

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Ingeniería en Nanotecnología

Decorado de Nanopartículas por Ablación Láser en Líquidos

TESIS

Que como parte de los requisitos

para obtener el Grado de

Ingeniero en Nanotecnología

Presenta:

Mauricio Calleja Quintero

Dirigido por:

Dr. Jorge Luis Domínguez Juárez

Codirigida por:

M. en C. Miriam Zagoya González

Mayo de 2026



La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.

Centro Universitario, UAQ. Qro., México



Universidad Autónoma de
Querétaro
Facultad de Ingeniería
Ingeniería en Nanotecnología



Decorado de Nanopartículas por Ablación Láser en Líquidos

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de

Ingeniero en Nanotecnología

Presenta:

Mauricio Calleja Quintero

Dirigido por:

Dr. Jorge Luis Domínguez Juárez

Dr. Jorge Luis Domínguez Juárez

Presidente

Firma

Dr. Ricardo Antonio Escalona Villalpando

Secretario

Firma

Dr. Rufino Nava Mendoza

Vocal

Firma

M. en C. Miriam Zagoya González

Suplente

Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Octubre de 2025

México

Dedicatoria

A todas esas personas que me apoyaron a lo largo del camino, por su amor incondicional, por compartir su sabiduría y que me recordaron que incluso en los momentos de duda, siempre es posible levantarse.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Jorge Luis Domínguez, por su orientación y paciencia desde el primer día que ingresé al CFATA como visitante y a lo largo de este trabajo. Asimismo, agradecer al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA-UNAM), debido a su gran apoyo en este trabajo.

Agradezco también a mis profesores, M. en C. Jesús Valdés, M. en C. Moisés Martínez, quienes me enseñaron que existe un nuevo mundo por descubrir en sus respectivas materias. Aunque no fue sencillo, mi desarrollo académico y personal se lo debo a su particular forma de enseñar.

De manera especial, agradezco a mi familia, Cecilia Quintero y Ximena Calleja, por su apoyo y acompañamiento emocional en cada uno de mis proyectos. A mis tías, María de Jesús y Ana María Quintero, por estar siempre al pendiente sin importar la distancia. A mis primos, Dante y Arath Guerra, Andrés y Rodrigo Quintero, por su ánimo constante y por brindarme valiosa retroalimentación durante el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos, Carlos Tirado, Rafael Becerra, Javier Ballado, Luis Diego Azcona y Azael Gastelum, por su apoyo y motivación permanente, por ayudarme a mantenerme enfocado, a la vez, relajado para alcanzar mis objetivos.

Finalmente, a mis compañeros de trabajo quienes a lo largo de la carrera me permitieron continuar con mis estudios y contribuyeron a mi formación como una persona más responsable y comprometida.

Índice

Agradecimientos	4
Índice de cuadros.....	7
Índice de figuras.....	8
Abreviaturas y siglas	13
Resumen.....	14
Abstract	16
1. Introducción	18
2. Antecedentes.....	21
2.1 Ablación Láser	23
2.2 Láser de femtosegundos.....	25
2.3 Parámetros dinámicos variables en la síntesis por ablación láser	25
2.4 Centrifugación.....	26
2.5 Material nanométrico en dispersión coloidal	26
2.6 Nanomateriales de semiconductor y metal plasmónico.....	27
2.7 Propiedades ópticas y morfológicas.....	28
3. Hipótesis	29
4. Objetivos.....	29
4.1 Objetivo general	29
4.2 Objetivos específicos.....	30
5. Material y Metodología	30
5.1 Simulación.....	30
5.1.1 Simulación en “MIE Theory Caculator”	36
5.2 Ablación láser en líquidos LAL	37
5.2.1 Proceso de preparación de muestra.....	37
5.2.2 Proceso de ablación	38
5.3 Disposición de muestra y solución para las distintas metodologías.....	42
5.3.1 Ablación para obtención de un solo material.....	42
5.3.2 Hibridación	42
5.3.3 Irradiación de una suspensión de NPs previamente sintetizadas	43
5.3.4 Hibridación en recipiente pequeño	45

5.3.5 Irradiación en recipiente pequeño.....	45
5.4 Espectros UV-Vis.....	46
5.5 Concentración con peso:	46
5.6 Centrifugación:	46
5.7 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	47
6. Resultados y discusión.....	49
6.1 Simulación.....	49
6.2 Espectroscopía UV-Vis	54
6.2.1 Variación de distancia al foco.....	54
6.2.2 Irradiación.....	57
6.2.3 Agitación.....	62
6.2.4 Tamaño del recipiente.....	65
6.2.5 Centrifugación	67
6.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)	72
7. Conclusiones.....	78
Bibliografía o Referencias.....	81

Índice de cuadros

Cuadro 1. Cupo máximo dentro de NP semiconductora (110-150 nm) para distintos tamaños de nanopartículas metálicas(10-50 nm).	52
Cuadro 2. Características espectrales de nanopartículas híbridas silicio-oro sometidas a irradiación post-síntesis en recipiente 1.	60
Cuadro 3. Longitud de onda máxima y FWHM de nanopartículas híbridas silicio-oro irradiadas en recipiente 2.	62
Cuadro 4. Características espectrales λ_x de nanopartículas híbridas silicio-oro obtenidas bajo diferentes condiciones de agitación.....	65
Cuadro 5. Pico máximo de la longitud de onda en la absorción del espectro visible después de obtener un pico distintivo de nanopartículas híbridas silicio-oro en función de la centrifugación.....	67
Cuadro 6. Corrimiento en nanómetros (blueshift) de la longitud de onda del pico máximo distintivo en el espectro de absorción respecto a la muestra control después de centrifugación.....	67

Índice de figuras

Figura 1. Restricción geométrica para la incrustación de una nanopartícula metálica en una nanopartícula semiconductor (Realización propia).	32
Figura 2. Definición geométrica de la distancia centro-centro entre nanopartículas (Realización propia).	34
Figura 3. Configuraciones híbridas silicio-oro: a) core-shell y b) nanopartícula decorada (creación propia asistida con IA).	37
Figura 4. Distribución de puntos para la determinación del punto focal (creación propia asistida con IA).	40
Figura 5. Trayectoria (escala no proporcional) de ablación láser sobre la muestra de un ciclo de movimiento de los motores X, Y (creación propia).	40
Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de ablación (creación propia asistida con IA). ...	41
Figura 7. Esquema experimental para la ablación laser en líquidos (creación propia).....	42
Figura 8. Esquema experimental para la síntesis de nanopartículas híbridas silicio-oro (creación propia).	43

Figura 9. Esquema experimental para la irradiación al líquido con nanopartículas post-síntesis con foco para ablación en el líquido. (creación propia).	44
Figura 10. Sistema experimental de ablación e irradiación.	44
Figura 11. Configuración experimental para la síntesis en target con recipiente 2 pequeño (creación propia).	45
Figura 12. Configuración experimental para la irradiación directo a líquido en recipiente 2 (creación propia).	46
Figura 13. Adaptación de tubos Eppendorf para centrifugación.	47
Figura 14. Deposición de muestra sobre sustrato de silicio para análisis SEM.....	48
Figura 15. Área superficial expuesta en función del grado de incrustación.	50
Figura 16. Relación entre área superficial disponible y capacidad de adsorción molecular.	51
Figura 17. Área superficial disponible para distintos tamaños de nanopartículas metálicas.	53

Figura 18. Espectro UV-Vis teórico para nanopartículas simples e híbridas tipo “core-shell”. Elaboración propia a partir de la calculadora de teoría de Mie de nanoComposix (oro), basada en el modelo desarrollado por Oldenburg (2000).	54
Figura 19. Espectros UV-Vis de nanopartículas de silicio cristalino sintetizadas a diferentes posiciones focales.....	55
Figura 20. Espectros UV-Vis de nanopartículas de silicio amorfo sintetizadas a diferentes posiciones focales.....	56
Figura 21. Espectros UV-Vis de nanopartículas de oro sintetizadas a diferentes posiciones focales.	57
Figura 22. Comparación del efecto de la irradiación post-síntesis sobre nanopartículas de silicio. Nota: Imagen b) tomada de Green synthesis of silica-coated gold nanoparticles employing femtosecond laser, solid targets, and water por Machado, N. G. P., Raele, M.P., Jimenez-Villar, E., de Rossi, W., 2025, Discover Nano, Volumen (20), p. 17.	58
Figura 23. Efecto del tiempo de irradiación sobre el espectro UV-Vis de nanopartículas híbridas silicio-oro.	59
Figura 24. Efecto de la irradiación post-síntesis en nanopartículas híbridas sintetizadas en recipiente 2.	61

Figura 25. Espectros UV-Vis de nanopartículas híbridas obtenidas a diferentes velocidades de agitación.	63
Figura 26. Comparación del pico distintivo para diferentes velocidades de agitación.....	64
Figura 27. Comparación del efecto del tamaño del recipiente y la irradiación post-síntesis.	66
Figura 28. Efecto de la centrifugación sobre el espectro UV-Vis de nanopartículas híbridas.	69
Figura 29. Comparación del inverso del ancho a media altura ($1/\text{FWHM}$) del máximo de absorción UV-Vis para las diferentes condiciones de síntesis, utilizado como indicador de la homogeneidad de las nanopartículas.....	71
Figura 30. Comparación de la longitud de onda del máximo de absorción (λ_{max}) para las diferentes condiciones de síntesis, empleada como indicador del tamaño promedio esperado de las nanopartículas.	72
Figura 31. Micrografías SEM de nanopartículas de silicio antes y después de irradiación post-síntesis.	73

Figura 32. Micrografías SEM de nanopartículas híbridas silicio-oro antes y después de irradiación.	74
Figura 33. Comparación SEM-BSE de una mezcla de nanopartículas de silicio y oro sintetizadas por separado.....	74
Figura 34. Evidencia SEM-BSE de nanopartículas híbridas silicio-oro obtenidas a 5000 rpm.	76
Figura 35. Micrografías SEM de nanopartículas híbridas sintetizadas en recipiente 2.	77

Abreviaturas y siglas

- LAL: Ablación láser en líquidos
- NPs: Nanopartículas
- RPM: Revoluciones por minuto

Resumen

La síntesis de nanopartículas híbridas metal-semiconductor, ha despertado gran interés por sus aplicaciones en fotocatalisis, sensores, conversión de energía y remediación ambiental. Este trabajo estudia su obtención mediante ablación láser pulsado en líquidos (LAL), técnica física que evita precursores químicos utilizando solo agua.

Se seleccionaron dos nanomateriales estables en agua, es decir, las nanopartículas (NPs) de silicio y de oro. Por lo que se decidió estudiar nanopartículas híbridas de silicio decoradas con oro. El procedimiento se realizó en dos etapas: primero se ablacionó un blanco de silicio amorfo sumergido en agua para generar un nanofluido de nanopartículas de silicio. Posteriormente, se ablacionó un blanco de oro dentro de este nanofluido, permitiendo que las nanopartículas de oro decoraran las de silicio mediante la energía del láser.

Se evaluó el efecto de distintos parámetros en la hibridación: tiempo de irradiación láser (incluyendo irradiación post-síntesis: 15, 30 y 45 min), volumen del nanofluido de silicio (manteniendo la concentración) y velocidad de agitación durante la ablación de decoracion con oro (3000, 5000 y 7000 RPM). Además, se analizó el efecto de la posición del blanco respecto al punto focal en la producción de nanopartículas puras.

Mediante espectroscopía UV-Vis se estudiaron las propiedades ópticas. Se utilizó predicción teórica basada en la dispersión de Mie para estimar picos de absorción y homogeneidad de tamaños. Los resultados experimentales mostraron que la irradiación posterior a la síntesis y el uso de recipientes de menor volumen favorecen el estrechamiento de los picos de absorción, indicando mayor homogeneidad y reducción del tamaño promedio de las nanopartículas por fragmentación inducida por el láser. La agitación mostró poco efecto significativo.

La microscopía electrónica de barrido (SEM), utilizando electrones secundarios y modo BSE (retrodispersión), confirmó la formación de estructuras híbridas, con regiones de alto contraste (oro) sobre estructuras de silicio/sílice. Aunque no se pudo confirmar inequívocamente estructuras core-shell, los resultados evidencian una interacción superficial entre ambas fases.

En conclusión, la técnica LAL permite obtener nanopartículas híbridas Si-Au de forma limpia y controlable, donde la irradiación post-síntesis y el volumen del nanofluido son parámetros clave para mejorar la homogeneidad.

Palabras clave: Nanomateriales; Ablación Laser en Líquidos; Decoración de nanopartículas.

Abstract

The synthesis of hybrid metal-semiconductor nanoparticles has gained significant interest due to their potential applications in photocatalysis, sensors, energy conversion, and environmental remediation. This work focuses on the production of silicon-gold hybrid nanoparticles using Pulsed Laser Ablation in Liquids (LAL), a clean physical technique that does not require additional chemical precursors using just water.

The most stable materials in water are silica and gold NPs, therefore it was decided to do silica decorated NPs with gold. The synthesis was carried out in two stages. First, an amorphous silicon target was ablated in water to produce a silicon nanoparticle nanofluid. Subsequently, a gold target was ablated directly inside this silicon nanofluid, allowing gold nanoparticles to decorate the silicon nanoparticles through the energy of the pulsed laser.

The influence of several experimental parameters on the hybridization process was evaluated: laser irradiation time (including post-synthesis irradiation at 15, 30, and 45 min), volume of the silicon nanofluid (maintaining constant nanoparticle concentration), and stirring speed of the nanofluid during gold ablation (3000, 5000, and 7000 RPM). The effect of target position relative to the laser focal point was also studied for pure nanoparticle production.

Optical properties were characterized by UV-Vis spectroscopy. Theoretical predictions based on Mie scattering theory were used to estimate absorption peaks and size distribution. Experimental results showed that post-synthesis irradiation and the use of smaller containers promoted the narrowing of the characteristic absorption peaks, indicating improved size homogeneity and a reduction in average nanoparticle size due to laser-induced fragmentation. Stirring speed had minimal effect on hybridization.

Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis, using secondary electrons and backscattered electron (BSE) mode, confirmed the formation of hybrid structures, with high-contrast regions (gold) deposited on silicon/silica structures. Although core-shell configurations could not be definitively confirmed, the results indicate surface interaction between both phases.

In conclusion, LAL is an effective and clean method for producing Si-Au hybrid nanoparticles. Post-synthesis irradiation and nanofluid volume were identified as key parameters for controlling homogeneity and morphology.

Keywords: *Nanomaterials; Laser Ablation in Liquids; Nanoparticle Decoration.*

1. Introducción

El desarrollo de nanomateriales funcionales ha cobrado relevancia debido a sus potenciales aplicaciones en catálisis, obtención de energía y remediación ambiental (Hasan, 2015; Ijaz, Gilani, Nazir, & Bukhari, 2020). Para el caso de obtención de energía, se requiere de nuevas fuentes de energía renovables, de fácil acceso, priorizando la producción de máquinas nanométricas que puedan utilizar a la energía solar (Seifikar, Azizian, Eslamipannah, & Jaleh, 2022). Nanomateriales inmersos en dispersiones coloidales representa una alternativa para la posibilidad de producir celdas solares líquidas (Domínguez-Juárez, y otros, 2023). Si aunado a los nanomateriales, se tuviera la posibilidad de extraer energía del agua como solvente en la forma del hidrógeno, este hidrógeno también puede ser atrapado en otros productos para combustibles líquidos, como el metanol en procesos fotocatalíticos (Kang, y otros, 2019). Un nanomaterial que funcione para atrapar luz mientras que absorbe y rompe otras moléculas es la finalidad de muchas líneas de investigación (Valdés-Hernández, y otros, 2024). Es aquí donde aparece el deseo de utilizar los materiales híbridos, en donde por un lado se puedan integrar a nivel nanométrico diversos materiales que tengan diferentes funciones, o que incluso en combinación, pueda potenciar procesos a nivel nanométrico (Martínez-Chávez, Rivera-Muñoz, Velázquez-Castillo, Escobar-Alarcón, & Esquivel, 2021). El estudio sistemático de dichos materiales también tiene un interés genuino, y que ocurre desde la síntesis, hasta la caracterización de la interacción de la luz solar (Zeng, y otros, 2012; Zhang, Gökce, & Barcikowski, 2017; Zhang & Wada, 2021). También es posible usar la dependencia de las longitudes de onda de la luz para discriminar parámetros de control y al mismo tiempo usar técnicas fotónicas que incluyen los efectos y las propiedades para la identificación de líquidos en la interacción (Domínguez-Juárez, y otros, 2023).

Identificar los posibles cambios controlables de estos nanomateriales usando dicha luz permite avanzar en el proceso de fabricación. Si esta producción con la ablación en agua se combina con el análisis láser en líquidos, se puede seguir un sistema de producción de química verde, utilizando directamente a la superficie de los nanomateriales decorados sin recubrimientos o solventes, para que no afecte el estudio de su respuesta o eficiencia (Khairani, Mínguez-Vega, Doñate-Buendía, & Gökce, 2023). La ablación láser es una

técnica robusta con aplicaciones en una amplia gama de campos; que incluyen la nano y micro fabricación, ciencia de materiales, la química analítica y la medicina. En el caso de la nanotecnología, la interacción de la luz potente de un láser con la materia a tiempos ultracortos permite generar fragmentos nanométricos incrustados (Eliezer, y otros, 2004; Zeng, y otros, 2012; Zhang & Wada, 2021). Por lo tanto, esta tesis estudia desde la producción de nanomateriales usando ablación láser hasta el uso de agua como solvente, como una alternativa amigable con el ambiente, pensando en una alternativa de estudio con las propiedades ópticas de los nanomateriales híbridos en líquidos (Dominguez-Juarez, y otros, 2015; Valdés-Hernández, y otros, 2024).

Existen diversos métodos y tipos de láseres para realizar la síntesis de NPs decoradas o híbridas. Este método es una alternativa sustentable cuyos materiales mantienen propiedades puras en sus superficies y que directamente están interaccionando químicamente con los solventes que los sostienen, además, no presenta desechos ni gran consumo energético al realizarse (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013; Zhang & Wada, 2021). Debido a que es un método emergente, aún se tiene mucho campo de investigación para determinar los mejores parámetros (potencia del láser, frecuencia, tiempo de exposición al láser, solventes, métodos complementarios, ciclos, tratamiento de targets), para obtener nanopartículas híbridas capaces de ser estables por un prolongado periodo de tiempo (Kanitz, y otros, 2017; Phan & Haes, 2019). Tanto en la literatura como en procesos que ya se realizan en el laboratorio de óptica y fotónica (Laboratorio de Láseres 1) del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Juriquilla, se encuentran diversas combinaciones de parámetros utilizados para obtener nanopartículas estables y con un rango pequeño de tamaño (Maximova, Aristov, Sentis, & Kabashin, 2015; Zeng, y otros, 2012). Esta tesis busca desarrollar procesos alternativos de producción de materiales híbridos, mediante optimización y caracterización, así como la búsqueda de posibles soluciones para la selectividad de materiales a partir de sus propiedades físicas y químicas. Por ello, resulta necesario establecer criterios que permitan solucionar sistemáticamente los parámetros de síntesis más adecuados para obtener nanopartículas híbridas con propiedades reproducibles. Actualmente dentro de la lista de

parámetros se encuentran; el tiempo de exposición del blanco (target) al láser, la frecuencia de repetición de los pulsos, la energía pico del pulso láser, el tiempo de exposición que se incluye, el número de ciclos, la potencia promedio y el solvente en el que se deposita el target (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013; Khan, Al-Thabaiti, Obaid, Khan, & Al-Youbi, 2011).

En estudios e investigaciones realizadas en las últimas dos décadas, la ablación láser como técnica física “Top Down” ha sido un método aplicado para la realización de diferentes nanoestructuras (Mohazzab, Jaleh, Nasrollahzadeh, Issaabadi, & Varma, 2019; Seifikar, Azizian, Eslamipannah, & Jaleh, 2022). Debido a que no se requieren precursores, la demanda de energía y costos de agentes es baja. Las obleas de los materiales son 5 veces menos caras que las sales metálicas o precursores organometálicos (Zhang, Gökce, & Barcikowski, 2017). La ablación láser en líquidos es un método simple y adaptable a muchos medios, que beneficia la síntesis de materiales complejos. Entre los ejemplos se encuentran los nanocompuestos de lignosulfonato decorados con paladio (Mohazzab, et al., 2020) o nanocompuestos de GO/ TiO₂/Au (Mohazzab, Jaleh, Nasrollahzadeh, Issaabadi, & Varma, 2019). Esta técnica es considerada una de las 12 principales dentro de la “química verde” (Kang, y otros, 2019; Zhang, Gökce, & Barcikowski, 2017). También, permite la síntesis de varios tipos de nanopartículas sin utilizar sustancias tóxicas y nocivas para el medio ambiente (Flores-Castañeda & Camacho-López, 2023; Samir, Abd El-salam, Harun, & Mohamed, 2021). De acuerdo con Zeng et. al., (2012), el tamaño, la morfología y la forma de las nanoestructuras se pueden manipular dependiendo de los parámetros del láser, el líquido y el objetivo utilizado (Zeng, y otros, 2012).

Aunque ha habido avances en la determinación de parámetros en síntesis de nanopartículas metálicas, se ve comprometida la pureza del coloide, ya que se pueden producir tamaños de partículas secundarias no deseadas. Se ha reportado que para obtener una solución monodispersa, es necesario de un método complementario como la centrifugación (Bonaccorso, Zerbetto, Ferrari, & Amendola, 2013; Miller, Harris, & Hobbie, 2014; Suresh, Pelletier, Moon, Phelps, & Doktycz, 2015; Zhang, Gökce, & Barcikowski, 2017). La importancia de tener un control en el tamaño, también apoya a la estabilidad de las nanopartículas. Lo

reportado por Kim et. al., en 2013, indica que, si el rango de tamaño de nanopartículas es pequeño, la estabilidad anómala según el análisis de la teoría Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek (DLVO) clásica es mejor (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013). Actualmente, muchos procesos de síntesis no están claros, como el caso del trabajo de Lam et. al., (2014), o la modificación de nanopartículas para generar otras estructuras, donde muestra que la fragmentación y alargamiento es posible con láseres (Tsuji, Watanabe, & Tsuji, 2003). También se requieren técnicas espectroscópicas ópticas complementarias para monitorear en tiempo real el proceso y técnicas computacionales para establecer parámetros de fabricación (Jendrzej, Gökce, Amendola, & Barcikowski, 2016; Lam, y otros, 2014). Sin embargo, entender estos procesos no solo es importante para el control de tamaño, sino también repercuten en las propiedades físicas y químicas que tendrá el nanomaterial (Chen, y otros, 2021; Kelly, Coronado, Zhao, & Schatz, 2003; Werner, Hashimoto, & Uwada, 2010; Park, Yoon, Kim, Huh, & Yoon, 2010). Con el presente proyecto de esta tesis se pretende establecer un protocolo inicial para normalizar, comparar, mostrar tendencia y sugerir técnicas que permitan comparaciones valiosas para el control de síntesis de nanopartículas de semiconductor, decoradas con metales por ablación láser en líquidos. Así mismo, se buscará comprender e interpretar la fabricación fundamental y las propiedades físicas y químicas del producto final. Finalmente, utilizar técnicas de espectroscopias ópticas y técnicas computacionales para identificar los cambios que se pueden aplicar a las nanopartículas y medirlas in situ.

2. Antecedentes

Las nanopartículas son objetos que contienen al menos una dimensión que va de 1 – 100 nm influenciando una propiedad dependiente de ese tamaño. La producción de nanopartículas tiene un interés legítimo hacia la miniaturización de dispositivos optoelectrónicos, cuánticos y para desarrollos tecnológicos basados en los usos de superficies. Mientras las dimensiones de un material vayan disminuyendo, se incrementa la energía de superficie, y la relación área contra volumen. Un nanomaterial se puede considerar metaestable debido al corto tiempo de vida del estado de energía. Durante la formación de las nanopartículas (NPs), se considera que la vida media es dependiente de su tamaño. Comúnmente, para promover la estabilidad

de las NPs se incluyen agentes que, por su tamaño o ancho, varían el potencial de superficie de la nanoestructura (Phan & Haes, 2019). Aparecen ventajas sobre los materiales “macro” por su área de superficie efectiva, transporte de masa, propiedades de catálisis y el control sobre microambientes (Welch & Compton, 2006). Esto ha propiciado que, en los últimos años, se usen los nanomateriales para diversas áreas económicas y comerciales. Por ejemplo, para el área farmacéutica o aplicaciones alternativas médicas, donde es posible liberar el fármaco durante el transporte o hacia el sitio objetivo, al direccionar a ligandos de superficie o incluso usando una guía magnética para un mejor resultado (Mohanraj & Chen, 2006). Pero es de destacar que, si se tienen un control adecuado, sus ventajas sobresalen debido a su alta reactividad de superficie y su aumento en la relación área-volumen. Es importante considerar siempre la nano toxicología que se enfoca en el impacto negativo que podrían traer al medio ambiente o al propio ser humano (Elsaesser & Howard, 2012). Las aplicaciones que muestran ventajas interesantes son:

- Aquellas en electroanálisis con muy poco material hacia su miniaturización para detectar especies, debido a su bajo costo, uso sencillo y fiabilidad.
- El uso de nanopartículas derivadas de un material base barato, hace que el costo de la detección por electrodo se reduzca notablemente contra uno hecho de materiales caros como el oro (Welch & Compton, 2006).
- En la rama óptica, sirven para la imagenología biomédica, iluminación en el estado sólido y de indicadores del desempeño de fotocatalizadores. Estas ramas se pueden ver mejoradas si se les agregan decoraciones o una cubierta de carbono (Zhang, Gökce, & Barcikowski, 2017).

En general, los métodos para realizar la síntesis de nanopartículas se pueden dividir en los siguientes grupos: químicos, físicos, fotoquímicos y biológicos (Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018). Se pueden obtener nanopartículas, nano esferas, nano cápsulas, entre otras nanoestructuras (Hasan, 2015). En la rama biológica, existen métodos que se combinan y utilizan como base de proteínas, polisacáridos y polímeros sintéticos haciendo una dispersión, evaporación, emulsificación espontánea o difusión del solvente (Mohanraj & Chen, 2006). En contraste con los otros métodos de síntesis, el enfoque físico

utiliza procesos de descomposición evaporación-condensación (Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018). Entre los más destacados se encuentra el método físico de ablación láser en líquidos (LAL), que se ha vuelto una alternativa consiguiendo ventajas sobre otros (Ijaz, Gilani, Nazir, & Bukhari, 2020). Una de las más importantes es que las NPs obtenidas son libres de toxicidad biológica, presentan funcionalizaciones de un solo paso sin uso de purificaciones posteriores, son altamente estables y no requieren de un proceso de cobertura (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013). La secuencia de procesos físicos en general es: primero se hace incidir el pulso del láser en el objetivo dentro del solvente elegido, después se genera en el objetivo plasma ópticamente activo, surge una burbuja y suceden procesos químicos en fase de gas, finalmente la burbuja colapsa y se libera la materia en la fase líquida (Zhang, Gökce, & Barcikowski, 2017). Se ha reportado que utilizar el método LAL, provee un mejor control sobre el tamaño de las NPs obtenidas, en el caso de su interacción con células vivas in-vitro, muestran potencial para el área de la biotecnología (Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018). La síntesis de NPs híbridas sin exposición a químicos se logra con un control sobre el tamaño de partícula variando los parámetros del láser (Gündoğdu, Kepceoğlu, Gezgin, Küçükçelebi, & Kılıç, 2019). Las características ópticas deseables en el ámbito de fotocatalisis son: absorbancia elevada, absorción extendida hacia el visible y resonancia plasmónica intensa. Se puede lograr una variación en estas características dependiendo de la polaridad, hidrofobicidad o resonancia que presente un solvente orgánico extra en la síntesis (Khan, Al-Thabaiti, Obaid, Khan, & Al-Youbi, 2011).

2.1 Ablación Láser

La ablación con láser es un proceso en el que se utiliza un rayo láser con mucha energía focalizada para arrancar material de una superficie sólida. Cuando el rayo láser intenso es expuesto al material, se genera un calentamiento súbito, lo que provoca la vaporización y fusión del material. En el campo de los nanomateriales, se considera que son sintetizados de manera “botom-up” o “top-down”. La técnica de ablación láser en líquidos mezcla las dos maneras mencionadas anteriormente y fue desarrollada por Fojtik (1993) y Henglein (1993). Recientemente, la ablación láser en líquidos se ha convertido en una nueva rama de las

nanociencias para la síntesis de nanomateriales (Zhang & Wada, 2021). Por ejemplo, metales puros, aleaciones de metales, óxidos, sulfuros, polímeros de partículas y compósitos complejos, utilizados para; áreas biológicas, ópticas, catalizadores, energías y remediación ambiental (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013; Zhang & Wada, 2021). Los sistemas utilizados para realizar la síntesis son; láseres pulsados que se pueden clasificar dependiendo de la duración del pulso. Incluyen láseres de microsegundos (ms), nanosegundos (ns), picosegundos (ps) y femtosegundos (fs). Este rango de tiempo es bastante importante para la síntesis de los nanomateriales, ya que, dependiendo de la duración del pulso, la dispersión coloidal poseerá distintas propiedades (Gündoğdu, Kepceoğlu, Gezgin, Küçükçelebi, & Kılıç, 2019; Henglein, 1993; Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018). Las ventajas que presenta esta técnica son (Fojtik & Henglein, 1993; Lam, y otros, 2014):

- Es una técnica de síntesis continua y sin necesidad de procesos que involucren pasos dependientes de habilidades de los usuarios, lo que permite la síntesis de dispersiones sistematizadas y repetibles con la propiedad de producciones coloidales de nanomateriales de alta pureza o finos.
- Dado que se realiza dentro de un sistema automatizado y controlado, garantiza la seguridad del personal que la realice.
- Es una técnica fácil de implementar, tomando las debidas medidas de seguridad.

Los mecanismos fisicoquímicos son bastante complejos debido a las interacciones que suceden en diferentes escalas de tiempo durante la ablación. La potencia del láser calienta la superficie súbitamente y vaporiza el material objetivo, lo que causa la remoción de la superficie de este (excitación electrónica, calentamiento y desintegración de red) (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013). Durante el proceso se crean: plasma de iones, electrones y partículas neutras. La interacción entre el plasma y el medio líquido induce varios fenómenos como la formación de la burbuja de cavitación y dispersión en la fase líquida (Gündoğdu, Kepceoğlu, Gezgin, Küçükçelebi, & Kılıç, 2019; Zhang & Wada, 2021; Henglein, 1993; Kanitz, y otros, 2017).

2.2 Láser de femtosegundos

Un láser de femtosegundos emite pulsos ópticos con duraciones del orden de 10^{-15} . Estas duraciones de pulso extremadamente cortas hacen que los láseres de femtosegundos sean únicos y les permiten lograr capacidades de procesamiento precisas y ultrarrápidas. Se utilizan normalmente en diversas aplicaciones científicas, médicas e industriales debido a su capacidad para concentrar energía en el tiempo y en el espacio con una precisión extremadamente alta. Este confinamiento permite usar mucha energía y proteger las zonas que pudieran ser afectadas por el calor. Es decir, la luz puede interactuar con materiales en escalas de tiempo más cortas que el tiempo de difusión térmica, lo que lleva a una transferencia de calor mínima al material circundante (Eliezer et al., 2004). Esto los hace ideales para micro mecanizado de precisión, estructuración de superficies y procesamiento de materiales al combinarse con la potencia máxima. Dicha potencia puede ser extrema a pesar de la corta duración de sus pulsos.

Los láseres de femtosegundos se utilizan ampliamente para aplicaciones de micro mecanizado, incluido el corte, la perforación y la estructuración de superficies de diversos materiales, como metales, semiconductores, cerámicas y polímeros (Jiang et al., 2018). Su capacidad para crear características precisas a pequeña escala los hace valiosos en industrias como la nanotecnología, la microelectrónica, la fabricación de dispositivos médicos y la ingeniería aeroespacial o en aplicaciones médicas como la cirugía corneal. Los láseres de femtosegundos son herramientas indispensables en diversos campos de investigación científica, como la espectroscopia ultrarrápida, la femto-química y la física de attosegundos. Permiten a los investigadores estudiar fenómenos ultrarrápidos en escalas de tiempo antes inaccesibles, proporcionando información sobre procesos fundamentales en física, química y biología.

2.3 Parámetros dinámicos variables en la síntesis por ablación láser

La fabricación de nanomateriales puede ser controlada con: la absorción, la longitud de onda, la potencia, la tasa de repetición, el área del punto focal, el ancho del pulso y el tiempo expuesto al mismo. En el caso de producción con el uso de materiales puros se pueden lograr sin ningún químico en el proceso. Además de los parámetros variables mencionados, también

se pueden agregar procesos complementarios post-síntesis como una segunda irradiación, centrifugación, tratamientos sónicos o magnéticos (Biswas, et al., 2018; Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013).

2.4 Centrifugación

Una centrifugadora es un dispositivo que permite separar y agrupar por tamaños, partículas de una solución utilizando un rotor (Griffith, 2010; Miller, Harris, & Hobbie, 2014). Cuando el rotor gira, se le aplica una fuerza centrífuga a cada partícula de la muestra, lo que permite la sedimentación a una tasa proporcional a la fuerza centrífuga aplicada. Esta sedimentación se ve afectada por las propiedades físicas que posean las partículas y la solución en donde se encuentre (Bai, et al., 2010; Villalobos-Hernández & Müller-Goymann, 2006). La centrifugación es el método más conveniente para la separación y purificación de suspensiones coloidales de nanopartículas, después de ser sintetizadas (Kuang, et al., 2014; Liu, Kang, Liu, & Yang, 2018; Akbulut, et al., 2012), y contribuye a la separación de adiciones no deseadas en las nanopartículas obtenidas (Kahnouji, Mosaddegh, & Bolorizadeh, 2019).

La funcionabilidad de la centrifugación se debe a la velocidad y las variables que determinan los coeficientes de sedimentación (Akbulut, et al., 2012).

Se ha reportado que la distribución del tamaño de partículas en la solución fomenta una mejora en las propiedades que posee. La variación de los parámetros dependientes del tiempo, así como de la velocidad que afectan directamente el intervalo de tamaños obtenidos después del proceso. Se han reportado mejoras en la fotoluminiscencia y en la absorbancia de luz, dependiente del tamaño de las partículas sintetizadas (Biswas, et al., 2018; Kuang, Liu, & Sun, 2012; Suresh, Pelletier, Moon, Phelps, & Doktycz, 2015).

2.5 Material nanométrico en dispersión coloidal

Después de que las partículas son liberadas de la burbuja de cavitación, entran a la fase líquida y crecen de manera espontánea (Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018). La solución obtenida es la dispersión coloidal nanométrica del material que haya sido sometido a LAL. Esta solución también permite que la síntesis continúe sin ninguna afección

de la interacción con el láser. Es cierto que, si la concentración de nanomaterial aumenta en la solución, afectará la absorción de energía del láser. Por eso es importante controlar este parámetro y desarrollar un estándar (Khan, Al-Thabaiti, Obaid, Khan, & Al-Youbi, 2011).

Los materiales sintetizados a partir de ablación láser, son deseables porque las superficies nanométricas que se obtienen sin ningún tipo de cobertura, hacen posible la conjugación de grupos funcionales, aditivos y aniones para controlar el tamaño durante su crecimiento en un líquido (Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018; Gündoğdu, Kepceoğlu, Gezgin, Küçükçelebi, & Kılıç, 2019). Durante la síntesis, si la concentración de nanomaterial aumenta en la solución, afectará la absorción de energía del láser a la muestra (Khan, Al-Thabaiti, Obaid, Khan, & Al-Youbi, 2011; Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018).

2.6 Nanomateriales de semiconductor y metal plasmónico

Gran parte de las investigaciones hoy en día están dirigidas a los materiales capaces de aprovechar recursos renovables para reducir la contaminación del medio ambiente (Hasan, 2015; Ijaz, Gilani, Nazir, & Bukhari, 2020). El caso de los nanomateriales que utilizan la luz del sol como fuente de energía, representan grandes ventajas considerando que los procesos que realizan demandan mucha energía. Entre estos nanomateriales se encuentran la combinación de los semiconductores y los metálicos (Martínez-Chávez, Rivera-Muñoz, Velázquez-Castillo, Escobar-Alarcón, & Esquivel, 2021; Valdés-Hernández, y otros, 2024). Un semiconductor se define por sus propiedades eléctricas, es decir, es un material cuya conductividad eléctrica es intermedia entre la de un conductor (como los metales) y un aislante (como el vidrio), debido a que posee una brecha de banda o bandgap moderada entre su banda de valencia y su banda de conducción (Valdés-Hernández, y otros, 2024). Mientras que un fenómeno interesante ocurre a las nanopartículas metálicas, donde aparecen las resonancias plasmónicas de superficie localizadas que excita a los electrones de conducción en nanoestructuras metálicas acopladas a campos electromagnéticos externos (Kelly, Coronado, Zhao, & Schatz, 2003). Con nanopartículas esféricas de algunos metales como el oro, las resonancias aparecen típicamente alrededor del espectro visible, donde se puede absorber la energía solar (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013). Cuando se combina a los

semiconductores y a los metálicos, estos materiales son capaces de realizar reacciones de reducción y oxidación después de ser excitados. De la misma forma que a los metálicos, cuando un semiconductor es excitado, los electrones pertenecientes a la banda de valencia pueden ser transferidos a la banda de conducción. En una combinación de ambos, cuando un electrón llega a la banda de conducción, deja un estado desocupado, tomado en cuenta como una partícula positiva o “hueco”. Tanto el electrón como el “hueco” pueden viajar a través de la superficie del material y facilitando que la mayor parte del tiempo estén disponibles con el exceso de electrones de las nanopartículas metálicas para ser utilizados por otra molécula para realizar una oxidación o una reducción (Martínez-Chávez, Rivera-Muñoz, Velázquez-Castillo, Escobar-Alarcón, & Esquivel, 2021; Valdés-Hernández, y otros, 2024).

2.7 Propiedades ópticas y morfológicas

Las propiedades ópticas en las soluciones obtenidas, pueden ser medidas con UV-Vis en los modos de absorbancia y transmitancia. Así mismo, se puede determinar mediante el método Tauc, el band gap del material obtenido (Martínez-Chávez, Rivera-Muñoz, Velázquez-Castillo, Escobar-Alarcón, & Esquivel, 2021; Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018). También se puede obtener el espectro de emisión de fotoluminiscencia que, a partir de la longitud de onda, permite conocer las transiciones de banda a banda relacionadas directamente al “bandgap”, de la producción de excitones (pares electrón-hueco) y de vacancias generadas por algún otro átomo en el caso de materiales compuestos (Martínez-Chávez, Rivera-Muñoz, Velázquez-Castillo, Escobar-Alarcón, & Esquivel, 2021).

Con los nanomateriales, el color de estos depende de su tamaño. Por un lado, la composición química es la misma, pero el tamaño afecta la longitud de onda absorbida y dispersada. A la suma de estas dos características (absorción más dispersión espacial) se le conoce como extinción, según la teoría de dispersión de Mie. Es decir, depende del tamaño de partícula y de las propiedades ópticas. Se puede observar estas características por medio del espectro de absorción obtenido por espectroscopia, por ejemplo, en el UV-Vis (Bohren & Huffman, 2004). A nivel nanométrico, la luz absorbida suele depender del comportamiento colectivo de los electrones (resonancia plasmónica superficial). Es por eso por lo que se tienen que entender que existen la dependencia de la luz reflejada o emitida en función de una condición

de resonancia que depende del tamaño de la nanopartícula (Kelly, Coronado, Zhao, & Schatz, 2003). Para radios menores a los 20 nm domina la absorbancia, pero para mayores valores de radio, los efectos del campo eléctrico de la resonancia dejan de ser uniforme en toda la nanopartícula. Por lo que existe un corrimiento hacia el rojo, es decir, el aumento de la longitud de onda de resonancia o el pico máximo de absorción. También para las propiedades ópticas a nivel nanométrico hacia lo más pequeño, ocurre el aumento de la superficie respecto al volumen, que también afecta la dispersión espacial. Y ya que las nanopartículas más pequeñas presentan mayor dispersión, esto representa también picos de resonancia más pronunciados (Link & El-Sayed, 1999). Por lo tanto, el seguimiento del pico y del ancho de dicha resonancia de los nanomateriales en un espectro establecido como el visible, puede dar una idea del cambio de tamaño de los nanomateriales (Kelly, Coronado, Zhao, & Schatz, 2003).

Por otra parte, la microscopia electrónica de barrido permite determinar el tamaño y forma de las nanopartículas obtenidas, aunque con el espectro de UV-Vis se puede tener una primera aproximación (Lloyd, 1987).

3. Hipótesis

La variación de parámetros experimentales durante la ablación láser en líquidos permite modificar la interacción entre nanopartículas semiconductoras y metálicas, favoreciendo el decorado y la formación de estructuras híbridas.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Generar un protocolo sistemático para la producción de dispersiones coloidales de nanopartículas de semiconductor, decoradas con materiales metálicos por el método de ablación laser, estableciendo criterios para la estabilidad, el control de tamaño y la forma de dichas nanopartículas, así como sus propiedades ópticas usando agua como solvente amigable con el ambiente.

4.2 Objetivos específicos

- Seleccionar materiales de la literatura y de producción realizada en el laboratorio de Óptica y Fotónica del CFATA con una alta estabilidad coloidal, entre los que se encuentran nanopartículas de silicio como semiconductor y metales como el oro.
- Determinar un protocolo de la síntesis de Nanopartículas de silicio decoradas con oro a través de Ablación láser en líquidos (LAL).
- Modificar parámetros como la potencia, la concentración y la distancia del foco al target para obtener un rango de tamaños y formas, utilizando el método de ablación láser en líquidos.
- Cuantificar y medir los criterios de control en la producción de dichas Nanopartículas dependiendo de parámetros dinámicos durante la ablación.

5. Material y Metodología

5.1 Simulación

A partir de resultados experimentales usando las condiciones excepcionales de la ablación láser, observados en el laboratorio, se ha producido materiales de semiconductor decoradas con nanopartículas de oro. En estas se observan a las nanopartículas de oro incrustadas en la superficie de las nanopartículas del semiconductor (Flores-Castañeda & Camacho-López, 2023; Machado, Raele, Jimenez-Villar, & de Rossi, 2025).

Con el propósito de obtener una estimación geométrica del número máximo teórico de nanopartículas metálicas que podrían distribuirse alrededor de una nanopartícula de silicio, se desarrollaron dos programas en MATLAB. El modelo se basa en una representación simplificada de las nanopartículas producidas por ablación láser sin considerar los fundamentos físicos o químicos de su formación, por lo que ambas se idealizan como esferas. Esta aproximación permite analizar la influencia de la relación entre sus tamaños y establecer un límite geométrico de decoración bajo condiciones simplificadas.

Esta tesis no considera la complejidad de su formación, aunque existen métodos computacionales capaces de simular la respuesta plasmónica de nanoestructuras complejas, totalmente atomísticas implícitas de los nanomateriales. Como los modelos de cargas fluctuantes dependientes de la frecuencia y de dipolos para describir las propiedades de respuesta de estructuras atomísticas (Lipparini, Cappelli, & Barone, 2011). También existe el Método de Elementos de Borde en las variantes del modelo de continuo polarizable dieléctrico (DPCM) y formalismo de ecuaciones integrales (IEF-PCM). Usualmente también se puede analizar propiedades inducidas por el campo eléctrico, como la densidad de carga y los patrones de campo eléctrico (Scalmani & Frisch, 2010; Tomasi, Mennucci, & Cammi, 2005).

Esta tesis utiliza un método geométrico idealizado, lo más simple posible que pueda interpretar espacialmente el decorado de las nanopartículas sin incluir propiedades de resonancia de plasmones de superficie o las uniones interfaciales y cargas electrostáticas para mantenerlas unidas y estables.

En el primer programa, el código solicita el diámetro de las NPs involucradas con el fin de calcular el área superficial expuesta. Es importante que el diámetro de la NP semiconductor sea mayor que el de la NP metálica como lo ocurrido en la fabricación real de nanopartículas de silicio y oro por ablación láser, ya que esta condición permite la validez física del modelo y evita resultados inconsistentes. Posteriormente, los diámetros son divididos entre dos para obtener los radios correspondientes, los cuales se emplean en los cálculos subsecuentes.

Desde el punto de vista geométrico, se establece una aproximación basada en la relación de áreas. Se considera que las NPs metálicas de radio r_2 , pueden distribuirse sobre la superficie interna de una NP semiconductor de radio r_1 , para encontrarse parcial o completamente incrustadas en ella. Para que esta configuración sea físicamente posible, debe cumplirse una restricción geométrica esencial: la distancia entre los centros de ambas esferas (d), deben satisfacer una condición que garantice que la nanopartícula metálica permanezca dentro de la esfera mayor sin sobresalir de su superficie:

$$d \leq r_1 - r_2 \quad (1)$$

Por lo tanto, también se cumple que:

$$d + r_2 \leq r_1 \quad (2)$$

En esta segunda desigualdad, se limita la esfera de radio r_2 , dado que no puede ser más grande r_1 . En la Figura 1 se observa la distancia entre centros, si r_2 es mayor que la esfera de r_1 , quedará expuesta fuera de la esfera r_1 .

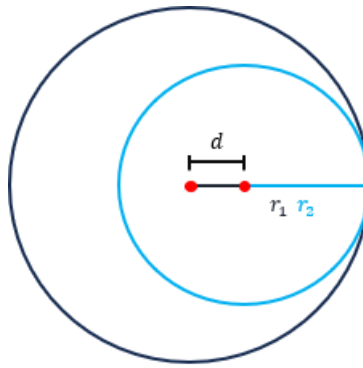


Figura 1. Restricción geométrica para la incrustación de una nanopartícula metálica en una nanopartícula semiconductor (Realización propia).

El espacio o cupo de la NP más pequeña dentro de la NP de mayor tamaño es determinado por sus centros. Solo en esta condición matemática simple puede simplificar el problema. Entonces, se utiliza la ecuación de área superficial de una esfera:

$$A = 4\pi r^2 \quad (3)$$

Se sustituye la condición planteada:

$$A_{disponible} = 4\pi(r_1 - r_2)^2 \quad (4)$$

Después, el área ocupada por cada NP metálica se calcula como la proyección de esa esfera sobre la superficie de la esfera de r_1 :

$$A_{NP\ metálica} = \pi r_2^2 \quad (5)$$

Por lo tanto, para aproximar cuántas NP metálicas podrían caber dentro de la esfera de r_1 , sin huecos y usando un empaquetamiento ideal se usó:

$$N = \eta \cdot \frac{4\pi(r_1 - r_2)^2}{\pi r_2^2} \quad (6)$$

$$N = 4\eta \cdot \frac{(r_1 - r_2)^2}{r_2^2} \quad (7)$$

Dónde el factor η se refiere a la eficiencia de empaquetamiento. Se omitieron estas constantes como parte de una aproximación física. En el código se utilizó la siguiente ecuación para el cálculo de cuántas NPs metálicas caben dentro del semiconductor:

$$N \approx \frac{(r_1 - r_2)^2}{r_2^2} \quad (8)$$

Posteriormente, se realizaron los siguientes cálculos, para simular el área disponible expuesta, dependiendo de la incrustación de las NPs metálicas en la NP semiconductor (desde totalmente incrustada hasta el límite de totalmente fuera):

$$d = r_1 - r_2 \quad (9)$$

Dónde d , es la incrustación máxima sin que el centro salga de la esfera grande, previamente descrita (Figura 2).

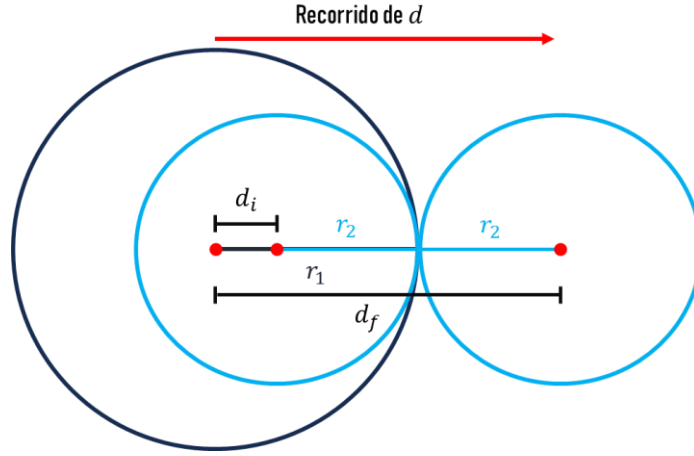


Figura 2. Definición geométrica de la distancia centro-centro entre nanopartículas (Realización propia).

Después, se utilizó la ecuación matemática que indica la altura del casquete esférico para una esfera pequeña parcialmente incrustada (h):

$$h = r_2 - (d - r_1) \quad (10)$$

Posteriormente, se utilizó la siguiente ecuación que señala el área de un casquete esférico, en este caso, el área del casquete de la NP metálica:

$$A_{casquete} = 2\pi r h \quad (11)$$

Se tomó la ecuación del área total de una esfera:

$$A = 4\pi r^2 \quad (12)$$

Para calcular el área que tienen expuesta las NPs metálicas dependiendo de su incrustación:

$$A_{expuesta\ de\ metal} = 4\pi r_2^2 - 2\pi r_2 h \quad (13)$$

Finalmente, se calcula el área total expuesta de todas las NPs metálicas usando N (número total de NPs metálicas que caben dentro de la NP semiconductora con un empaquetamiento ideal):

$$A_{total\ metal} = N \cdot A_{expuesta\ de\ metal} \quad (14)$$

También se calculó el área de la NP semiconductora, que tendría expuesta dependiendo de dicha incrustación, utilizando la fórmula de intersección de dos esferas h_1 :

$$h_1 = r_1 - \frac{d^2 - r_2^2 + r_1^2}{2d} \quad (15)$$

Dónde h_1 , es la altura del casquete en la esfera grande. Para después calcular el área de la NP semiconductora que queda cubierta por una NP metálica:

$$A_{\text{cubierta por una NP metálica}} = 2\pi r_1 h_1 \quad (16)$$

Para poder calcular el área que queda expuesta del semiconductor, dependiendo de la incrustación, se utilizó la siguiente ecuación:

$$A_{\text{expuesta de semiconductor}} = 4\pi r_1^2 - (N \cdot A_{\text{cubierta por una NP metálica}}) \quad (17)$$

Para el caso de nanomateriales que funcionen para absorber y romper otras moléculas en su superficie como en la catálisis heterogénea, se presentan algunas de ellas comunes que pueden rodear a esferas como primera aproximación. Para conocer la adsorción de moléculas, desde la perspectiva geométrica y considerando al agua, el dióxido de carbono o el hidrogeno se realizó una aproximación dependiendo del radio de Van der Waals de cada molécula:

- $CO_2 = 0.176 \text{ nm}$
- $H_2O = 0.15 \text{ nm}$
- $H_2 = 0.12 \text{ nm}$

Se tomaron los valores del área expuesta para la NP semiconductora y el total del área expuesta por todas las NPs metálicas para calcular cuántas moléculas podrían adsorberse idealmente:

$$N_{\text{molécula deseada}} = \frac{A_{\text{expuesta de semiconductor}} + A_{\text{total metal}}}{A_{\text{molécula}}} \quad (18)$$

Dónde el área de la molécula se calculó usando un empaquetamiento hexagonal 2D:

$$A_{\text{molécula}} = 4\sqrt{3} \cdot r_{\text{molécula deseada}}^2 \quad (19)$$

En el código, se utilizaron vectores para mostrar diversos resultados dependientes de la incrustación de las NPs metálicas. Por lo que en el código se solicita que muestre un gráfico para los valores obtenidos del área expuesta del semiconductor ($A_{expuesta\ de\ semiconductor}$) y el área total expuesta por todas las NPs metálicas incrustadas ($A_{total\ metal}$), dependiente de la altura de incrustación (h). De la misma manera, se solicita que se grafique el número de moléculas que se podrían adsorber en la superficie de todo el material, mostrando para CO_2 , H_2O y H_2 .

En un segundo programa, se extendió el modelo explicado previamente con el objetivo de analizar el comportamiento del área variando el tamaño de la NP metálica y dejando fijo el tamaño de la NP semiconductor. A diferencia del primer código, en este nuevo se definieron intervalos de tamaños para ambas NPs, generando vectores con cinco valores diferentes dentro del intervalo definido. Se utilizó la ecuación 8, que indica la cantidad de NPs metálicas que pueden incrustarse completamente en la esfera semiconductor sin traslaparse, además se generó una matriz para indicar cuántas NPs caben variando el tamaño de ambas.

Posteriormente, se fijó un valor de tamaño para la NP semiconductor, con el fin de replicar el ejercicio anterior y analizar el efecto del tamaño de las NPs metálicas. Se definió un rango continuo de distancias entre centros para modelar los diferentes grados de incrustación, desde el contacto externo hasta la máxima intersección sin solapamiento.

La geometría del sistema se evaluó nuevamente mediante el cálculo del casquete esférico usando las mismas ecuaciones previamente descritas. En este caso, la altura del casquete se organizó en forma matricial para cada tamaño de NP metálica, lo que permitió obtener el área superficial aproximada y distancia entre centros respectivamente.

Finalmente, el área total expuesta de las NPs metálicas se obtuvo al multiplicar el área individual por el número total de NPs calculado para cada caso.

5.1.1 Simulación en “MIE Theory Caculator”

Se utilizó la calculadora teórica “MIE Theory Caculator” de la web que muestra una aproximación del espectro UV-Vis de una muestra de nanopartículas de silicio con oro tipo

“core-shell” (Figura 3) (nanoComposix, 2000). En principio, la segregación de diferentes materiales puede ocurrir no solo en la decoración, por lo que puede aparecer el efecto de coreshell. Este resultado es diferente a las nanopartículas decoradas, pero como apoyo visual sirvió para guiar los posteriores experimentos y verificar si el material estaba llegando a un objetivo.

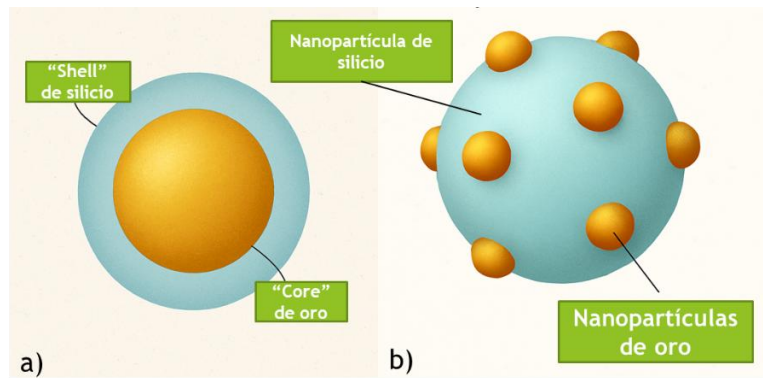


Figura 3. Configuraciones híbridas silicio-oro: a) core-shell y b) nanopartícula decorada (creación propia asistida con IA).

5.2 Ablación láser en líquidos LAL

La ablación láser en líquidos es un proceso donde un haz de gran intensidad se concentra en un objetivo sólido que se encuentra en un medio acuoso (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013; Zhang & Wada, 2021). A continuación, se describe la metodología de preparación de muestra y parámetros generales. Los materiales de los objetivos o “targets” pueden ser: oro, silicio amorfo o silicio cristalino. Posteriormente se comentarán en específico las variaciones dependiendo de la prueba realizada, como: variación de distancia al foco, irradiación, agitación y tamaño del recipiente.

5.2.1 Proceso de preparación de muestra

Para la preparación de las muestras blanco o “targets”, se enlistan los siguientes pasos:

- i. Enjuagar el “target” en un depósito lleno de agua destilada mQ
- ii. Sumergir el “target” en un depósito lleno de acetona
- iii. Volver a enjuagar el target con agua mQ
- iv. Sumergir el “target” en un depósito lleno de metanol

- v. Someter el “target” a una corriente de aire a presión para secarla

Estos mismos pasos se utilizaron para la limpieza de la cubeta dónde se realizarían las ablaciones.

5.2.2 Proceso de ablación

Para el proceso de ablación se utilizó un sistema de pulsos ultrarrápidos (300 femtosegundos a una longitud de onda de 1040 nm) y los pasos que se siguieron para el proceso de ablación fueron los siguientes:

- I. Meter la cubeta a la báscula para tomar su peso como referencia
- II. Poner el target de oro o silicio en la cubeta (Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013; Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018; Zhang & Wada, 2021)
- III. Pesar de nuevo para saber el peso del target antes de la ablación
- IV. Poner agua miliQ con una pipeta en la cubeta (5 mL para contenedor de 4.8 cm de diámetro interno x 1.2 cm de profundidad y 4mL para contenedor de 2.9 cm de diámetro interno x 0.5 cm de profundidad)
- V. Se seleccionan los parámetros del láser: la longitud de onda (1040 nm), la duración del pulso (300 fs) y 40 kHz para ablación o una de frecuencia de 40 Hz con un divisor de 5000 para no anclonar el material, pero medir a qué distancia se encuentra el foco (Figura 4) (Díaz-Díaz, 2026; Khan, Al-Thabaiti, Obaid, Khan, & Al-Youbi, 2011; Teplicky, Chorvat, Michalka, & Chorvatova, 2018; Zhang & Wada, 2021)
- VI. Se coloca la muestra en el “set-up” y se enfoca el haz del láser en uno de los cuatro puntos donde se va a medir el foco en la muestra usando lentes o espejos (Khan, Al-Thabaiti, Obaid, Khan, & Al-Youbi, 2011; Zhang & Wada, 2021). En la Figura 4 se visualizan la disposición de los cuatro puntos sobre el “target” (Díaz-Díaz, 2026).
- VII. Se ejecuta un programa en MATLAB que, con ayuda de motores, realiza un barrido en un rango de distancias determinado para encontrar el voltaje pico máximo.
- VIII. Después, se hace un tratamiento de la señal obtenida en un programa de MATLAB para suavizar las cuatro señales y obtener un valor más preciso.

- IX. Dependiendo de la metodología, se selecciona la posición en z donde se realizará la ablación en 3 diferentes distancias: En el foco (FP), después del foco (AF) y antes del foco (BF). Del foco se toma una distancia de Rayleigh (Z_r) como $200\ \mu m$. Para ambas posiciones se usaron $2Z_r$. Por lo tanto, para una muestra AF, del valor de la posición del foco se le restaban $400\ \mu m$ y para una muestra BF se le sumaban $400\ \mu m$.
- X. Se activa el láser y se permite que el haz interactúe con la superficie de $5\ mm^2$ del material, (Díaz-Díaz, 2026; Khairani, Mínguez-Vega, Doñate-Buendía, & Gökce, 2023; Khan, Al-Thabaiti, Obaid, Khan, & Al-Youbi, 2011). En la Figura 5, se muestra como es un ciclo en el recorrido del láser sobre la muestra. Este recorrido se hace 100 veces sobre la muestra, se termina el proceso de ablación y se bloquea el láser para evitar que siga interaccionando con la muestra. Un ciclo se compone de 5 mm en el eje x (color rojo), 0.025 mm en el eje y (color verde), 5 mm a la izquierda en el eje x (color rojo) y finalmente 0.025 mm en el eje y (color verde).
- XI. La suspensión obtenida se coloca en un frasco y se agregan 5 mL de agua que sirven para enjuagar la cubeta dónde se realizó la ablación, para su posterior análisis y caracterización (Khairani, Mínguez-Vega, Doñate-Buendía, & Gökce, 2023; Kim, Kwon, Shin, Song, & Park, 2013)
- XII. Se pesa de nuevo el “target” para calcular cuánta masa de la muestra fue ablacionada.

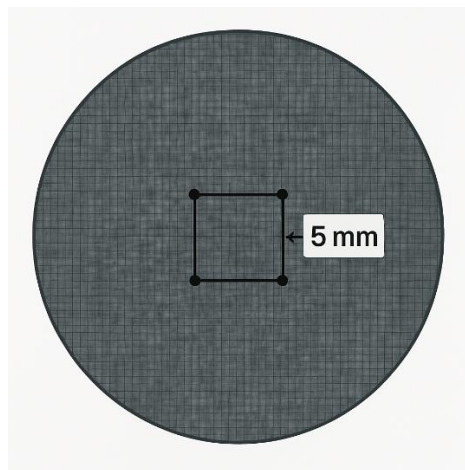


Figura 4. Distribución de puntos para la determinación del punto focal (creación propia asistida con IA).

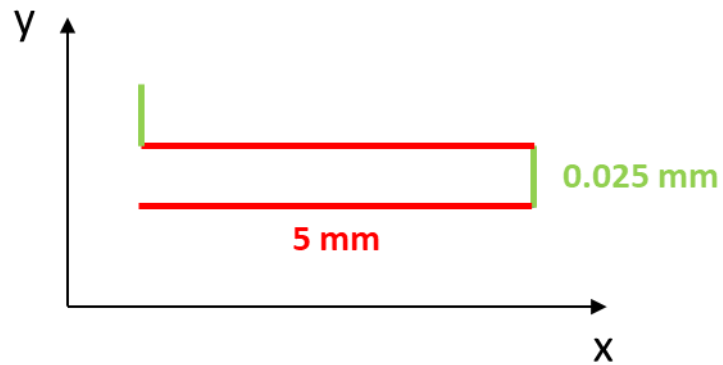


Figura 5. Trayectoria (escala no proporcional) de ablación láser sobre la muestra de un ciclo de movimiento de los motores X, Y (creación propia).

A continuación, en la Figura 6, se muestra un diagrama de flujo más ilustrativo de los pasos generales en el proceso de ablación:

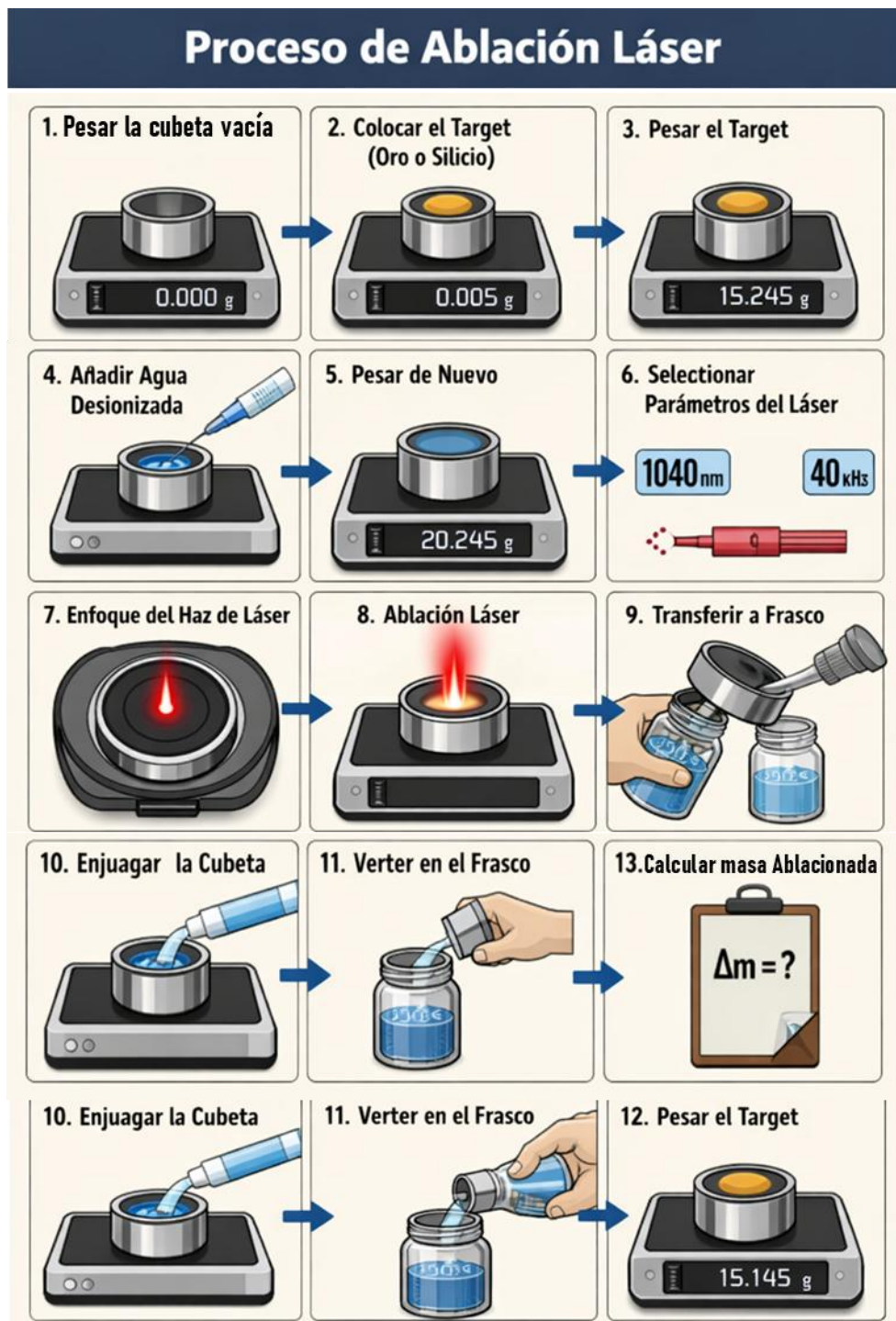


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de ablación (creación propia asistida con IA).

5.3 Disposición de muestra y solución para las distintas metodologías

En esta sección se muestran las variantes de disposición del “target” y las soluciones, utilizadas para cada metodología propuesta. Posterior a este acomodo, se realizaron los pasos descritos en la sección 5.2 Ablación láser en líquidos LAL (Díaz-Díaz, 2026).

5.3.1 Ablación para obtención de un solo material

En la Figura 7, se muestra el esquema de obtención de NPs, vía ablación láser en medio acuoso de Khairani et al. (2023), se utilizó como disposición básica para realizar la ablación de un solo material, silicio y oro por separados. En esta disposición se colocó el “target” de oro o silicio en el fondo de la cubeta con 5 mL de agua desionizada. El láser, siguió el recorrido previamente descrito en la Figura 5.

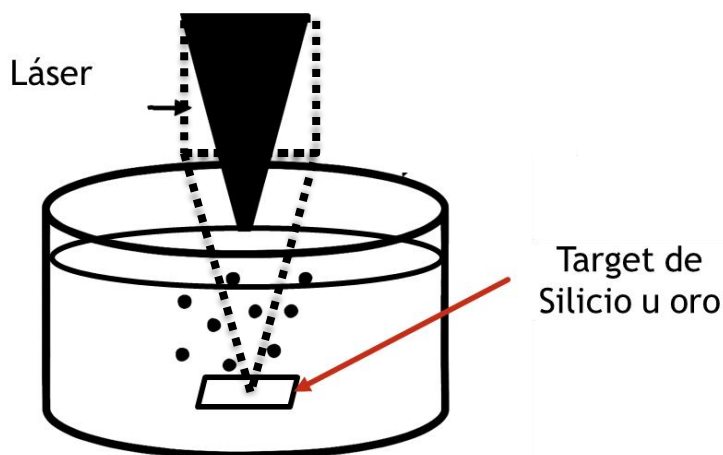


Figura 7. Esquema experimental para la ablación laser en líquidos (creación propia).

5.3.2 Hibridación

En la Figura 8 se muestra el acomodo que se utilizó para realizar la hibridación estándar, en un recipiente de dimensiones 4.8 cm de diámetro interno x 1.2 cm de profundidad (recipiente 1), con capacidad para 5 mL. Para estas muestras se diluyó con agua 5 mL de una suspensión de NPs de silicio previamente ablacionadas, que originalmente tenían una concentración de 0.1 mg / mL, con 5 mL de agua. Esta disposición se utilizó para realizar las pruebas de hibridación e hibridación variando la agitación. En esta última, se realizaron pruebas con una agitación de 3000, 5000 y 7000 rpm.

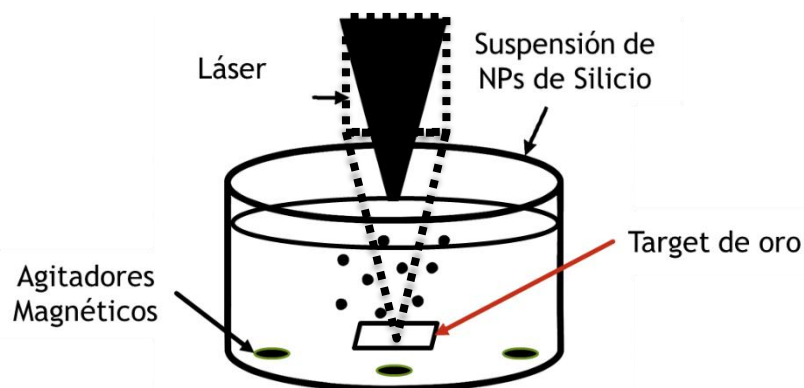


Figura 8. Esquema experimental para la síntesis de nanopartículas híbridas silicio-oro (creación propia).

5.3.3 Irradiación de una suspensión de NPs previamente sintetizadas

En la Figura 9 se muestra este acomodo. Se colocaron 5 mL de la suspensión del material deseado para irradiar: silicio o hibridación silicio-oro (Machado, Raele, Jimenez-Villar, & de Rossi, 2025). Después se llevó el recipiente al soporte para ablación y se colocaron 5 agitadores magnéticos en el fondo del recipiente, distribuidos lo más simétricos posible como se muestra en la Figura 9. En esta disposición, el láser se mantiene estático para evitar que interactúe con los agitadores. Así, se realizaron las irradiaciones para una suspensión de NPs de silicio amorfo y una suspensión de NPs híbridas silicio-oro en el recipiente grande.

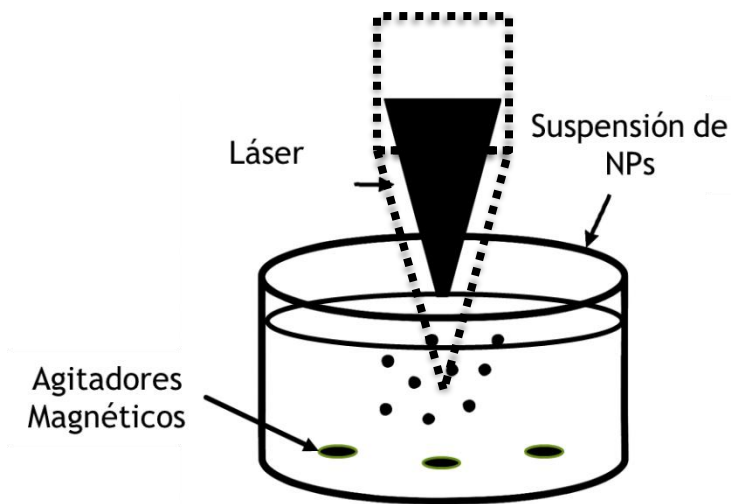


Figura 9. Esquema experimental para la irradiación al líquido con nanopartículas post-síntesis con foco para ablación en el líquido. (creación propia).

En la figura 10, se muestra la disposición real de este método. En el soporte se coloca el recipiente con la muestra y los cinco agitadores magnéticos. En la parte superior se encuentra el láser y se logra percibir un punto morado que es el haz impactando la suspensión. Del lado derecho se visualizan los motores que permiten mover el soporte con la muestra en los tres ejes.

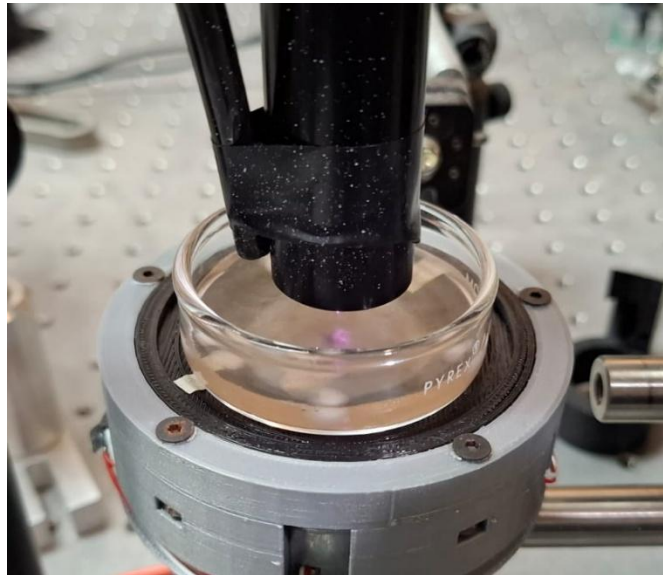


Figura 10. Sistema experimental de ablación e irradiación.

5.3.4 Hibridación en recipiente pequeño

Para esta metodología, se colocó el sistema de ablación de acuerdo a lo mostrado en la Figura 11. Se utilizó el recipiente 2 (un recipiente de plástico de 4 mL con dimensiones de 2.9 cm de diámetro interno x 0.5 cm de profundidad). Se colocó el “target” de oro en el fondo y se agregaron 2 mL de suspensión de NPs de silicio y 2 mL de agua mQ. También, se colocó un agitador magnético en la orilla del recipiente. Esta orilla, es un aro concéntrico en todo el perímetro del recipiente que tiene una profundidad de 1 mm y 1 mm de ancho. El recorrido del láser es el mismo presentado en la Figura 5.

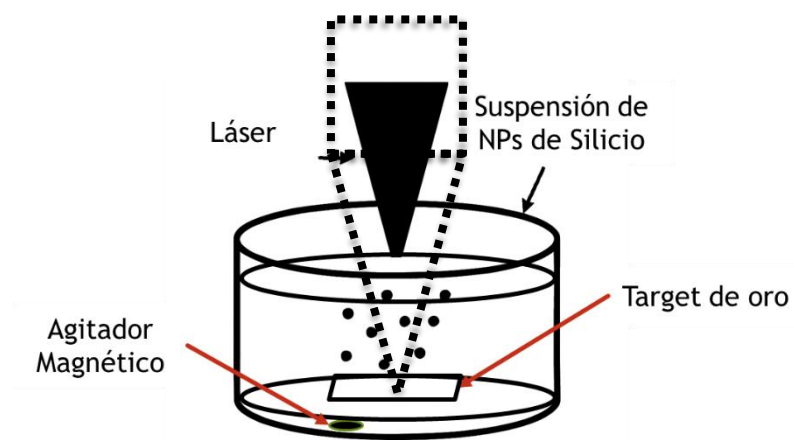


Figura 11. Configuración experimental para la síntesis en target con recipiente 2 pequeño (creación propia).

5.3.5 Irradiación en recipiente pequeño

En la Figura 12, se muestra la disposición de esta metodología. Se colocó solo un agitador magnético en la orilla previamente descrita en 5.3.4. En esta disposición, el láser se mantiene estático para evitar que interactúe con el agitador y enfocado en esa “orilla” completamente del otro lado de dónde se ubicaba el agitador.

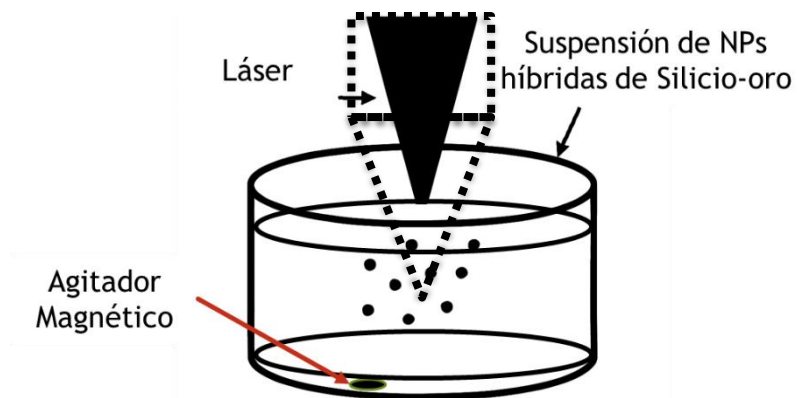


Figura 12. Configuración experimental para la irradiación directa a líquido en recipiente 2 (creación propia).

5.4 Espectros UV-Vis

El espectrómetro funciona al medir cuanta luz ultravioleta y visible puede absorber una muestra. Funciona con la ley de Beer-Lambert (Mänteles & Deniz, 2017), que indica que la absorbancia es proporcional a la concentración de las especies que absorben.

Los pasos generales para analizar la muestra fueron los siguientes:

- I. Colocar la suspensión coloidal de nanopartículas previamente sintetizadas en la cubeta de cuarzo
- II. Correr una corrección de la línea base usando un blanco de agua destilada.
- III. Colocar la cubeta con la suspensión en el sujetador de muestra
- IV. Correr un escaneo de todo el espectro

Posterior al escaneo, se guardaron los datos obtenidos del espectro para su análisis como menciona el Manual de UV-Vis del laboratorio de óptica y fotónica del laboratorio CFATA.

5.5 Concentración con peso:

Se utilizó, una balanza analítica Gemini GR-200, 210 g x 0,1 mg con calibración interna para medir las masas antes y después del proceso de ablación para determinar la concentración de las muestras expresadas en mg/mL.

5.6 Centrifugación:

El equipo que se utilizó fue una centrifugadora con una Velocidad de Temporizador 0-60 min, suero aislado, 0-4000 revoluciones por minuto (RPM) con Tubo de Centrífuga 6 pcs – 20 ml.

En las muestras realizadas se fijó un tiempo de centrifugación de 2 minutos, pero se varió la velocidad de centrifugación: 2000, 3000 y 4000 RPM.

La muestra sometida a centrifugación fue la suspensión de NPs de silicio-oro en el recipiente 1. Se diluyó con agua al 50 % y se ingresó 1 mL en cuatro tubos Eppendorf de 1 mL. Los cuales fueron insertados en adaptadores adecuados para su compatibilidad con el rotor de la centrífuga como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Adaptación de tubos Eppendorf para centrifugación.

5.7 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Para la verificación del tamaño y forma de las nanopartículas obtenidas se caracterizaron las muestras por SEM. En la Figura 14, se observa la preparación de las muestras. Primero se recortó una placa de silicio (sustrato cristalino (100)) y se dividió en cuadros de 2 mm x 2 mm con ayuda del láser y los motores encargados de realizar las ablaciones. Posteriormente, se colocó la placa en una plancha calefactora con agitador magnético (Fisher Scientific Isotemp) a 80 °C para evaporar el agua de la muestra y solo depositar las NPs de las suspensiones. Luego, con una micropipeta se tomaron 20 μL de cada muestra y se

depositaron gota por gota dentro de uno de los cuadros delimitados, hasta que el cuadro mostrara una mancha visible al ojo humano.

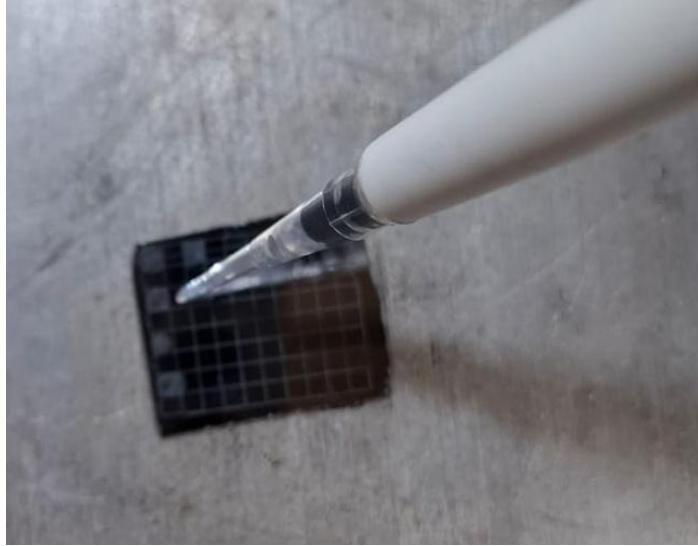


Figura 14. Deposición de muestra sobre sustrato de silicio para análisis SEM.

Las muestras que se colocaron en la placa fueron las siguientes:

- Suspensión de NPs de silicio amorfo en agua con el láser colocado dos distancias de Rayleigh antes del punto focal.
- Suspensión de NPs de silicio amorfo en agua con el láser colocado a dos distancias de Rayleigh antes del punto focal irradiada 45 minutos.
- Suspensión de NPs híbridas silicio-oro en agua con el láser colocado a dos distancias de Rayleigh antes del punto focal.
- Suspensión de NPs híbridas silicio-oro en agua con el láser colocado a dos distancias de Rayleigh antes del punto focal irradiada 45 minutos.
- Solución de NPs de silicio amorfo y NPs de oro ablacionadas por separado en agua.
- Suspensión de NPs híbridas silicio-oro en agua ablacionadas en recipiente de dimensiones 4.8 cm de diámetro interno x 1.2 cm de profundidad con una agitación de 3000 RPM.

- Suspensión de NPs híbridas silicio-oro en agua ablacionadas en recipiente de dimensiones 4.8 cm de diámetro interno x 1.2 cm de profundidad con una agitación de 5000 RPM.
- Suspensión de NPs híbridas silicio-oro en agua en recipiente de dimensiones 2.9 cm de diámetro interno x 0.5 cm de profundidad en el foco con agitación de 3000 RPM.
- Suspensión de NPs híbridas silicio-oro en agua en recipiente de dimensiones 2.9 cm de diámetro interno x 0.5 cm de profundidad en el foco con agitación de 3000 RPM, irradiada 45 minutos.

Las imágenes de electrones secundarios o retro dispersos, se obtuvieron en formato TIF en ampliaciones acorde al objetivo del estudio de 30x a 50,000x. Para la obtención de imágenes por microscopía electrónica de barrido, con electrones secundarios y/o retro dispersados, se trabajó en voltajes de aceleración de 0.5 a 30 kV, en condiciones de bajo y alto vacío, así como en modo de electrones desacelerados. Para modo STEM (20 a 30 kV), se usó detector BF-STEM con posibilidad de cambiar el contraste. La amplificación máxima a obtener está limitada principalmente por la composición química del material y su sensibilidad al haz electrónico (Mendivil, Krishnan, Castillo, & Shaji, 2015; Meza-Arroyo, Valdés-Hernández, Domínguez-Juárez, & Quintero-Torres, 2024).

6. Resultados y discusión.

6.1 Simulación

Los primeros resultados obtenidos correspondieron a la simulación geométrica desarrollada con el propósito de estimar el límite geométrico de incrustación que podrían presentar las nanopartículas de oro dentro de una nanopartícula de silicio. Para realizar esta estimación, se consideró una representación idealizada en la que las nanopartículas de silicio y oro se modelaron como esferas perfectas con diámetros definidos. Asimismo, se asumió que todas las nanopartículas metálicas poseen el mismo diámetro, lo que permitió simplificar el análisis y establecer una relación geométrica entre el tamaño de las nanopartículas involucradas.

La primera simulación se muestra en la Figura 15, dónde se grafica el área expuesta de las nanopartículas metálicas dependiendo de su incrustación en una sola de semiconductor. Los tamaños utilizados para esta simulación fueron 30 nm de diámetro para las nanopartículas metálicas y 150 nm para la de silicio. Aquí podemos apreciar como el área expuesta de las nanopartículas metálicas va creciendo linealmente conforme se va exponiendo. Por su parte, el área de la superficie de la nanopartícula de silicio es similar a una función cuadrática en la que sus puntos máximos son: cuando las nanopartículas metálicas están completamente incrustadas como una nanopartícula “core-shell” y cuando las nanopartículas metálicas están completamente expuestas. Su punto mínimo se encuentra en cuanto se tiene la mitad de las nanopartículas metálicas expuestas.

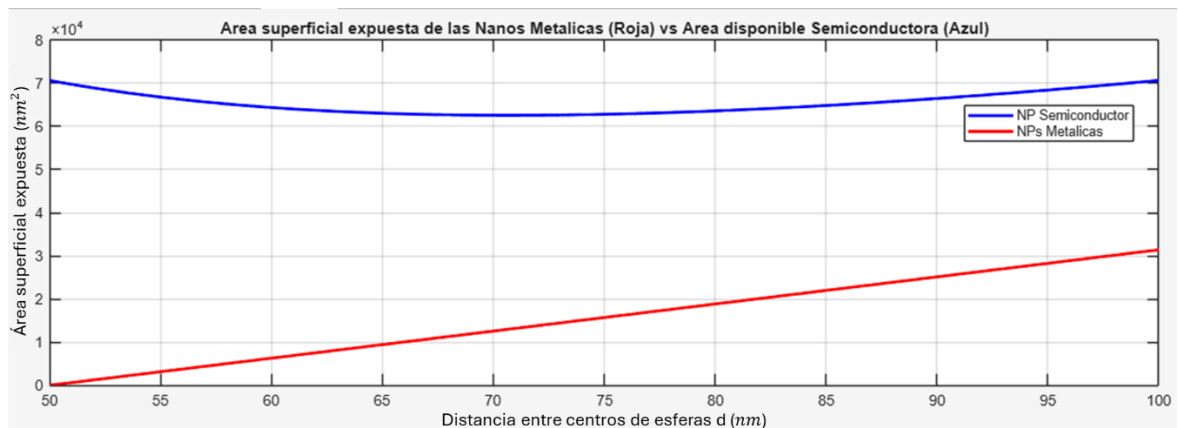


Figura 15. Área superficial expuesta en función del grado de incrustación.

Estos cálculos se tomaron como guía para realizar un segundo calculo para saber cuántas moléculas podrían rodear a la superficie total, es decir, en el área combinada de silicio con oro dependiendo de la incrustación de las nanopartículas metálicas.

Como se puede observar en la Figura 16, el área expuesta total va en incremento dependiendo de la exposición de las nanopartículas metálicas. Pero el comportamiento de la capacidad de moléculas en la superficie del material tiene un crecimiento lineal. De estos resultados, también se puede observar que depende del radio de Van der Waals de la molécula, será la cantidad de moléculas que se podrán adherir al material. Es decir, la molécula más pequeña es la de hidrógeno molecular, por lo que empieza en las 7×10^5 moléculas en el área mínima

de hibridación. La pendiente es más grande, si la molécula es más pequeña. Conforme la molécula es más grande, la pendiente baja, pero sigue en constante crecimiento debido al incremento de área disponible en la hibridación.

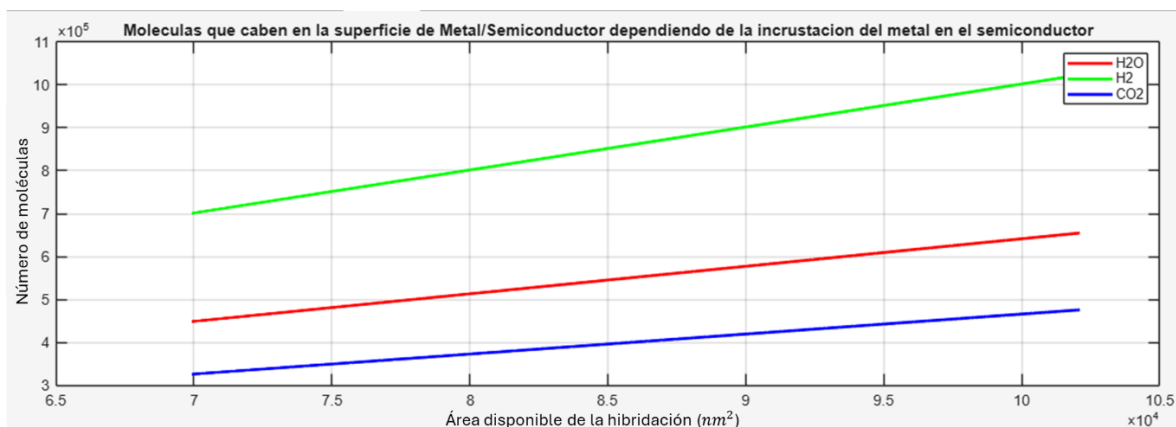


Figura 16. Relación entre área superficial disponible y capacidad de adsorción molecular.

En el segundo programa generado, se tomaron los datos iniciales para conocer el límite geométrico dependiendo de un rango de tamaños de nanopartículas de silicio al que se le incrustan diferentes tamaños de nanopartículas metálicas.

A continuación, se muestra una tabla (Cuadro 1), con los resultados de la primera parte del programa, se calculó cuantas nanopartículas metálicas caben dentro de una de silicio. Se utilizó este pensamiento de cuantas caben dentro para utilizar el concepto de incrustación, ya que cuando se realiza la hibridación, se pueden incrustar hasta lograr tipo “core-shell”. Esta tabla muestra realmente el límite geométrico que tendría el material al ser hibridado. Este modelo no contempla la posibilidad de que, al hibridar las NPs de oro no se incrusten por completo cubriendo solo la superficie externa de la esfera de silicio.

Conforme sea más grande la nanopartícula de silicio, caben más NPs metálicas dentro. Podemos observar que, al crecer la NP metálica a 20 nm, decrece un orden de magnitud la capacidad volumétrica en la NP semiconductor. A partir de ahí, la capacidad se va

reduciendo paulatinamente mientras las NPs metálicas crecen, hasta llegar a valores mínimos.

A partir de estos valores, se hizo el cálculo del área expuesta fijando el valor de 110 nm de diámetro para la NP de silicio y para las nanopartículas metálicas el rango de 10-50 nm.

Cuadro 1. Cupo máximo dentro de NP semiconductor (110-150 nm) para distintos tamaños de nanopartículas metálicas (10-50 nm).

	<i>10 nm</i>	<i>20 nm</i>	<i>30 nm</i>	<i>40 nm</i>	<i>50 nm</i>
110 nm	100	20	7	3	1
120 nm	121	25	9	4	1
130 nm	144	30	11	5	2
140 nm	169	36	13	6	3
150 nm	196	42	16	7	4

Como se muestra en la Figura 17, el área expuesta tiene un comportamiento lineal, teniendo su máximo cuando se encuentra completamente fuera de la NP de silicio y cero cuando se encuentra completamente incrustada. Por lo que, en comparación con los demás tamaños, encontramos que el ideal para las NPs de oro debe ser el más pequeño, para que así tengamos una mayor área expuesta. Esto también se traduce a una gran disponibilidad de sitios activos ideales para que suceda la catálisis. Es el concepto fundamental de la nanotecnología que resulta en un comportamiento diferente del material a nano escala, debido a que poseen una relación superficie-volumen muy elevada.

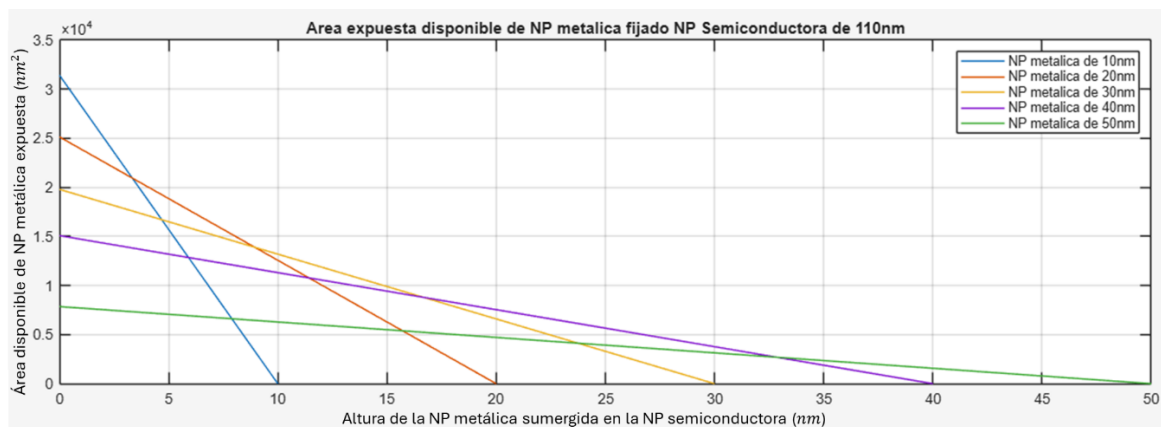


Figura 17. Área superficial disponible para distintos tamaños de nanopartículas metálicas.

Posteriormente, se utilizó el sitio web de simulación de Nanocomposix (nanoComposix, 2000). En la Figura 18 se muestra el resultado de espectros que arrojó el sitio web. Se utilizó un tamaño de 15 nm de radio para cada nanopartícula, debido a que experimentos previos en el laboratorio arrojaron espectros con el pico de absorbancia distintivo cerca de 550 nm para nanopartículas de Oro y Silicio (150 nm) individualmente. También, se usó el mismo tamaño para ambas nanopartículas, ya que una nanopartícula “core-shell” muestra una estructura diferente a una nanopartícula decorada, como se ilustra en la Figura 3.

Al estudiar el posible límite geométrico del material destacan dos factores importantes. El primero es la diferencia de tamaños entre la NP semiconductor y la NP metálica, ya que esta relación influye directamente en el área superficial disponible y en el grado de exposición de las nanopartículas metálicas sobre la superficie del semiconductor, como se ilustra en la recta azul de la Figura 15. El segundo factor, corresponde a las limitaciones del modelo teórico contemplando, considerando que las NPs metálicas que se encuentren en la superficie no necesariamente deben encontrarse confinadas en el volumen interno de la NP semiconductor. Esto permitiría la presencia de una mayor cantidad de nanopartículas metálicas sobre la superficie del material semiconductor.

Adicionalmente, el espectro obtenido mediante la plataforma de simulación nanoComposix permitió establecer un espectro UV-Vis de referencia, para orientar experimentalmente la

síntesis de las muestras híbridas, reduciendo la necesidad de verificar continuamente la morfología y tamaño de NP mediante SEM.

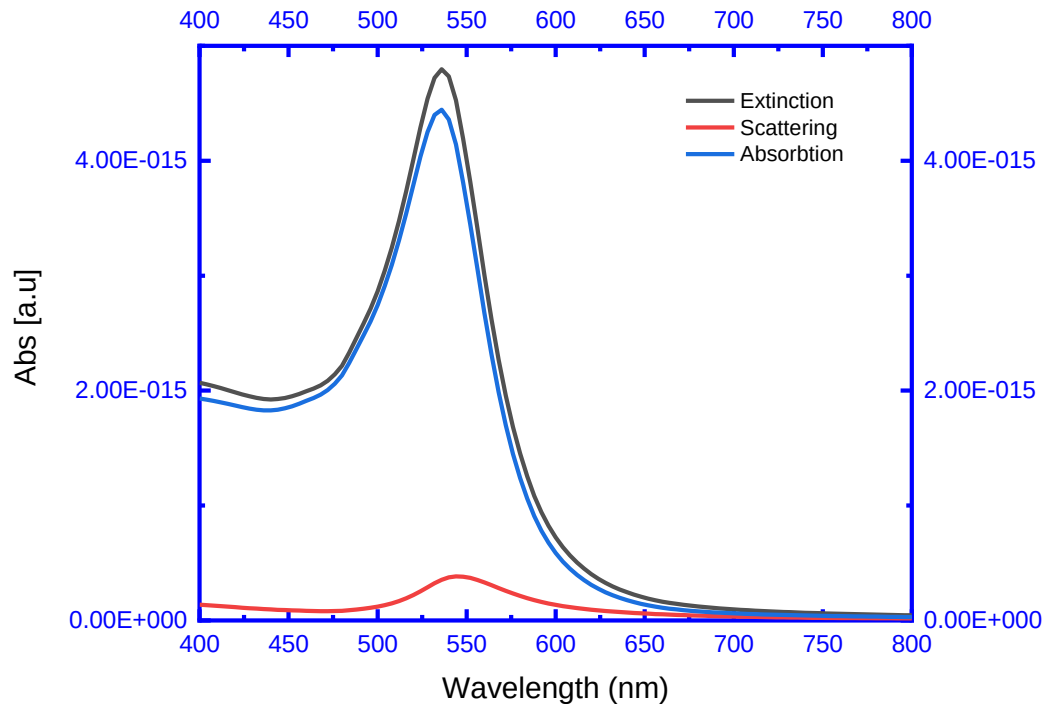


Figura 18. Espectro UV-Vis teórico para nanopartículas simples e híbridas tipo “core-shell”. Elaboración propia a partir de la calculadora de teoría de Mie de nanoComposix (oro), basada en el modelo desarrollado por Oldenburg (2000).

6.2 Espectroscopía UV-Vis

Para la etapa de resultados obtenidos en espectroscopía UV-Vis, se dividieron en cuatro procedimientos específicos: variación de distancia al foco, irradiación, agitación y tamaño del recipiente. Agregando un apartado de centrifugación que nos indica también un control de tamaños posterior a la hibridación.

6.2.1 Variación de distancia al foco

Primero, se realizaron las ablaciones de cada target por separado para encontrar la mejor distancia focal. Es decir, en qué punto se produce más material.

En la Figura 19, podemos observar el espectro UV-Vis que presentó al ser ablacionada la oblea de silicio cristalino. Se puede observar que la curva del espectro de la suspensión ablacionada en el foco y la ablacionada antes del foco, presentan una forma muy similar, pero con distinta absorción. Esto indica que antes del foco se logró una mayor cantidad de material. Por otra parte, la curva de la suspensión que fue ablacionada antes del foco presenta otra forma que indica que se generaron óxidos de silicio como presentan Machado et al. (2025) y Díaz, A. (2026).

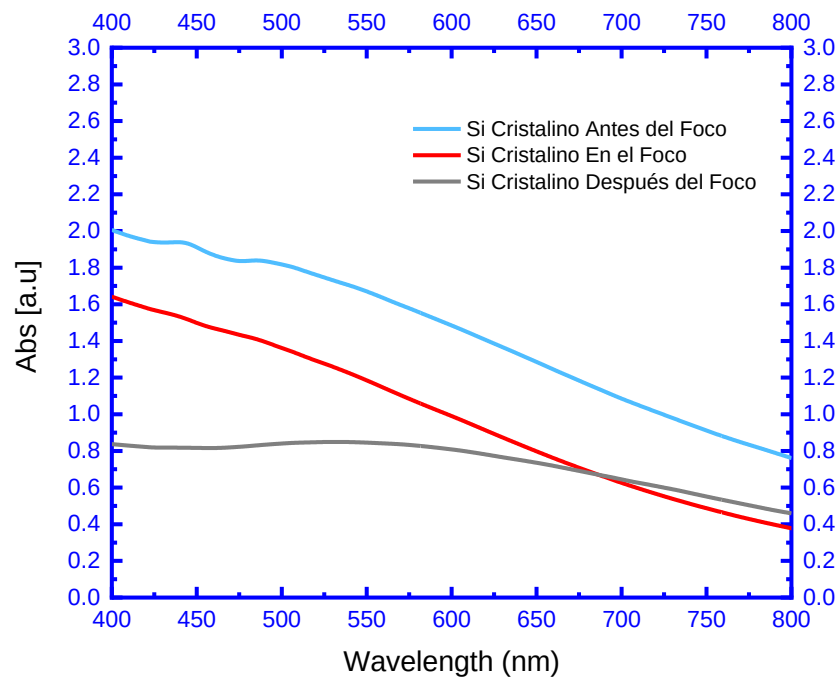


Figura 19. Espectros UV-Vis de nanopartículas de silicio cristalino sintetizadas a diferentes posiciones focales.

Posteriormente, en la Figura 20 se observa que, en la oblea de silicio amorfo se obtiene un comportamiento muy similar, resaltando aún más ese pico disimulado cerca de 550 nm de longitud de onda, en la prueba ablacionada después del foco. Las otras dos curvas muestran prácticamente el mismo comportamiento decreciente con esa diferencia de absorbancia.

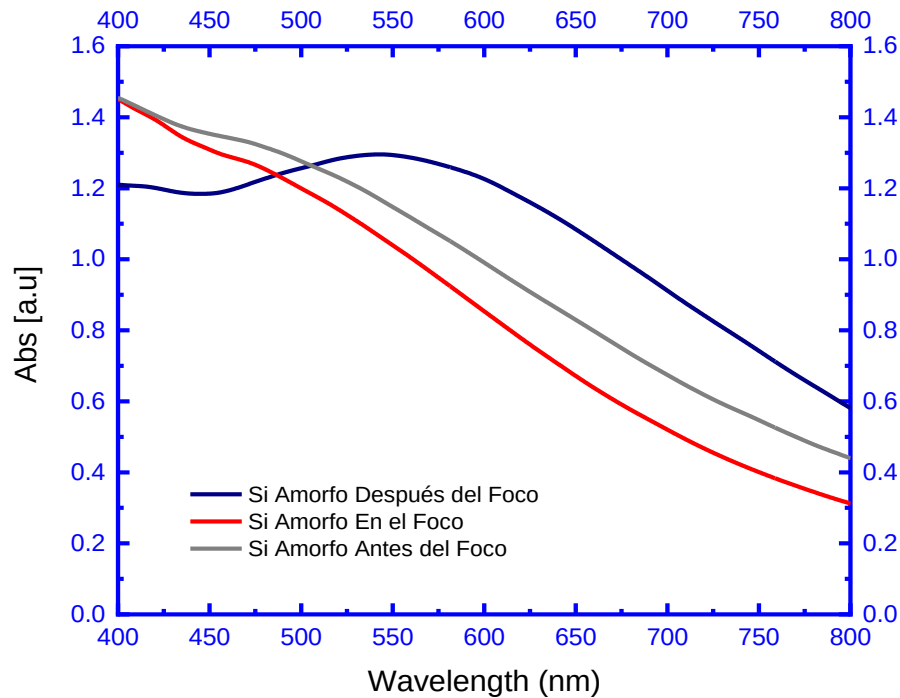


Figura 20. Espectros UV-Vis de nanopartículas de silicio amorfo sintetizadas a diferentes posiciones focales.

En la Figura 21, se muestran los espectros de oro. Se colocó el láser en tres diferentes posiciones como en las pruebas con silicio. Los espectros obtenidos muestran una diferencia considerable en su pico distintivo. Podemos observar que la muestra ablacionada después del foco tiene un tamaño menor debido a que está recorrida a menores longitudes de onda, pero también una menor concentración, es decir, que se ablacionó menos material que en las otras dos pruebas. En la curva del oro ablacionado antes del foco, muestra el mayor tamaño, pero no es la mayor concentración de material.

Finalmente, podemos observar que el espectro más distintivo es el del oro ablacionado en el foco, ya que su pico es mucho más evidente y su tamaño es el intermedio de las tres pruebas realizadas. Estos espectros de variación de distancia al foco resultaron interesantes para compararlos con resultados reportados en la literatura y a partir de ahí, tomar la decisión de cuál sería la mejor posición para realizar las nanopartículas decoradas.

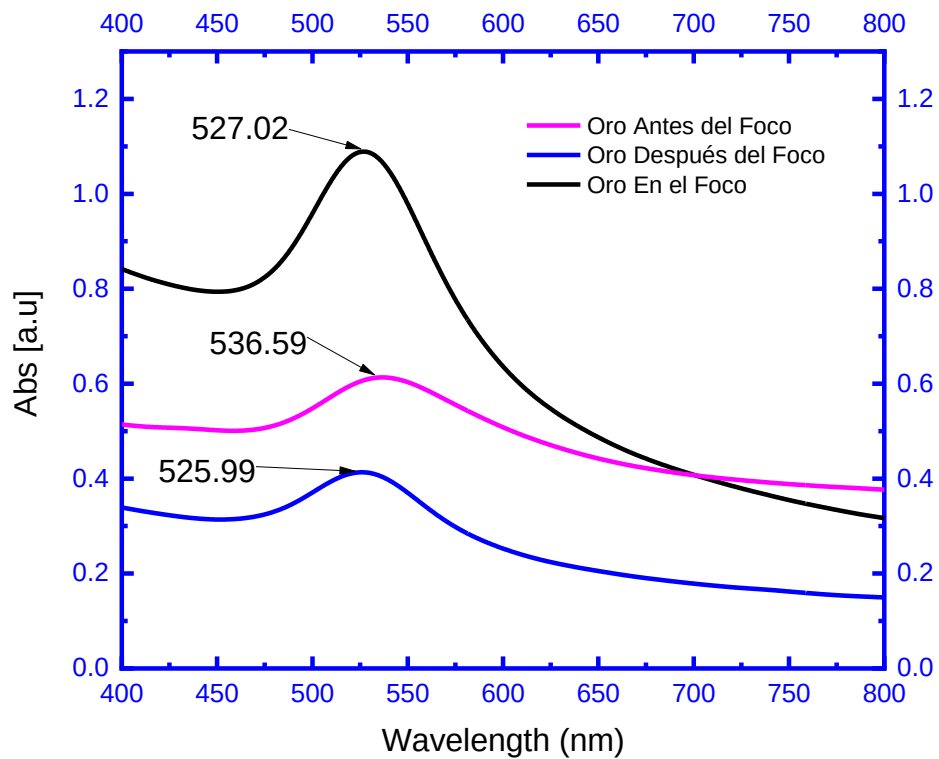


Figura 21. Espectros UV-Vis de nanopartículas de oro sintetizadas a diferentes posiciones focales.

6.2.2 Irradiación

El proceso de irradiación se realizó sobre la suspensión de silicio amorfo y la hibridación silicio-oro. La primera irradiación que se hizo fue sobre la suspensión de silicio para replicar lo que Machado et al. (2025), hicieron al irradiar silicio y obtener óxido de silicio.

Los resultados obtenidos fueron muy similares a los obtenidos por Machado et al. (2025). Se puede observar en la Figura 22, como la absorbancia cambia drásticamente después de 45 minutos de irradiación al igual que en las fotografías se nota más transparente la suspensión fragmentada que la suspensión original de silicio. Se puede concluir que se obtuvieron nanopartículas de SiO_2 al irradiar la solución inicial de silicio.

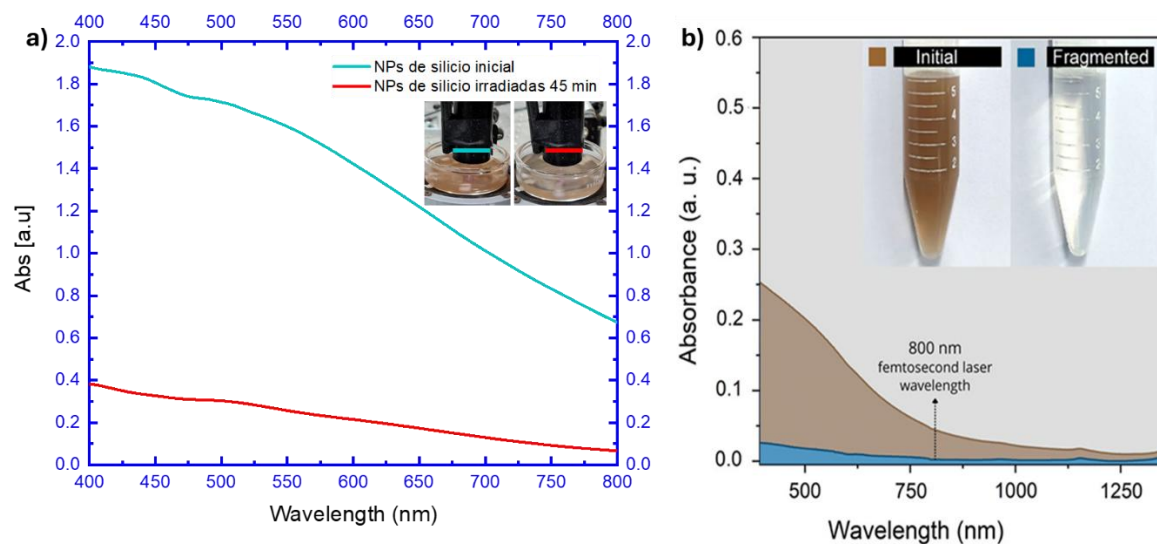


Figura 22. Comparación del efecto de la irradiación post-síntesis sobre nanopartículas de silicio. Nota: Imagen b) tomada de Green synthesis of silica-coated gold nanoparticles employing femtosecond laser, solid targets, and water por Machado, N. G. P., Raele, M.P., Jimenez-Villar, E., de Rossi, W., 2025, Discover Nano, Volumen (20), p. 17.

Posteriormente, en la Figura 23, se muestran los resultados obtenidos de absorbancia UV-vis resultantes de irradiar una suspensión de NPs híbridas silicio-oro por 15, 30 y 45 minutos comparándola con una solución de NPs de silicio y oro ablacionadas por separado. Se puede visualizar que conforme se fue dejando la suspensión más tiempo en la irradiación, el pico fue incrementando desde la suspensión original hasta los 45 minutos de exposición.

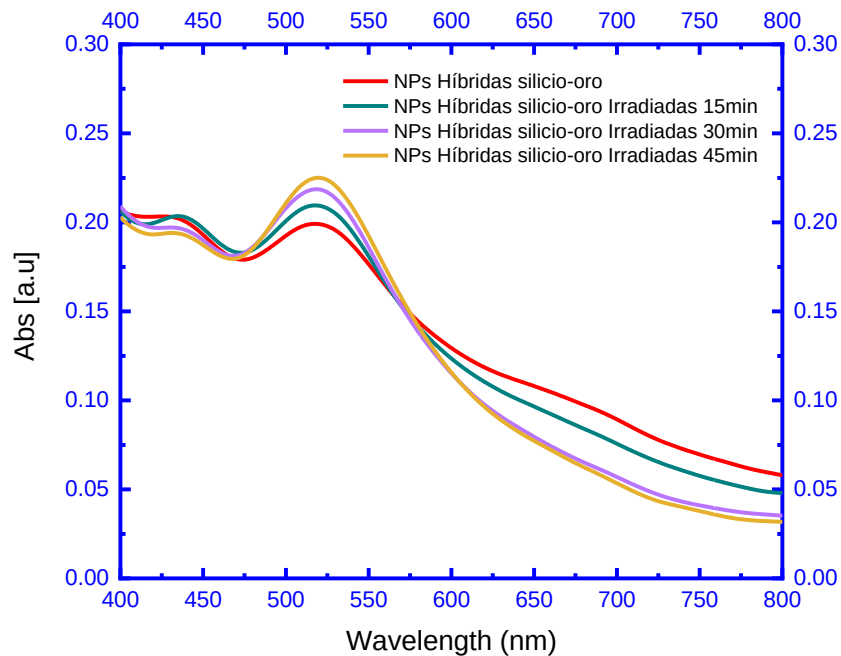


Figura 23. Efecto del tiempo de irradiación sobre el espectro UV-Vis de nanopartículas híbridas silicio-oro.

Por parte de la longitud de onda a la que se encuentra el pico distintivo de cada curva se tiene la siguiente tabla (Cuadro 2) con los datos obtenidos. Este cuadro presenta más claridad sobre cómo se desplaza el pico hacia la derecha, lo que quiere decir que hay un aumento de tamaño en las partículas que se encuentran irradiadas. La diferencia entre la suspensión inicial de NPs híbridas y la irradiada por 45 minutos es de 2.07 nm. Por lo que se puede inferir que las NPs aumentaron su tamaño, o en su defecto, se decoraron mejor las NPs de silicio con NPs de oro de menor tamaño.

Cuadro 2. Características espectrales de nanopartículas híbridas silicio-oro sometidas a irradiación post-síntesis en recipiente 1.

	x inicial (nm)	x final (nm)	Altura Máxima (a.u)	Pico distintivo (nm)	FWHM (nm)
NPs Híbridas silicio-oro	465.93707	598.72321	0.19917	517.44	168.86136
NPs Híbridas silicio-oro Irradiadas 15min	465.93707	598.72321	0.20952	517.7	151.50969
NPs Híbridas silicio-oro Irradiadas 30min	465.93707	598.72321	0.2186	518.48	138.41447
NPs Híbridas silicio-oro Irradiadas 45min	465.93707	598.72321	0.22503	519.51	136.10527

Por último, en la Figura 24, se muestra el espectro UV-Vis de absorbancia de NPs híbridas silicio-oro que fueron sintetizadas en el recipiente 2 e irradiadas por 15, 30 y 45 minutos respectivamente después de su síntesis. Se observa que hay una clara diferencia en la forma del pico distintivo de cada muestra cerca de los 525 nm. Conforme el tiempo de irradiación aumenta, el pico distintivo se alarga verticalmente.

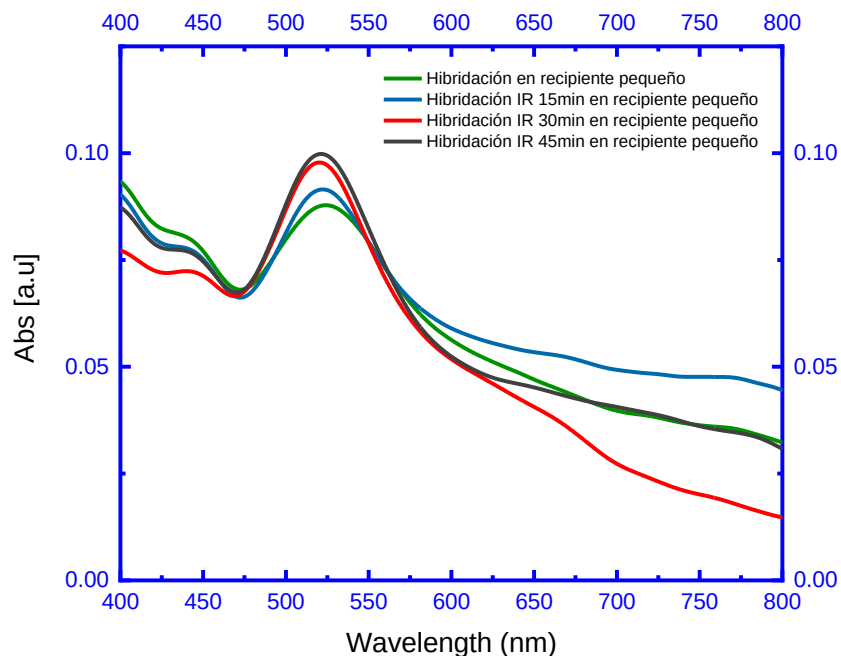


Figura 24. Efecto de la irradiación post-síntesis en nanopartículas híbridas sintetizadas en recipiente 2.

Se describe un análisis más detallado en el Cuadro 3. Para el análisis del ancho se utilizó la herramienta de integración en Origin, se calculó el ancho completo a la mitad del máximo (FWHM por sus siglas en inglés) entre los valores de 466 nm y 599 nm.

Se puede observar que se tienen diferentes anchos de los picos distintivos. La muestra irradiada por 30 minutos tiene el ancho de menor tamaño, al igual que la longitud de onda donde se encuentra el máximo. El ancho indica que la distribución de tamaños es menor (Maximova, Aristov, Sentis, & Kabashin, 2015) y el máximo se encuentra corrido a la izquierda indicando que su tamaño promedio es menor al de las demás (Besner, Kabashin, & Meunier, 2006). Por lo que se infiere que la muestra expuesta 30 minutos tiene las mejores características de control de tamaño de las cuatro muestras registradas en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Longitud de onda máxima y FWHM de nanopartículas híbridas silicio-oro irradiadas en recipiente 2.

	Original	15 min	30 min	45 min
Longitud de onda de pico distintivo (nm)	524.17	522.36	520.29	521.33
Ancho (nm)	155.22595	144.03513	121.25529	122.7602

6.2.3 Agitación

En la Figura 25, como parte de la metodología de variación de agitación cuando se realiza la hibridación, se muestran los espectros más relevantes para una comparación a diferentes velocidades de agitación; 3000 (color rojo), 5000 (color azul) y 7000 RPM (color verde) respectivamente. A su vez, se agregaron los espectros de NPs de silicio (color gris), NPs de oro (color morado) y una solución de ambas (color dorado). Se puede observar que la curva de la mezcla silicio-oro es prácticamente la suma de la curva de oro y la de silicio, que son bastantes diferentes en el ancho de su pico distintivo, otra vez, comparado con las curvas de las suspensiones que contienen hibridaciones. Sus picos distintivos se encuentran en 523.14 nm para la mezcla y 524.95 nm para oro. Para silicio se observa una curva decreciente bastante similar a la que presentan Machado et al. (2025), que se ilustró en la Figura 22.

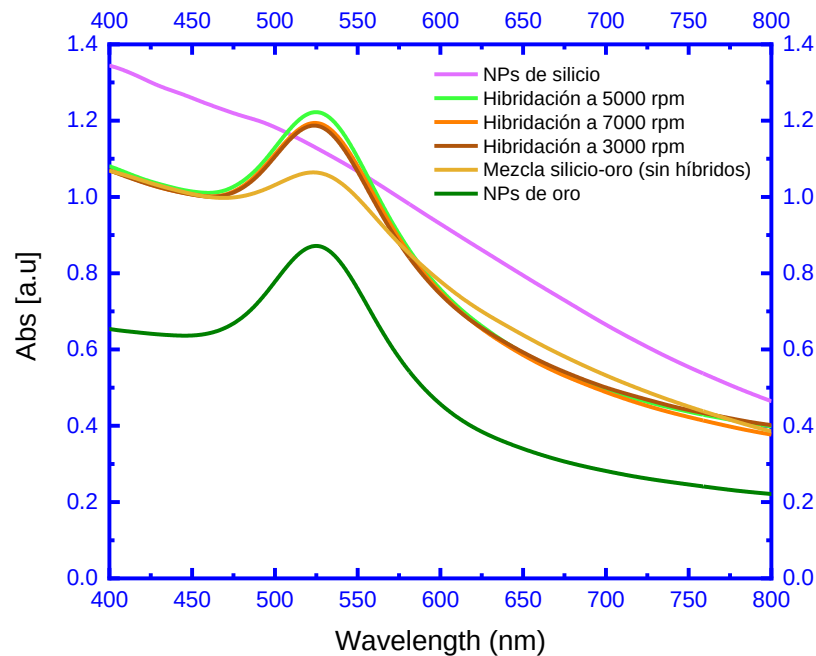


Figura 25. Espectros UV-Vis de nanopartículas híbridas obtenidas a diferentes velocidades de agitación.

Para tener una mejor apreciación a las curvas de las diferentes agitaciones utilizadas, se realizó un acercamiento y se eliminaron las curvas de oro, silicio y mezcla. En la Figura 26, se observa este acercamiento y se logra percibir como el pico de la curva de hibridación a 5000 RPM, es el más alargado de los tres. Por su parte, la curva de 3000 RPM, es la más delgada y el intermedio es la de 7000 RPM. Estos resultados sugieren la existencia de un intervalo de velocidades favorables para la interacción entre nanopartículas. Cuando se analiza en qué longitud se encuentra el máximo del pico distintivo del material, se observa que: 523.66 nm para 3000 RPM, 524.17 nm para 7000 RPM y 524.95 nm para 5000 RPM. Siendo así, se infiere que la curva de 5000 RPM muestra el mayor tamaño.

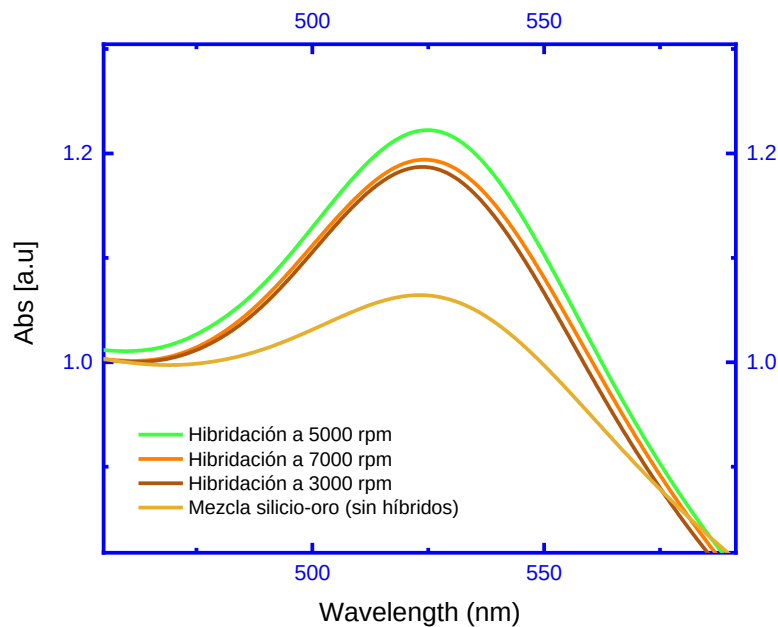


Figura 26. Comparación del pico distintivo para diferentes velocidades de agitación.

Para evaluar el ancho de los picos (FWHM), se utilizó la misma herramienta descrita anteriormente. En el Cuadro 4, se observa que la muestra obtenida a una velocidad de agitación de 5000 RPM, presenta el menor valor de FWHM entre las tres condiciones evaluadas. Sin embargo, la diferencia observada es de aproximadamente 2 nm respecto a las demás muestras, por lo que no puede considerarse una variación significativa dentro de esta metodología.

En consecuencia, los resultados no muestran evidencia concluyente de una mejora sustancial en la homogeneidad de la distribución de tamaños de las nanopartículas al modificar la velocidad de agitación dentro del intervalo estudiado.

No obstante, la información obtenida a partir de los espectros UV-Vis, sugiere que una velocidad de agitación de 5000 RPM, constituye la condición más favorable en la evaluación, considerando tanto la forma de la curva de absorbancia como la posición del pico plasmónico. Este comportamiento podría estar relacionado con cambios en el tamaño promedio de las

nanopartículas o con modificaciones en la interacción entre las nanopartículas de oro y silicio durante el proceso de hibridación.

Adicionalmente, se consideraron las observaciones reportadas por Maximova et. al., (2015) y Besner et. al., (2006), quienes señalan que el estrechamiento del pico característico en los espectros UV-Vis puede asociarse con una distribución de tamaños más homogénea dentro de la población de nanopartículas.

Cuadro 4. Características espectrales λx de nanopartículas híbridas silicio-oro obtenidas bajo diferentes condiciones de agitación.

	λx de inicio	λx final	Altura Máxima de intensidad (a.u)	Pico λ distintivo (nm)	FWHM (nm)
NPs de silicio	465.93707	598.72321	1.2333		272.31407
Hibridación a 5000 RPM	465.93707	598.72321	1.22229	524.95	157.27672
Hibridación a 7000 RPM	465.93707	598.72321	1.19399	524.17	159.8236
Hibridación a 3000 RPM	465.93707	598.72321	1.18705	523.66	159.74434
Mezcla silicio- oro (sin híbridos)	465.93707	598.72321	1.06432	523.14	200.35907
NPs de oro	465.93707	598.72321	0.87147	524.95	137.39389

6.2.4 Tamaño del recipiente

Los resultados obtenidos al realizar la hibridación silicio-oro en un recipiente más pequeño se muestran en la Figura 27, se observa el espectro de absorbancia de la suspensión de NPs híbridas ablacionadas en el recipiente 2, el cuál fue comparado con los espectros de absorbancia de dos diferentes muestras. Dentro de las diferencias destacables se tiene la forma del espectro. La hibridación realizada en el recipiente de mayores dimensiones, registra una menor intensidad que las otras dos muestras.

Por su parte, el pico distintivo de la suspensión de NPs híbridas ablacionadas en el contenedor más grande se encuentra en 512.26 nm. El de la suspensión de NPs híbridas irradiadas post

síntesis por 45 min se encuentra en 518.74 nm. Finalmente, el de la suspensión de NPs híbridas ablacionadas en el contenedor más pequeño, se encuentra en 523.91 nm.

Respecto a estas longitudes de onda obtenidas, se puede inferir que, con las diferentes metodologías, el tamaño de las nanopartículas híbridas va aumentando, lo que se traduce como una mayor decoración de la nanopartícula de silicio con nanopartículas más pequeñas de oro (Maximova, Aristov, Sentis, & Kabashin, 2015).

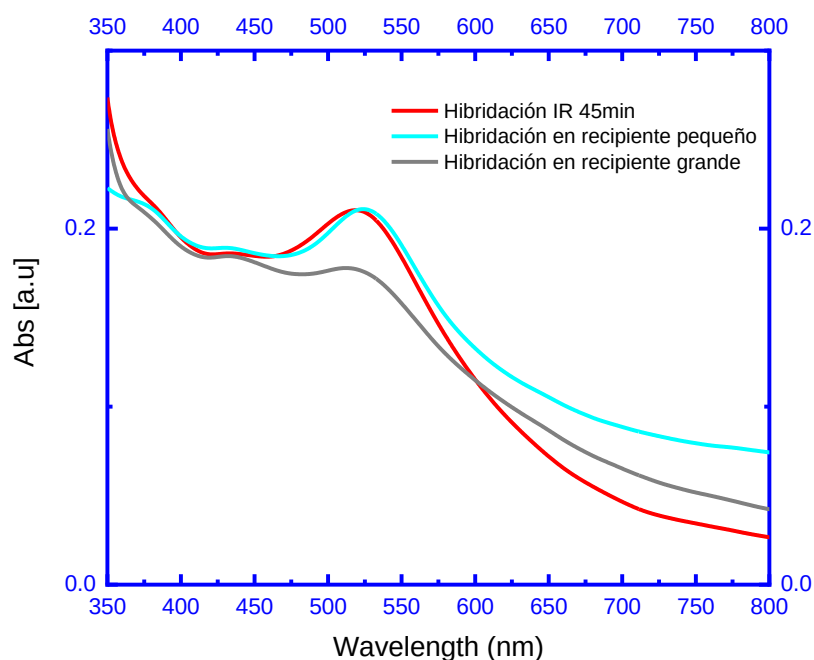


Figura 27. Comparación del efecto del tamaño del recipiente y la irradiación post-síntesis.

6.2.5 Centrifugación

Los resultados obtenidos para la suspensión de nanopartículas híbridas de silicio-oro después de ser centrifugadas a diferentes velocidades se muestran en el Cuadro 5.

El pico máximo distintivo λ de la muestra control, se obtuvo a una longitud de onda de 528.57 nm, por lo que se hizo una segunda tabla comparativa.

Cuadro 5. Pico máximo de la longitud de onda en la absorción del espectro visible después de obtener un pico distintivo de nanopartículas híbridas silicio-oro en función de la centrifugación.

RPMs/Pico máximo	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_{ave}
2000	520.03	519.77	519.51	520.81	520.03
3000	518.48	519.77	517.7	518.48	518.6075
4000	519	517.7	517.44	519.51	518.4125

En este segundo cuadro (Cuadro 6), se logra apreciar mejor la diferencia de nanómetros que hay contra la muestra control, indicando que el promedio de diferencia de tamaño NPs híbridas silicio-oro centrifugadas a 4000 RPM es el mayor. Lo que quiere decir que la diferencia de tamaño, crece linealmente conforme se aumentan las revoluciones por minuto. Por lo tanto, dependiendo de las revoluciones por minuto a las que se centrifugue la suspensión, se obtendrán diferentes tamaños de nanopartículas.

Cuadro 6. Corrimiento en nanómetros (“blueshift”) de la longitud de onda del pico máximo distintivo en el espectro de absorción respecto a la muestra control después de centrifugación.

RPMs/Número de muestra	$\Delta\lambda_1$	$\Delta\lambda_2$	$\Delta\lambda_3$	$\Delta\lambda_4$	$\Delta\lambda_{ave}$
2000	8.54	8.8	9.06	7.76	8.54
3000	10.09	8.8	10.87	10.09	9.9625
4000	9.57	10.87	11.13	9.06	10.1575

Esta diferencia de picos distintivos se muestra en la Figura 28, dónde se comparan espectros UV-Vis de la muestra centrifugada a 4000 RPM de color azul, la muestra de hibridación inicial y una solución de NPs de silicio y oro ablacionadas por separado, es decir, sin hibridar. Esta última solución, se agregó a la comparación para comprobar que, la hibridación fue realizada exitosamente mostrando claras diferencias. Dentro de las diferencias destacables se tiene la forma del espectro, que el ancho del pico distintivo es mayor que el de las NPs híbridas y el pico distintivo se encuentra en 523.4 nm.

Por su parte, también se logra observar la diferencia de curva y a qué longitud de onda se encuentra el máximo de cada pico distintivo: suspensión centrifugada 518.22 nm y para suspensión control 528.57 nm. Se necesita saber su composición exacta para determinar también si este método puede utilizarse como método de separación de residuos. En este caso serían residuos de NPs de silicio, dióxido de silicio, oro y óxido de oro. No se puede determinar completamente porque es una separación por tamaño de partícula, por lo que, si hay una NP de silicio del mismo tamaño que una híbrida, las dos partículas aparecerán en el espectro de absorbancia (Akbulut, y otros, 2012). Pero lo que se puede inferir es que sí hay un control sobre el tamaño de partículas que se desean separar (Besner, Kabashin, & Meunier, 2006).

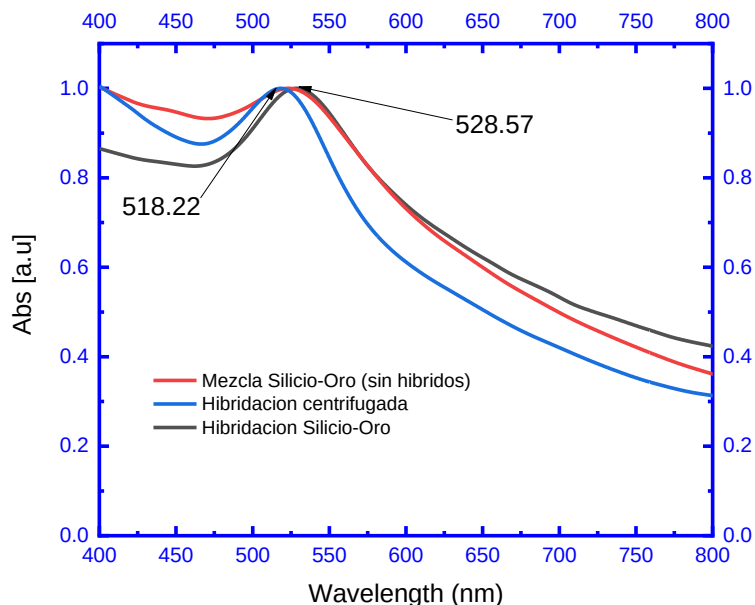


Figura 28. Efecto de la centrifugación sobre el espectro UV-Vis de nanopartículas híbridas.

Con el objetivo de integrar los resultados obtenidos a partir del análisis espectroscópico, las Figuras 29 y 30 resumen el efecto de las principales variables experimentales sobre dos parámetros relevantes de las suspensiones coloidales: la homogeneidad de la población de nanopartículas, representada mediante el inverso del ancho a media altura del pico de absorción ($1/\text{FWHM}$), y la posición del máximo de absorbancia (λ_{max}), asociada a cambios en el tamaño promedio esperado de las nanopartículas. Para facilitar la comparación, las muestras se agruparon de acuerdo con la variable experimental evaluada: en color naranja se presentan las obtenidas variando la velocidad de agitación durante el proceso de hibridación, en azul la mezcla de nanopartículas sintetizadas por separado (sin formación de estructuras híbridas), en morado las muestras irradiadas en el recipiente 1 y en verde las irradiadas en el recipiente 2.

De manera general, los resultados muestran que la irradiación post-síntesis y el empleo de recipientes de menor tamaño, produjeron los efectos más notorios sobre ambos parámetros. En estos casos se observaron incrementos en el inverso del FWHM, consistentes con una

mayor homogeneidad de la población de nanopartículas, así como desplazamientos del máximo de absorbancia hacia menores longitudes de onda, comportamiento asociado en la literatura con una disminución del tamaño promedio de partícula.

Por otro lado, las variaciones en la velocidad de agitación durante el proceso de hibridación produjeron cambios más moderados en comparación con los parámetros anteriores, aunque mantuvieron diferencias apreciables respecto a la mezcla de nanopartículas sintetizadas por separado. Esto respalda la hipótesis de que; las condiciones hidrodinámicas influyen en la interacción entre las nanopartículas de oro y silicio, durante el proceso de formación de las estructuras híbridas.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que; los parámetros de síntesis evaluados permiten modular simultáneamente la distribución de tamaños y las propiedades ópticas de las nanopartículas híbridas silicio-oro, obtenidas mediante ablación láser en líquidos, proporcionando herramientas para el control parcial de sus características finales.

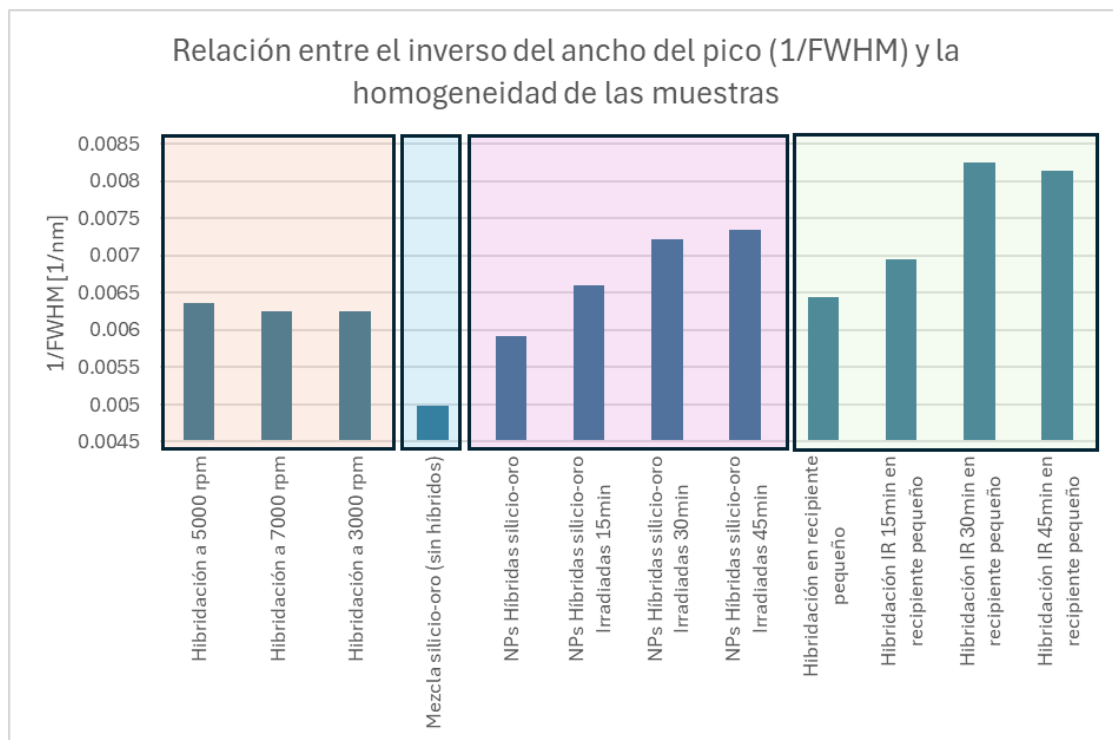


Figura 29. Comparación del inverso del ancho a media altura (1/FWHM) del máximo de absorción UV-Vis para las diferentes condiciones de síntesis, utilizado como indicador de la homogeneidad de las nanopartículas.

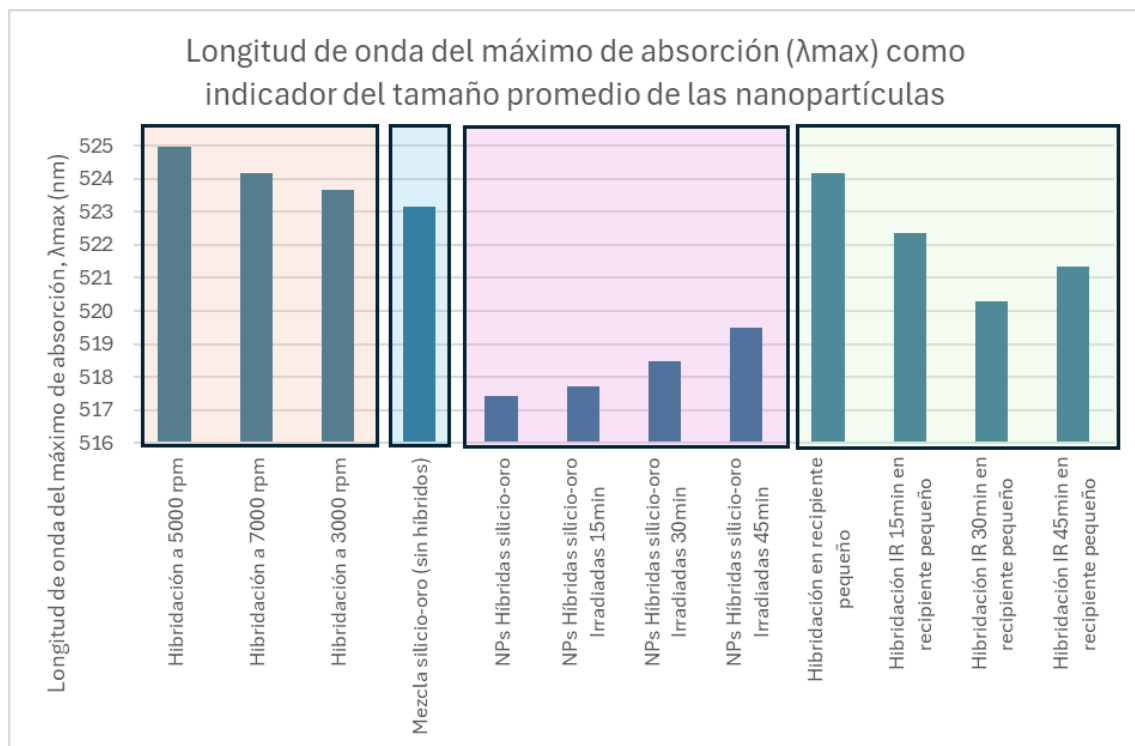


Figura 30. Comparación de la longitud de onda del máximo de absorción (λ_{max}) para las diferentes condiciones de síntesis, empleada como indicador del tamaño promedio esperado de las nanopartículas.

6.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

A continuación, se presentan la sección de resultados obtenidos en Microscopía electrónica de barrido. Como se puede ver en la Figura 31, del lado izquierdo (a), se tiene la ampliación x100k de una muestra de silicio amorfo ablacionado antes del punto focal. Como se describe en la imagen, se obtuvieron NPs de silicio cercanas a los 137 nm de diámetro como se esperaba, comparado con la literatura (Besner, Kabashin, & Meunier, 2006). Al realizar una irradiación post-síntesis, las NPs de silicio fueron fragmentadas y se redujo su tamaño a un valor cercano a los 50 nm, como se puede apreciar en la Figura 29 del lado derecho (b). De igual manera, después de ser irradiadas, también se generaron estructuras aún más pequeñas que se logran visualizar en el fondo como una especie de mancha porosa.

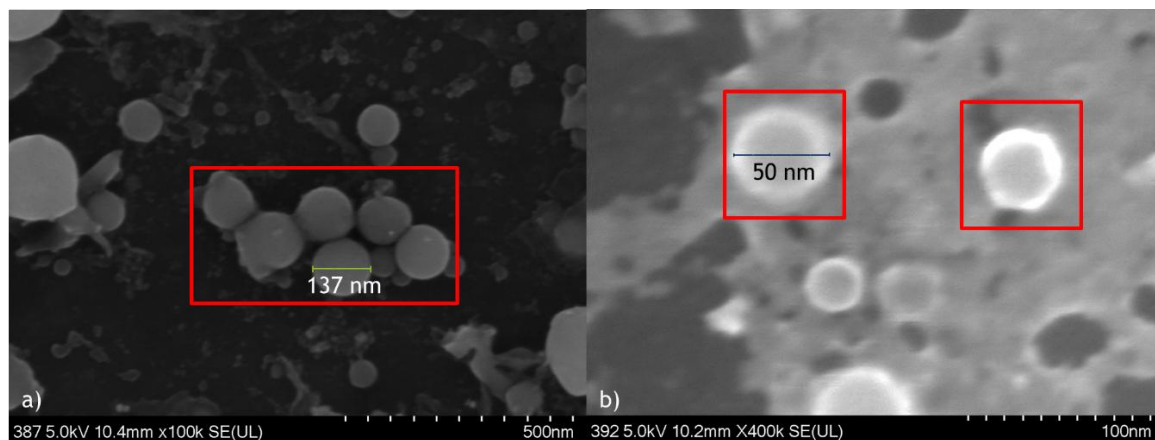


Figura 31. Micrografías SEM de nanopartículas de silicio antes y después de irradiación post-síntesis.

Por su parte en la Figura 32, se muestra del lado izquierdo (a), la suspensión de nanopartículas híbridas con el proceso descrito en la sección 5.3.2, con una ampliación de x50.0k. Las estructuras enmarcadas son las que se esperaba obtener como sistema híbrido. Se tiene la esfera de silicio decorada en su superficie con NPs metálicas. Se encontró que tenían un rango de tamaños de 150 – 170 nm. Se puede observar que, en la sección tomada por SEM, se encuentran muchas de estas estructuras decoradas. No se encuentran homogéneas, pero se logra apreciar la decoración.

Del lado derecho (b), se muestra la imagen con un aumento de x100k, en donde se muestra el material después de ser irradiado 45 minutos. En la muestra sometida a SEM, se encontró que se logró una estructura “core-shell”, donde el núcleo es la NP de oro y el recubrimiento se trata de una NP de silicio, obteniendo así una NP de 100 nm. También se logró la estructura deseada de decoración enmarcada de color rojo en la parte media a la derecha de la imagen. De igual manera, se obtuvo una NP de 100 nm, pero esta vez decorada con NPs de un diámetro inferior. Es decir, la estructura planteada en los objetivos del trabajo. Con ese aumento, no se logran percibir más NPs decoradas con la forma deseada, pero del lado superior izquierdo se notan unas pequeñas estructuras decoradas con NPs más grandes de oro.

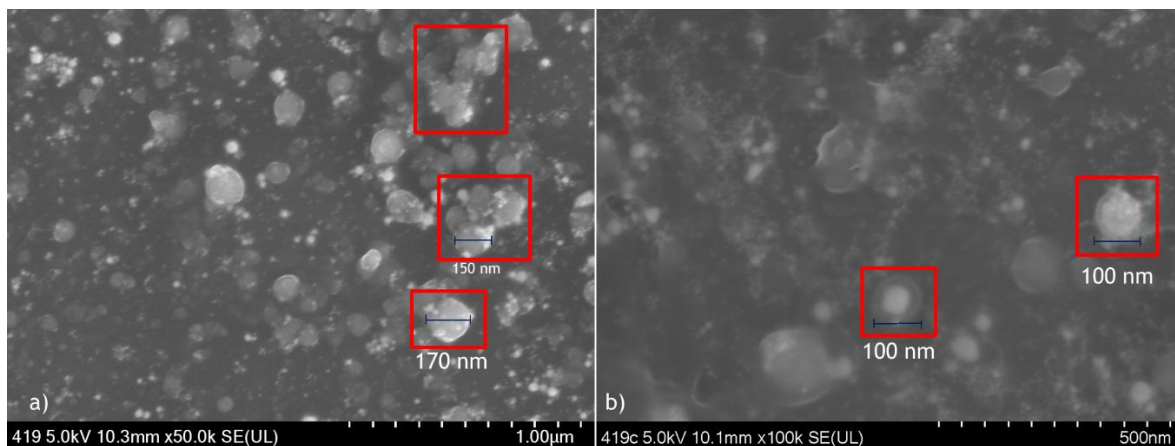


Figura 32. Micrografías SEM de nanopartículas híbridas silicio-oro antes y después de irradiación.

También, se realizó SEM a la muestra solución de NPs de silicio amorfo y NPs de oro, ablacionadas por separado y en agua, para verificar que hubiera una diferencia con las NPs híbridas. Con la Figura 31, podemos verificar esta información. Enmarcadas en amarillo, se logran percibir NPs de silicio independientes o aglomeradas sin algún tipo de decoración o interacción directa con las NPs de oro que se encuentran en el medio. Se realizó el contraste para verificar a que elemento pertenecían las NPs, en la parte b) de la Figura 33. Al realizar el contraste HA(T), las NPs de oro son las que se visualizan debido a su número Z tan elevado, comparado con el de silicio (Walther & Müller, 1985).

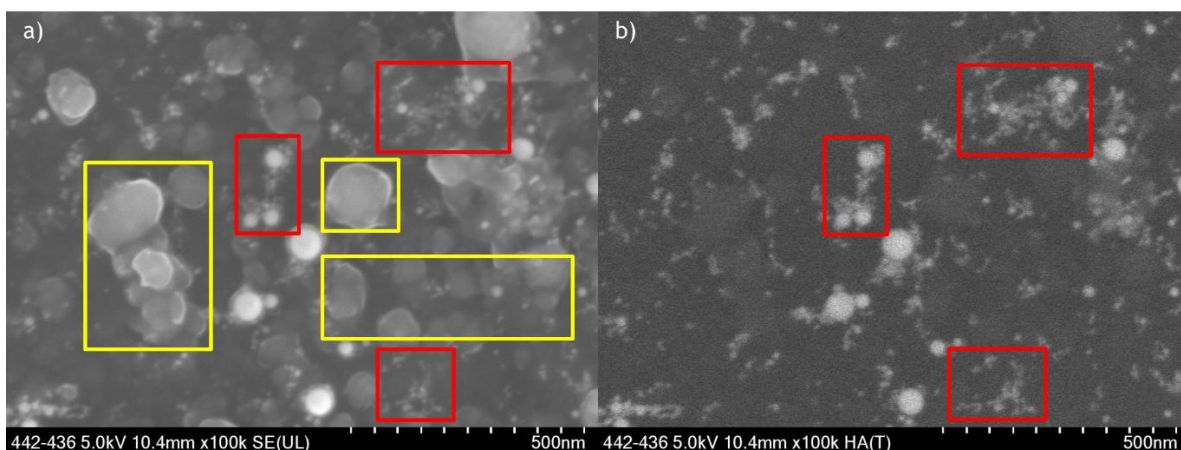


Figura 33. Comparación SEM-BSE de una mezcla de nanopartículas de silicio y oro sintetizadas por separado.

Se obtuvieron imágenes mostradas en la Figura 34. En la parte superior a), se tiene la muestra sintetizada con una agitación de 3000 RPM y se puede visualizar un sistema bastante desordenado, donde es casi imposible encontrar estructuras completamente decoradas. En la parte inferior de esa muestra, se encuentran estructuras parecidas a esferas con pequeñas partículas en sus bordes superiores.

En la parte inferior izquierda b), se tiene la imagen de la muestra sintetizada con una agitación de 5000 RPM. Se capturó la imagen con el detector de electrones secundarios (SE(UL)), para visualizar la morfología y tamaño de las NPs híbridas obtenidas. Se lograron encontrar estructuras completamente esféricas de tamaños variados de los 52 – 75 nm. También se logró encontrar una esfera decorada de mayor tamaño en la parte inferior derecha de la imagen, es posible visualizar una decoración con NPs de oro de mayor tamaño. Al no visualizar en las demás esferas, se optó por detectar los electrones retrodispersados para obtener el contraste-Z (Lloyd, 1987).

En la parte inferior derecha c), se muestra con HA(T) la misma muestra en la misma zona que en la parte b) de la Figura 32. Aquí se observa un contraste consistente con diferencias de número atómico entre regiones atribuidas al silicio y al oro respectivamente. Las esferas que resaltan en este apartado cubren por completo la esfera de silicio visible en la parte b). Al ser electrones retrodispersados (BSE), las regiones de mayor intensidad observadas en HA(T), son consistentes con la presencia de oro debido al contraste-Z descrito por Lloyd (1987). Por lo que se mostraron regiones compatibles con una posible decoración superficial relativamente homogénea.

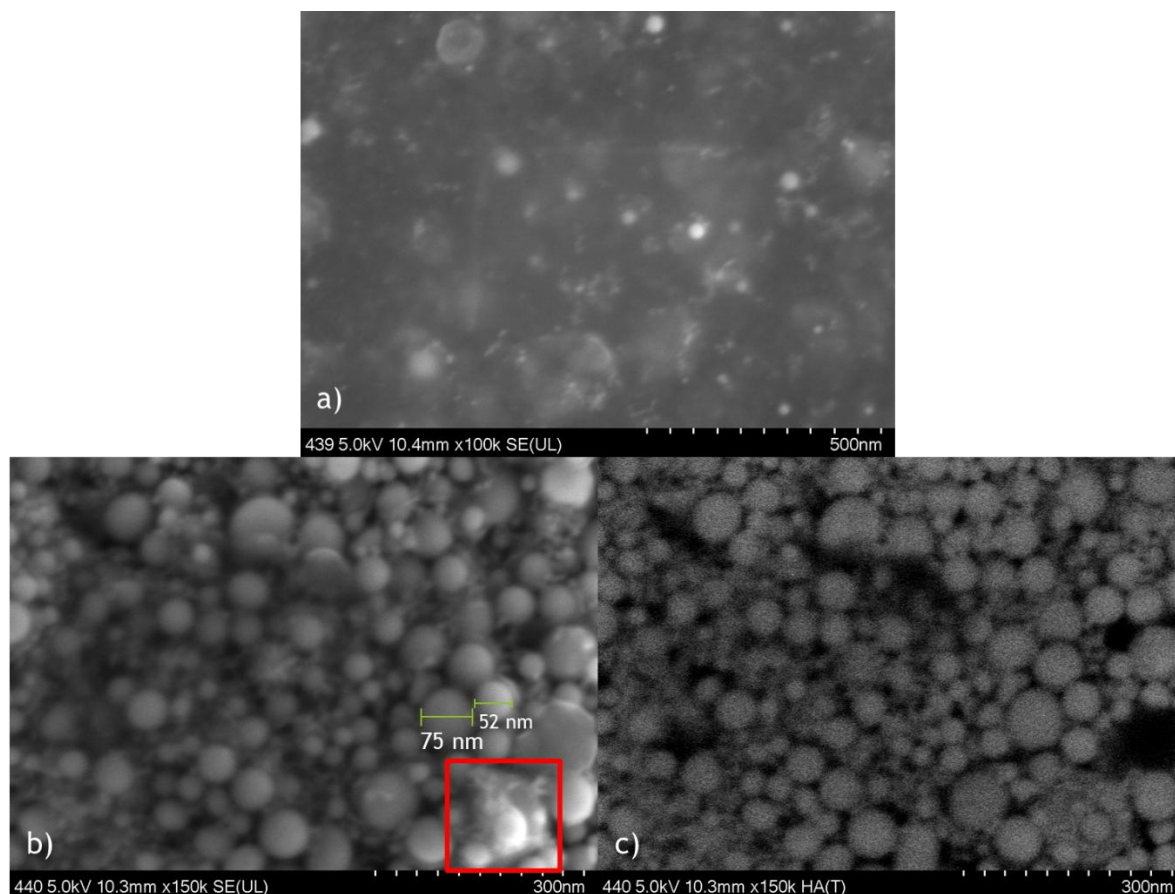


Figura 34. Evidencia SEM-BSE de nanopartículas híbridas silicio-oro obtenidas a 5000 rpm.

Se obtuvieron dos imágenes mostradas en la Figura 35 de las pruebas realizadas en el recipiente 2 (de menores dimensiones). En el apartado a) de la ilustración, se visualizan estructuras no completamente esféricas y sin decorar. Del lado derecho de esa imagen se logran apreciar estructuras más decoradas y con una forma más esférica. Dentro de esa muestra se encontraron tamaños de las NPs cercanos a los 40 nm.

Por otro lado, del lado derecho de la Figura 35 b), se tiene la muestra que fue irradiada 45 minutos por el láser después de su síntesis. Lo que quiere decir que el material obtenido en la parte a), fue sometido a una irradiación y se obtuvo la muestra de la parte b). Aquí se puede apreciar que es una muestra más homogénea. Tiene tamaños de entre 20 – 30 nm, con algunas NPs aún más pequeñas de 17 nm aproximadamente. Al comparar los resultados obtenidos en

la Figura 34 b), se puede inferir que las estructuras obtenidas en la Figura 35 b) están igualmente decoradas en toda su superficie, pero muestran tamaños mucho menores.

A partir de los resultados obtenidos mediante microscopía electrónica de barrido, se observó que las condiciones de irradiación post-síntesis y el uso de recipientes de menor tamaño, favorecieron una reducción en el tamaño promedio de las estructuras presentes y una distribución de tamaños más homogénea dentro de la suspensión coloidal.

Adicionalmente, el análisis comparativo entre imágenes obtenidas mediante electrones secundarios y modos de alto ángulo tipo BSE, permitió distinguir regiones de alta intensidad asociadas a materiales de mayor número atómico, consistentes con la presencia de nanopartículas de oro sobre estructuras atribuidas al silicio o sílice. Particularmente, la Figura 34 mostró regiones brillantes distribuidas sobre la superficie de estructuras semiconductoras, comportamiento compatible con una posible decoración superficial relativamente homogénea.

Aunque las imágenes SEM no permiten confirmar de manera definitiva configuraciones tipo “core-shell” o una cobertura uniforme completa, los resultados obtenidos sugieren una interacción parcial entre ambas fases y respaldan la posible formación de nanopartículas híbridas mediante ablación láser en líquidos.

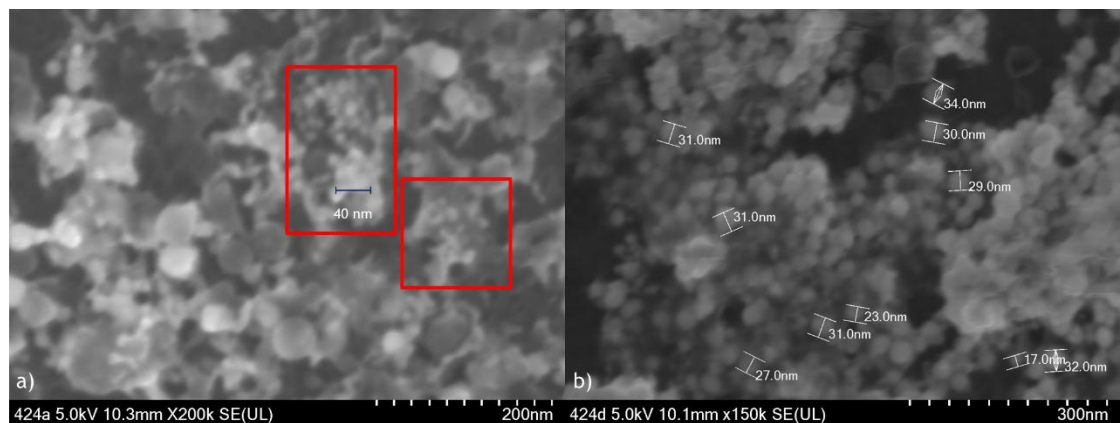


Figura 35. Micrografías SEM de nanopartículas híbridas sintetizadas en recipiente 2.

7. Conclusiones.

En este trabajo se demostró que la ablación láser en líquidos, permite sintetizar nanopartículas híbridas silicio-oro, cuyas propiedades ópticas y morfológicas pueden ser moduladas mediante el control de parámetros experimentales de síntesis.

Los resultados obtenidos demostraron que; variables como la posición respecto al punto focal, la irradiación post-síntesis, la velocidad de agitación, el tamaño del recipiente y la centrifugación influyen directamente en la distribución de tamaños, la homogeneidad coloidal y la interacción entre nanopartículas. Especialmente, la irradiación post-síntesis y utilizar un recipiente de menor tamaño, favorecieron el estrechamiento del pico característico en los espectros UV-Vis, comportamiento asociado en la literatura con una distribución de tamaños más homogénea y una disminución en el tamaño promedio de las nanopartículas.

Asimismo, las pruebas realizadas con diferentes velocidades de agitación mostraron que las condiciones hidrodinámicas durante la hibridación, afectan menos significativamente la interacción entre las nanopartículas de oro y silicio. Los resultados sugieren que existe un intervalo de agitación favorable para promover la homogenización de la suspensión y la interacción entre ambas, mientras que velocidades excesivas podrían favorecer procesos de agregación entre nanopartículas metálicas.

Inicialmente, se analizó el comportamiento geométrico teórico de las estructuras decoradas y se utilizó la plataforma de predicción teórica geométrica de dispersión espacial de Mie, para estimarlos picos máximos de los espectros de absorción en UV-Vis asociados a diferentes características de las nanopartículas híbridas. Los picos máximos en este espectro proporcionan información de tamaño de la nanopartícula y la homogeneidad de tamaños se caracteriza con ancho espectral de estos picos. Estos resultados de los tamaños y la homogeneidad en la hibridación se verificaron por microscopia electrónica de barrido (SEM). También para la fabricación de materiales puros se evaluó el efecto de la posición respecto al punto focal durante la ablación, mediante los mismos espectros de absorción visible, observándose las variaciones tanto en la eficiencia de producción como en características de las nanopartículas obtenidas. Resalta la formación de óxido de silicio ya reportada en la

literatura debido a la irradiación laser. En general se estudió el efecto de la irradiación laser en la fabricación con los picos máximos en la absorción UV-VIS de los nanofluidos. Esto se realizó teniendo una irradiación inicial y después fue dependiente del tiempo, usando tiempos post-síntesis (15min, 30min y 45min). Pero en el tamaño del recipiente conservando la concentración de los nanofluidos, para el efecto de la hibridación fue sobresaliente. Finalmente se evaluó también la centrifugación a los materiales obtenidos híbridos para homogeneizar los tamaños. Los resultados obtenidos en esta tesis y analizados mediante espectroscopía UV-Vis, mostraron que para la hibridación 1) la irradiación posterior a la síntesis y el uso de 2) recipientes de menor tamaño, favorecieron el estrechamiento del pico característico en la hibridación. En el caso de la velocidad de agitación del nanofluido de silicio en la decoración (3000, 500 y 7000 RPM) no se tuvieron grandes cambios en dicha hibridación. Mientras que el comportamiento asociado con una distribución de tamaños, es decir, nanopartículas más homogéneas también se logra con 1) y 2). Obteniéndose un control mayor en la reducción en el tamaño promedio de las nanopartículas, que representa la fragmentación debido a la exposición al laser. Finalmente, el análisis mediante microscopía electrónica de barrido permitió identificar estructuras compatibles con nanopartículas híbridas silicio-oro y los resultados antes mencionados. La comparación se logró con imágenes obtenidas mediante electrones secundarios y modos de alto ángulo tipo BSE, permitió distinguir regiones de alta intensidad asociadas a materiales de mayor número atómico. Esto consistentes con la presencia de nanopartículas de oro sobre estructuras atribuidas al silicio o sílice. Aunque, las técnicas empleadas no permiten confirmar de manera definitiva configuraciones tipo “core-shell”, los resultados obtenidos sugieren una interacción superficial entre ambas fases y respaldan la posible formación de nanopartículas híbridas mediante LAL.

Un comentario adicional es que este trabajo permitió establecer una primera aproximación experimental del grupo de trabajo y obtener una relación entre las condiciones experimentales de síntesis de decoración híbrida, propiedades ópticas y morfológicas de las nanopartículas obtenidas, demostrando que la ablación láser en líquidos representa una técnica versátil, para controlar parcialmente la interacción entre nanopartículas metálicas y

semiconductoras, sin el uso de precursores químicos adicionales. Los resultados obtenidos contribuyen al entendimiento de los procesos de hibridación en sistemas coloidales sintetizados por LAL y establecen una base experimental para futuras investigaciones, orientadas al control estructural y funcional de nanopartículas híbridas.

Bibliografía o Referencias.

- Akbulut, O., Mace, C. R., Martinez, R. V., Kumar, A. A., Nie, Z., Patton, M. R., & Whitesides, G. M. (2012). Separation of nanoparticles in aqueous multiphase systems through centrifugation. *Nano Letters*, 12(8), 4060-4064.
doi:<https://doi.org/10.1021/nl301452x>
- Bai, L., Ma, X., Liu, J., Sun, X., Zhao, D., & Evans, D. G. (2010). Rapid Separation and Purification of Nanoparticles in Organic Density Gradients. *Journal of the American Chemical Society*, 132(7), 2333-2337.
doi:<https://doi.org/10.1021/ja908971d>
- Besner, S., Kabashin, A. V., & Meunier, M. (2006). Fragmentation of Colloidal Nanoparticles by Femtosecond Laser-Induced Supercontinuum Generation. *Applied Physics Letters*, 89(23), 233122–233122. doi:<https://doi.org/10.1063/1.2402944>
- Biswas, S., Nandi, A., Dhara, A., Baral, A., Saha, H., Mukherjee, N., & Hossain, S. M. (2018). Effect of Centrifugation Time on the Optical Properties of Colloidal Silicon Nanoparticle. *Materials Today: Proceedings*, 5(3), 10028-10033.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.202>
- Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (2004). *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* (1 ed.). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Bonaccorso, F., Zerbetto, M., Ferrari, A. C., & Amendola, V. (2013). Sorting Nanoparticles by Centrifugal Fields in Clean Media. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(25), 13217-13229. doi:<https://doi.org/10.1021/jp400599g>
- Chen, Q., Ye, Y., Liu, J., Wu, S., Li, P., & Liang, C. (2021). Stability Evolution of Ultrafine Ag Nanoparticles Prepared by Laser Ablation in Liquids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 584, 444-451.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.10.083>
- Díaz-Díaz, A. (2026). *Sistema óptico automatizado para la síntesis de nanopartículas por medio de ablación láser en líquidos*. Obtenido de Repositorio Institucional UAQ: <https://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/12657>
- Domínguez-Juárez, J. L., Quintero-Torres, R., Cardoso-Duarte, M. A., Quiroz-Juárez, M. A., Aragón, J. L., & Villatoro, J. (2023). Unveiling the Properties of Liquids via Photothermal-Induced Diffraction Patterns. *Communications Physics*, 6, 154.
doi:<https://doi.org/10.1038/s42005-023-01278-x>

- Domínguez-Juárez, J. L., Vallone, S., Lempel, A., Moocarme, M., Oh, J., Gafney, H. D., & Vuong, L. T. (May de 2015). Influence of Solvent Polarity on Light-Induced Thermal Cycles in Plasmonic Nanofluids. *Optica*, 2(5), 447-453.
doi:<https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000447>
- Eliezer, S., Eliaz, N., Grossman, E., Fisher, D., Gouzman, I., Henis, Z., . . . Lereah, Y. (2004). Synthesis of Nanoparticles with Femtosecond Laser Pulses. *Physical Review B*, 69(14), 144119-1–144119-6.
doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.69.144119>
- Elsaesser, A., & Howard, C. V. (2012). Toxicology of Nanoparticles. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64(2), 129-137. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addr.2011.09.001>
- Flores-Castañeda, M., & Camacho-López, S. (2023). Si nanoparticle decorated Bi₂O₃CO₃ 2D nanocomposite synthesized by femtosecond laser ablation of solids in liquids and aging. *Optics & Laser Technology*, 158.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108891>
- Fojtik, A., & Henglein, A. (1993). Laser Ablation of Films and Suspended Particles in a Solvent: Formation of Cluster and Colloid Solutions. *Berichte der Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie*, 97(2), 252–254.
- Griffith, O. M. (2010). *Practical Techniques for Centrifugal Separations*. Waltham, MA: Thermo Fisher Scientific.
- Gündoğdu, Y., Kepceoğlu, A., Gezgün, S. Y., Küçükçelebi, H., & Kılıç, H. Ş. (2019). Femtosecond Laser Ablation Synthesis of Nanoparticles and Nano-Hybrides in Ethanol Medium. *Materials Today: Proceedings*, 18, 1803-1810.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.667>
- Hasan, S. (2015). A Review on Nanoparticles: Their Synthesis and Types. *Research Journal of Recent Sciences*, 4(ISC-2014), 9-11.
- Henglein, A. (1993). Physicochemical Properties of Small Metal Particles in Solution: "Microelectrode" Reactions, Chemisorption, Composite Metal Particles, and the Atom-to-Metal Transition. *The Journal of Physical Chemistry*, 97(21), 5457–5471.
doi:<https://doi.org/10.1021/j100123a004>
- Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A., & Bukhari, A. (2020). Detail Review on Chemical, Physical and Green Synthesis, Classification, Characterizations and Applications of Nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 13(3), 223-245.
doi:<https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1802517>

- Jendrzej, S., Gökce, B., Amendola, V., & Barcikowski, S. (2016). Barrierless Growth of Precursor-Free, Ultrafast Laser-Fragmented Noble Metal Nanoparticles by Colloidal Atom Clusters – A Kinetic In Situ Study. *Journal of Colloid and Interface Science*, 463, 299-307. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.10.032>
- Jensen, L. (2017). *Introduction to Computational Chemistry* (3rd edition ed.). Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Jiang, L., Wang, A.-D., Li, B., Cui, T.-H., & Lu, Y.-F. (2018). Electrons Dynamics Control by Shaping Femtosecond Laser Pulses in Micro/Nanofabrication: Modeling, Method, Measurement and Application. *Light: Science & Applications*, 7(2), 17134. doi:<https://doi.org/10.1038/lsa.2017.134>
- Kahnouji, Y. A., Mosaddegh, E., & Bolorizadeh, M. A. (2019). Detailed Analysis of Size-Separation of Silver Nanoparticles by Density Gradient Centrifugation Method. *Materials Science and Engineering: C*, 98, 109817. doi:<https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109817>
- Kang, W.-J., Cheng, C.-Q., Li, Z., Feng, Y., Shen, G.-R., & Du, X.-W. (2019). Ultrafine Ag Nanoparticles as Active Catalyst for Electrocatalytic Hydrogen Production. *ChemCatChem*, 11(24), 5976–5981. doi:<https://doi.org/10.1002/cctc.201901364>
- Kanitz, A., Hoppius, J. S., Fiebrandt, M., Awakowicz, P., Esen, C., Ostendorf, A., & Gurevich, E. L. (2017). Impact of Liquid Environment on Femtosecond Laser Ablation. *Applied Physics A*, 123(11), 674. doi:<https://doi.org/10.1007/s00339-017-1280-z>
- Kelly, K. L., Coronado, E., Zhao, L. L., & Schatz, G. C. (2003). The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment. *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(3), 668–677. doi:<https://doi.org/10.1021/jp026731y>
- Khairani, I. Y., Mínguez-Vega, G., Doñate-Buendía, C., & Gökce, B. (2023). Green Nanoparticle Synthesis at Scale: A Perspective on Overcoming the Limits of Pulsed Laser Ablation in Liquids for High-Throughput Production. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(29), 19380–19408. doi:<https://doi.org/10.1039/D3CP01214J>
- Khan, Z., Al-Thabaiti, S. A., Obaid, A. Y., Khan, Z. A., & Al-Youbi, A. O. (2011). Effects of Solvents on the Stability and Morphology of CTAB-Stabilized Silver Nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 390(1-3), 120-125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.09.015>

- Kim, K. K., Kwon, H. J., Shin, S. K., Song, J. K., & Park, S. M. (2013). Stability of Uncapped Gold Nanoparticles Produced by Laser Ablation in Deionized Water: The Effect of Post-Irradiation. *Chemical Physics Letters*, 588, 167–173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cplett.2013.10.011>
- Kuang, Y., Liu, J., & Sun, X. (2012). Ultrashort Single-Walled Carbon Nanotubes: Density Gradient Separation, Optical Property, and Mathematical Modeling Study. *The Journal of Physical Chemistry C*, 116(46), 24770–24776. doi:<https://doi.org/10.1021/jp3028337>
- Kuang, Y., Song, S., Liu, X., Li, M., Cai, Z., Luo, L., & Sun, X. (2014). Solvent Switching and Purification of Colloidal Nanoparticles through Water/Oil Interfaces within a Density Gradient. *Journal of the American Chemical Society*, 136(49), 17378–17381. doi:<https://doi.org/10.1021/ja509904f>
- Lam, J., Amans, D., Chaput, F., Diouf, M., Ledoux, G., Mary, N., . . . Dujardin, C. (2014). γ -Al₂O₃ Nanoparticles Synthesised by Pulsed Laser Ablation in Liquids: A Plasma Analysis. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(19), 963–973. doi:<https://doi.org/10.1039/C3CP54363A>
- Link, S., & El-Sayed, M. A. (1999). Size and Temperature Dependence of the Plasmon Absorption of Colloidal Gold Nanoparticles. *The Journal of Physical Chemistry B*, 103(21), 4212–4217. doi:<https://doi.org/10.1021/jp984796o>
- Lipparini, F., Cappelli, C., & Barone, V. (2011). Linear response theory and electronic transition energies for a fully polarizable QM/Classical Hamiltonian. *Journal of Chemical Theory and Computation*, 7(12), 4071–4083. doi:10.1021/ct2005193
- Liu, X., Kang, J., Liu, B., & Yang, J. (2018). Separation of Gold Nanowires and Nanoparticles through a Facile Process of Centrifugation. *Materials Letters*, 212, 191–194. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.10.068>
- Lloyd, G. E. (1987). Atomic Number and Crystallographic Contrast Images with the SEM: A Review of Backscattered Electron Techniques. *Mineralogical Magazine*, 51(359), 3–19. doi:<https://doi.org/10.1180/minmag.1987.051.359.02>
- Machado, N. G., Raele, M. P., Jimenez-Villar, E., & de Rossi, W. (2025). Green synthesis of silica-coated gold nanoparticles employing femtosecond laser, solid targets, and water. *Discover Nano*, 20(1), 17. doi:<https://doi.org/10.1186/s11671-024-04141-2>

- Mäntele, W., & Deniz, E. (2017). UV–VIS Absorption Spectroscopy: Lambert-Beer Reloaded. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 173, 965–968. doi:<https://doi.org/10.1016/j.saa.2016.09.037>
- Martínez-Chávez, L. A., Rivera-Muñoz, E. M., Velázquez-Castillo, R. R., Escobar-Alarcón, L., & Esquivel, K. (2021). Au-Ag/TiO₂ Thin Films Preparation by Laser Ablation and Sputtering Plasmas for Its Potential Use as Photoanodes in Electrochemical Advanced Oxidation Processes (EAOP). *Catalysts*, 11(11), 1406. doi:<https://doi.org/10.3390/catal11111406>
- Maximova, K., Aristov, A., Sentis, M., & Kabashin, A. V. (2015). Size-controllable synthesis of bare gold nanoparticles by femtosecond laser fragmentation in water. *Nanotechnology*, 26(6), 065601. doi:<https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/6/065601>
- Mendivil, M. I., Krishnan, B., Castillo, G. A., & Shaji, S. (2015). Synthesis and Properties of Palladium Nanoparticles by Pulsed Laser Ablation in Liquid. *Applied Surface Science*, 348, 45-53. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.075>
- Meza-Arroyo, J., Valdés-Hernández, J., Domínguez-Juárez, J. L., & Quintero-Torres, R. (2024). DLS Homemade Setup: Reviewing First and Second-Order Coherence and Autocorrelation Concepts of a Light Source in the Context of Nanoparticle Sizes Synthesized by PLAL. *Physica Scripta*, 99(8), 085311. doi:<https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad664e>
- Miller, J. B., Harris, J. M., & Hobbie, E. K. (2014). Purifying Colloidal Nanoparticles through Ultracentrifugation with Implications for Interfaces and Materials. *Langmuir*, 30(27), 7936–7946. doi:<https://doi.org/10.1021/la404675v>
- Mohanraj, V. J., & Chen, Y. (2006). Nanoparticles – A Review. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 5(1), 561-573. doi:<https://doi.org/10.4314/tjpr.v5i1.14634>
- Mohazzab, B. F., Jaleh, B., Nasrollahzadeh, M., Issaabadi, Z., & Varma, R. S. (2019). Laser ablation-assisted synthesis of GO/TiO₂/Au nanocomposite: Applications in K₃[Fe(CN)₆] and Nigrosin reduction. *Molecular Catalysis*, 473, 110401. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mcat.2019.110401>
- Mohazzab, B. F., Jaleh, B., Nasrollahzadeh, M., Khazalpour, S., Sajjadi, M., & Varma, R. S. (2020). Upgraded Valorization of Biowaste: Laser-Assisted Synthesis of Pd/Calcium Lignosulfonate Nanocomposite for Hydrogen Storage and

Environmental Remediation. *ACS Omega*, 5(11), 5888–5899.
doi:<https://doi.org/10.1021/acsomega.9b04149>

nanoComposix. (2000). *Mie Theory Calculator*. Recuperado el 29 de Junio de 2026, de nanoComposix: <https://nanocomposix.com/pages/mie-theory-calculator>

Oldenburg, S. J. (2000). *Light Scattering from Gold Nanoshells*. Houston: Rice University.

Park, J. S., Yoon, J. H., Kim, H. J., Huh, Y.-D., & Yoon, S. (2010). Laser-Induced Formation and Disintegration of Gold Nanopeanuts and Nanowires. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 31(4), 819–824.

Phan, H. T., & Haes, A. J. (2019). What Does Nanoparticle Stability Mean? *Analytical Chemistry*, 91(19), 12138–12144.
doi:<https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b01867>

Samir, A., Abd El-salam, H. M., Harun, S. W., & Mohamed, T. (2021). The Effects of Different Parameters and Interaction Angles of a 532 nm Pulsed Nd:YAG Laser on the Properties of Laser-Ablated Silver Nanoparticles. *Optics Communications*, 501, 127366. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.127366>

Scalmani, G., & Frisch, M. J. (2010). Continuous Surface Charge Polarizable Continuum Models of Solvation. I. General Formalism. *Journal of Chemical Physics*, 132, 114110. doi:10.1063/1.3359469

Seifikar, F., Azizian, S., Eslamipناه, M., & Jaleh, B. (2022). One Step Synthesis of Stable Nanofluids of Cu, Ag, Au, Ni, Pd, and Pt in PEG Using Laser Ablation in Liquids Method and Study of Their Capability in Solar-Thermal Conversion. *Solar Energy*, 246, 74-88. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.09.040>

Suresh, A. K., Pelletier, D. A., Moon, J.-W., Phelps, T. J., & Doktycz, M. J. (2015). Size-Separation of Silver Nanoparticles Using Sucrose Gradient Centrifugation. *Journal of Chromatography & Separation Techniques*, 6(5), 283.
doi:<https://doi.org/10.4172/2157-7064.1000283>

Teplicky, T., Chorvat, D., Michalka, M., & Chorvatova, A. M. (2018). Preparation of Metal Nanoparticles by Femtosecond Laser Ablation. *Nova Biotechnologica et Chimica*, 17(1), 38–47. doi:<https://doi.org/10.2478/nbec-2018-0004>

Tomasi, J., Mennucci, B., & Cammi, R. (2005). Quantum Mechanical Continuum Solvation Models. *Chemical Reviews*, 105(8), 2999–3094. doi:10.1021/cr9904009

- Tsuji, T., Watanabe, N., & Tsuji, M. (2003). Laser Induced Morphology Change of Silver Colloids: Formation of Nano-Size Wires. *Applied Surface Science*, 211(1-4), 189–193. doi:[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00225-3](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00225-3)
- Valdés-Hernández, J., Domínguez-Juárez, J. L., Nava-Mendoza, R., Cortés-Romero, C. M., Quintero-Torres, R., & Cuán-Hernández, Á. (2024). Photocatalytic Enhancement for CO₂ Reduction Using Au Nanoparticles Supported on Fe-Doped SrTiO₃– δ Perovskite. *Solar RRL*, 8(9), 2300968. doi:<https://doi.org/10.1002/solr.202300968>
- Villalobos-Hernández, J. R., & Müller-Goymann, C. C. (2006). Physical Stability, Centrifugation Tests, and Entrapment Efficiency Studies of Carnauba Wax–Decyl Oleate Nanoparticles Used for the Dispersion of Inorganic Sunscreens in Aqueous Media. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 63(2), 115–127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2006.01.005>
- Walther, P., & Müller, M. (1985). Detection of Small (5–15 nm) Gold-Labelled Surface Antigens Using Backscattered Electrons. *Scanning Electron Microscopy*, 4(1), 195–201.
- Welch, C. M., & Compton, R. G. (2006). The Use of Nanoparticles in Electroanalysis: A Review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 384(3), 601-619. doi:<https://doi.org/10.1007/s00216-005-0230-3>
- Werner, D., Hashimoto, S., & Uwada, T. (2010). Remarkable Photothermal Effect of Interband Excitation on Nanosecond Laser-Induced Reshaping and Size Reduction of Pseudospherical Gold Nanoparticles in Aqueous Solution. *Langmuir*, 26(12), 9956–9963. doi:<https://doi.org/10.1021/la100015t>
- Xiong, B., Cheng, J., Qiao, Y., Zhou, R., He, Y., & Yeung, E. S. (2011). Separation of Nanorods by Density Gradient Centrifugation. *Nano Research*, 4(10), 1036–1044. doi:<https://doi.org/10.1007/s12274-011-0159-6>
- Zeng, H., Du, X.-W., Singh, S. C., Kulinich, S. A., Yang, S., He, J., & Cai, W. (2012). Nanomaterials via Laser Ablation/Irradiation in Liquid: A Review. *Advanced Functional Materials*, 22(7), 1333–1353. doi:<https://doi.org/10.1002/adfm.201102295>
- Zhang, D., & Wada, H. (2021). Laser Ablation in Liquids for Nanomaterial Synthesis and Applications. En D. Zhang, H. Wada, & K. Sugioka (Ed.), *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering* (págs. 1481–1515). Springer International Publishing.

Zhang, D., Gökce, B., & Barcikowski, S. (2017). Laser Synthesis and Processing of Colloids: Fundamentals and Applications. *Chemical Reviews*, 117(5), 3990-4103. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00468>