

# LUZ ABSORBIDA Y DISPERSADA POR NANOPARTÍCULAS DE ORO: EL EFECTO DE LA POROSIDAD

Autores: Ana Lilia González - Ronquillo, Alejandro Ramos Romero

## Resumen

Las nanopartículas de oro ofrecen nuevas posibilidades en medicina, ya que pueden transportar fármacos de forma controlada y funcionar simultáneamente en diagnóstico y tratamiento, un enfoque llamado teranóstico. Su comportamiento está estrechamente ligado a cómo interactúan con la luz. En este trabajo explicamos, de manera accesible, por qué las nanopartículas de oro porosas resultan especialmente prometedoras. Analizamos tres casos: una nanopartícula sólida, una parcialmente porosa y una completamente porosa y hueca. Mediante simulaciones numéricas mostramos que la porosidad influye significativamente en la cantidad de luz que la nanopartícula puede absorber y dispersar. También encontramos que características como la profundidad de los poros y el material que los rellena (por ejemplo, aire o agua) modifican su respuesta óptica. En particular, la respuesta espectral de las nanopartículas porosas presenta un desplazamiento hacia el rojo respecto de las sólidas. Sustituir aire por agua dentro de los poros produce, además, cambios adicionales en esta respuesta. Otro resultado relevante es la aparición de "puntos calientes", regiones donde el campo eléctrico se intensifica notablemente, tanto en la superficie como dentro de los poros. Esto sugiere que moléculas alojadas en estos espacios pueden experimentar campos electromagnéticos muy intensos. Estos hallazgos ayudan a comprender y optimizar el diseño de nanopartículas para aplicaciones biomédicas y ópticas.

## Palabras claves

Nanopartícula de oro, porosidad, absorción de luz, dispersión de luz, campo eléctrico, simulación numérica.

## Introducción

Antes de continuar con la lectura, invitamos al lector a revisar el Glosario de términos que se encuentra después de la sección de conclusiones.

Una nanopartícula (NP) es aquella porción de material cuyo largo, ancho y alto mide entre 1 y 100 nanómetros (nm). A esta escala, las nanopartículas (NPs) hechas de oro (Au) presentan propiedades fisicoquímicas que comúnmente no se ven a escala macroscópica. Por ejemplo, las NPs de oro presentan propiedades bactericidas (Méndez-Pfeiffer et al., 2019) y catalíticas que el oro en *bulk* no tiene. Por otro lado, una NP de oro ya no se aprecia de color dorado: si tiene forma cúbica, tiende a reflejar tonalidades verdes, mientras que en forma de octaedro adquiere tonos rojizos o anaranjados (Tao et al., 2006).

Hoy en día es posible fabricar NPs con formas muy variadas, como esferas, cubos, octaedros, prismas triangulares, estrellas o estructuras huecas, entre otras. Cada geometría modifica su interacción con la luz y, por ello, también sus posibles aplicaciones. Gracias a estas propiedades, las NPs de Au han despertado interés en medicina, biología, química, electrónica, ciencia e ingeniería de materiales, entre otras.

Las NPs de oro sólidas son las más estudiadas, le siguen las estructuras núcleo-capa y luego, las NPs huecas o porosas. Estas últimas destacan por su potencial en la liberación controlada de fármacos, detección de virus (Rad et al., 2025) o moléculas (Li et al., 2011), plataformas para inmunoensayos, terapias contra el cáncer (Cun et al., 2025), terapias contra agentes patógenos (Wu et al., 2021) entre otros. Las NPs porosas y huecas se proponen

principalmente como componentes de supercapacitores electroquímicos (Bahar & Ekinci, 2020), componentes de inmunosensores (Romportong et al., 2025), o para aplicaciones teranósticas (terapia y diagnóstico) contra el cáncer (Shen et al., 2012).

Gracias al perfeccionamiento de las técnicas de fabricación, hoy es posible producir NPs esféricas de oro con tamaño entre 100 nm y 500 nm de diámetro, con poros muy profundos cuyo diámetro mide algunas decenas de nanómetros (Kosinova et al., 2016; Kosinova et al., 2017). Sin embargo, uno de los principales retos actuales sigue siendo garantizar su estabilidad física y química (Valencia et al., 2020).

La respuesta de una NP porosa difiere de la de su contraparte sólida, incluso cuando ambas tienen el mismo tamaño y forma. En particular, las NPs de oro porosas muestran una mayor absorción de luz en el infrarrojo, lo que las convierte en una opción especialmente atractiva para diversas aplicaciones en biomedicina.

En las siguientes secciones se explican, de manera accesible, los conceptos básicos necesarios para entender por qué las NPs de Au porosas resultan tan atractivas cuando interactúan con la radiación electromagnética. Después se describe el modelo empleado para representarlas y, finalmente, se analizan los resultados de las simulaciones numéricas, incluyendo la eficiencia de absorción y dispersión de luz, además de la distribución de los llamados puntos calientes.

## Interacción de una NP con una onda electromagnética

Pensemos en tres situaciones hipotéticas particulares.

Situación A) Luz proveniente del

Sol (la fuente de luz) que atraviesa una ventana de vidrio (obstáculo). Nosotros (el observador) estamos del otro lado de la ventana. La experiencia diaria nos dice que podemos ver a través de la ventana, lo cual indica que ese vidrio dejó pasar gran parte de la luz que pueden captar nuestros ojos. A este proceso se le llama *transmisión óptica*.

Situación B) El obstáculo entre el Sol y nosotros es una pared. En este caso, no podemos ver lo que hay del otro lado, porque la luz no logra atravesarla. La mayor parte de la luz fue retenida por la pared, fenómeno conocido como *absorción óptica*.

Situación C) Finalmente, consideremos un espejo. Aquí, la luz que incide sobre la superficie es devuelta casi en su totalidad, lo que nos permite ver imágenes. Este proceso se conoce como *reflexión óptica*.

Estas tres situaciones son ejemplos de materiales que transmiten toda la luz, o absorben toda, o reflejan toda.

Existen materiales que debido a su composición “seleccionan” el tipo de luz que reflejan, absorben o transmiten. Un ejemplo claro es una manzana de cáscara roja. Cuando la luz blanca incide sobre ella, la luz roja es reflejada y captada por nuestras pupilas, el resto de los colores que componen el *espectro electromagnético (EM)* visible es absorbido o dispersado.

La luz visible constituye solo un pequeño conjunto de todas las ondas que forman el espectro EM. Así que, las preguntas que nos planteamos son ¿Qué pasa con una onda EM, caracterizada por una *longitud* de onda particular, cuando incide sobre una NP de oro porosa?, la cantidad de luz absorbida y dispersada por ella ¿será diferente de aquella de una NP de oro sólida?.

En las tres situaciones planteadas

anteriormente, el “obstáculo” era una superficie plana. En esos casos, se emplean los conceptos de reflexión, absorción y transmisión. Por otro lado, cuando la luz u onda EM incide sobre una NP de cualquier forma y tamaño, se dice que la luz puede ser *absorbida y/o dispersada*. Esta última, involucra la luz reflejada y transmitida por toda la superficie de la NP. Además, a la suma de la luz absorbida más la dispersada se le conoce como la luz extinguida (Bohren & Huffman, 2008). La figura 1, ilustra el fenómeno de absorción y dispersión (o esparcimiento) de luz por una NP.

Figura 1.

Interacción de luz con una partícula esférica



**Nota.** Parte de la luz que incide sobre una NP de Au puede ser absorbida. El resto será dispersada o esparcida en todas direcciones. Figura de elaboración propia.

### Simulación numérica de una nanoesfera de oro porosa

Para hallar la respuesta a las preguntas planteadas en la sección anterior, existen varios caminos. Uno de ellos es la realización de *simulaciones numéricas*. La simulación numérica de una situación específica también llamado experimento numérico es una herramienta auxiliar para representar la realidad desde otro ángulo. A través de modelos matemáticos, se pueden recrear situaciones, con ayuda de programas computacionales, que después se comparan o complementan con experimentos en un laboratorio. De esta manera, la simulación numérica

no reemplaza a los experimentos, sino que los enriquece, permite explorar hipótesis antes de llevarlos a la práctica. Además, es una herramienta auxiliar para la obtención de relaciones entre variables de un sistema. En conjunto, los experimentos de laboratorio y las simulaciones numéricas forman un equipo poderoso para acelerar la identificación de tendencias o comportamientos de las variables, para luego hacer pruebas de predicciones que llevarán al resultado final del aprendizaje del comportamiento de un sistema. Todo ello nos permite comprender fenómenos complejos con mayor profundidad.

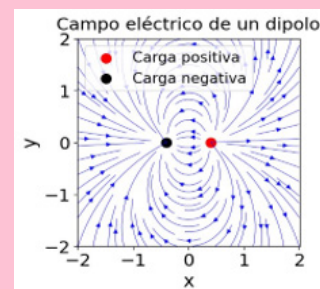
El código computacional que utilizamos para simular numéricamente las propiedades ópticas – en particular, las eficiencias de absorción y dispersión– de una nanoesfera porosa es DDSCAT, en su versión 7.3. Este código está basado en la llamada aproximación de dipolo discreto (DDA, por sus siglas en inglés), un método que representa la partícula mediante un conjunto de dipolos eléctricos puntuales que reproducen su interacción con la radiación (Draine 1988; Draine & Flatau, 1994).

Para comprender mejor la base conceptual de la DDA, es necesario entender qué es un dipolo puntual. Empecemos por la definición de un dipolo eléctrico físico (Griffiths, 2024; Jackson, 1998). Se trata de una pareja de cargas, una positiva y una negativa, separadas entre sí. Cada carga emite su propio campo eléctrico. El campo eléctrico de la carga positiva se representa con flechas que salen de ésta, mientras que el de la carga negativa se representa con flechas que entran en ella. En la figura 2, se muestran las líneas de campo eléctrico del dipolo físico. El dipolo se caracteriza por tener un momento dipolar que tiene

magnitud y dirección. Su magnitud es el producto de la carga por la distancia de separación. Su dirección va desde la carga negativa hacia la positiva.

Figura 2.

Campo eléctrico de un dipolo físico



**Nota.** El dipolo se compone de una carga positiva (representada en color rojo) y una carga negativa (representada en color negro) separadas cierta distancia. Las líneas del campo eléctrico salen de la carga positiva y entran a la carga negativa. Figura de elaboración propia.

Un *dipolo eléctrico puntual* es un modelo idealizado en el que las cargas se consideran puntuales, es decir, tan pequeñas que no ocupan espacio. Al mismo tiempo, la magnitud de sus cargas se considera muy grande, tendiendo a ser infinita. Además, la distancia de separación entre las cargas se hace muy pequeña, tendiendo a cero. De esta manera, el momento dipolar se mantiene finito. Las líneas de campo eléctrico de un dipolo puntual son muy parecidas a las de un dipolo físico visto desde una distancia muy lejana.

Regresando a la idea base de la DDA. La partícula objeto de estudio se representa por un conjunto de dipolos puntuales separados entre sí una distancia muy pequeña en comparación con la *longitud de onda* de la luz incidente. El número de dipolos que se utiliza para modelar la partícula depende de su forma. En la figura 3, se muestra una partícula representada con un número diferente de dipolos. En las figuras 3a) y 3b)

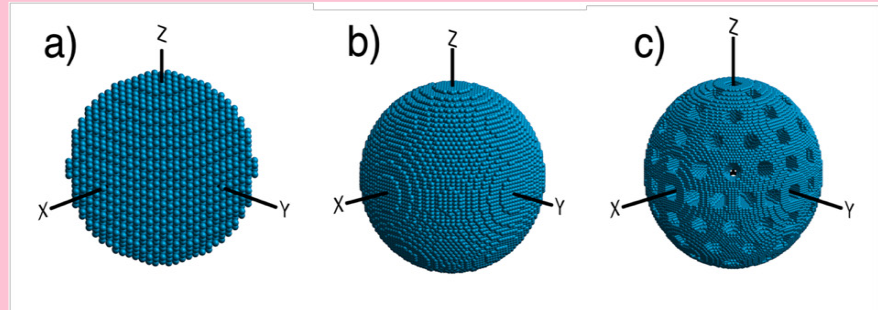
se muestra una esfera con 4,224 y 65,752 dipolos, respectivamente. Se puede observar que la superficie de la esfera se define mejor cuando se utiliza un gran número de dipolos. Sin embargo, al aumentar la cantidad de dipolos también aumenta el tiempo de cálculo computacional. Este es el precio que hay que pagar para obtener una representación más precisa de la partícula, garantizar convergencia de los resultados y mejorar la predicción de la respuesta óptica.

En la figura 3c), se observa un arreglo de 168,644 dipolos representando una esfera porosa. En este modelo, los poros tienen forma de paraboloide, además, están distribuidos de manera uniforme y radial. Esto último indica que la punta del paraboloide apunta hacia el centro de la esfera.

En la simulación numérica se considera que incide radiación EM (luz) sobre el conjunto de dipolos. Una onda EM se caracteriza por su longitud de onda. Por ejemplo, la luz roja tiene una longitud de onda de entre 650 nm y 700 nm, mientras que la luz azul la tiene de entre 380 nm y 500 nm. Cuando los

Figura 3.

Representación de una esfera por un arreglo de dipolos puntuales



Nota. Cada dipolo puntual está plasmado como una pequeña esferita. En a) y b) hay 4,224 y 65,752 dipolos, respectivamente, representando una esfera sólida. En c) hay 168,644 dipolos representando una esfera porosa. Figura de elaboración propia.

dipolos interactúan con esta radiación, el campo eléctrico de cada dipolo también oscila. En otras palabras, el dipolo responde a la radiación EM modificando la magnitud y dirección de su momento dipolar de manera periódica, generando a su vez radiación. La radiación emitida por cada dipolo puede sumarse o restarse a la radiación incidente y a la emitida por los otros dipolos.

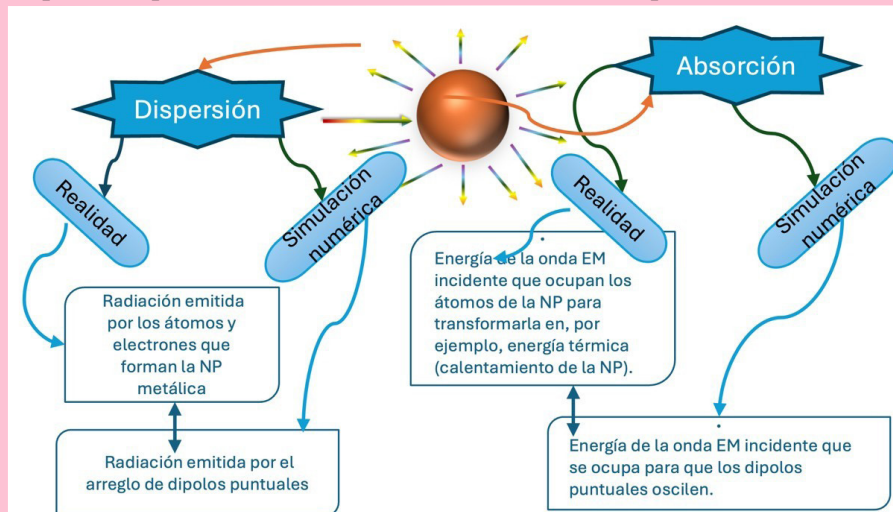
El código computacional DDSCAT calcula el campo eléctrico generado tanto en el interior de la NP como en sus inmediaciones. Además, el código también permite calcular el campo

eléctrico en regiones muy alejadas de la NP, lo que lleva a determinar su eficiencia de absorción y dispersión de la luz. A estas cantidades, es decir, a la eficiencia de absorción y dispersión, se les clasifica como propiedades de campo lejano.

Como se mencionó al inicio de esta sección, la simulación numérica de una situación real permite representarla desde otro punto de vista para facilitar su estudio. En la figura 4, mostramos un mapa mental donde se compara la realidad (interacción de luz con una NP) con la simulación numérica (interacción de una onda EM con un arreglo de dipolos puntuales).

Figura 4.

Mapa mental para ilustrar la interacción de la luz con la nanopartícula



Nota. Se ilustra la diferencia entre la situación real y la simulación numérica, además de su interpretación. Figura de elaboración propia.

## Resultados

A continuación, presentamos la respuesta óptica de tres NPs representativas de Au:

- 1) Esfera sólida.
- 2) Esfera parcialmente porosa: La profundidad de los poros llega a la mitad de la esfera.
- 3) Esfera porosa hueca: La profundidad de los poros llega hasta el centro de la esfera.

En cuanto a las especificaciones técnicas, cada NP tiene un tamaño de 200 nm, mientras que el diámetro de cada poro en la superficie es de 20 nm. Para las simulaciones se usaron alrededor de  $2 \times 10^5$  dipolos. Además, se consideró un rango de longitudes de onda de la onda EM entre 380 nm y 780 nm, con el objetivo de cubrir todo el espectro visible.

En la figura 5 se comparan las curvas espectrales de dispersión y absorción de tres tipos de nanopartículas: una sólida (líneas continuas de color verde), una parcialmente porosa (líneas continuas de color naranja) y una porosa y hueca (líneas continuas de color azul). Estas curvas muestran cómo interactúa cada NP con la luz a lo largo del espectro visible, desde el violeta hasta el rojo.

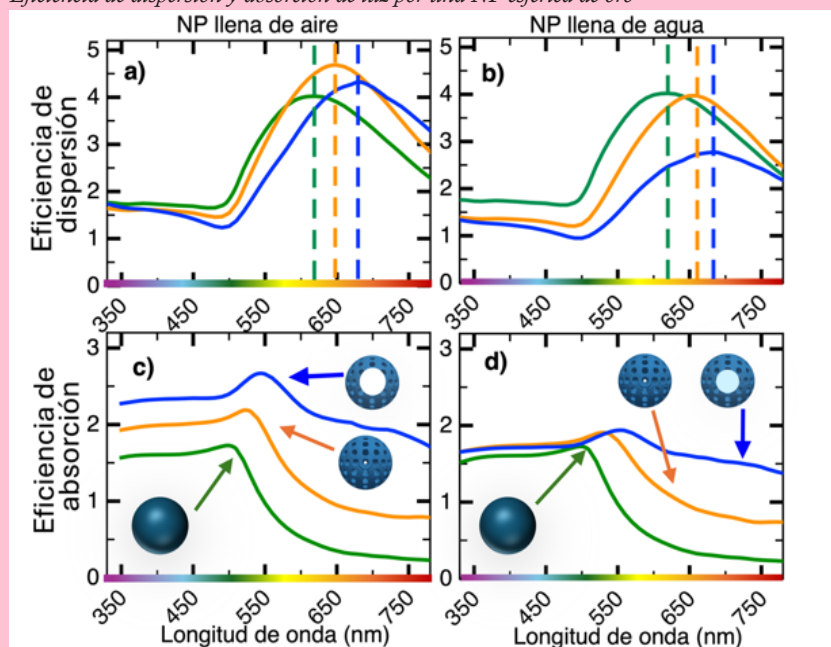
Se observa que la respuesta óptica es más intensa cuando los poros están llenos de aire (paneles 5a y 5c) que cuando están ocupados por agua (paneles 5b y 5d). Esto indica que

el material dentro de los poros influye en la forma en que la nanopartícula absorbe y dispersa la luz, lo que a su vez puede modificar ligeramente el color que percibimos en cada caso.

Todas las NPs muestran una alta capacidad para dispersar luz en el rango que va del verde al rojo (ver panel 5a) y 5b). Esto indica que, al iluminar cualquiera de las NPs de oro con luz blanca, el color que percibimos es una mezcla de tonos verdes, amarillos y rojos. Sin embargo, no todas se ven exactamente iguales, se espera que las NPs presenten diferencias de tonalidad, debido a que cada una dispersa la radiación electromagnética de forma distinta. Estas variaciones están relacionadas con qué tan intensa es la dispersión y con qué tan amplia es la región del espectro en la que ocurre.

Por ejemplo, la NP de Au sólida dispersa principalmente longitudes de onda cercanas a 620 nm (línea punteada de color verde en los paneles 5a) y 5b), asociadas con tonalidades amarillentas. En cambio, la NP de Au parcialmente porosa intensifica la dispersión en la región correspondiente a tonos amarillo-naranja (línea punteada de color naranja), mientras que la NP de Au porosa y hueca dispersa con mayor intensidad en la región asociada con tonos naranja-rojo (línea azul punteada). Como resultado, cada una presenta un matiz característico dentro de la misma gama de colores.

**Figura 5.**  
Eficiencia de dispersión y absorción de luz por una NP esférica de oro



**Nota.** Las líneas de color verde corresponden a la NP sólida, las de color naranja a la NP parcialmente porosa, y las de color azul a la NP porosa y hueca. Figura de elaboración

El desplazamiento hacia el rojo también se aprecia en las curvas de absorción (ver panel 5c) o 5d). Este efecto se observa con mayor claridad al comparar la posición del máximo de cada curva. Para la NP sólida, la parcialmente porosa y la porosa hueca con poros llenos de aire, los máximos se encuentran aproximadamente en 498 nm, 521 nm y 544 nm, respectivamente.

En otras palabras, a medida que aumenta la porosidad de la nanopartícula, la absorción de luz se desplaza progresivamente hacia longitudes de onda mayores. Un comportamiento similar se presenta cuando los poros están llenos de agua, lo que confirma que esta tendencia es una característica general del sistema.

El máximo en las curvas de absorción (Figuras 5c) y 5d) está asociado con un fenómeno conocido como resonancia del plasmón de superficie (RPS). A esta longitud de onda, donde se da el máximo, los electrones libres o de conducción de la NP metálica oscilan a la misma frecuencia que la del campo incidente, lo que produce una absorción particularmente intensa. Además, debido al tamaño nanométrico de la NP, una gran parte de esos electrones se concentran cerca de su superficie. Por esta razón, el fenómeno recibe el nombre de “plasmón de superficie”, ya que la respuesta electrónica ocurre principalmente en esa región.

Una propiedad clave de los plasmones de superficie en NPs es que pueden generar regiones donde el campo eléctrico se intensifica notablemente. Estas zonas se conocen como

puntos calientes.

En la figura 6, se muestra la magnitud del campo eléctrico de la NP sólida (figura 6a) y de la parcialmente porosa (figura 6b). El plano corresponde a un corte por la mitad de cada esfera, lo que permite observar su interior. En ambos casos, los cálculos se realizaron usando la longitud de onda a la que ocurre la RPS.

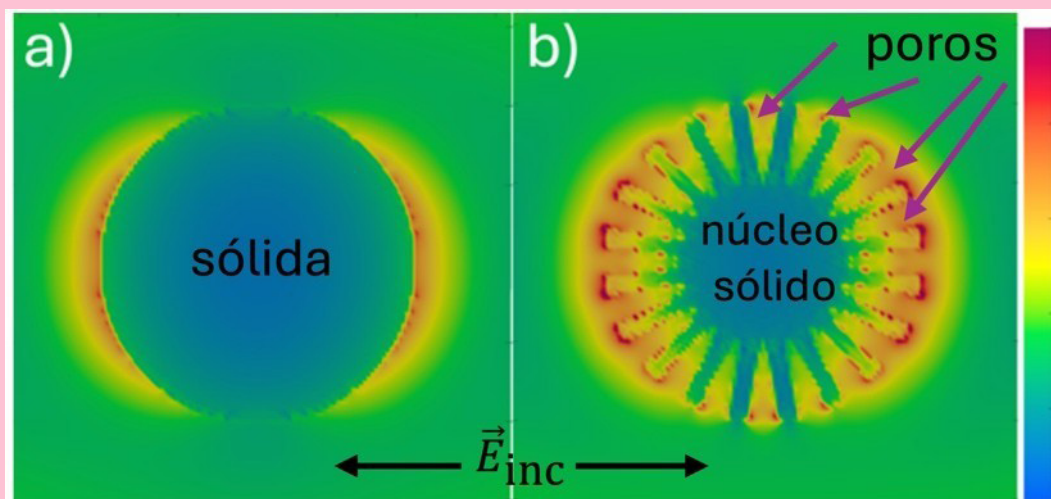
Los colores indican la intensidad del campo eléctrico: las regiones en rojo corresponden a los valores más altos (puntos calientes), mientras que las zonas en azul representan los más bajos. Los tonos intermedios entre azul y rojo, corresponden a valores intermedios de la magnitud del campo eléctrico.

En la NP sólida (figura 6a), los puntos calientes están distribuidos principalmente en la superficie y en los extremos de la esfera. Esta distribución se conoce como el plasmón de superficie dipolar. Ello se debe a que en un extremo hay acumulación de carga negativa y en el otro extremo acumulación de carga positiva.

En cambio, la NP parcialmente porosa (figura 6b) presenta una mayor cantidad de puntos calientes. Además de aparecer en la superficie, también se forman dentro de la NP, justo en las zonas de los poros. Esta intensificación del campo en el interior hace que este tipo de estructuras sea especialmente útil en aplicaciones como la detección de moléculas, el transporte de fármacos y estrategias teranósticas para el tratamiento de enfermedades.

**Figura 6.**

*Campo eléctrico dentro de una NP esférica*



*En a) la NP de oro es sólida y la luz que incide sobre ella tiene una longitud de onda de 498 nm. En b) la NP es parcialmente porosa y la longitud de onda de la luz incidente es de 521 nm. En b), los poros están llenos de aire. Figura de elaboración propia.*

## Conclusiones

A partir de simulaciones numéricas, mostramos cómo cambia la respuesta óptica entre nanopartículas de oro sólidas y porosas. Un resultado destacado es que, al iluminar una nanopartícula sólida con luz blanca, esta refleja tonalidades principalmente amarillas. En cambio, una nanopartícula parcialmente porosa presenta tonos entre amarillo y naranja, mientras que una porosa y hueca tiende a reflejar colores más cercanos al naranja-rojo.

Además, el material que llena los poros influye de manera importante en su comportamiento óptico. Cuando los poros están llenos de aire, las eficiencias de absorción y dispersión son mayores que cuando están ocupados por agua.

Por último, las regiones donde el campo electromagnético se intensifica —los llamados puntos calientes— no solo se localizan en la superficie de las nanopartículas porosas, sino también en el interior de sus poros. Esta característica las convierte en candidatas prometedoras para aplicaciones como la detección de gases o líquidos contaminantes.

## Glosario de término

**Curva espectral o espectro.** Se trata de una representación gráfica que muestra cómo interactúa una muestra de material con la radiación electromagnética. Por lo general, en el eje horizontal se representa la longitud de onda en nanómetros o la frecuencia de la onda y, en el eje vertical, la magnitud física relacionada con la interacción de la luz, como por ejemplo la reflectancia o transmitancia, entre otras.

**Espectro electromagnético.** Rango completo de todas las radiaciones electromagnéticas clasificadas según su longitud de onda o frecuencia, desde ondas de radio hasta rayos gamma.

**Espectro óptico.** Parte del espectro electromagnético que corresponde a la luz visible, es decir, las longitudes de onda que el ojo humano puede percibir (aproximadamente entre 380 y 750 nm).

**Longitud de onda.** Distancia entre dos puntos equivalentes y consecutivos de una onda (como cresta a cresta o valle a valle), que caracteriza la periodicidad espacial de la onda.

**Material en bulto.** Porción de un material cuyo largo, ancho y alto son de un tamaño tal que las propiedades del material no dependen de su volumen ni de los llamados efectos de superficie.

**Nanómetro.** Unidad de medida que equivale a una mil millonésima parte del metro.

**Onda electromagnética.** Perturbación oscilatoria que transporta energía a través del espacio. Formada por un campo eléctrico y otro magnético, perpendiculares entre sí, y a la dirección de propagación.

## Referencias

Bahar, N., & Ekinici, D. (2020). Hollow porous gold nanoparticle/reduced graphene oxide composite films for electrochemical supercapacitor applications. *Electrochimica Acta*, 337, 135844. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.135844>

Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (2008). *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons.

Cun, F., Chen, J., Li, H., Kou, Y., Wang, M., Li, X., Chen, H., & Kong, J. (2025).

Cun, F., Chen, J., Li, H., Kou, Y., Wang, M., Li, X., Chen, H., & Kong, J. (2025). Mesoporous Gold Nanospheres Confined Platinum Nanoclusters as Robust ROS and Oxygen Nanogenerators for NIR-II Hyperthermia Cancer Therapy. *Advanced Science*, 12(28), 2502688. <https://doi.org/10.1002/advs.202502688>

Draine, B. T. (1988). The discrete-dipole approximation and its application to interstellar graphite grains. *The Astrophysical Journal*, 333, 848. <https://doi.org/10.1086/166795>

Draine, B. T., & Flatau, P. J. (1994). Discrete-Dipole approximation for scattering calculations. *Journal of the Optical Society of America A*, 11(4), 1491. <https://doi.org/10.1364/josaa.11.001491>

Griffiths, D. J. (2024). *Introduction to electrodynamics* (5th ed.). Cambridge University Press.

Jackson, J. D. (1998). *Classical electrodynamics* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Kosinova, A., Wang, D., Schaaf, P., Kovalenko, O., Klinger, L., & Rabkin, E. (2016). Fabrication of hollow gold nanoparticles by dewetting, dealloying and coarsening. *Acta Materialia*, 102, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.09.024>

Kosinova, A., Wang, D., Baradacs, E., Parditka, B., Kups, T., Klinger, L., Erdelyi, Z., Schaaf, P., & Rabkin, E. (2017). Tuning the nanoscale morphology and optical properties of porous gold nanoparticles by surface passivation and annealing. *Acta Materialia*, 127, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.01.01>

Li, J., Yuan, R., Chai, Y., Che, X., Li, W., & Zhong, X. (2010). Nonenzymatic glucose sensor based on a glassy carbon electrode modified with chains of platinum hollow nanoparticles and porous gold nanoparticles in a chitosan membrane. *Microchimica Acta*, 172(1-2), 163-169. <https://doi.org/10.1007/s00604-010-0485-z>

Méndez-Pfeiffer, P. A., Urzúa, L. S., Sánchez-Mora, E., González, A. L., Romo-Herrera, J. M., Arciniega, J. J. G., & Morales, L. J. M. (2019). Damage on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* using white light photoactivation of Au and Ag nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 125(21). <https://doi.org/10.1063/1.5090273>

Rad, M. B., Mohebbi, S. R., Yadegar, A., & Ghourchian, H. (2025). Porous GNPs assisted LAMP-CRISPR/Cas12a amperometric biosensor as a potential point of care testing system for SARS-CoV-2. *Microchimica Acta*, 192(5). <https://doi.org/10.1007/s00604-025-07094-0>

Rompontong, S., Khumngern, S., Nontipichet, N., Tuntiwongmetee, T., Thavarungkul, P., Kanatharana, P., Sangthawan, P., & Numnuam, A. (2025). Hollow porous AuNPs decorated on Pty and MB-coated rGO-COOH for a highly sensitive label-free electrochemical cystatin-C immunosensor for chronic kidney disease assessment. *Electrochimica Acta*, 146304. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.146304>

Shen, H., You, J., Zhang, G., Ziemys, A., Li, Q., Bai, L., Deng, X., Erm, D. R., Liu, X., Li, C., & Ferrari, M. (2012). Cooperative, Nanoparticle-Enabled Thermal Therapy of Breast Cancer. *Advanced Healthcare Materials*, 1(1), 84-89. <https://doi.org/10.1002/adhm.201100005>

Tao, A., Sinsermsuksakul, P., & Yang, P. (2006). Polyhedral silver nanocrystals with distinct scattering signatures. *Angewandte Chemie-International Edition in English* 45(28), 4597. <https://doi.org/10.1002/anie.200601277>

Valencia, F. J., Ramírez, M., Varas, A., Rogan, J., & Kiwi, M. (2020). Thermal Stability of Hollow Porous Gold Nanoparticles: A Molecular Dynamics Study. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 60(12), 6204-6210. <https://doi.org/10.1021/acs.jcim.0c00785>

Wu, Q., Peng, R., Luo, Y., Cui, Q., Zhu, S., & Li, L. (2021). Antibacterial activity of porous gold nanocomposites via NIR light-triggered photothermal and photodynamic effects. *ACS Appl. Bio Mater.*, 4(6), 5071-5079. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c00318>

## AUTORES

Ana Lilia González - Ronquillo  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Instituto de física BUAP  
anagr@ifuap.buap.mx  
ORCID: 0000-0002-2573-4081

Alejandro Romero Ramos  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Instituto de física BUAP  
3cm.ramos.alejandro@gmail.com  
ORCID: 0009-0008-5687-2429