad antimicrobiana), mientras que el ZnO no funcionalizado, con su band gap ligeramente mayor sigue siendo óptimo como material bloqueador de radiación UV. Estos hallazgos destacan como el ajuste del band gap mediante la modificación superficial permite adaptar las nanopartículas de ZnO para usos específicos en los ámbitos industrial, ambiental o biomédico (Wang, 2004), (Uribe-López et al., 2021).

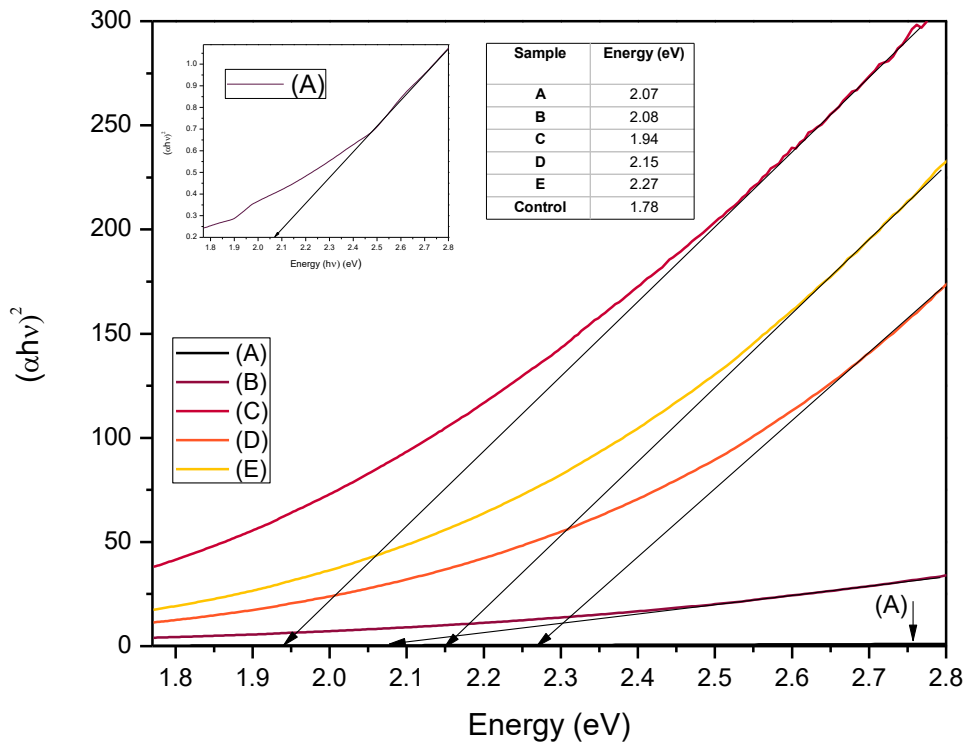


Figura 2. Tauc plot ZnO NP funcionalizadas y control

La caracterización de ZnO NPs mediante difracción de rayos X (DRX) es importante para entender su estructura cristalina y propiedades. Este tipo de nanomaterial típicamente presenta una estructura cristalina tipo wurtzita, que es la forma más comúnmente documentada en estudios de DRX (Torres-Santillán et al., 2023). Se muestra los difractogramas de las ZnO NPs de todas las muestras -incluyendo la muestra control (Figura 3-b) y las funcionalizadas (A–E) (Figura 3-a)- que exhiben patrones de difracción característicos de la fase hexagonal wurtzita del ZnO, con una excelente concordancia con el patrón de referencia JCPDS 00-001-1136. Los picos más prominentes, observados a ángulos $2\theta \approx 31.7^\circ$, 34.4° y 36.2° , corresponden a los planos cristalográficos (100), (002) y (101), respectivamente, los cuales son típicos de ZnO altamente cristalino. Además, se observa la presencia de picos secundarios como los asociados a los planos (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004) y (202), indicando la conservación de la estructura cristalina aun después del proceso de funcionalización con APTES.

No se detectaron picos adicionales atribuibles a fases secundarias, como óxidos mixtos, siloxanos o contaminantes, lo que sugiere que la modificación superficial mediante APTES no alteró significativamente la red cristalina del ZnO. Este comportamiento es

deseable en aplicaciones donde se requiere mantener las propiedades intrínsecas del material, como la actividad fotocatalítica o la estabilidad térmica. En cuanto a la intensidad relativa de los picos, se observan ligeras disminuciones en las muestras funcionalizadas respecto a la muestra control. Esto podría estar relacionado con la incorporación de grupos silano en la superficie de los cristales, lo que puede generar una ligera pasivación superficial, o bien inducir una leve desordenación en la red cristalina más cercana a la superficie, sin modificar el núcleo cristalino del material.

El tamaño de las nanopartículas puede estimarse utilizando la ecuación de Debye-Scherrer, una metodología ampliamente aplicada en la literatura para este propósito (Torres-Santillán et al., 2023). Esta relación permite correlacionar los anchos de los picos de difracción con el tamaño de las partículas, lo que se traduce en características relevantes de la morfología de los nanomateriales. Algunos estudios han reportado que las ZnO NPs tienen un tamaño de cristalito que puede variar entre aproximadamente 10 nm a 50 nm, dependiendo de las condiciones de síntesis (Aquino et al., 2018). En tal sentido, se aplicó lo antes mencionado, obteniéndose valores promedio entre 26.22 y 26.74 nm para las muestras funcionalizadas, mientras que la muestra control presentó un valor mayor, de 28.56 nm. Esta ligera reducción en el tamaño de partícula sugiere que el tratamiento con APTES podría limitar el crecimiento cristalino durante la síntesis o inducir una ligera inhibición del proceso de agregación de dominios cristalinos. Este efecto es común en materiales funcionalizados, ya que la presencia de agentes orgánicos puede actuar como inhibidores del crecimiento en ciertas direcciones cristalográficas. Para las ZnO NPs control, los parámetros de red calculados son aproximadamente: $a=3.250 \text{ \AA}$, $c=5.207 \text{ \AA}$, los cuales son consistentes con la tarjeta estándar JCPDS N.º 36-1451 para el ZnO. En las muestras funcionalizadas con APTES, las posiciones de los picos presentan ligeros desplazamientos; sin embargo, los parámetros de red calculados se mantienen dentro del margen de error experimental respecto al control, con $a\approx 3.251\text{-}3.253 \text{ \AA}$ and $c\approx 5.208\text{-}5.210 \text{ \AA}$, indicando que la funcionalización superficial no distorsiona significativamente la red cristalina del ZnO, como era de esperarse, ya que el APTES modifica principalmente la superficie y no la estructura interna del material.

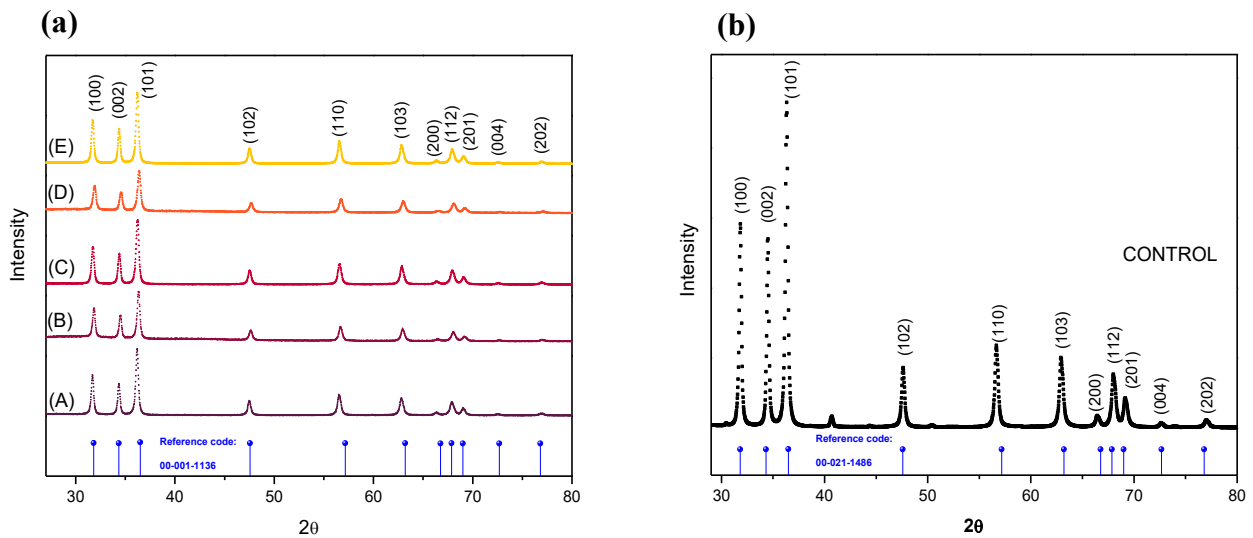


Figura 3. Espectros DRX de las Zn NPs funcionalizadas (a) y control (b).

La caracterización estructural fue realizada mediante espectroscopía Raman confocal, permitiendo evaluar los efectos de los parámetros de síntesis sobre la calidad cristalina y la estabilidad superficial de los nanomateriales obtenidos. La figura correspondiente muestra los espectros Raman de las cinco formulaciones trabajadas (A-E).

En la Figura 4, se puede evidenciar que uno de los picos más relevantes observados en todos los espectros se localiza en torno a 438 cm^{-1} , y corresponde al modo vibracional E_2 (high), característico del ZnO con estructura hexagonal tipo wurtzita, esto en concordancia con el espectro XRD (Figura 3). Este modo, asociado a las vibraciones de los átomos de oxígeno en la red, se considera un marcador fiable de la calidad cristalina del material. Una intensidad elevada y una forma bien definida de este pico indican un orden estructural conservado, incluso tras el proceso de funcionalización superficial. En las muestras analizadas, se observaron variaciones significativas en la intensidad del pico E_2 (high), lo que refleja diferencias en la conservación de la cristalinidad entre formulaciones. La muestra (A), que posee una proporción equimolar de ZnO NPs y APTES (1.10% cada uno) sin ácido acético, presentó el pico E_2 (high) más intenso, lo que indica una excelente preservación de la estructura cristalina durante el proceso de silanización. Esto sugiere que, en ausencia de catalizadores como el ácido acético, el APTES puede formar enlaces covalentes con la superficie del ZnO NPs sin inducir desorden significativo en la red cristalina. En cambio, la muestra (D), con bajo contenido de ZnO NPs (0.66%) y alta concentración de ácido acético

(0.33%), mostró una disminución marcada en la intensidad del $E_2(\text{high})$, junto con un incremento en la señal correspondiente a modos longitudinales ópticos (LO), como $A_1(\text{LO})$ y $E_1(\text{LO})$ ($\sim 580\text{--}590\text{ cm}^{-1}$). Estos últimos se relacionan con defectos estructurales, impurezas o desorden superficial inducido por distorsiones en la red cristalina. La mayor intensidad de los modos LO en presencia de ácido acético puede explicarse por una condensación acelerada del APTES, promovida por la acidificación del medio, lo que favorece la formación de una capa densa de silano que altera o cubre parcialmente la superficie cristalina del ZnO NPs. Por su parte, la muestra (B), que contiene menor concentración de ZnO NPs (0.66%) y APTES (0.99%) sin ácido, presentó una señal Raman general más débil, lo que podría atribuirse a una menor densidad de nanopartículas funcionalizadas y, por ende, una menor sección de dispersión Raman efectiva. En cambio, la muestra (E), aunque con alto contenido de ZnO NPs (1.10%), mostró un espectro más atenuado, posiblemente por la baja concentración de APTES (0.67%), lo cual podría resultar en una cobertura superficial incompleta o una baja eficiencia de funcionalización, afectando la interacción con el haz láser.

Un aspecto interesante es la presencia de una señal en la región de $\sim 204\text{ cm}^{-1}$, atribuida al modo $2E_2(\text{low})$. Este modo no corresponde a una vibración principal, sino a un modo combinado de segundo orden que involucra la repetición armónica del modo $E_2(\text{low})$, característico de las vibraciones de los átomos de Zn. Su aparición puede deberse a la existencia de procesos vibracionales no lineales habilitados por la conservación parcial del orden estructural y por fenómenos de confinamiento fonónico típicos de materiales nanométricos, cabe mencionar que, los materiales bidimensionales han mostrado comportamientos vibracionales únicos debido a los efectos de Moiré en su estructura (Hernández-Varela et al., 2024). Estos efectos son importantes para entender cómo las vibraciones no lineales pueden ser utilizadas para aplicaciones tecnológicas avanzadas. Además, el confinamiento fonónico en nanomateriales, como los híbridos orgánico-inorgánicos, permite manipular las propiedades vibracionales, lo que se traduce en nuevas aplicaciones en campos como la electrónica y la energía (Vidal-Limón et al., 2018). Además, este modo puede intensificarse en presencia de tensiones internas moderadas o interacciones interparticulares inducidas por la funcionalización química.

La intensidad relativa del modo $2E_2(\text{low})$ puede correlacionarse con el nivel de acoplamiento superficial entre las nanopartículas y la capa de APTES. En formulaciones con

ácido acético, por ejemplo, la mayor densidad de reticulación de la capa silanada puede generar tensiones superficiales residuales que potencien la activación de este modo vibracional. Por tanto, su análisis contribuye con información complementaria sobre el impacto mecánico y estructural de la funcionalización sobre la red del ZnO. La presencia moderada del modo $2E_2(\text{low})$ sugiere una funcionalización efectiva con un mínimo impacto en la red interna del material. Por el contrario, las formulaciones que incluyen ácido acético en el proceso de síntesis presentan mayor desorden estructural, más defectos superficiales y una menor calidad vibracional general, lo cual puede impactar negativamente en la funcionalidad final de las nanopartículas, especialmente en aplicaciones donde la interacción superficial y la estabilidad coloidal son críticas.

Para el caso de la muestra control, se evidencia claramente las bandas características del ZnO con estructura wurtzita, confirmando su fase cristalina. Se destacan los modos vibracionales $E_2(\text{low})$, $E_2(\text{high})$ y $A_1(\text{LO})$, siendo el pico más intenso el correspondiente al modo $E_2(\text{high})$ ubicado en torno a 478 cm^{-1} , característico de la vibración del oxígeno en la red del ZnO. Este modo es indicativo de una buena calidad cristalina en la estructura hexagonal. Sin embargo, la presencia de múltiples señales adicionales, así como una banda ancha en la región de $800\text{--}900\text{ cm}^{-1}$, sugiere posibles defectos estructurales y desorden superficial, probablemente relacionados con la agregación observada en otras caracterizaciones (DLS y Z potencial). Esto está en línea con el bajo valor de potencial Z (-0.34 mV) y el alto tamaño hidrodinámico (108 nm), lo que indica una estabilidad coloidal muy limitada.

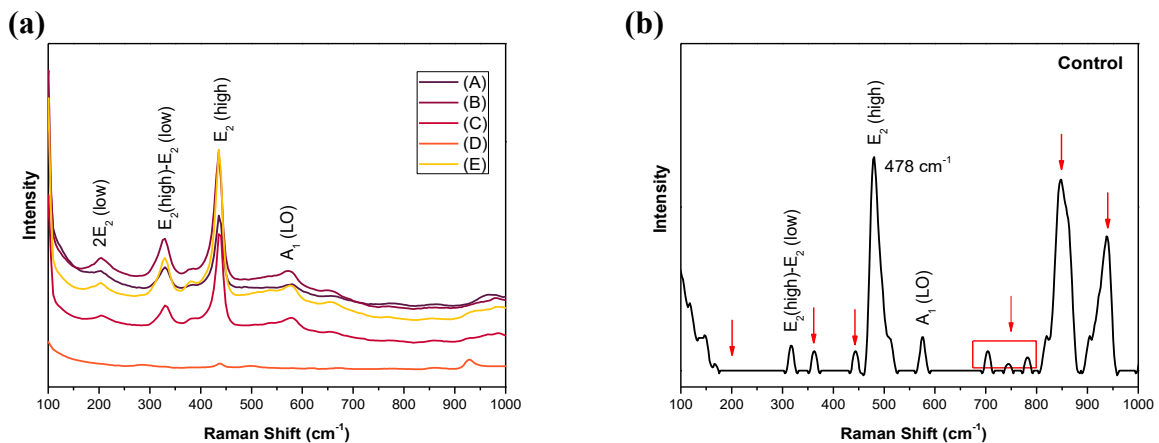


Figura 4. Espectros Raman confocal de las ZnO NPs funcionalizadas (a) y control (b).

Asimismo, se presentan los resultados obtenidos mediante las técnicas de análisis de potencial Z, movilidad electroforética y dispersión de luz dinámica (DLS), aplicadas tanto a las nanopartículas de ZnO funcionalizadas como a la muestra control (Figura 5). Estas caracterizaciones permitieron evaluar la estabilidad coloidal, la carga superficial y el tamaño hidrodinámico de las nanopartículas en suspensión, parámetros importantes para inferir su comportamiento en medios líquidos y su idoneidad para distintas aplicaciones. Los datos obtenidos muestran un claro impacto de la funcionalización sobre la estabilidad y el comportamiento coloidal de las nanopartículas de ZnO. El potencial Z, que representa la carga superficial y es un indicador directo de la estabilidad en suspensión, varía significativamente entre las muestras. La muestra (D) presenta el valor más negativo (-500.69 mV), seguida por la (E) (-92.21 mV) y (C) (-46.62 mV), lo que indica una fuerte repulsión electrostática entre partículas en estas formulaciones. Esto es consistente con una excelente estabilidad coloidal, lo cual es corroborado por los valores bajos de diámetro hidrodinámico en estas mismas muestras (26.5 nm para D, 50.2 nm para E y 35.9 nm para C), mostrando una baja tendencia a la agregación. En cambio, las muestras (A) y (B) presentan valores mucho menos negativos de potencial Z (-3.01 mV y -0.396 mV, respectivamente), cercanos a los del control (-0.34 mV), lo cual refleja una inestabilidad coloidal significativa. Esta escasa repulsión electrostática facilita la aglomeración de partículas, como lo confirma el tamaño hidrodinámico en la muestra (A), que es extraordinariamente alto (2470.1 nm), indicando la formación de agregados importantes en suspensión. La movilidad electroforética, que guarda relación directa con el potencial Z, sigue la misma tendencia. Las muestras más estables, como la (D) y la (E), muestran valores elevados (37.3 cm²/V·s y 6.87 cm²/V·s, respectivamente), mientras que las muestras (A), (B) y el control presentan valores significativamente menores, incluso en el orden de 10^{-2} o 10^{-6} cm²/V·s, confirmando su pobre estabilidad electrocinética.

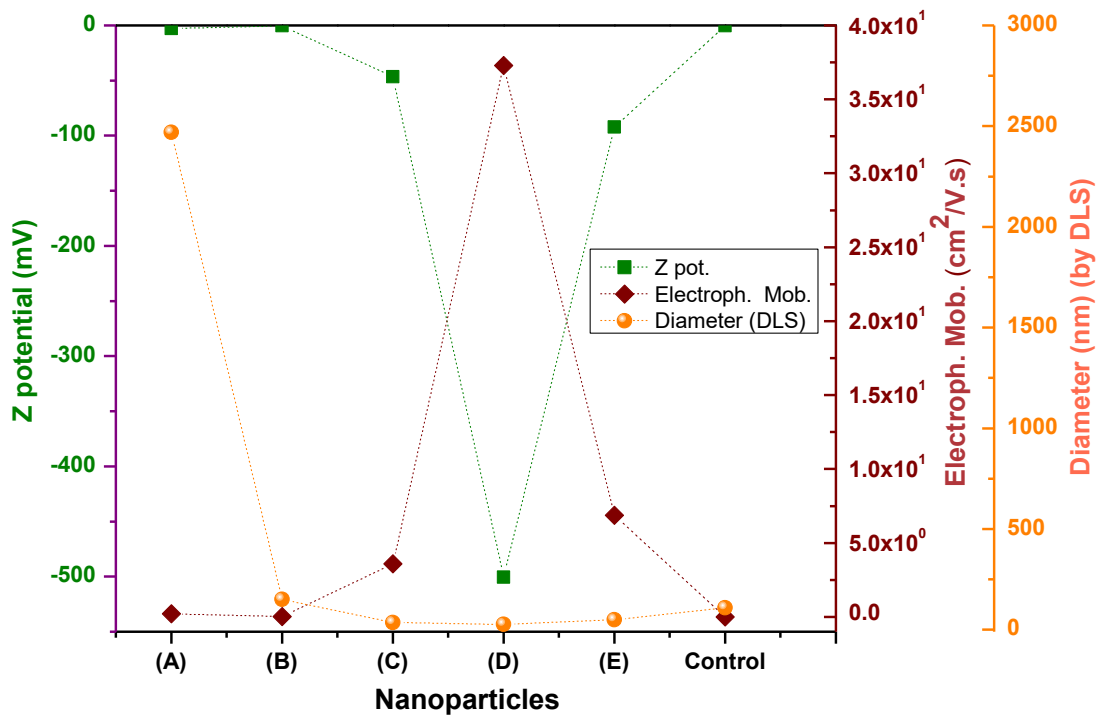


Figura 5. Caracterización por DLS, Z potencial y movilidad electroforética de las ZnO NPs.

Agradecemos al revisor por esta valiosa observación. Si bien la formulación D no presenta el band gap más bajo entre las muestras, sí demostró el conjunto más equilibrado de propiedades fisicoquímicas en general. Específicamente, la formulación D mostró un tamaño de cristalita reducido en comparación con el control, un potencial zeta notablemente negativo (lo que indica una excelente estabilidad coloidal) y un diámetro hidrodinámico moderado, menor que el del control, pero coherente con una funcionalización superficial efectiva. Aunque otras formulaciones presentaron valores de band gap ligeramente más bajos, no igualaron la estabilidad ni la uniformidad en el tamaño de partícula observadas en la formulación D. Esto sugiere que la formulación D logra un compromiso óptimo entre modificación superficial y preservación de características ópticas y estructurales deseables, lo que la convierte en la candidata más prometedora entre las formulaciones evaluadas para futuras aplicaciones.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de múltiples técnicas de caracterización revelan una congruencia sólida que permite establecer comparaciones integrales entre las distintas formulaciones de ZnO sintetizadas por vía verde. En particular, la muestra (D) destacó como la más favorable, al presentar un tamaño de partícula pequeño y consistente tanto por DRX (26.55 nm) como por DLS (26.5 nm), un band gap de 2.15 eV, un potencial Z de -500.69 mV y una alta movilidad electroforética (37.3 cm²/V·s), lo que sugiere una excelente estabilidad coloidal y propiedades ópticas ajustadas para aplicaciones optoelectrónicas y antimicrobianas. En contraste, la muestra control presentó una discrepancia significativa entre el tamaño por DRX (28.56 nm) y DLS (108 nm), atribuida a una baja estabilidad coloidal (Z = -0.34 mV), que favorece la agregación de partículas en suspensión y, por ende, una sobreestimación del tamaño hidrodinámico en solución. Este comportamiento resalta la importancia de la funcionalización vegetal para mejorar la estabilidad, homogeneidad y desempeño de las nanopartículas de ZnO, consolidando a la muestra (D) como la formulación más efectiva dentro del estudio.

REFERENCIAS

Aquino, P., Osorio, A. M., Ninán, E., & Torres, F. (2018). Caracterización de nanopartículas de ZnO sintetizadas por el método de precipitación y su evaluación en la incorporación en pinturas esmalte. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 84(1), 5–17. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v84i1.151>

Ashraf, R., Riaz, S., Kayani, Z. N., & Naseem, S. (2015). Effect of Calcination on Properties of ZnO Nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 2(10), 5468–5472. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.11.071>

Asmat-Campos, D., Rojas, M. L., Miano, A. C., Cruzado-Bravo, M. L. M., Menezes, D. B., Pereira, R., & Montes de Oca-Vásquez, G. (2025). Biosynthesized metal nanoparticles from agro-industrial byproducts applied in the functionalization of bioplastics for use in the blueberry packaging. *Composites Part B: Engineering*, 296, 112249. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112249>

Cheng Keong, C., Sunitha Vivek, Y., Salamatinia, B., & Amini Horri, B. (2017). Green Synthesis of ZnO Nanoparticles by an Alginate Mediated Ion-Exchange Process and a case study for Photocatalysis of Methylene Blue Dye. *Journal of Physics: Conference Series*, 829, 012014. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/829/1/012014>

Chundawat, P., Vyas, Y., Dharmendra, D., Chaubisa, P., & Ameta, C. (2022). Novel synergistic Combination of W and Co Co-doped ZnO Nanoparticles Incorporated as a Photoanode in a Dye Sensitized Solar Cell. *ChemistrySelect*, 7(45). <https://doi.org/10.1002/slct.202202830>

Dobrucka, R., & Długaszewska, J. (2016). Biosynthesis and antibacterial activity of ZnO nanoparticles using *Trifolium pratense* flower extract. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(4), 517–523. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.05.016>

Fatiqin, A., Alfanaar, R., Rahman, S., Febrianto, Y., Citrariana, S., Arsana, M. P., Suprayogi, T., & Kurniawan, Y. S. (2024). Catalytic Reduction of 4-Nitrophenol and Methylene Blue with Silver Nanoparticles Decorated with *Drymoglossum piloselloides* Extract. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, 4(2), 249–261. <https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.210>

Ferreira, N. S., Sasaki, J. M., Silva JR, R. S., Attah-Baah, J. M., & Macêdo, M. A. (2021). Visible-Light-Responsive Photocatalytic Activity Significantly Enhanced by Active [$V_{Zn} + V_{O} +$] Defects in Self-Assembled ZnO Nanoparticles. *Inorganic Chemistry*, *60*(7), 4475–4496. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c03327>

Gheisi, A. R., Neygandhi, C., Sternig, A. K., Carrasco, E., Marbach, H., Thomele, D., & Diwald, O. (2014). O₂ adsorption dependent photoluminescence emission from metal oxide nanoparticles. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, *16*(43), 23922–23929. <https://doi.org/10.1039/C4CP03080J>

González-Crisostomo, J. C., López-Juárez, R., & Petranovskii, V. (2021). Photocatalytic Degradation of Rhodamine B Dye in Aqueous Suspension by ZnO and M-ZnO (M = La³⁺, Ce³⁺, Pr³⁺ and Nd³⁺) Nanoparticles in the Presence of UV/H₂O₂. *Processes*, *9*(10), 1736. <https://doi.org/10.3390/pr9101736>

Hajos, M., Starowicz, M., Brzychczyk, B., Basista, G., & Francik, S. (2025). Size Distribution of Zinc Oxide Nanoparticles Depending on the Temperature of Electrochemical Synthesis. *Materials*, *18*(2), 458. <https://doi.org/10.3390/ma18020458>

Hardani, H., Soonmin, H., Syahidi, K., Zaidah, A., Sulistiyana, S., Hidayatulloh, A., Fudholi, A., & Angraini, L. M. (2025). Optimizing Solar Power: The Impact of N719 Dye Concentration on DSSC Efficiency with TiO₂ Nanoparticles. *Journal of Multidisciplinary Applied Natural Science*, *5*(1), 254–266. <https://doi.org/10.47352/jmans.2774-3047.245>

Hernández-Varela, J. D., Cervantes-Sodi, F., & García-Trujillo, S. E. (2024). Las rotaciones en la escala nanométrica: el efecto Moiré en los materiales 2D. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *48*(187), 431–437. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.2619>

Hsu, A., Liu, F., Leung, Y. H., Ma, A. P. Y., Djurišić, A. B., Leung, F. C. C., Chan, W. K., & Lee, H. K. (2014). Is the effect of surface modifying molecules on antibacterial activity universal for a given material? *Nanoscale*, *6*(17), 10323–10331. <https://doi.org/10.1039/C4NR02366H>

Javed, R., Usman, M., Tabassum, S., & Zia, M. (2016). Effect of capping agents:

Structural, optical and biological properties of ZnO nanoparticles. *Applied Surface Science*, 386, 319–326. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.06.042>

Jayachandran, A., T.R., A., & Nair, A. S. (2021). Green synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using *Cayratia pedata* leaf extract. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 26, 100995. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2021.100995>

Mohammed, Y. H. I., Alghamdi, S., Jabbar, B., Marghani, D., Beigh, S., Abouzied, A. S., Khalifa, N. E., Khojali, W. M. A., Huwaimel, B., Alkhalifah, D. H. M., & Hozzein, W. N. (2023). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Cymbopogon citratus* Extract and Its Antibacterial Activity. *ACS Omega*, 8(35), 32027–32042. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03908>

Mohanasundaram, P., & Saral A., M. (2025). Binding properties and biological applications of green synthesized ZnO nanoparticles from neem flower. *Scientific Reports*, 15(1), 17727. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02157-x>

Otilia Cintează, L., & Antonia Tănase, M. (2021). Multifunctional ZnO Nanoparticle: Based Coatings for Cultural Heritage Preventive Conservation. In *Thin Films*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94070>

Rana, N., Chand, S., & Gathania, A. K. (2016). Green synthesis of zinc oxide nano-sized spherical particles using *Terminalia chebula* fruits extract for their photocatalytic applications. *International Nano Letters*, 6(2), 91–98. <https://doi.org/10.1007/s40089-015-0171-6>

Razouq, H., Berger, T., Hüsing, N., & Diwald, O. (2023). Vapor phase-grown TiO₂ and ZnO nanoparticles inside electrospun polymer fibers and their calcination-induced organization. *Monatshefte Für Chemie - Chemical Monthly*, 154(8), 849–856. <https://doi.org/10.1007/s00706-023-03093-0>

Rojas Labastida, R. A., Pacheco Julián, J. V., Amaya Parra, G., & Jiménez Valera, S. (2024). Nanopartículas de óxido de zinc y óxido de plata para uso de protección solar de piel. *REVISTA DE CIENCIAS TECNOLÓGICAS*, 7(2), e283. <https://doi.org/10.37636/recit.v7n2e283>

SAADI, H., ATMANI, E. H., & FAZOUAN, N. (2024). *Effect of Calcination Temperature on the Sol-Gel Synthesis of Aluminum-Doped ZnO Nanoparticles for Photovoltaic Applications*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4560408/v1>

Selim, Y. A., Azb, M. A., Ragab, I., & H. M. Abd El-Azim, M. (2020). Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Deverra tortuosa* and their Cytotoxic Activities. *Scientific Reports*, *10*(1), 3445. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60541-1>

Talam, S., Karumuri, S. R., & Gunnam, N. (2012). Synthesis, Characterization, and Spectroscopic Properties of ZnO Nanoparticles. *ISRN Nanotechnology*, *2012*, 1–6. <https://doi.org/10.5402/2012/372505>

Torres-Santillán, E., López-Ramírez, D., Arroyo-Calderón, J. A., Castañeda-Olmos, M. A., & Ortega-Avilés, M. (2023). Análisis estructural y morfológico de las nanoestructuras de ZnO-CuO/GOr sintetizadas por vía química verde. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías Del ICBI*, *11*, 57–60. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial5.11567>

Udayagiri, H., Sana, S. S., Dogiparthi, L. K., Vadde, R., Varma, R. S., Koduru, J. R., Ghodake, G. S., Somala, A. R., Boya, V. K. N., Kim, S.-C., & Karri, R. R. (2024). Phytochemical fabrication of ZnO nanoparticles and their antibacterial and anti-biofilm activity. *Scientific Reports*, *14*(1), 19714. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69044-9>

Uribe-López, M. C., Hidalgo-López, M. C., López-González, R., Frías-Márquez, D. M., Núñez-Nogueira, G., Hernández-Castillo, D., & Alvarez-Lemus, M. A. (2021). Photocatalytic activity of ZnO nanoparticles and the role of the synthesis method on their physical and chemical properties. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *404*, 112866. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.112866>

Vidal-Limón, A., Contreras, O., & Águilar, S. A. (2018). Materiales híbridos como alternativa nanotecnológica para la producción de energéticos. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencia y Nanotecnología*, *10*(19), 109. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2017.19.62404>

Viswanatha, R., Sapra, S., Sen Gupta, S., Satpati, B., Satyam, P. V., Dev, B. N.,

& Sarma, D. D. (2004). Synthesis and Characterization of Mn-Doped ZnO Nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(20), 6303–6310. <https://doi.org/10.1021/jp049960o>

Wang, Z. L. (2004). Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 16(25), R829–R858. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/25/R01>

Yadav, A., Prasad, V., Kathe, A. A., Raj, S., Yadav, D., Sundaramoorthy, C., & Vigneshwaran, N. (2006). Functional finishing in cotton fabrics using zinc oxide nanoparticles. In *Bull. Mater. Sci* (Vol. 29, Issue 6).

Zeng, H., Duan, G., Li, Y., Yang, S., Xu, X., & Cai, W. (2010). Blue Luminescence of ZnO Nanoparticles Based on Non-Equilibrium Processes: Defect Origins and Emission Controls. *Advanced Functional Materials*, 20(4), 561–572. <https://doi.org/10.1002/adfm.200901884>