



Reproducción numérica de curvas de z-scan para nanovarillas de Oro

Laura Araceli Gámez Campos
araceli_gamez@uadec.edu.mx

Raúl Ochoa Valiente
raul.ochoa.valiente@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-7965-0740>

Beatriz Adriana Martínez Irivas
beatrizirivas@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-4857-2254>
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas,
Universidad Autónoma de Coahuila, ProL.
David Berlanga S/N, Edif. A. Unidad Camporredondo C. P. 25000
Saltillo Coahuila México

Emma Vianey García Ramírez
egarcia@conacyt.mx
<https://orcid.org/0000-0002-7630-1833>
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,
Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla,
Av. San Claudio, Cd. Universitaria,
Jardines de San Manuel, C. P. 72572,
Puebla, Pue. México.

RESUMEN

El desarrollo de la nanotecnología ha traído consigo la necesidad de caracterizar materiales de tamaño nanométrico. La caracterización de las propiedades ópticas no lineales de nanopartículas es muy importante para determinar sus posibles aplicaciones. En este trabajo se han desarrollado algoritmos numéricos para reproducir curvas experimentales obtenidas mediante la técnica de Z-scan para refracción y absorción no lineal, para cuatro sistemas de nanovarillas de oro suspendidas en agua desionizada, usando como fuente de excitación un láser Nd:YAG con duración de pulso de 26 ps y frecuencia de repetición de 10 Hz, para una longitud de onda de $\lambda = 532$ nm. Estos algoritmos fueron desarrollados como alternativa al uso de las expresiones analíticas de Z-scan que fueron desarrolladas originalmente para respuestas de tipo local. Los resultados obtenidos mostraron la necesidad de incluir, en dichas expresiones el carácter no local de la respuesta no lineal de las muestras estudiadas.

Palabras clave: *nanovarillas de oro; propiedades ópticas no lineales de tercer orden; técnica de z-scan; algoritmo numérico*

Correspondencia: beatrizirivas@uadec.edu.mx

Artículo recibido: 02 mayo 2022. Aceptado para publicación: 25 mayo 2022.

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Como citar: Gámez Campos, L. A., Ochoa Valiente, R., Martínez Irivas, B. A., & García Ramírez, E. V. (2022). Reproducción numérica de curvas de z-scan para nanovarillas de Oro. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), 3176-3192. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2455

Numerical reproduction of z-scan curves for gold nanorods in colloidal suspension

ABSTRACT

The development of nanotechnology has brought with it the need to characterize nanometric-sized materials. The characterization of the nonlinear optical properties of nanoparticles is very important to determine their possible applications. In this work, numerical algorithms have been developed to reproduce experimental curves obtained by means of the Z-scan technique for nonlinear refraction and absorption, for four systems of gold nanorods suspended in deionized water, using an Nd:YAG laser as an excitation source with pulse duration of 26 ps and repetition frequency of 10 Hz, for a wavelength of $\lambda = 532$ nm. These algorithms were developed as an alternative to using the Z-scan analytic expressions that were originally developed for local type responses. The results obtained showed the need to include, in these expressions, the non-local character of the non-linear response of the samples studied.

Key Word: *gold nanorods; no linear optical properties; z-scan technique*

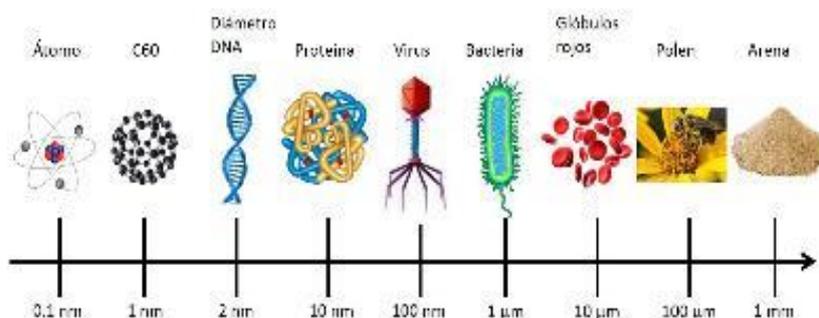
1. INTRODUCCIÓN

La nanotecnología puede resultarnos una palabra compleja y algo muy distante a nosotros, sin embargo, está presente en la vida cotidiana, ejemplo de ello son los dispositivos electrónicos fabricados, incluidos los chips informáticos. En esta rama tecnológica se puede manipular la estructura molecular de los materiales con el objetivo de cambiar las propiedades intrínsecas para que con esto se puedan obtener aplicaciones revolucionarias; esta área se ha desarrollado entre las décadas de los 60s y 80s y ha crecido con fuerza en las últimas tres décadas y junto con la óptica no lineal, rama de la física, se estudian las modificaciones en las propiedades ópticas, cuando luz de alta intensidad incide en los materiales incluidos los que se encuentran a nanoescala. El estudio de de esas propiedades es posible usando técnicas basadas en la luz. En este trabajo se desarrollaron algoritmos para reproducir curvas experimentales obtenidas con la técnica de Z-scan con las cuales se puede determinar la modificación de las propiedades ópticas de cuatro sistemas de nanovarillas de oro en suspensión coloidal para analizar las posibles aplicaciones de dichos sistemas.

2. ANTECEDENTES

La nanotecnología se enfoca en materiales cuya escala es de 10^{-9} metros (nanómetros), para tener una idea de esta escala imaginemos que dividimos un milímetro de una regla en un millón de partes iguales, una de estas partes es 1 nanómetro (1 nm). En esta escala podemos encontrar a las nanopartículas (NPs) aunque sus dimensiones pueden variar de 1 hasta 100 nm (Vasily Klimow, 2014). Podemos pensar que una nanopartícula es 1000 veces más pequeña que un microorganismo, por ejemplo, una bacteria, como se puede ver en la Figura 1.

Figura 1. Escala descriptiva para comparar objetos.



Hace más de 4000 años los antiguos egipcios usaban estos materiales, ellos desarrollaron un proceso químico para sintetizar NPs de sulfuro de plomo (PbS) de aproximadamente

5 nm de diámetro para teñir el cabello. El pigmento “azul egipcio” que data de alrededor del siglo III a. C. fue el primer pigmento sintético del que se tiene registro, este contenía cristales de tamaño nanométrico, y consistía en una mezcla sinterizada de silicato de cobre y calcio (Nicholas Eastrough et al, 2005).

En diversas exploraciones arqueológicas hechas a las regiones geográficas antiguas del Imperio Romano, Mesopotamia y Grecia, se encontró un uso extensivo del azul egipcio con fines decorativos, como se observa en la Figura 2.

Figura 2. Ejemplo del uso del azul egipcio en pinturas en el templo de Dendera.



La síntesis de NPs metálicas mediante métodos químicos se remonta a los siglos XIV y XIII a. C., cuando los egipcios y mesopotámicos comenzaron a fabricar vidrio utilizando metales, lo que puede citarse como el comienzo de la era de las NPs metálicas. Sin embargo, una pieza de trabajo de vidrio romano del siglo IV a.C es el ejemplo más famoso del uso de NPs metálicas, por esta razón los romanos ostentan el título de pioneros de la nanotecnología, la pieza es la Copa de Licurgo, Figura 3, dicho objeto está exquisitamente labrado en plata dorada en su base y en el borde, mientras que el cuerpo de la copa consta de pequeñas esculturas de vidrio que representan varias escenas de la muerte de Licurgo, el mitológico rey de Tracia.

La espectacularidad de la copa además de su labrado se debe a un cambio en su color el cual depende de la dirección de la luz, al iluminar por delante, su color es verde jade y opaco; por dentro se torna rojo rubí translúcido. La explicación a este efecto es la presencia de partículas de oro y plata de tamaño nanométrico inmersas en el vidrio, dichas partículas fueron descubiertas hasta 1990, cuando investigadores en Inglaterra examinaron con microscopios electrónicos unos fragmentos del vidrio.

Figura 3. *Copa de Licurgo*

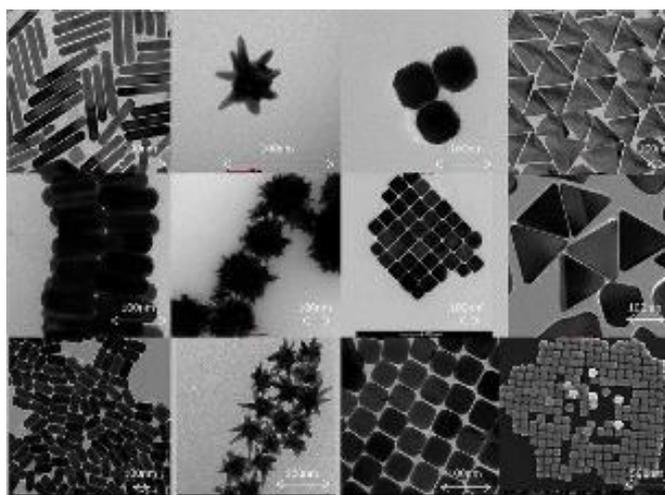


Otro ejemplo de la presencia de NPs en vidrio se tiene en los vitrales de las catedrales diseñados en la edad media en toda Europa, los cuales presentan una gran gama de colores producidos por dichas partículas.

2.1 Nanopartículas hoy

Actualmente existen diferentes métodos para producir partículas a nanoescala, ya sea de carbono, metales, óxidos metálicos o de materia orgánica (Jeevanamdham et al, 2018). Estos métodos de síntesis se han ido perfeccionando de manera que es posible obtener partículas con diferentes formas y tamaños, estas pueden ser esféricas, cilíndricas, espirales, Figura 4, por mencionar algunas, y sus propiedades varían de acuerdo con su forma, composición y tamaño.

Figura 4. *Diferentes formas de nanopartículas metálicas*



Dentro de las NPs que destacan por sus propiedades ópticas no lineales se encuentran las metálicas, particularmente las de oro, esto debido a sus potenciales aplicaciones asociadas a la amplificación del campo eléctrico debido a la presencia de plasmones de

resonancia. Para excitar la amplificación del campo es necesaria la interacción de las partículas con la luz, por lo que en la siguiente sección está dedicada a la óptica.

Por otro lado, dentro de las aplicaciones de las NPs se encuentran la protección para sensores, dispositivos de limitación óptica y terapias médicas (François L., 2000, West R., 2003, Thakor A. S., 2011). En general, la respuesta de las NPs metálicas se puede ajustar a la aplicación deseada controlando su tamaño, forma y medio en el que se encuentren (Chang S. S., 1999); aquí es donde los métodos de síntesis juegan un papel importante, estos se clasifican en dos grandes tipos: síntesis por método ascendente/método constructivo y síntesis por método descendente/método destructivo (Ealia A. M. & Saravanakumar, M. P., 2017). El método ascendente consiste en la construcción del material desde átomos a grupos de átomos y de grupos a NPs. El método descendente consiste en la reducción de material de gran volumen a partículas de escala nanométrica. Las NPs mostradas en este trabajo fueron sintetizadas por el método ascendente mediante el protocolo llamado semilla de crecimiento.

2.2 Óptica

Cuando la luz interactúa con un medio se presentan fenómenos como la reflexión, refracción y absorción de la luz. La refracción de la luz es el cambio de la dirección de propagación que sufre la luz al pasar del vacío a un medio, mostrado en la Figura 5a), en la Figura 5b) se muestra el fenómeno de la reflexión usando un espejo, mientras que la Figura 5c) ilustra la absorción que es el mecanismo mediante el cual la luz es atrapada por la materia. Estos tipos de fenómenos se llevan a cabo debido a una cantidad conocida como índice de refracción del medio, este es una medida para saber cuánto se reduce la velocidad de la luz dentro de un medio y está definido como $n=c/v$, con c la velocidad de la luz en el vacío y v la velocidad de la luz dentro del medio.

Figura 5. Fenómenos de a) reflexión, b) refracción y c) absorción de la luz.



Por otro lado, la respuesta del material a la interacción con luz de baja intensidad está representada por la polarización lineal del medio, mediante la siguiente expresión

$$\bar{P} = \varepsilon_0 \chi \bar{E} \quad (1)$$

siendo ε_0 la permitividad del espacio libre, χ la susceptibilidad eléctrica y \bar{E} el campo eléctrico de la luz. Las propiedades ópticas del medio están contenidas en la susceptibilidad eléctrica χ , dado que $\bar{n} = (1 + \chi)^2$ y $\bar{n} = n + i\alpha$; para luz de baja intensidad n y α no cambian, sin embargo esto no sucede para luz muy intensa, generalmente proveniente de una fuente láser, para altas intensidades la ecuación (1) se modifica de la siguiente forma (Boyd R. W., 2003).

$$\bar{P} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \bar{E} + \varepsilon_0 \chi^{(2)} \bar{E} \cdot \bar{E} + \varepsilon_0 \chi^{(3)} \bar{E} \cdot \bar{E} \cdot \bar{E} + \dots \quad (2)$$

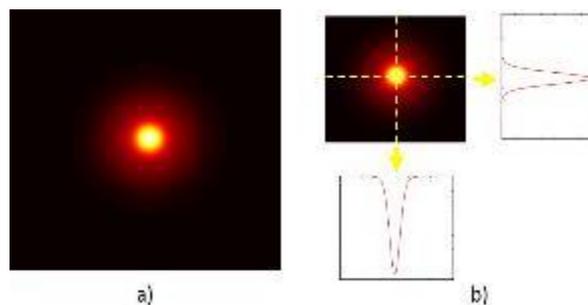
Los términos adicionales a la contribución lineal representan la polarización no lineal que puede ser de segundo, tercer orden, etc., de acuerdo a la potencia del campo eléctrico. Los cambios inducidos en n y α , se representan por Δn y $\Delta \alpha$ respectivamente, dichos cambios están contenidos en las susceptibilidades $\chi^{(2)}, \chi^{(3)}, \dots$ etc. de acuerdo al orden del fenómeno no lineal.

2.3 Fenómenos no lineales

Se requiere conocer la naturaleza del haz láser ya que vamos a estudiar fenómenos de tercer orden, en específico el autoenfocamiento y la absorción lineal, que son resultado de Δn y $\Delta \alpha$ con la intensidad I .

Un haz de luz láser comúnmente presenta una distribución de intensidad Gaussiana (E. A. Saleh & Malvin Carl Teich, 1991), esto es que la intensidad en el centro es mayor que en las orillas del haz, como se muestra en la Figura 6, en el inciso a) se muestra el spot de un haz láser y en b) su perfil de intensidad para un eje horizontal y uno vertical indicados en líneas amarillas punteadas.

Figura 6. a) Spot de un haz Gaussiano, b) perfiles de intensidad del haz Gaussiano.



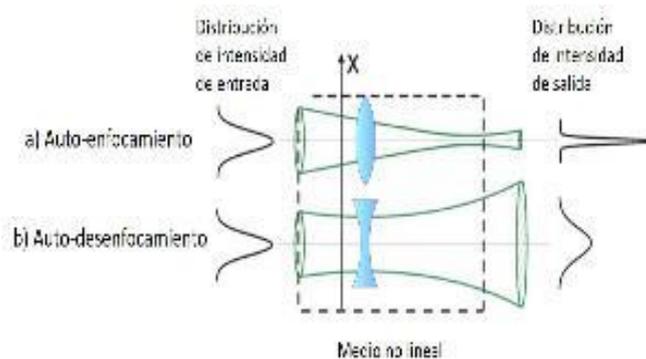
Cuando un haz de este tipo atraviesa un medio no lineal, inducirá cambios Δn y $\Delta\alpha$ en el índice de refracción y coeficiente de absorción respectivamente, la modificación de estas propiedades está representada en las siguientes expresiones

$$n(I) = n_0 \pm \Delta n \quad (3)$$

$$\alpha(I) = \alpha_0 + \Delta\alpha \quad (4)$$

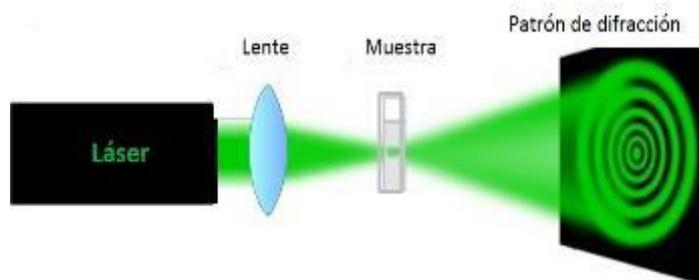
con $\Delta n = I n_2$ y $\Delta\alpha = \beta I$, n_2 y β son el índice de refracción y coeficiente de absorción no lineales respectivamente. La distribución de la intensidad uniforme de la luz a la entrada generará una lente autoinducida, es decir, el medio se comportará como una lente ya sea positiva o negativa de acuerdo al signo de Δn este efecto inducido por la luz, será percibido por la misma luz, haciendo que se autoenfoque o se auto-desenfoque, Figura 7.

Figura 7. a) Auto enfocamiento y b) Auto-desenfocamiento de la luz.



Otro fenómeno de auto-acción es la auto-modulación espacial de fase, Figura 8, que es la distorsión del frente de onda de un haz que viaja a través de un medio óptico no lineal. Este fenómeno puede describirse como un fenómeno de difracción de la luz, debido a que su patrón de difracción consiste en anillos concéntricos, lo que se asemeja a la difracción de la luz al atravesar una abertura circular.

Figura 8. Automodulación espacial de fase.

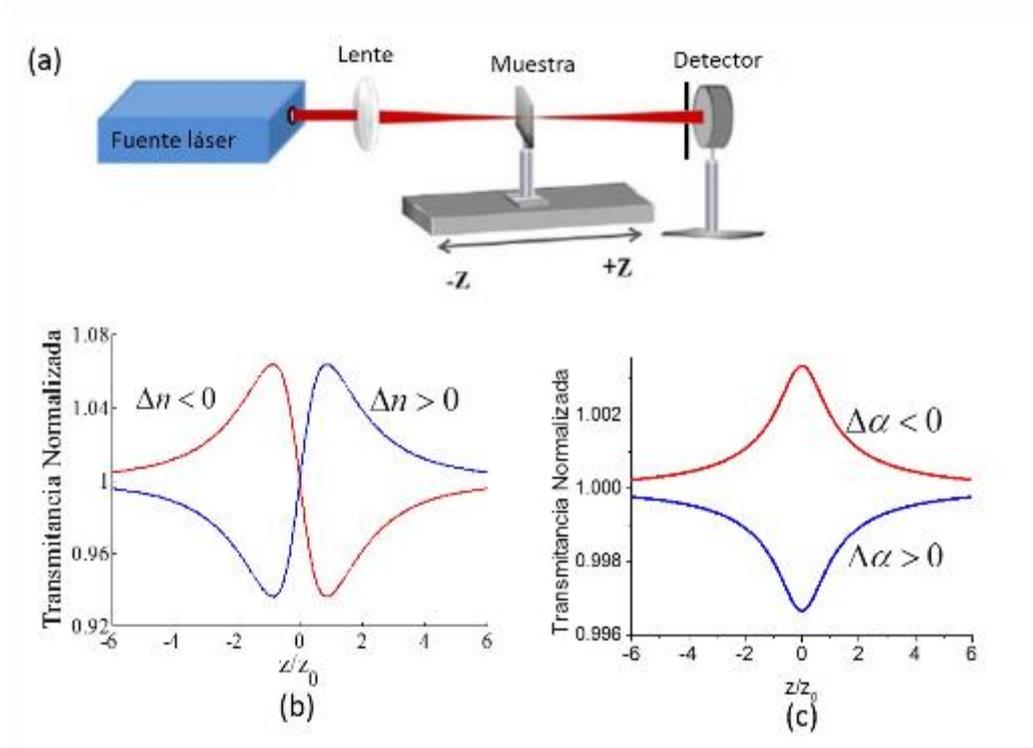


La técnica de barrido en Z, descrita en la siguiente sección, es una herramienta para determinar fenómenos de auto-acción.

2.4 Técnica de barrido en Z

Esta técnica consiste en enfocar un haz Gaussiano y barrer una muestra delgada alrededor del punto focal para medir la transmitancia de la muestra en un detector colocado a campo lejano, teniendo como resultado curvas de posición de la muestra vs transmitancia. Esta técnica tiene dos configuraciones una usando una abertura circular pequeña colocada frente al detector para determinar los cambios de fase no lineales inducidos en el haz para medir refracción no lineal y otra sin abertura para determinar los cambios en absorción, es decir absorción no lineal, Figura 9a). La técnica recibe su nombre de considerar al eje de barrido de la muestra como el eje Z. La Figura 9b) muestra curvas características para la configuración con abertura; la curva roja corresponde a una respuesta no lineal negativa es decir el medio se comporta como una lente negativa o divergente. Al colocar la muestra antes del foco de la lente y al funcionar dicha muestra como una lente divergente se tendrá un haz a la salida del medio que converja teniendo entonces una menor extensión espacial al llegar al detector; como resultado el detector registra una mayor potencia resultando en un pico de transmitancia, cuando la muestra ha pasado la posición focal de la lente se dará el proceso inverso y el haz transmitido diverge, esto es la extensión espacial o tamaño del haz al llegar al detector aumentará, lo que se verá reflejado en una disminución de la transmitancia, teniendo la formación de un valle en la curva de barrido en Z. Las curvas mostradas en 9c) corresponden a la configuración sin abertura frente al detector, esta configuración es usada para determinar los cambios de fase del haz asociados a la absorción del medio no lineal.

Figura.9. a) Esquema experimental de la técnica de barrido en Z, b) Curvas para la configuración con abertura, c) Curvas para la configuración sin abertura.



Puede observarse que estas curvas están caracterizadas por un pico o un valle, esto se debe a las variaciones en el coeficiente de absorción $\alpha(I)$, por ejemplo en el caso de la curva en rojo los extremos corresponden a posiciones de la muestra lejanas al foco, por lo que la intensidad no es lo suficientemente elevada para inducir cambios en la absorción del medio, por lo que la transmitancia tiene un comportamiento lineal, para posiciones cercanas al foco la intensidad aumenta modificando $\alpha(I)$ en una cantidad, si es negativo entonces $\alpha(I)$ disminuirá permitiendo el paso de una mayor cantidad de luz, dando origen a la formación de un pico, para posiciones de la muestra posteriores al foco la intensidad disminuye, teniendo un comportamiento similar al inicio del barrido.

Si es positivo, $\alpha(I)$ incrementará, lo que implica que la muestra absorbe más luz, teniendo como resultado un haz de baja intensidad que llega al detector por lo que se da la formación de un valle mostrado en la curva de color azul.

Es posible expresar mediante ecuaciones lo descrito en el párrafo anterior, iniciando con el campo eléctrico del haz Gaussiano en el plano de entrada de la muestra que está expresado por la ecuación (5)

$$E(r, z) = A_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w(z)^2}\right] \exp\left[-i\left(kz - k\frac{r^2}{2R(z)} + \varepsilon(z)\right)\right] \quad (5)$$

con

$$w(z) = w_0 \left[1 + \frac{z_0}{z}\right]^{1/2} \quad (6)$$

$$R(z) = z \left[1 + \frac{z_0}{z}\right] \quad (7)$$

$$\varepsilon(z) = \tan^{-1}(z/z_0) \quad (8)$$

donde A_0 es una constante, $k = 2\pi/\lambda$, $w(z)$ y $R(z)$ son el ancho y radio de curvatura del frente de onda respectivamente y $\varepsilon(z)$ el efecto Gouy relativo al retardo en fase de la onda plana. El argumento de la segunda exponencial de la ec. (5) es la fase $\phi(r, z)$ del haz.

$$E(r, z) = A_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{\omega^2(z)}\right] \exp[i\phi] \quad (9)$$

Cuando el campo expresado en la ecuación (5) se propaga a través de un medio no lineal delgado, se considera que el campo en el plano de salida del medio es el mismo campo, pero con una pequeña diferencia de fase adicional $\Delta\phi(r, z)$ llamada cambio de fase no lineal (Sheik-Bahae et al, 1990).

$$E_{salida}(r, z) = E(r, z) \exp(-i\Delta\phi(r, z)) \quad (10)$$

El cambio de fase no lineal está asociado al índice de refracción no lineal n_2 y al coeficiente de absorción no lineal β

$$\Delta\phi(r, z) = \frac{kn_2}{\beta} \ln[1 + q(z, r)] \quad (11)$$

Al sustituir la ecuación (11) en la ecuación (10), E_{salida} puede escribirse como

$$E_{salida}(r, z) = E(r, z) (1 + q)^{\left(-i\frac{\Delta\Phi_0}{2\Psi_0} - \frac{1}{2}\right)} \quad (12)$$

donde $q(z, r) = \beta I(z, r) L_{eff}$ y $L_{eff} = (1 - e^{-\alpha L})/\alpha$, con $\Delta\Phi_0 = kn_2 I_0 L_{eff}$ y $\Delta\Psi_0 = \beta I_0 L_{eff}$ donde L_{eff} es la longitud efectiva y L el grosor del medio.

La ecuación (12) representa el campo en el plano de salida de la muestra, este campo debe propagarse hasta el plano del detector mediante la transformada de Fourier, es decir llevar E_{salida} a campo lejano; para obtener las curvas de la Figura 9b) y 9c) de forma numérica; este procedimiento fue utilizado en este trabajo para reproducir numéricamente resultados experimentales para muestras delgadas de nanovarillas de oro suspendidas en agua desionizada, dichos resultados fueron obtenidos previamente.

2.5 Nanovarillas de oro

La técnica de Z-scan, fue utilizada en sus dos configuraciones para caracterizar las propiedades no lineales de cuatro muestras de nanovarillas de oro suspendidas en agua desionizada, las dimensiones de las NPs de cada sistema coloidal se muestran en la Tabla 1, los datos reportados fueron obtenidos mediante un análisis estadístico de los resultados arrojados del conteo de partículas para cada sistema coloidal, dicho conteo está basado en microscopias SEM tomadas para cada sistema. La Figura 10 muestra una microscopía para cada sistema.

Figura 10. Microscopias de las muestras estudiadas, a) longitud $l=25.82$ nm, b) $l=37.46$ nm, c) $l= 54.13$ nm, d) $l= 60.43$ nm.

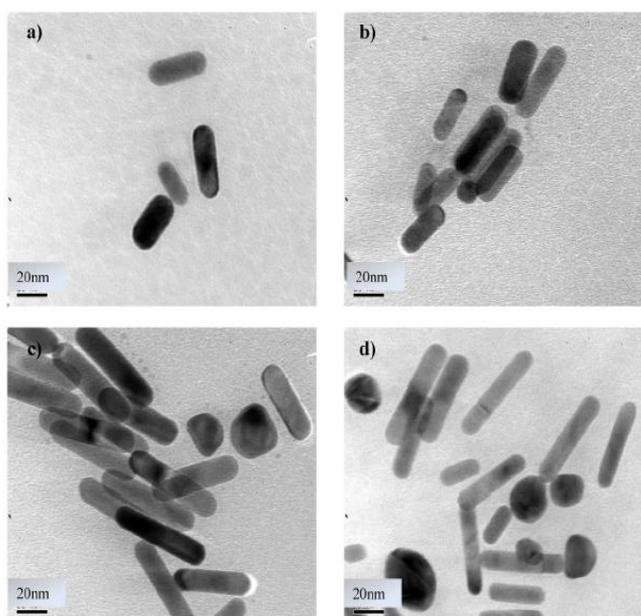


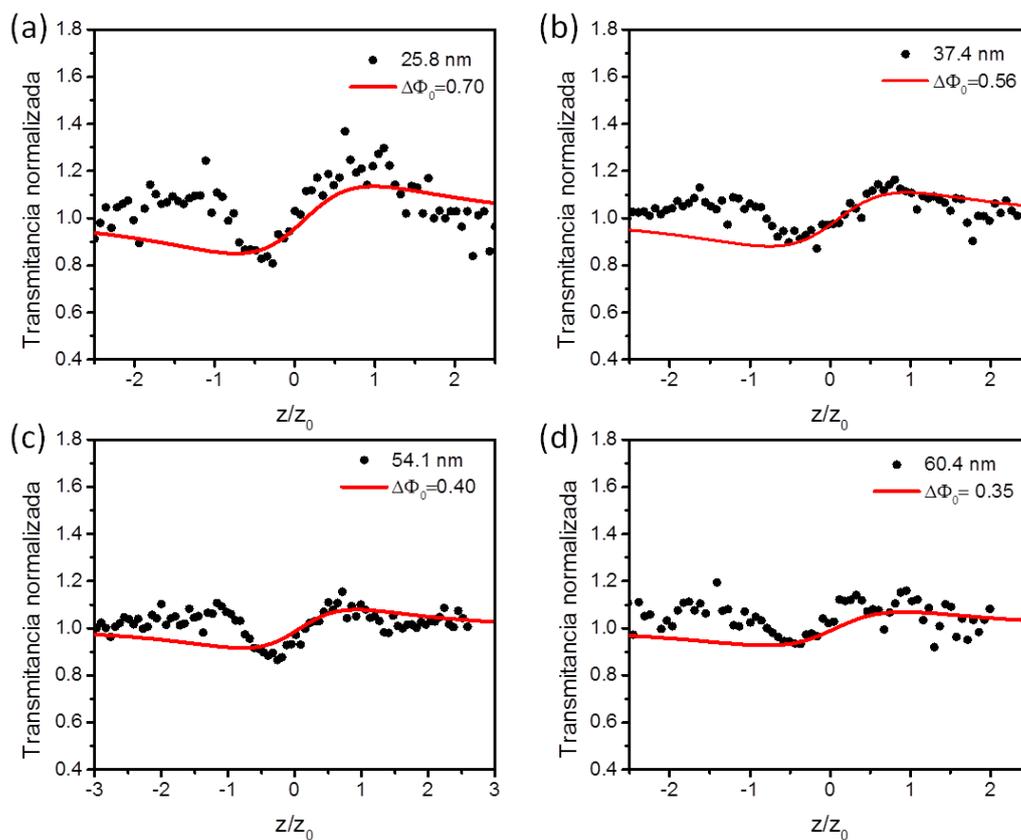
Tabla 1

Dimensiones de las NPs			
Muestra	Longitud (l) (nm)	Diámetro (D) (nm)	Razón de aspecto l/D
25.8 nm	25.8	11.47	2.25
37.4 nm	37.4	11.65	3.21
54.1 nm	54.1	12.42	4.35
60.4 nm	60.4	12.38	4.88

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se reprodujeron numéricamente curvas experimentales de barrido en Z, obtenidas para muestras de 1 mm de grosor así como fuente de luz láser Nd:YAG con duración de pulso de 26 ps y frecuencia de repetición de 10 Hz, para una longitud de onda de $\lambda = 532$ nm, radio mínimo de $\omega_0 = 35 \mu\text{m}$ e intensidad incidente $I_0 = 0.9 \text{ GW/cm}^2$. Utilizando el modelo que reproduce las ecuaciones 10 y 12 reportado en (García Ramírez E. V., 2001, Martínez Irvias B. A, 2015), se realizaron dos algoritmos en python uno para refracción no lineal y el otro para absorción, con ellos se obtuvieron numéricamente curvas de barrido en Z, para obtener dichas curvas se hizo uso de la función transformada rápida de Fourier de la biblioteca Numpy para proyectar el campo eléctrico a la salida de la muestra a campo lejano. Se reprodujeron numéricamente los resultados experimentales obteniéndose los cambios de fase no lineal asociados a refracción $\Delta\Phi_0$ y la absorción $\Delta\Psi_0$ dependientes de la intensidad. En la Figura 11 se presentan los ajustes numéricos en líneas continuas rojas, puede observarse que, las curvas presentan un comportamiento valle pico lo que indica la presencia de refracción no lineal positiva, se observa que la amplitud pico valle va disminuyendo conforme aumenta la longitud de la partícula lo que se ve reflejado en $\Delta\Phi_0$ menor.

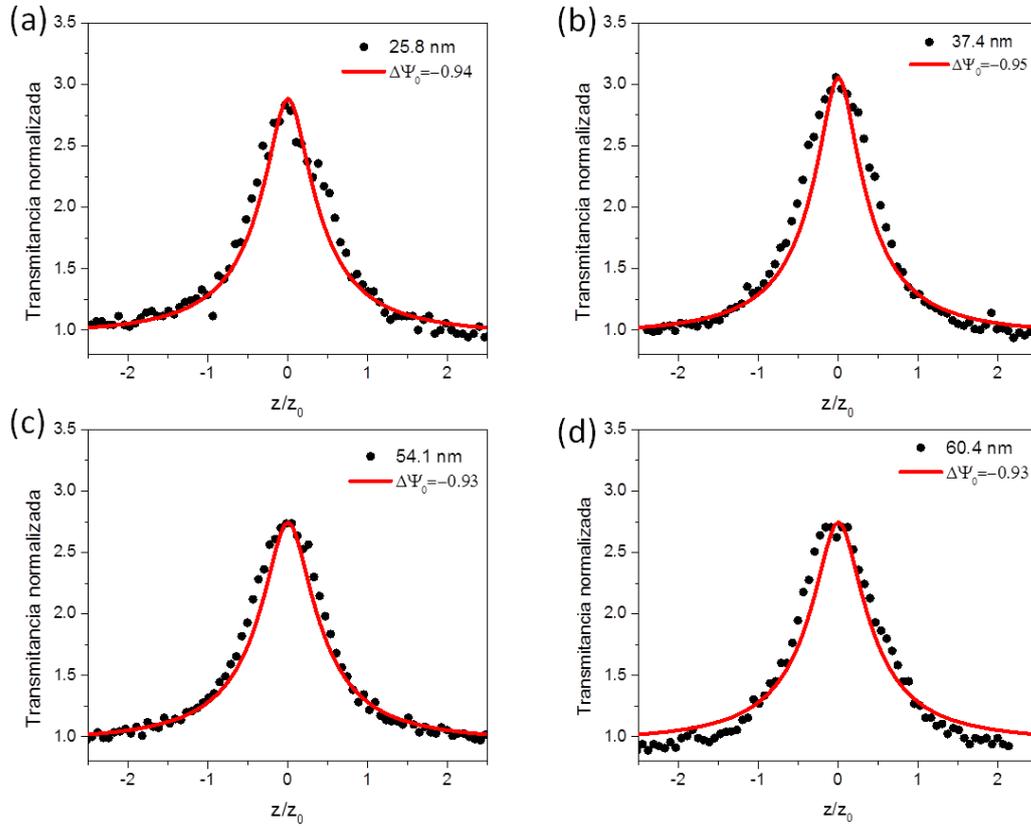
Figura 11. Curva de Z-scan para la configuración con abertura para los 4 sistemas de nanovarillas estudiados.



Se observa también que el ajuste numérico no reproduce en su totalidad los resultados experimentales, pues estos no coinciden con las posiciones y amplitudes de los picos y valle experimentales. De las curvas numéricas se aprecia una extensión espacial mayor respecto de los resultados experimentales.

Los resultados experimentales para la configuración sin abertura se presentan en la Figura 12.

Figura 12. Curva de Z-scan para la configuración sin abertura para los 4 sistemas de nanovarillas estudiados.



Del algoritmo desarrollado para la configuración de abertura abierta se obtuvieron valores para el cambio de fase debido a absorción $\Delta\Psi_0$, los ajustes numéricos se muestran en la Figura 12 en línea continuas. Los valores obtenidos para $\Delta\Phi_0$ y $\Delta\Psi_0$ se reportan en la Tabla 2.

Tabla 2

Parámetros de ajuste obtenidos		
Muestra	$\Delta\Phi_0$	$\Delta\Psi_0$
25.8 nm	0.70	-0.94
37.4 nm	0.56	-0.95
54.1 nm	0.40	-0.93
60.4 nm	0.35	-0.93

Los valores obtenidos para $\Delta\Psi_0$ se mantienen aproximadamente constantes, puede observarse un pico de transmitancia en todas las curvas, lo que representa una disminución en el coeficiente de absorción dado por la ecuación (4), es decir las muestras presentan un $\Delta\alpha$ negativo, la disminución de $\alpha(I)$ representa una mayor transmisión de la luz con el incremento de la intensidad. Se observa que las curvas se ubican dentro de los datos experimentales, lo que representa una mayor extensión espacial de la respuesta no lineal respecto de las curvas numéricas.

Un mejor ajuste de los resultados experimentales puede obtenerse al introducir un parámetro adicional en la ecuación (12), este parámetro modifica la extensión espacial de la respuesta no lineal y representa la no localidad de dicha respuesta.

4. CONCLUSIONES

Se desarrollaron dos algoritmos en Python para obtener curvas numéricas para las configuraciones de abertura y sin abertura de la técnica de barrido en Z. Los algoritmos fueron usados para reproducir resultados experimentales de cuatro sistemas coloidales conformados por nanovarillas de oro suspendidas en agua desionizada. Los ajustes numéricos mostraron para el caso de refracción no lineal una disminución en el cambio de fase no lineal $\Delta\Phi_0$ con el incremento de la longitud de las nanovarillas y para el caso de absorción no lineal, el cambio de fase $\Delta\Psi_0$ presenta cambios mínimos. Para mejorar el ajuste numérico es necesario considerar la no localidad de la respuesta no lineal, para esto debe modificarse la expresión del campo eléctrico en el plano de salida del medio incluyendo un parámetro que represente la no localidad.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Boyd R. W. (2003). *Nonlinear optics* (2^a. Ed.). USA: Academic Press.
- Chang S. S., Shih C. W., Chen C. D., Lai W. C., and Wang C. R. C., (1999). The shape transition of gold nanorods, *Lagmuir* 15(3), 701–709.
- Ealia A. M. and Saravanakumar, M. P. (2017). A review on the classification, characterisation, synthesis of nanoparticles and their application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 263, 032019.
- E. A. Saleh, Malvin Carl Teich, (1991). *Fundamentals of photonics*. USA. J. W. Goodman François L., Mostafavi M., Belloni J., Delouis J. F., Delaire J., and Feneyrou P., (2000). Optical limitation induced by gold clusters. 1. size effect, *J. Phys. Chem. B* 104(26), 6133–6137.

- García Ramírez E. V., Arroyo Carrasco M. L., Méndez Otero M.M., Reynoso Lara E., Chavez Cerda S., and Iturbe Castillo M. D. (2011). Z-scan and spatial self-phase modulation of a Gaussian beam in a thin nonlocal nonlinear media J. Opt. 13 085203.
- Jeevanamdani, Ahmed Barhoum, Yen S. Chan, Alain Dufresne, Michael K. Danquah, (2018), Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. Beilstein J. Nanotechnol, 9, 1050-1074.
- Nicholas Eastrough, Valentine Walsh, Tracey Chaplin and Ruth Siddall, (2005), Pigment Compendium. USA. Elsevier.
- Martínez Irvias B. A, Arroyo Carrasco M. L. Méndez Otero M. M., Ramos García R., and Iturbe Castillo M. D. (2015). Far-field diffraction patterns by a thin nonlinear absorptive nonlocal media. Opt. Express 23, 14036-14043.
- Sheik-Bahae, M., Said, A., Wei, T., Hagan, D., and van Stryland, E. (1990). Sensitive Measurement of Optical Nonlinearities Using a Single Beam. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, 26(4), 760–769.
- Thakor A. S., Jokerst J., Zavaleta C., Massoud T. F. and Gambhir S. S., (2011). Gold nanoparticles: a revival in precious metal administration to patients, Nano Lett. 11(10), 4029–4036.
- Vasily Klimov, (2014). Nanoplasmonics (1st Ed.) USA. Jenny Stanford Publishing West R., Wang Y. and Goodson T. III, (2003). Nonlinear absorption properties in novel gold nanostructured topologies, J. Phys. Chem. B 107(15), 3419–3426.