

Estudio de propiedades ópticas no lineales en películas de Gelita Bloom con materiales orgánicos

J. Y. Reséndiz-Montero,¹ J. D. Arriaga-Gutierrez¹, R. I. Peñarán-Prieto¹, J. A. Andrade-Lucio¹, E. Alvarado-Méndez¹.

¹División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca

jy.resendizmontero@ugto.mx¹, ri.penaranprieto@ugto.mx¹, jd.arriagagutierrez@ugto.mx¹, andrade@ugto.mx¹, ealvarad@ugto.mx¹

Resumen

Se presenta un estudio óptico no lineal de materiales orgánicos en películas. Las películas fueron elaboradas en Gelita Bloom al cual se le incorpora el material orgánico; investigamos las propiedades de dos materiales: *Bougainvillea glabra Choisy* e *Hibiscus Sabdariffa*, posteriormente realizamos un estudio de anillos de auto-difracción, lo cual es una primera prueba que comúnmente hacemos, de no linealidad. Posteriormente, realizamos un estudio de Z-scan a diferentes potencias, y los datos experimentales fueron ajustados con el modelo teórico de formación de lente térmica.

Palabras clave: óptica no lineal, materiales orgánicos, z-scan.

Introducción

La óptica no lineal (NLO) implica el estudio de la interacción luz-materia incorporando la respuesta óptica no lineal del material en función del campo óptico¹. Actualmente, láseres y la óptica no lineal son las subdisciplinas de la óptica moderna más importantes, ya que tiene un gran número de aplicaciones en comunicaciones para interruptores ópticos, guías de onda, láseres de altas potencias, en la medicina es posible detectar células cancerígenas mediante microscopía óptica no lineal, contraste de fase no lineal, etc.². La óptica no lineal tiene una gran riqueza física, como resultado de la interacción de láseres con la materia, hoy en día hay una amplia gama de fenómenos físicos tales como: generación de armónicos, la mezcla de frecuencias, dispersión de Raman y Brillouin, efecto Kerr, efecto Pockels, entre otros^{3,4}.

La óptica no lineal se origina cuando en materiales dieléctricos se genera la polarización, que es la dependencia con el campo eléctrico, y es expresada mediante la ecuación,

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot E \quad (1)$$

en donde la constante de proporcionalidad $\chi^{(1)}$ es la susceptibilidad lineal que nos representa la sensibilidad de un material a campo eléctrico externo, ϵ_0 es el coeficiente dieléctrico en el vacío.

Si la luz incidente es un láser, su intensidad es muy superior a la de la luz común en varios órdenes de magnitud. Podemos hacer la expansión de la polarización eléctrica en una serie de potencias de la amplitud del campo eléctrico de la luz, la relación entre P y E para el medio anisotrópico es

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot E + \epsilon_0 \chi^{(2)} : EE + \epsilon_0 \chi^{(3)} : EEE + \dots, \quad (2)$$

donde $\chi^{(1)}$ es la susceptibilidad lineal, $\chi^{(2)}$ y $\chi^{(3)}$ son las susceptibilidades no lineales de segundo y tercer orden, respectivamente². A partir del segundo término en adelante, surge la óptica no lineal, es decir, cuando el campo eléctrico depende de potencias mayores o iguales a 2³.

Unas de las ramas que está siendo ampliamente estudiada es la no linealidad de tercer orden en materiales orgánicos. Para ello se usan láseres continuos que modifican principalmente el índice de refracción de un medio. Nosotros en este trabajo presentamos un estudio de no linealidad de materiales orgánicos, ya que abundan en la naturaleza y son económicos. En particular, presentamos un estudio de los materiales *Bougainvillea Glabra Choisy* e *Hibiscus Sabdariffa*. Estos estudios ofrecen potenciales aplicaciones en comunicaciones como guías de onda, interruptores ópticos y también como en sensores para detección de flujos de calor en tiempo real, también conocido como contraste de fase no lineal, procesamiento de imagen, holografía, rejillas ópticas no lineales, entre otros.

Modelo Teórico

En el estudio de la óptica no lineal, es crucial entender cómo los materiales responden a intensas fuentes de luz, como los láseres. Para nuestra investigación utilizamos un láser continuo y por medio del modelo de Severiano *et. al.*⁵ describiremos el cambio de índice de refracción, el cual se basa en la detección de la irradiancia en el eje en el campo lejano. Cabe mencionar que estas variaciones de este índice de refracción se producen por efectos de temperatura, debido a que se usan láseres continuos. Consideramos un medio delgado y la formación de una lente foto-inducida debido al efecto de autoenfoco no lineal. La transmitancia de la luz a través del medio depende de la lente foto-inducida focal ($F(z)$) así como de la distancia de Rayleigh₀. $F(z)$ depende del radio del haz a alguna potencia “ m ”,

$$F(z) = a_m \omega^m \quad (3)$$

en donde a_m es una constante de las unidades adecuadas, m es un número real que describe el tipo de no linealidad del material.

La ecuación 3 puede ser reescrita tomando en cuenta los parámetros experimentales tales como variaciones del índice de refracción respecto a la temperatura y la respuesta óptica no lineal del material, quedando de la siguiente manera,

$$F(z) = \frac{\pi k}{\left(\frac{dn}{dT}\right) P \alpha d} \omega^2 \quad (4)$$

en donde k es la conductividad térmica, (dn/dT) es el desplazamiento del índice de refracción debido a la temperatura, P es la potencia del láser, α es la absorción lineal, d el grosor del medio y por último esta depende del radio del haz al cuadrado ω^2 . Esta ecuación nos ayuda a entender cómo los materiales se deforman ópticamente bajo la influencia de un calentamiento intenso y localizado.

La distancia focal del sistema puede ser aproximada a la dependencia cuadrática con la intensidad, y ya que depende de la posición, usamos teoría de aproximación paraxial obteniendo la siguiente expresión,

$$f(z) = a \frac{\pi \omega^4(z)}{[\alpha d \pi \omega^2(z) + b \beta d P]} \quad (5)$$

En donde $a = \frac{k\pi}{P\left(\frac{dn}{dT}\right)}$

Nótese que el cambio de la distancia focal produce un cambio de fase, mediante la siguiente relación,

$$\Delta\phi = \frac{z_0}{2f(z)} \quad (6)$$

Finalmente, el índice de refracción n_2 es crucial para caracterizar la respuesta óptica de un material a altas intensidades de luz y está dado por,

$$n_2 = \frac{\lambda\omega_0^2\Delta\phi}{2PL_{eff}} \quad (7)$$

en donde L_{eff} es el espesor efectivo de la muestra, $L_{eff} = (1 - \frac{\exp(-\alpha d)}{\alpha})$; $\Delta\phi$ representa el desplazamiento de fase no lineal en el eje en el foco.

La ecuación 7 es fundamental para la técnica Z-scan, en medios donde el cambio del índice de refracción depende de la temperatura, y se utiliza para medir las propiedades ópticas no lineales de los materiales⁵.

Implementación numérica del modelo teórico

El programa de ajuste de curvas de Z-Scan, versión 3.0F0, desarrollado por el CA de Fotónica no Lineal de la Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías en el Campus Irapuato-Salamanca, está diseñado para facilitar la caracterización y parametrización de curvas experimentales obtenidas, usando el modelo de lente térmica. La interfaz gráfica del programa permite a los usuarios interactuar con las herramientas de Matlab para realizar ajustes entre los datos experimentales y el modelo teórico. El programa optimiza el uso de tiempo y recursos en el laboratorio, automatizando y simplificando el proceso de ajuste de curvas, reduciendo significativamente la necesidad de ajustes manuales repetitivos. Además, detalla el proceso iterativo necesario para ajustar las variables del modelo, asegurando un emparejamiento óptimo entre las curvas teóricas y experimentales.

El objetivo principal del programa es proporcionar una herramienta eficiente para ajustar curvas de Z-Scan, permitiendo a los usuarios obtener parámetros ópticos con alta precisión y fiabilidad. La versión V.3.0F0 del programa está diseñada para realizar ajustes precisos de curvas de Z-Scan, facilitando la caracterización y parametrización de datos experimentales obtenidos en el laboratorio de óptica. Mediante el uso de algoritmos avanzados, este software compara curvas experimentales con modelos teóricos generados matemáticamente, optimizando así el proceso de análisis óptico.

Entre las características principales, se destaca la aplicación rápida de variaciones, lo que permite ajustes más ágiles y eficientes. El proceso iterativo ha sido optimizado para mejorar la precisión y verificación de los resultados, asegurando que cada ajuste sea exacto y confiable. Además, el programa ofrece una gestión personalizada de archivos, facilitando la organización y acceso a los datos experimentales. La interfaz gráfica intuitiva permite un uso sencillo del programa, incluso para usuarios sin experiencia previa. La automatización de los procesos de ajuste y verificación incrementa la productividad al reducir la necesidad de intervenciones manuales, permitiendo a los investigadores enfocarse en el análisis crítico de los datos. Por último, el programa establece un estándar metodológico en el análisis de datos ópticos, asegurando resultados consistentes y reproducibles, cruciales para la validación y comparación de estudios científicos.

Partes de la aplicación

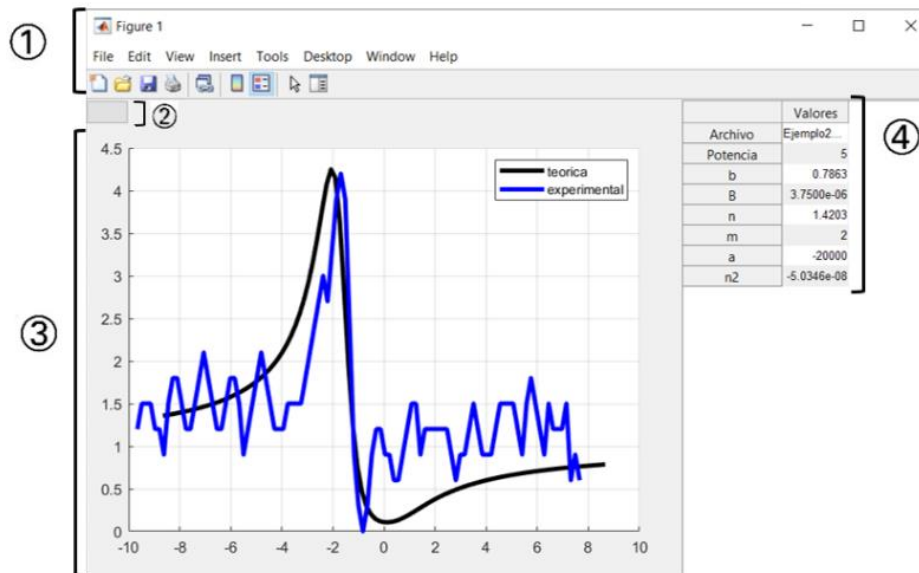


Figura 1. Partes que componen la interfaz de la aplicación

La interfaz gráfica está compuesta por varios elementos esenciales que facilitan su uso y optimizan el proceso de ajuste de curvas como se muestra en la figura 1

1. **Herramientas de Matlab:** Permite realizar modificaciones estéticas en las curvas y guardar los resultados como imágenes, lo cual es útil para documentar y presentar los datos.
2. **Botón de Actualización:** Permite actualizar la gráfica para reflejar las modificaciones realizadas en cada iteración.
3. **Gráfica:** El componente principal de la interfaz, donde se muestran la curva experimental (en azul) y la curva teórica (en negro).
4. **Información de Ajuste:** Esta tabla proporciona los datos relevantes necesarios para el análisis del ajuste.

Para iniciar la aplicación, se debe ejecutar el programa con la función de Matlab denominada Programa, una vez ejecutada la aplicación, se mostrará un diálogo de lectura de archivos, donde se indicará con qué archivo se trabajará en el proceso de ajuste. Solo se permite la lectura de archivos con la extensión `.zscan`. Finalmente, se obtendrá la configuración inicial de la aplicación. Se procede con el proceso de iteración, ajustando las variables para lograr un emparejamiento óptimo. La primera variable que ajustar será la "a", una variable del modelo matemático que permite ajustar la distancia entre el pico y el valle de la curva respecto al eje vertical. La siguiente variable que ajustar es "B", que rige la apertura de la curva y modifica la distancia entre el pico y el valle respecto al eje horizontal. Es importante destacar que ajustar cada variable afectará la curva en menor o mayor medida, por lo que se recomienda ajustar "a" y "B" en conjunto.

Preparación de Películas

En la preparación de las películas usando *Gelite Bloom*, se comenzó con una muestra madre de extracto de flor de Jamaica, que se diluyó en una mezcla de alcohol etílico y agua destilada. Posteriormente, la solución resultante se colocó en un recipiente para baño María hasta alcanzar una temperatura de 80° C, posteriormente se incorporó *Gelite Bloom* y se añadió un agitador magnético con el objetivo de asegurar una mezcla homogénea entre la *Gelite Bloom* e *Hibiscus Sabdariffa*.

Después de cinco minutos, la muestra se vertió sobre portaobjetos para lograr una superficie uniforme y formar una película. Finalmente, las películas se dejaron reposar durante 24 horas para permitir que se solidificaran adecuadamente, como se muestra en la secuencia de la figura 2.

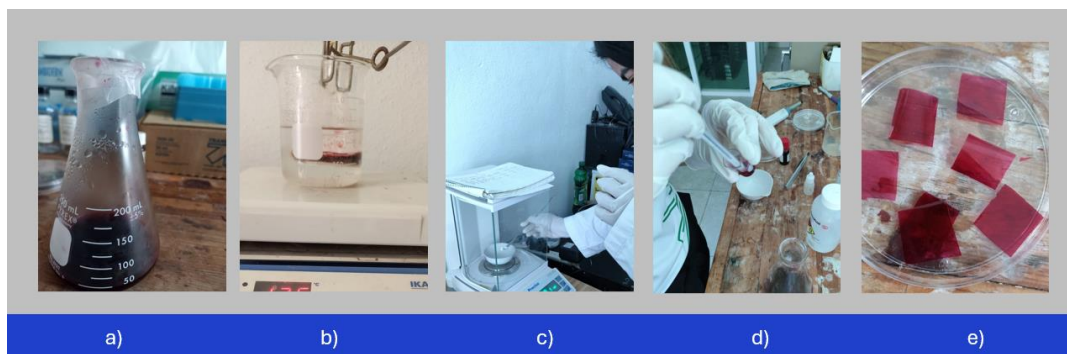


Figura 2. Proceso de preparación de las películas. a) muestra madre; b) baño maría; c) pesaje de la muestra; d) preparación de películas; e) películas ya formadas.

Análisis y Resultados

El índice de refracción no lineal n_2 se mide mediante la técnica Z-Scan propuesta por Sheik-Bahae^{6,7}. Sin embargo, debido a que usamos un láser continuo el modelo teórico más adecuado para describir este fenómeno, es el modelo de lente térmica⁵, ya que tenemos variaciones de índice de refracción con respecto a la temperatura. Un resultado interesante de este modelo es que basta con una sola medición para medir la refracción no lineal y calcular la absorción no lineal.

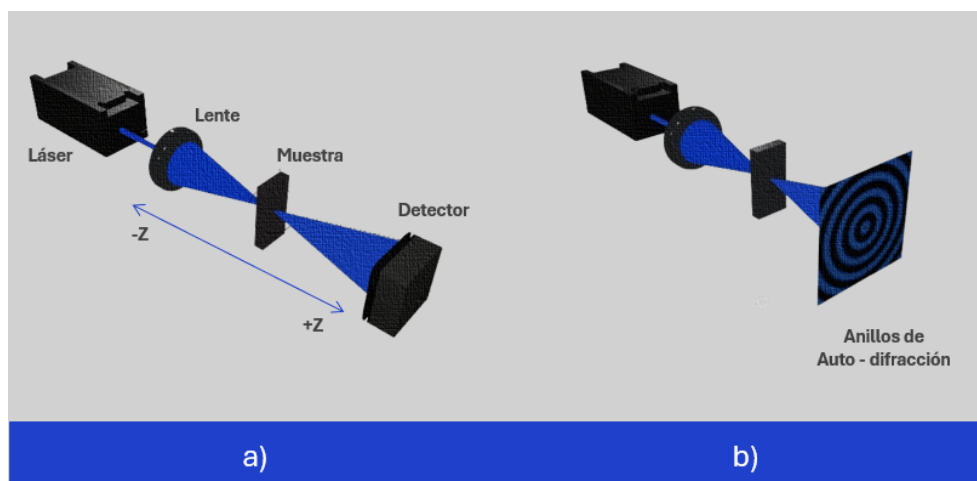


Figura 3. a) Representación esquemática de la configuración de Z-scan utilizada para el estudio NLO. b) Arreglo esquemático para formación de anillos de auto-difracción.

Para estudiar las propiedades ópticas no lineales de la *Bougainvillea Glabra Choisy* y de *Hibiscus Sabdariffa*, utilizamos un láser continuo de Ar de potencia variable, con longitud de onda 528 nm, una lente convexa de 7.5 cm de distancia focal, una celda de 2mm de grosor, como se muestra en la figura 3a.

El experimento consiste en hacer un barrido en z por lo que inicialmente la muestra es colocada a -2.5 cm del foco del haz, donde la intensidad de éste es baja⁸. Después la muestra comienza a moverse lentamente a lo largo del eje z , y a medida que se acerca al punto focal, la intensidad de la luz que atraviesa la muestra aumenta debido a la convergencia del haz, hasta completar 2.5 cm.

Cuando la muestra es iluminada por el haz de alta intensidad, puede experimentar efectos ópticos no lineales como el auto-enfocamiento y auto-desenfocamiento. Al final a medida que la muestra se mueve. El detector mide la intensidad del haz transmitido y estos datos son enviados a un archivo donde serán analizadas posteriormente las propiedades no lineales.

Resultados del experimento de Z-Scan

En la figura 4 se comparan los datos experimentales con la curva teórica, a 9 mW de la *Bougainvillea Glabra Choisy*. La línea azul representa los datos experimentales obtenidos del experimento de Z-Scan, mientras que la línea negra representa la curva teórica ajustada. La figura 4 muestra un pico pronunciado en la región negativa, seguido de una disminución rápida y una estabilización en valores cercanos a cero, observamos una separación entre el pico y el valle.

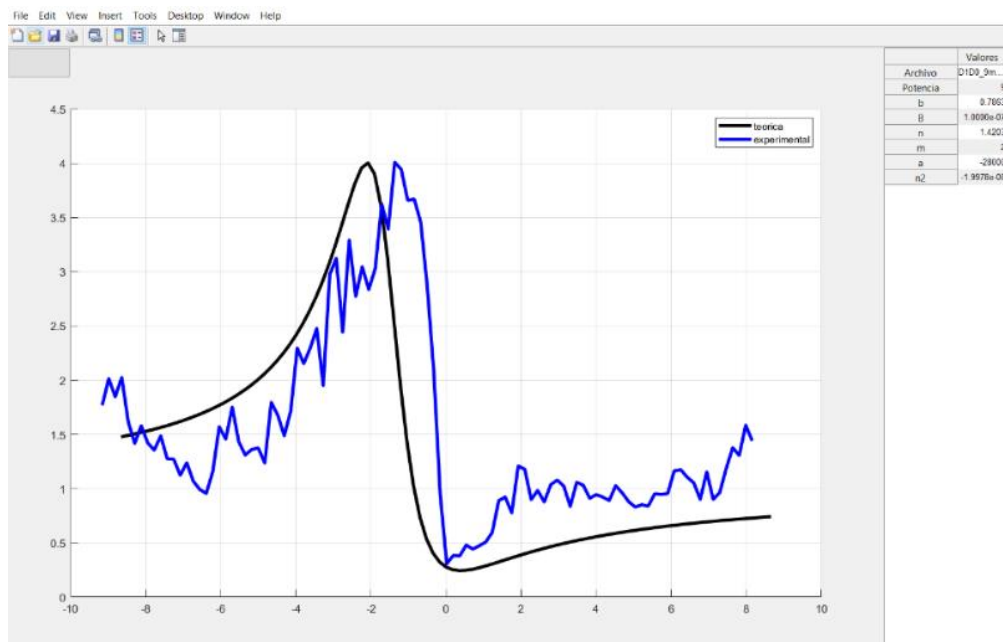


Figura 4. Resultados de Z-Scan a 9 mW, mostrando la comparación entre los datos experimentales (línea azul) y la curva teórica (línea negra).

En figura 5 se muestra la curva de Z-Scan a 12 mW. Aquí observamos un buen ajuste entre el pico y valle de los datos experimentales y el modelo teóricos.

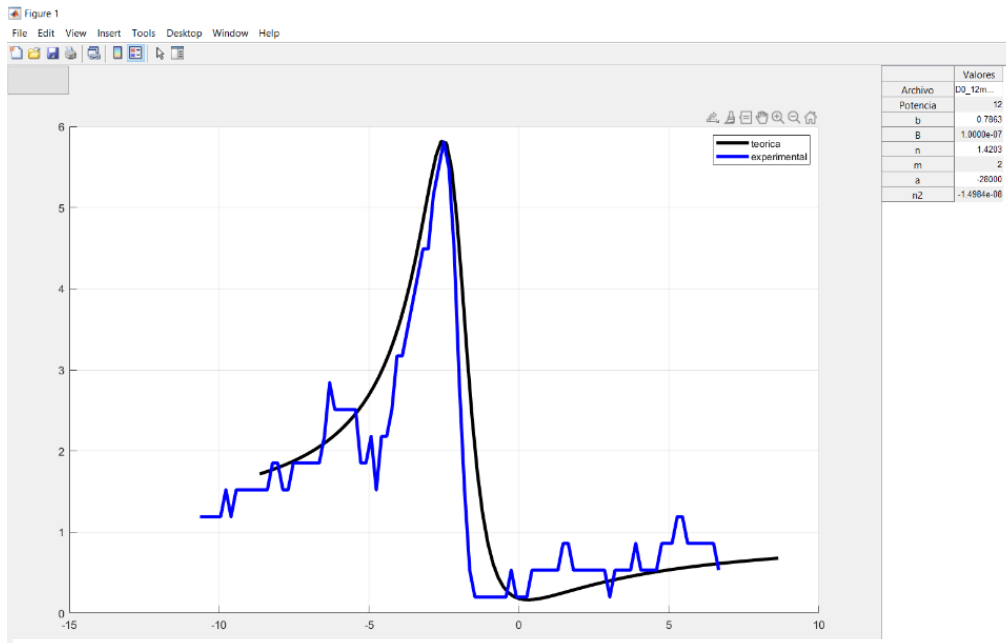


Figura 5. Resultados de Z-Scan a 12 mW, mostrando la comparación entre los datos experimentales (línea azul) y la curva teórica (línea negra).

En la figura 6, se muestran los resultados de Z-Scan a 16 mW aquí observamos todavía un buen ajuste, pero la curva experimental muestra en el pico máximo una oscilación debido a un fuerte efecto de cambio de fase.

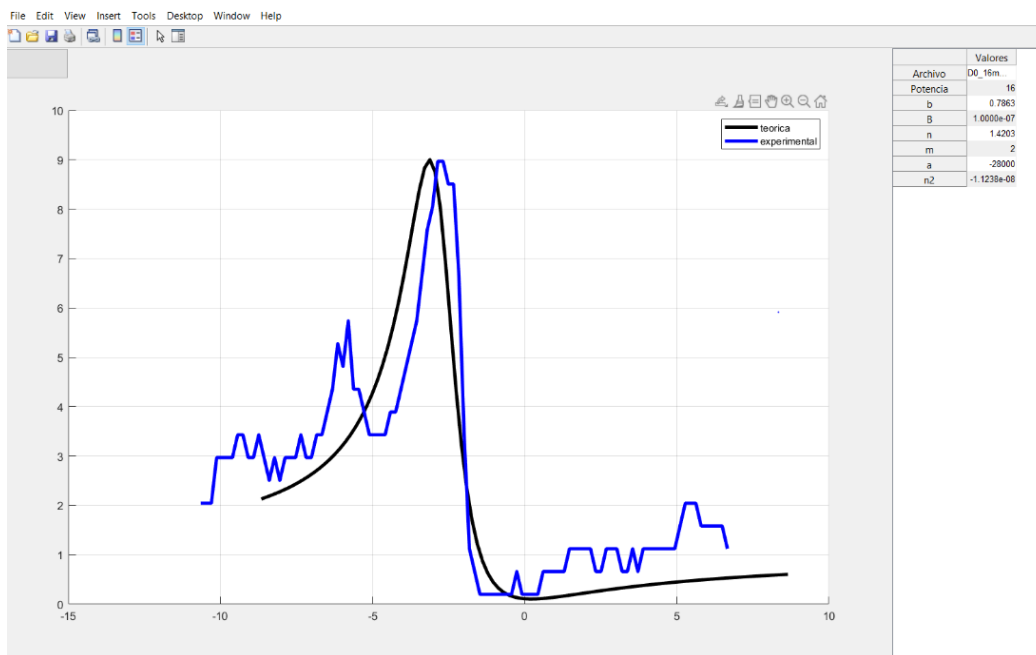


Figura 6. Resultados de Z-Scan a 16 mW, mostrando la comparación entre los datos experimentales (línea azul) y la curva teórica (línea negra).

En la figura 7, se muestra la curva de Z-Scan a 16mW, pero de la muestra de *Hibiscus Sabdariffa*. Observamos el comportamiento típico de Z-Scan a esta potencia, pero a potencias menores no se observa un comportamiento de no linealidad.

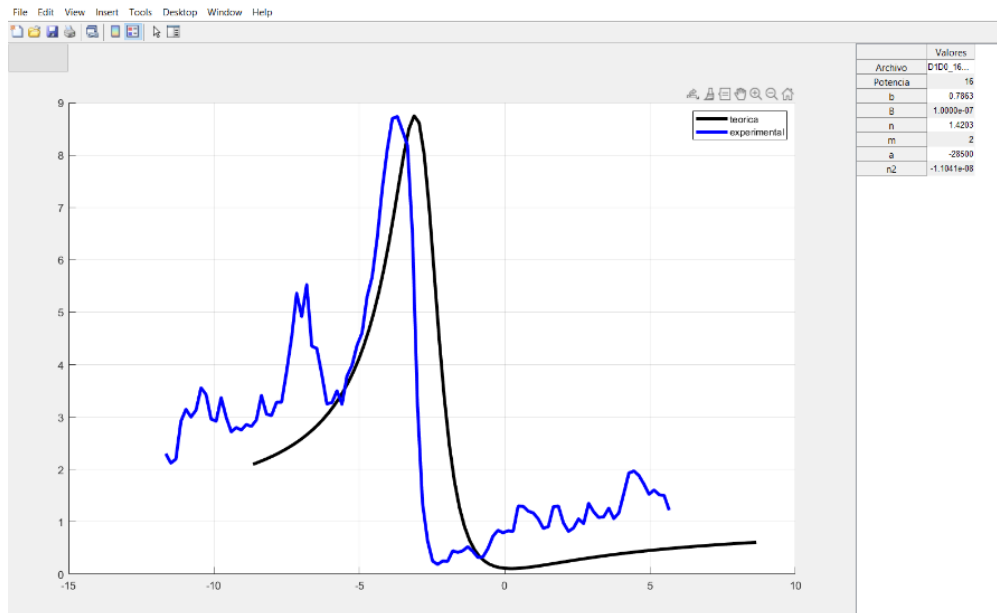


Figura 7. Resultados de Z-Scan a 16 mW, mostrando la comparación entre los datos experimentales (línea azul) y la curva teórica (línea negra).

En la tabla 1, se muestran los resultados del índice de refracción no lineal dependiente de la potencia

Tabla 1. Índices de refracción no lineal de las muestras.

Muestra líquida	Potencia (mW)	Índice de refracción no lineal (cm ² /W)	Absorción no lineal (cm/W)
Buganvilia (<i>Bougainvillea glabra choisy</i>)	9	-1.99778 ⁻⁸	2.8 ⁴
	12	-1.4984 ⁻⁸	2.8 ⁴
	16	-1.1238 ⁻⁸	2.8 ⁴
Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i>)	16	-1.1041 ⁻⁸	2.85 ⁴

Tabla 2. Índices de refracción lineal de las muestras.

Muestra líquida	Índice de refracción lineal
Bugainvilia (<i>Bougainvillea glabra choisy</i>)	1.3635
Jamaica (<i>Hibiscus sabdariffa</i>)	1.3444

En la tabla 2 se muestran los índices de refracción lineales de *Bougainvillea glabra choisy* ($n=1.3635$), y de la *Hibiscus Sabdariffa* ($n=1.3444$), esas mediciones fueron realizadas con el refractómetro de Abbe, como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Refractómetro Abbe.

Estudio de anillos de Auto-Difracción

Finalmente, realizamos un estudio de anillos de auto difracción. En la figura 9 se muestra el patrón de anillos formado a 1 mW; a esta potencia no es notorio el efecto de formación de anillos. Cuando incrementamos la potencia a 2 mW tienden a formarse 4 anillos, lo cual nos indica que el material, está auto modulando la fase del haz. En la figura 9c, aumenta aún más el número de anillos hasta que dificulta su conteo, siendo estos más nítidos en la parte externa y en la interna donde se saturan por una alta intensidad, esto significa que la fase es muy grande y se ve reflejado en el aumento del índice de refracción no lineal, ya que son directamente proporcionales^{7,9}.

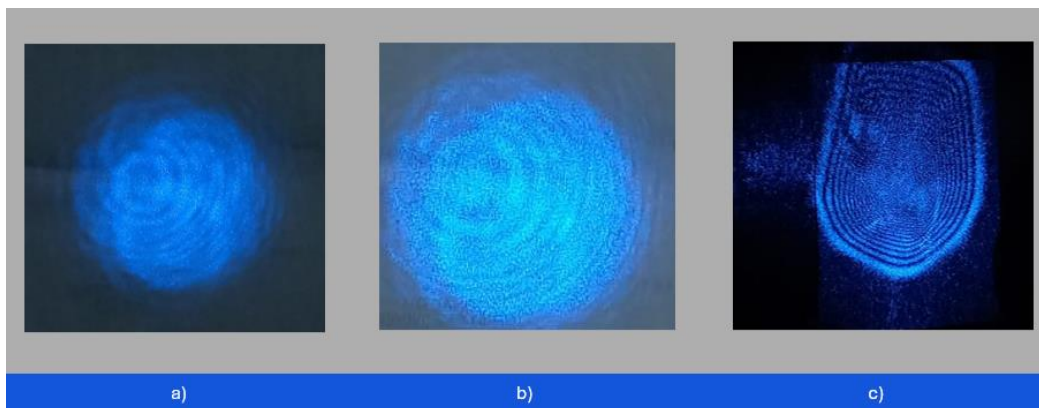


Figura 9. Anillos de Auto- Difracción para: a) 1 mW, b) 2 mW y c) 10 mW.

Conclusiones

En este estudio, se analizaron las propiedades ópticas no lineales de las películas de *Gelita Bloom* combinadas con los materiales orgánicos *Bougainvillea glabra Choisy* e *Hibiscus sabdariffa* mediante la técnica Z-scan y el modelo de lente térmica. Los resultados obtenidos muestran que el índice de refracción no lineal es significativo en ambos materiales, notando una dependencia en función de la temperatura.

Para la *Bougainvillea glabra Choisy*, se observó un buen ajuste entre los datos experimentales y el modelo teórico de lente térmica a diferentes potencias del láser continuo, lo cual confirma su capacidad de auto-desenfocamiento no lineal, siendo del orden de 10^{-8} lo que nos indica una no linealidad alta.

En el caso de *Hibiscus sabdariffa*, los resultados también indican una respuesta óptica no lineal, a potencias menores no observamos comportamiento no lineal. A 16 mW, se observó un comportamiento típico de Z-Scan con auto-desenfocamiento, mostrando un índice de refracción no lineal del orden de 10^{-8} , lo que sugiere su aplicabilidad en tecnologías de detección y modulación óptica.

Estos hallazgos subrayan la viabilidad de utilizar materiales orgánicos accesibles y económicos en tecnologías avanzadas de óptica no lineal, como guías de onda, interruptores ópticos y sensores térmicos. El éxito de este estudio abre nuevas posibilidades para la implementación de materiales orgánicos en aplicaciones de alta tecnología, fomentando una mayor exploración y desarrollo en el campo de la óptica no lineal.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por el proyecto DAIP #073/2024, "Estudio óptico no lineal Z-scan de la influencia de la concentración en líquidos tricatiónicos".

Referencias

- Joshi, M. P. (2015). Basics of Nonlinear Optics. In: Gupta, P., Khare, R. (eds) Laser Physics and Technology: Proceedings of the school on laser physics & technology 160. 27-64. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2000-8>
- He, G. S. (2014). Nonlinear Optics and Photonics. pp. (1-17). Oxford University Press.
- Li, C. (2018). Nonlinear optics: Principles and applications. Springer pp. (1-20).
- Garmire, E. (2013). Nonlinear optics in daily life. Optics Express, 21(25), 30532–30544. <https://doi.org/10.1364/OE.21.030532>.
- Severiano-Carrillo, I., Alvarado-Méndez, E., Trejo-Durán, M., & Méndez-Otero, M. M. (2017). Improved Z-scan adjustment to thermal nonlinearities by including nonlinear absorption. Optics Communications, 397, 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.03.073>
- Sheik-Bahae, M., Said, A. A., Wei, T.-H., Hagan, D. J., & Van Stryland, E. W. (1990). Sensitive measurement of optical nonlinearities using a single beam. IEEE Journal of Quantum Electronics, 26(4), 760–769. <https://doi.org/10.1109/3.53394>
- Argüello-Sarmiento, G., Ortiz-Gutiérrez, M., Trejo-Durán, M., Andrade-Lucio, J. A., Castellanos-Águila, J. E., & Alvarado-Méndez, E. (2023). Nonlinear optical properties in organic fish gelatin, potassium dichromate, and organic-inorganic mix. Journal of Molecular Liquids, 383(122058), 122058. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122058>
- Boyd, R. W. (1991). Nonlinear Optics. Academic Press. (pp. 1-16).
- Cano-Lara, M., Severiano-Carrillo, I., Trejo-Durán, M., & Alvarado-Méndez, E. (2017). Evolution of diffraction and self-diffraction phenomena in thin films of Gelite Bloom/Hibiscus Sabdariffa. Journal of Modern Optics, 64(17), 1793–1799. <https://doi.org/10.1080/09500340.2017.1318965>