

Estudio fotoacústico de nanopartículas de oro por ablación láser

Photoacoustic study of gold nanoparticles by laser ablation

Jesús Manuel Rivera-Esteban¹, Agustin Benigno Olivas-Alvarez²

Fecha de recepción: 20 de febrero de 2020

Fecha de aprobación: 10 de mayo de 2020

Rivera-Esteban, J.M; Olivas-Alvarez, A.B. Estudio fotoacústico de nanopartículas de oro por ablación láser. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34-2. Abril-Junio 2021. Pág 96-108.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i2.5010>

1 Doctor en Física. Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja, Daniel Hernandez Morillo. Perú. Correo electrónico: jesusriveraes20@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1790-6955>

2 Máster en Dirección de la Calidad Total en la Universidad Politécnica de Madrid-España. Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernandez Morillo. Perú.

 <https://orcid.org/0000-0001-5688-7112>



Palabras clave

Fotoacústica; nanopartículas de oro; ablación con láser.

Resumen

En la presente tesis se investigó el cambio de morfología y tamaño de las nanopartículas de oro obtenidos por ablación láser, con diferentes métodos de reconfiguración. En el caso del oro, el blanco fue ablacionado con un láser pulsado de Nd: YAG, (1064 nm, 37.48 mJ/p, 10 Hz, durante 10 minutos), los espectros de absorción presentan un solo máximo de absorción a 521 nm característica de las nanopartículas esféricas de oro. Se aplicó la técnica PLI a los coloides con pulsos láser de 532 nm de longitud de onda, 25.8 mJ de energía durante 6 minutos. El análisis por dispersión dinámica de la luz (DLS) mostró que las NpsAu con PLI fueron de 21 nm de diámetro, además, se comprobó que la amplitud de la señal fotoacústica está relacionada directa y proporcionalmente con la concentración de NpsAu en el coloide evidenciando que a mayor concentración la respuesta fotoacústica es mayor. De la investigación se concluyó que la técnica PLI focalizada aplicada a los coloides con NpsAg presenta nuevas morfologías. En el caso del oro se encontró un cambio de tamaño.

Keywords

Photoacoustics; gold nanoparticles; laser ablation.

Abstract

In the present thesis, the change in morphology and size of gold nanoparticles obtained by laser ablation was investigated using different reconfiguration methods. In the case of gold, the target was ablated with a pulsed Nd: YAG laser, (1064 nm, 37.48 mJ/p, 10 Hz, during 10 minutes), the absorption spectra present a single absorption maximum at 521 nm characteristic of spherical gold nanoparticles. The PLI technique was applied to the colloids with laser pulses of 532 nm wavelength, 25.8 mJ of energy during 6 minutes. The analysis by dynamic dispersion of light (DLS) showed that the NpsAu with PLI were 21 nm in diameter. In addition, it was found that the amplitude of the photoacoustic signal is directly and proportionally related to the concentration of NpsAu on the colloid, showing that the higher the concentration, the greater the photoacoustic response. From the research it was concluded that the focused PLI technique applied to colloids with NpsAg presents new morphologies. In the case of gold, a change in size was found.

Introducción

La nanociencia es el estudio de los fenómenos y la manipulación de materiales a escala nanométrica y la nanotecnología se define como el diseño, caracterización y aplicación de estructuras, dispositivos y sistemas complejos mediante el control de la forma, el tamaño y las propiedades de la materia a escala nanométrica [1]. Así estas dos disciplinas emergentes tienen un elevado carácter multidisciplinar con especial relevancia científica y social.

Esta disciplina abre las puertas a la comprensión de nuevos fenómenos y al descubrimiento de nuevas propiedades y que pueden ser utilizables a escala macroscópica y microscópica: El objetivo es el control del comportamiento y la estructura de la materia a nivel atómico y molecular. En la literatura se muestran varias definiciones respecto a un nanomaterial o nanopartícula, así, por ejemplo, la National Nanotechnology Initiative: NNI, por sus siglas en inglés, propuso la siguiente definición: material con dimensiones de 1-100 nm (1 nm = 10⁻⁹ m), donde fenómenos únicos permiten nuevas aplicaciones y que fue reportado por Kaiser et al. [2].

Actualmente, la técnica de ablación láser pulsada en líquidos (PLAL) es ampliamente utilizada para la generación de nanopartículas (Nps), debido a que no genera residuos tóxicos y además las superficies de las Nps se encuentran ligadas, lo cual permite la posterior funcionalización con moléculas de interés particular para el investigador. La técnica PLAL, está ganando un creciente interés gracias a una serie de ventajas prometedoras, que incluyen: la sostenibilidad ambiental, de fácil montaje experimental, que se producen completamente libre de contaminantes no deseados o reactivos de síntesis peligrosas y fueron estudiadas por Amendola y Meneghetti [3], Nikov et al. [4] y Dell'Aglio et al. [5], que consiste básicamente en hacer incidir un láser de alta potencia de manera pulsada sobre una superficie de un blanco sólido, sumergido en un medio líquido.

En ese sentido, para llevar a cabo los estudios de los efectos de los parámetros del láser en la síntesis de los coloides y la características de las Nps obtenidas, tales como: tamaño, distribución de tamaño, concentración y la morfología, se utilizaron varias técnicas: fotoacústica pulsada, espectroscopia ultravioleta visible (UV-Vis), Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS; Atomic Absorption Spectrometer), Dispersión Dinámica de la Luz, (DLS; Dynamic Light Scattering), y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM; Scanning electron microscopy y STEM (Scanning Transmission Electron Microscopy).

Es por ello que, la novedad del estudio fue el uso de la fotoacústica pulsada para caracterizar coloides con NpsAu; encontrar cambios en las NpsAg, debido al mecanismo de la posterior irradiación láser y la obtención de nuevas morfologías en las NpsAg. Así como el uso de la NpsAg semilla, para inducir la reconfiguración de las NpsAg esféricas a otras morfologías. Y el objetivo general fue estudiar el efecto fotoacústico de nanopartículas de oro y síntesis de nanopartículas de plata producidas por la técnica Ablación láser pulsada en agua.

Material y métodos

El estudio presenta los aspectos fundamentales referidos al estudio de los coloides con NpsAu y NpsAg, producidos por la técnica PLAL con pulsos láser de 1064 nm, teniendo como objeto de estudio el efecto de la posterior irradiación con pulsos láser de longitud de onda de 532 nm en los coloides con NpsAu.

Para realizar la síntesis y posterior irradiación de la solución coloidal con radiación láser pulsada y focalizada se requirió determinar los parámetros experimentales que permiten modificar el tamaño y/o la forma de las Nps; con el fin de obtener, por un lado, sistemas de Nps con una dispersión reducida de tamaño y por otro lado evaluar las posibles nuevas geometrías. Se estudió la influencia de la concentración de los coloides (masa de oro por unidad de volumen) en el mecanismo de la irradiación de los mismos. Cambios en la PA de los coloides con NpsAu, sugieren cambios en el tamaño y forma de las Nps. Se utilizaron los equipos y materiales del Laboratorio de Óptica y Láseres de la Universidad Nacional de Trujillo.

Por otra parte, se describe los trabajos realizados en el Laboratorio de Óptica y Láseres (LOYL) del Departamento Académico de Física de la Universidad Nacional de Trujillo, y que, corresponde a la producción, posterior irradiación y caracterización de los coloides con NpsAu. En esta parte se ha utilizado, espectroscopia óptica UV-Vis, PA, AAS y DLS. Se sintetizaron coloides con NpsAu por el método PLAL. El blanco fue ablacionado con radiación infrarroja de longitud de onda 1064 nm proveniente de un láser Nd: YAG, con 12 mJ de energía a 10 Hz, durante 10 minutos. Al considerar la solución principal, se prepararon cinco muestras en dilución para variar la concentración la cual fue medida por Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS).

En ese sentido, para direccionar el haz láser sobre la placa se utilizó un espejo y para focalizar el haz se usó una lente, tal como se muestra en la figura 1. Además, se empleó una plataforma giratoria sobre la cual se adhirió el vaso conteniendo a la lámina de oro y agua ultrapura, esta cumple dos funciones: evitar la ablación de la placa en una única zona y agitar la solución coloidal.



Figura 1. Esquema experimental completo para producir coloides con NpsAu, por la técnica PLAL.

Se fijaron como parámetros la energía del láser; longitud de onda de 1064 nm, energía de 37.48 mJ/p y a una frecuencia de repetición de 10 Hz. Bajo estas condiciones se prepararon dos muestras con 20 ml cada una haciendo una solución única de 40 ml coloides con NpsAu. Luego se formaron cinco muestras por disolución, se aplicó el método PLI utilizando el mismo láser, pero con longitud de onda de 532 nm, con energía de 25.8 mJ/p, durante 6 minutos, esto consistió básicamente en retirar el blanco de oro y aplicar PLI directamente al coloide. De las cinco muestras en disolución con concentraciones diferentes se dividieron cada una en dos muestras la primera para ser caracterizada por espectroscopia UV-Vis y la segunda muestra por espectroscopia PA.

Detección de las señales PA de los coloides con NpsAu

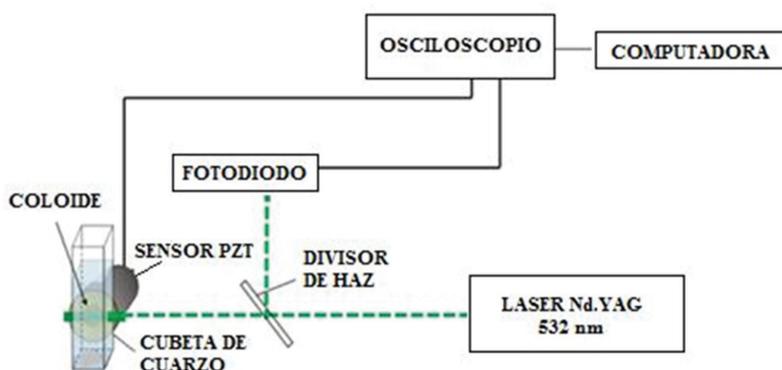


Figura 2. Montaje experimental para la detección de las señales fotoacústicas de los coloides de NpsAu.

Para las señales fotoacústicas de los coloides con NpsAu, se utilizó el segundo armónico de un láser Nd:YAG (532 nm) a una frecuencia de repetición de 10 Hz, (figura 2). Los coloides metálicos como el oro, la plata absorben la energía en la región visible del espectro electromagnético. Las señales fotoacústicas fueron producidas debido a la interacción de los coloides con la radiación de 532 nm. Las señales fotoacústicas se detectaron mediante un sensor PZT de 254 KHz adherido a una de las caras de una cubeta de cuarzo de dimensiones 1 cm x 1 cm x 5 cm, con

3 ml del coloide de nanopartículas de oro. Estas señales fueron adquiridas con un osciloscopio digital (DPO 3054 de 500 MHz, 2.5GS/s) y los datos exportados a una computadora para su posterior análisis. Se utilizó un fotodiodo como mecanismo de disparo del osciloscopio para que este pueda registrar las señales detectadas por el sensor PZT.

La energía del haz láser utilizado para la irradiación de los coloides de nanopartículas de oro fue de 0.5 mJ/p que está por debajo del umbral de ablación del coloide (régimen termoelástico) donde no se deforman las fuentes de donde proviene la señal PA y que proporcionara información acerca de las Nps sin modificarlas [6].

Las concentraciones de oro presentes en los coloides con NpsAu, fueron caracterizados al utilizar el equipo Perkin Elmer, Atomic Absorption Spectrometer PinAAcle900F, del Laboratorio de Química Instrumental de la Universidad Nacional de Trujillo.

Caracterización por Espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV-Vis)

Es una técnica espectroscópica basada en las transiciones electrónicas en la región UV (380 -780 nm) del espectro electromagnético. En el caso de las NpsAu los espectros de UV-Vis nos sirven para monitorear el desplazamiento del SPR, que está asociado al tamaño y forma de las NpsAu y proveen información de la unión de las moléculas a la superficie de las NpsAu, además de evaluar la estabilidad de las suspensiones coloidales.

La técnica UV-Vis nos permite evidenciar el plasmón superficial de las NpsAu, el cual refleja la oscilación colectiva de los electrones de conducción de las nanopartículas, debido a las interacciones de los mismos con la luz incidente. La interacción ocasiona una polarización temporal y por ello la formación de un dipolo oscilante. El dipolo oscila a la frecuencia de la luz incidente. Existe una frecuencia de resonancia para la cual la interacción entre la nanopartícula y la luz origina un máximo de absorción. Este máximo depende de la forma y tamaño de la nanopartícula y el medio circundante [7].

Como consecuencia de la fuerte interacción entre los electrones y la luz incidente, se produce una oscilación coherente de los electrones confinados en la superficie de las nanopartículas metálicas, en la interfaz metal-dieléctrico; la excitación electromagnética se llama polaritón del plasmón de superficie; el polaritón es una cuasi-partícula híbrida resultante del fuerte acoplamiento entre la luz y los electrones libres de una nanopartícula. Para determinadas frecuencias de la energía incidente, se produce un acoplamiento entre las frecuencias de la onda incidente y de la oscilación del polaritón, este fenómeno es la SPR [8].

Caracterización por Dispersión Dinámica de la luz (DLS)

La espectroscopia de correlación de fotones según Guerrero et al. [9] también se denomina dispersión dinámica de luz (DLS) y se utiliza para medir el tamaño de una partícula en el rango micrométrico utilizando el movimiento browniano en medios acuosos. Las partículas pequeñas se difunden más rápidamente y conducen a una mayor fluctuación de la intensidad de la luz dispersada en comparación para partículas más grandes. Los resultados se pueden dar en modo: Intensity Weighting, Volume Weighting, o Number Weighting, es ir ponderando la intensidad de las nanopartículas, ponderando el volumen de las nanopartículas o ponderando el número de las nanopartículas, respectivamente, (nosotros damos los resultados ponderando el número de las nanopartículas).

Resultados y discusiones

De una solución de 40 ml de un coloide con NpsAu producidas por la técnica PLAL se obtuvieron cinco muestras por disolución. Estas muestras fueron caracterizadas por las técnicas UV-Vis y fotoacústica pulsada, los nuevos coloides obtenidos por disolución fueron modificados por la técnica PLI (con el propósito de obtener cambios en su tamaño promedio), para lo cual se utilizó el láser pulsado Nd: YAG (532 nm, durante 6 minutos, energía de 25.8 mJ/p) y una lente convergente para focalizar el haz del láser. Los tamaños de la NpsAu fueron determinados al utilizar la técnica de dispersión dinámica de luz. En los siguientes enunciados se detallan los resultados experimentales y las discusiones correspondientes a las NpsAu y los análisis de los mismos.

Síntesis de coloides con NpsAu, por el método de PLAL

Se obtuvo espectros de absorción de cada muestra, observándose un único máximo de absorción en el intervalo visible del espectro electromagnético (520 – 522 nm), lo cual es característico de NpsAu esféricas. Al comparar los diferentes espectros no se evidenció corrimientos significativos en la posición del máximo relacionado con el plasmón de superficie. La concentración de NpsAu en los coloides se obtuvo al utilizar la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS: Atomic Absorption Spectrometer). Las concentraciones de oro fueron: 0.170 mg/l, 0.346 mg/l, 0.512 mg/l, 0.683 mg/l y 0.854 mg/l.

Efecto de la irradiación (PLI) en las características de las NpsAu

Análisis de los espectros UV-Vis

Considerando la posición del máximo, el ancho de banda, la intensidad de las transiciones interbanda y el área de la curva, se puede realizar una estimación sobre el tamaño de las nanopartículas. Este análisis resulta especialmente interesante para estudiar los cambios producidos por los tratamientos térmicos sobre la curva de absorción del material, ya que la tendencia a variar los citados parámetros es más fácilmente identificable [10].

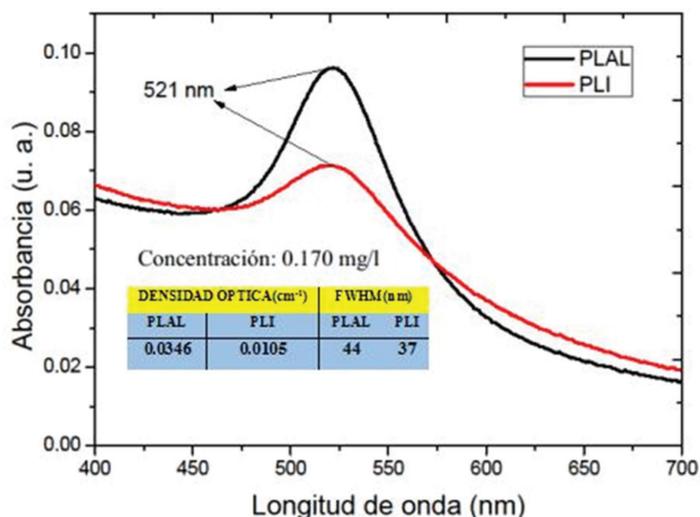


Figura 3. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.17 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico (FWHM) relacionado con el plasmón de superficie.

En la figura 3, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con una concentración de 0.170 mg/l. Se puede observar un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético, relacionado con la resonancia del plasmón de superficie (SPR, Surface Plasmon Resonance); este resultado sugiere que las NpsAu presentes en los coloides presentan forma esférica y tienen tamaño de algunas decenas de nanómetros. La comparación de los espectros de absorción permite inferir que un efecto de la irradiación es modificar la altura del máximo de absorción relacionado con el plasmón de superficie, lo cual sugiere cambios en características de las NpsAu. El máximo de absorción relacionado con el plasmón es proporcional a la concentración de las nanopartículas de oro con tamaños en el intervalo de 5-50 nm [11]. Con respecto al ancho de banda, los coloides irradiados presentan menor ancho de banda (37 nm) por lo que se predice mayor homogeneidad, tal como lo describen Kaiser et al. [2]. El máximo de absorción se presenta a 521 nm para los dos coloides.

Además del tamaño de las nanopartículas, existen otra serie de parámetros que tienen influencia en las propiedades de absorción del material; como son el índice de refracción de la matriz, el tipo de distribución, la geometría de las partículas y la homogeneidad en su distribución. El espectro de absorción del material es el resultado final de diversos parámetros por lo que no es conveniente determinar el tamaño de las nanopartículas al considerar sólo los espectros de absorción. Lo que se puede concluir para el coloide con concentración de 0.170 mg/l, es que el efecto de la irradiación láser fue modificar las propiedades ópticas de los coloides sintetizados por la técnica PLAL. Se evidenció una disminución significativa tanto de la altura y del ancho a media altura del pico de absorbancia relacionado con el plasmón de superficie.

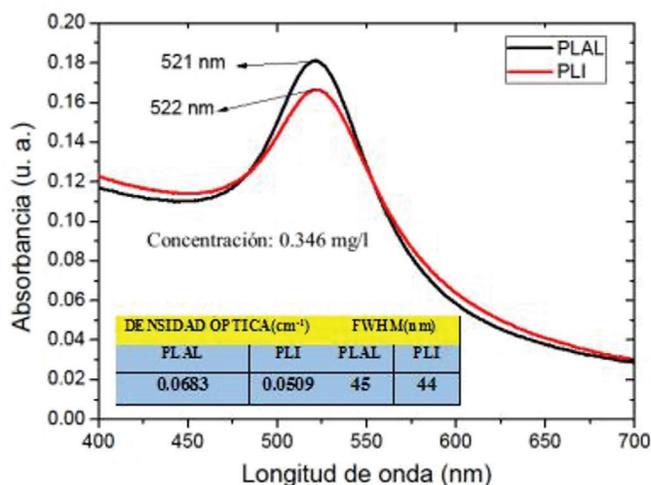


Figura 4. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.346 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico (FWHM) relacionado con el plasmón de superficie.

En la figura 4, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con concentración de 0.346 mg/l. Se observa un único máximo de absorción. Podemos mencionar que existe el efecto de PLI en la altura, ancho a media altura y posición del pico relacionado con el plasmón de superficie. Esto es consistente con los resultados de la dispersión de luz dinámica, que reporta el efecto de la irradiación en la distribución de los coloides.

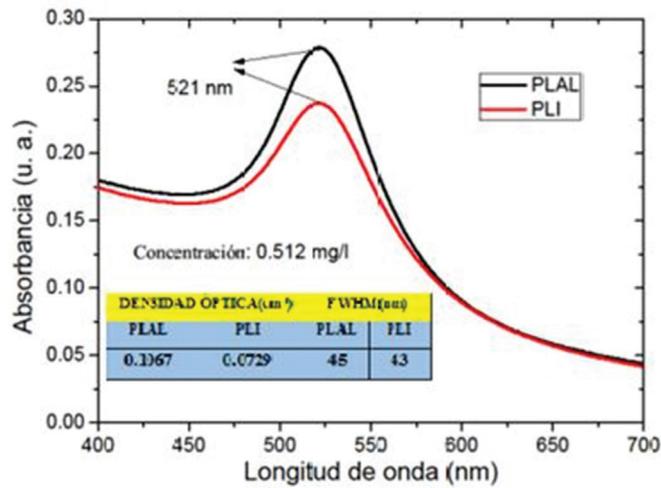


Figura 5. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.512 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico relacionado con el plasmón de superficie (FWHM).

En la figura 5, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con concentración de 0.512 mg/l. Se observa un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético. Al comparar los espectros podemos observar que la variación en el ancho de la banda relacionada con el plasmón es de 2 nm. Respecto a la intensidad del espectro de absorción se observa que los coloides irradiados (PLI) presentan menor intensidad.

Nuevamente se observa el efecto de la irradiación láser en el coloide con concentración de 0.512 mg/l, que es modificar las propiedades ópticas de los coloides sintetizados por la técnica PLAL. Como en el caso anterior, se evidenció una disminución significativa tanto de la altura y del ancho a media altura del pico de absorción relacionado con el plasmón de superficie.

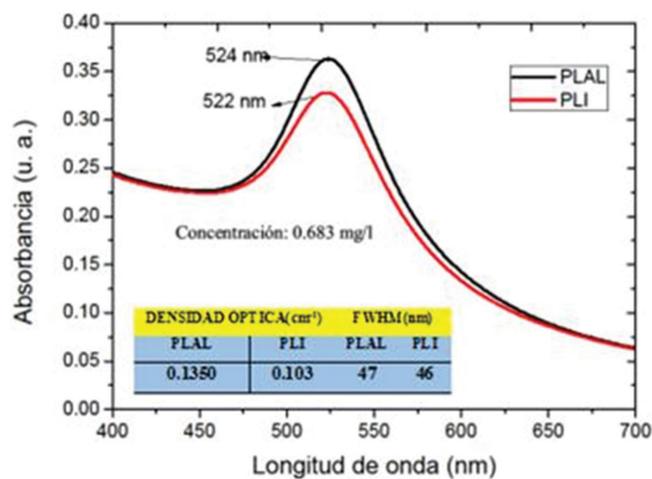


Figura 6. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.683 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico relacionado con el plasmón de superficie (FWHM).

En la figura 6, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con concentración de 0.683 mg/l. Se observa un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético, relacionado con la PSR. Al comparar los espectros podemos observar las variaciones en el ancho de banda de 1 nm.

Por lo que se puede concluir, para el coloide con concentración de 0.683 mg/l es que el efecto de la irradiación láser fue modificar las propiedades ópticas de los coloides sintetizados por la técnica PLAL. Se evidenció una disminución de la altura y del ancho a media altura del pico de absorbancia relacionado con el plasmón de superficie.

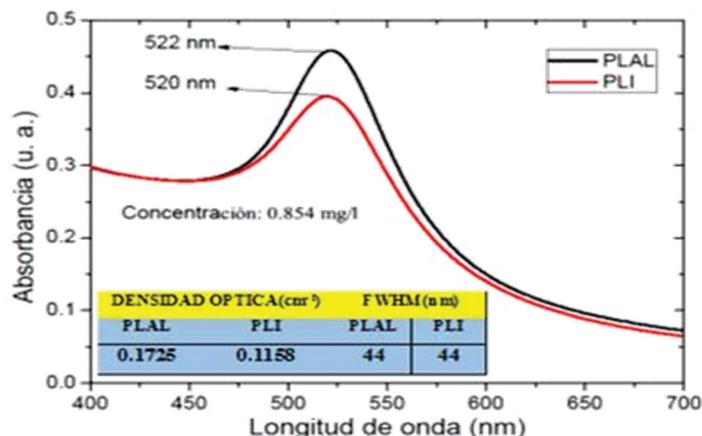


Figura 7. Efecto de la irradiación láser. Un coloide (concentración de 0.854 mg/l) sintetizado por PLAL, con radiación 1064 nm (-), es modificado por PLI (-), con longitud de 532 nm. Se indica la densidad óptica y el ancho de banda a media altura del pico relacionado con el plasmón de superficie (FWHM).

En la figura 7, se muestran los espectros de absorción de los coloides con NpsAu para una concentración de 0.854 mg/l. Se observa un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético, relacionado con la PSR. Al comparar los espectros no se observa las variaciones en el ancho de banda, esto es consistente con la homogeneidad de las NpsAu en el coloide.

De las figuras anteriores, se puede inferir que los espectros de absorción de los coloides con NpsAu para diferentes concentraciones, presentan un único máximo de absorción en la región visible del espectro electromagnético, relacionado con la resonancia del plasmón de superficie (PSR); este resultado sugiere que las NpsAu presentes en los coloides presentan en promedio forma esférica y tienen tamaño de algunas decenas de nanómetros, la forma del espectro permite inferir que la forma y tamaño de las nanopartículas en promedio permanecen con cambio poco apreciables [12].

Al comparar los espectros de absorción de los coloides con NpsAu con diferentes concentraciones, se puede observar que cada muestra irradiada presenta una disminución en la intensidad de su máximo de absorción en comparación con su similar en valor de concentración. Este último sugiere cambios en las distribuciones de tamaño. Pyatenko et al. [13], describen que, después de la irradiación de los coloides con NpsAu, puede ocurrir un cambio de forma y reducción de tamaño de las NpsAu. Uno de los mecanismos que pueden ocurrir como consecuencia de la irradiación de las soluciones coloidales es la fusión y vaporización de las NpsAu, las cuales se deben a las altas temperaturas en el interior de las nanopartículas. La alta temperatura es causada por la gran absorción de la energía del láser y la baja transferencia de calor al agua circundante.

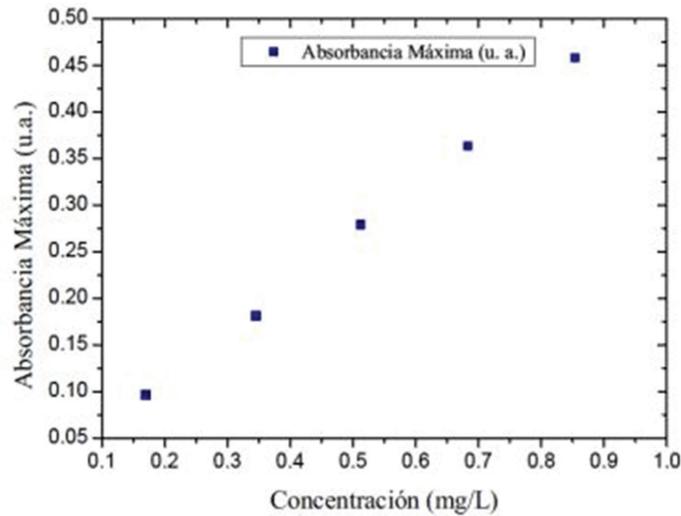


Figura 8. Absorbancia máxima de los coloides con NpsAu con irradiación (PLI), en función de su concentración, la tendencia es lineal, con un coeficiente de Pearson de 0.9964.

En la figura 8, se presenta la relación de la absorbancia máxima en función de la concentración, obteniéndose una relación lineal, lo cual nos indica que a mayor concentración de NpsAu en el coloide se obtiene mayor absorbancia.

Respuesta de la señal fotoacústica de las NpsAu

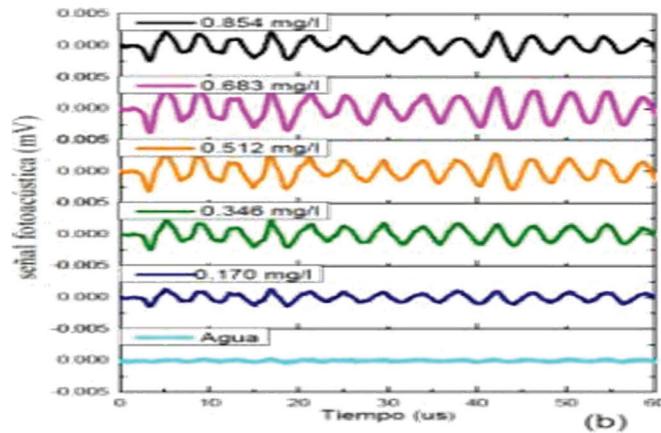


Figura 9. Espectros comparativos de la respuesta fotoacústica de los coloides con NpsAu en función del tiempo para cinco muestras con concentraciones diferentes: (b) muestras con PLI: ($\lambda = 532$ nm, 25,8 mJ/p).

La evolución temporal de las señales PA, que se muestran en la figura 9, fueron detectadas por el sensor PZT de respuesta rápida de 254 KHz. Corresponden a la respuesta fotoacústica de los coloides producidos por la técnica PLAL y las muestras coloidales que fueron modificados por la posterior irradiación láser con energía de 25.8 mJ/p. Así mismo, se puede observar que la intensidad de la amplitud fotoacústica disminuye cuando los coloides son posteriormente irradiados.

Se puede observar que, las señales aumentan en amplitud gradualmente en relación con las diferentes concentraciones. Así puede se puede decir que la técnica PA es capaz de detectar los cambios mínimos en la variación de la concentración de las NpsAu en el coloide. Para mejorar la relación señal a ruido como menciona Barreiro et al. [14], debido a ruido exterior, acústico y eléctrico, se promedia la señal, nosotros promediamos sobre 16 pulsos del láser. Por otro lado, la señal PA, se puede visualizar como una curva de voltaje vs tiempo, medida a una escala temporal de 5 ns y a una escala de milivoltios sin necesidad de amplificar.

El análisis de la señal PA generada por Nps metálicas es complejo debido a la dependencia de las propiedades físicas, tanto de la Nps y los alrededores del ambiente.

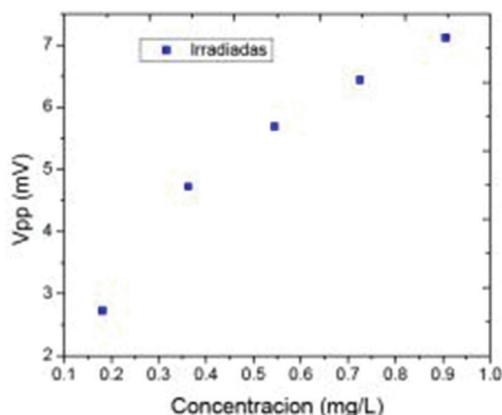


Figura 10. Voltaje pico-pico de la señal PA en función de la concentración de muestras con PLI.

En la figura 10, muestra voltaje pico-pico de la señal fotoacústica en función de la concentración, cuya relación es ascendente conforme se aumenta la concentración. Por lo tanto, se comprueba que a mayor concentración de NpsAu la señal PA se incrementa.

Uno de los objetivos de la presente tesis consistió en obtener la respuesta PA de los coloides con NpsAu; obtenidos por la técnica PLAL. Como se indicó nosotros obtuvimos las NpsAu en agua ultrapura, la máxima absorbancia vista a la longitud de onda obtenida fue alrededor de 521 nm y está relacionada con la PSR. Amendola y Meneghetti [3] reportan un máximo de plasmón para el oro a 520 nm, utilizando agua, nosotros obtuvimos el pico máximo de absorción alrededor de 521 nm, que es concordante con nuestro resultado y existe una relación directa y proporcional de la cantidad de NpsAu con el incremento del primer pico de la señal PA. Elsayed et al. [15] observó un cambio significativo en la distribución del tamaño de las NpsAu durante la variación de las condiciones de focalización que se centran en la interfaz agua-oro.

Caracterización por DLS

Este método tiene varias ventajas, no se requiere preparar la muestra, solo se requiere poca cantidad de coloide (ml), la duración de la prueba es corta de manera que las mediciones de rutina no son extensas.

A continuación, reportamos los resultados obtenidos por la técnica DLS:

- Resultado por espectroscopia de la luz dinámica LDS de los coloides (PLAL). Las NpsAu, presentan un diámetro promedio de 22 .6 nm.

- Resultado por espectroscopia de la luz dinámica LDS, de los coloides irradiados (PLI). Los NpsAu, presentan un diámetro promedio de 21.0 nm.

Conclusiones

Presentamos las conclusiones de nuestro trabajo, las cuales están dirigidas a las condiciones experimentales específicas que fueron utilizadas para la producción, posterior irradiación y caracterización de los coloides con nanopartículas de oro y plata producidas utilizando la técnica de ablación láser pulsada en agua, su caracterización por fotoacústica pulsada, espectroscopia UV-Visible y microscopia electrónica, lo que se concluye en lo siguiente: Para el caso de los coloides con nanopartículas de oro analizados según espectroscopia UV-Vis, se concluye que la absorbancia máxima es proporcional a la concentración de nanopartículas de oro en estado coloidal y según el análisis fotoacústico, se concluye que la amplitud de la señal fotoacústica correspondiente a los coloides con nanopartículas de oro está relacionada con la concentración evidenciando que a mayor concentración la amplitud fotoacústica es mayor.

En ese sentido, la técnica fotoacústica pulsada, es una técnica novedosa y relativamente nueva que permitiría caracterizar los coloides con nanopartículas de oro, capaz de detectar el cambio en la concentración de las nanopartículas de oro en estado coloidal. Sin embargo, existe poca información en la literatura acerca de la caracterización de coloides metálicos por fotoacústica, además el hecho de que el fundamento de la fotoacústica sea el estudio de los parámetros termoelásticos le confiere un carácter complementario con otras técnicas frecuentemente usadas para tal fin. La técnica de ablación láser pulsada en líquidos fue útil para obtener nanopartículas de oro en estado coloidal, esta técnica con los parámetros del láser controlados fue muy eficiente para producir nanopartículas de oro, obteniéndose nanopartículas limpias de subproductos químicos y en un tiempo de aproximadamente 10 minutos.

Referencias

- [1] G. Uribe y J. Rodríguez. "La nanociencia y la nanotecnología: Una revolución en curso, Perfiles latinoamericanos", *revista de la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales*. Sede México, pp.161-186, 2007.
- [2] D. Kaiser et al. *National Nanotechnology Initiative Strategic Plan*. Printed in the United States of America, oct 2016.
- [3] V. Amendola y M. Meneghetti. "What controls the composition and the structure of nanomaterials generated by laser ablation in liquid solution?", *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 15 n° 9, pp. 3027-3046, 2013.
- [4] R. Nikov et al. "Processing condition influence on the characteristics of gold nanoparticles produced by pulsed laser ablation in liquids", *Applied Surface Science*, vol. 27, n° 4, pp. 105-109, 2013.
- [5] M. Dell'Aglio. (2015). "Mechanisms and processes of pulsed laser ablation in liquids during nanoparticle production", *Applied Surface Science*. vol. 35, n° 2, pp. 55-59, 2015.
- [6] J. Alba. "Estudio de la Ablación Láser mediante la Fotoacústica Pulsada: Síntesis de Nanopartículas". Tesis de Maestría, Universidad de Guanajuato, México, 2013.
- [7] G. López. *Nanoestructuras metálicas; síntesis, caracterización y aplicaciones*. Editorial Reverte, Universidad Autónoma del Estado de México, 2013.
- [8] Y. Wang, E. Plummer y K. Kempa. "Foundations of plasmonics". *Advances in Physics*, vol. 60, n° 5, pp. 799-898, 2011.
- [9] A. Guerrero, R. Álvarez y L. Liz. "Nanoplasmónica basada en Química Coloidal", in *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, vol. 107, n° 3, pp. 221-228, 2011.
- [10] T. Fernández. *Caracterización de nanopartículas magnéticas y de oro para posibles aplicaciones biomédicas en diagnóstico y terapia*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
- [11] K. Hishan, A. Mohamed y R. Rania. "Effect of Experimental Parameters on the Fabrication of Gold Nanoparticles via Laser Ablation". *Optics and Photonics Journal*, Giza Egypt, pp. 273-84, 2012.

- [12] M. Takeshi et al. "Preparation and Shape-Modification of Silver Colloids by laser Ablation in Liquids: A Brief Review". *Science of Advanced Materials*, vol 4, pp. 391-400, 2012.
- [13] A. Pyatenko et al. "Mechanism of pulse laser interaction with colloidal nanoparticles". *Laser & Photonics Reviews*, 7(4), 596-604, 2013.
- [14] N. Barreiro et al. "Caracterización de la Espectroscopia Fotoacústica Pulsada del NO₂ en aire", in *Anales Afa*, vol. 20, 2008.
- [15] K. Elsayed et al. "Effect of focusing conditions and laser parameters on the fabrication of gold nanoparticles via laser ablation in liquid", *Optics and Laser Technology*, vol. 45, issue 1, pp. 495 – 50, 2013