

Biosíntesis de nanopartículas de oro obtenidas a diferentes temperaturas y el efecto en su morfología

Biosynthesis of gold nanoparticles obtained at different temperatures and the effect on their morphology

Luisa Elena Silva-De Hoyos¹, Alfredo Rafael Vilchis-Néstor², José Luis García-Rivas³, Liliana Argueta-Figueroa^{4*}

Fecha de recepción: 23 de enero de 2024

Fecha de aceptación: 26 de abril de 2024

Resumen - La biosíntesis es un método "verde" en el cual se emplean extractos de origen vegetal como agente reductor y estabilizante de las nanopartículas (NPs). El tamaño y forma de las NPs dependen de factores como la concentración de agente reductor y de la sal precursora, el pH, la temperatura y el tiempo de reacción. El propósito del presente trabajo es la biosíntesis de nanopartículas de oro (NPs-Au) utilizando el extracto acuoso de *Citrus paradisi* para determinar el efecto de la temperatura de la reacción en su tamaño y morfología. Las NPs-Au obtenidas a 0°C exhibieron un tamaño de 7 nm y fueron esféricas; a 40°C tuvieron unas dimensiones de 7 nm, con morfologías esféricas y triangulares; y a 60°C, fueron de 22 nm y esféricas.

Abstract - Biosynthesis is a "green" method in which extracts of plant are used as reducing and stabilizing agents for nanoparticles (NPs). The size and shape of the NPs depend on factors such as the concentration of the reducing agent and the precursor salt, the pH, the temperature, and the reaction time. The purpose of this work was the biosynthesis of gold nanoparticles (Au-NPs) using the aqueous extract of *Citrus paradisi* to determine the effect of reaction temperature on their size and morphology. NPs-Au obtained at 0°C exhibited a size of 7 nm and were spheroidal; at 40°C, they had dimensions of 7 nm, with spherical and triangular morphologies; and at 60°C, they were 22 nm and spherical.

1 Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Toluca • Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México, México • luisa.sh@toluca.tecnm.mx • ORCID: 0000-0002-8511-2284.

2 UAEM-UNAM - Centro Conjunto de Investigación Química Sustentable (CCIQS) • Carretera Toluca-Atlacomulco km. 14.5, San Cayetano, C.P. 50200, Toluca, Estado de México, México • arvilchisn@uaemex.mx • ORCID: 0000-0001-8490-0900.

3 Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Toluca • Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México, México • jgarciar@toluca.tecnm.mx. • ORCID: 0000-0003-4849-7370.

4 Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Toluca • Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México, México • *Autora de correspondencia: liliana.af@toluca.tecnm.mx & Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHcyT) • Av. Insurgentes Sur No. 1582, Col. Crédito Constructor, Alc. Benito Juárez, C.P. 03940, Ciudad de México, México • liliana.argueta@conahcyt.mx • ORCID: 0000-0002-1044-6757.

Aún son necesarios más estudios para obtener partículas con morfología y tamaño más homogéneos.

Palabras claves: Química “verde”; temperatura de reacción; síntesis mediada por plantas; *citrus paradisi*; toronja; extracto acuoso.

More studies are still needed to obtain particles with more homogeneous morphology and size.

Keywords: “Green” chemistry; reaction temperature; plant mediated synthesis; *citrus paradisi*; pink grapefruit; aqueous extract.

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología es un término relativamente reciente y se refiere a la aplicación de tecnologías para solucionar los desafíos que tienen diferentes sectores como son la medicina, física, química y biología a través de la utilización de materiales en escala nanométrica (Panda & Deepa, 2011; Ahmed *et al.*, 2016 & Bayda *et al.*, 2020). Las nanopartículas (NPs) son un tipo de nanoestructuras que son relativamente fáciles de obtener por diversas rutas de síntesis y que pueden ser muy estables. Debido a sus características, la investigación actual pretende que se utilicen como materiales para aplicaciones concretas, ya que cuando se encuentran a escala nanométrica, éstos exhiben otras propiedades ópticas, magnéticas, eléctricas y biológicas que no poseen esos mismos materiales a mayor tamaño (Beyene *et al.*, 2017 & Patil & Chandrasekaran, 2020).

En la actualidad, existen tres métodos de síntesis de NPs, los químicos, los físicos y los biológicos. Sin embargo, las dos primeras metodologías utilizan reactivos tóxicos, generando subproductos peligrosos y, además, se requiere del uso de equipos costosos. Dado lo anterior, el uso de la síntesis biológica es la mejor alternativa para ayudar a la disminución de subproductos contaminantes. Cabe mencionar que este método de síntesis es amigable con el medio ambiente y cumple con los postulados de la *Química Verde* (Balalakshmi *et al.*, 2017; Noruzi, 2015; Patil & Chandrasekaran, 2020; Silva De Hoyos *et al.*, 2017; Slepíčka *et al.*, 2020 & Song & Kim, 2009).

La biosíntesis mediada por extractos de plantas (BMEP) es un tipo de síntesis biológica, en la que se utilizan extractos de plantas como agentes reductores y de protección, siendo, además, uno de los tipos de fabricación más económicos, ya que el proceso no requiere de una gran cantidad de infraestructura. La BMEP es considerada como una síntesis de un sólo paso y puede ser aplicada para la producción de NPs a gran escala (Ahmed *et al.*, 2016).

En la BMEP, los extractos acuosos de origen vegetal, obtenidos de plantas, árboles, cactáceas, suculentas, entre otros, son utilizados para la biosíntesis de NPs, ya que éstos contienen metabolitos como alcaloides, flavonoides, fenoles, azúcares y alcoholes, entre otros. Dichos metabolitos actúan reduciendo las sales metálicas precursoras y, en algunos casos, sirven como protección, es decir, estabilizan a las NPs, evitando que continúen creciendo y se aglomeren entre sí.

Por otro lado, las NPs metálicas son de gran interés, ya que pueden obtenerse por BMEP, así como por sus potenciales aplicaciones, las cuales dependen del tamaño y la forma. El tamaño es crucial, ya que entre menores dimensiones posea la partícula, mayor es la cantidad de los átomos expuestos en la superficie de ésta; es decir, las NPs poseen mayor área superficial con respecto a su volumen, lo cual las vuelve altamente reactivas. Por otro lado, la forma de las NPs está relacionada con el tipo de aplicación y sus propiedades, por ejemplo, el efecto de dispersión Raman mejorada por la superficie (SERS) requiere del uso de nanopartículas con aristas en su morfología para optimizar la señal de Raman. Así, el control de estas características durante la síntesis es uno de los mayores retos para la nanociencia, ya que esto permitiría el diseño de materiales para aplicaciones específicas (Pachón & Rothenberg, 2008; Song & Kim, 2009 & Wang *et al.*, 2020).

Como se ha mencionado, las partículas en escala nanométrica tienen propiedades diferentes a las del material en bulto; ya que el tamaño y la forma de las NPs tienen una gran influencia en las propiedades que presentan (Sujitha & Kannan, 2013); por esto, diversos grupos de investigación en el mundo han buscado una metodología que sea de bajo costo, amigable con el medio ambiente, sencilla, reproducible, escalable y que permita el control de la forma y tamaño de las NPs.

En general, durante la nucleación y el crecimiento de las NPs, diversos parámetros intervienen en el tamaño y forma del nanomaterial resultante, como la concentración de agente reductor (extracto acuoso), la concentración de sal precursora, la naturaleza de los agentes reductores y estabilizantes, el pH, la temperatura y el tiempo de la reacción (Elia *et al.*, 2014; Fragoon *et al.*, 2012; Kumar *et al.*, 2013 & Patil & Chandrasekaran, 2020).

Por otro lado, *Citrus paradisi* es un cítrico conocido comúnmente como toronja, que se cultiva en México y forma parte de la dieta de los mexicanos (Producción de cítricos en México, 2022). Este cítrico es una rica fuente de componentes fitoquímicos bioactivos, como flavonoides, limonoides y sus glucósidos, ácido ascórbico, ácido fólico, carotenoides —licopeno y β -caroteno—; compuestos relacionados con la coumarina —fibra altamente fermentable— y potasio (Vanamala *et al.*, 2005). Por otro lado, la cáscara de este fruto se usa poco en gastronomía y, por lo general, es un material de desecho. Dicha cáscara se subdivide en el epicarpio (flavedo), que es la superficie periférica coloreada de la cáscara y en mesocarpio (albedo), que es la capa intermedia blanca suave de la cáscara; se han descrito diversos compuestos tales como flavonoides y ácido ascórbico como parte de sus constituyentes (Aruoma *et al.*, 2012). En este sentido, la BMEP puede aprovechar dichos compuestos de la cáscara de *Citrus paradisi* para la reducción de la sal precursora y permitir la formación de las NPs.

El presente trabajo tuvo como propósito llevar a cabo la biosíntesis de nanopartículas de oro (NPs-Au) utilizando el extracto acuoso de *Citrus paradisi* a diferentes temperaturas para determinar el efecto de este factor en la morfología de las partículas obtenidas.

MATERIAL Y MÉTODO

Los materiales necesarios para la biosíntesis de las NPs-Au fueron el extracto acuoso del epicarpio de *Citrus paradisi* como agente reductor, el ácido tetracloroaurico trihidratado de grado analítico — $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Sigma-Aldrich, Toluca, México— como agente precursor y agua deionizada; los cuales fueron utilizados sin purificación adicional.

Preparación del extracto acuoso de *Citrus paradisi*

La cáscara de *Citrus paradisi* se lavó y secó, luego el epicarpio fue retirado del fruto teniendo cuidado de separarlo del mesocarpio. 10 g del epicarpio fueron añadidos en 90 mL de agua deionizada al alcanzar el punto de ebullición y se mantuvo a esta temperatura por 20 min. Posteriormente, la solución se dejó enfriar y se filtró al vacío (Noruzi, 2015; Panda & Deepa, 2011 & Silva-De Hoyos *et al.*, 2020). El extracto obtenido se almacenó en un vial durante una hora.

Biosíntesis de nanopartículas de oro

La biosíntesis NPs-Au se realizó acorde con reportes previos (Silva-De Hoyos *et al.*, 2019 & Silva-De Hoyos *et al.*, 2020). En un vial se colocaron 5 mL de $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (sal precursora) a una concentración 10^{-3} M. A continuación se añadieron 2 mL del extracto del epicarpio de *Citrus paradisi*, aforando hasta 10 mL con agua deionizada. La reacción se llevó a cabo a 0°C —en inmersión en hielo—, 40°C y 60°C —en *baño maría*—, para determinar el efecto de la temperatura en la morfología de las NPs.

Caracterización de las nanopartículas de oro

La caracterización se realizó por medio de la espectroscopia UV-Vis a diferentes tiempos de reacción –30 min; 1 h; 1.5 h; 2 h; 4 h y 24h– para comprobar la presencia del plasmón de resonancia superficial (PRS) característico de las NPs-Au, cuyo pico máximo de absorción se encuentra entre 540 y 600 nm, lo que permite confirmar la presencia de dichas NPs (Noguez, 2007). Cada PRS fue obtenido con un espectrofotómetro UV-Vis (Lambda Perkin-Elmer, IL, EUA). El análisis de morfología y de las fases cristalinas de las muestras –preparadas sobre rejillas recubiertas de carbono– fueron realizadas a través de micrografías adquiridas con un Microscopio Electrónico de Transmisión (TEM, JEOL 2100, MA, EUA) operado a 200 kV de aceleración de voltaje y filamento de LaB₆. Todas las micrografías utilizadas provenían de las muestras de síntesis a las 24h de la reacción. Para determinar el tamaño de las NPs-Au se utilizaron al menos 20 micrografías por cada muestra, con aproximadamente 300 partículas de cada temperatura (0°C, 40°C y 60°C) (Panda & Deepa, 2011). Además, se obtuvo el patrón de difracción de área selecta (SAED) con TEM para determinar la estructura cristalina de las NPs-Au.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las síntesis de NPs-Au a diferentes temperaturas se describen a continuación (Figura 1 A-D).

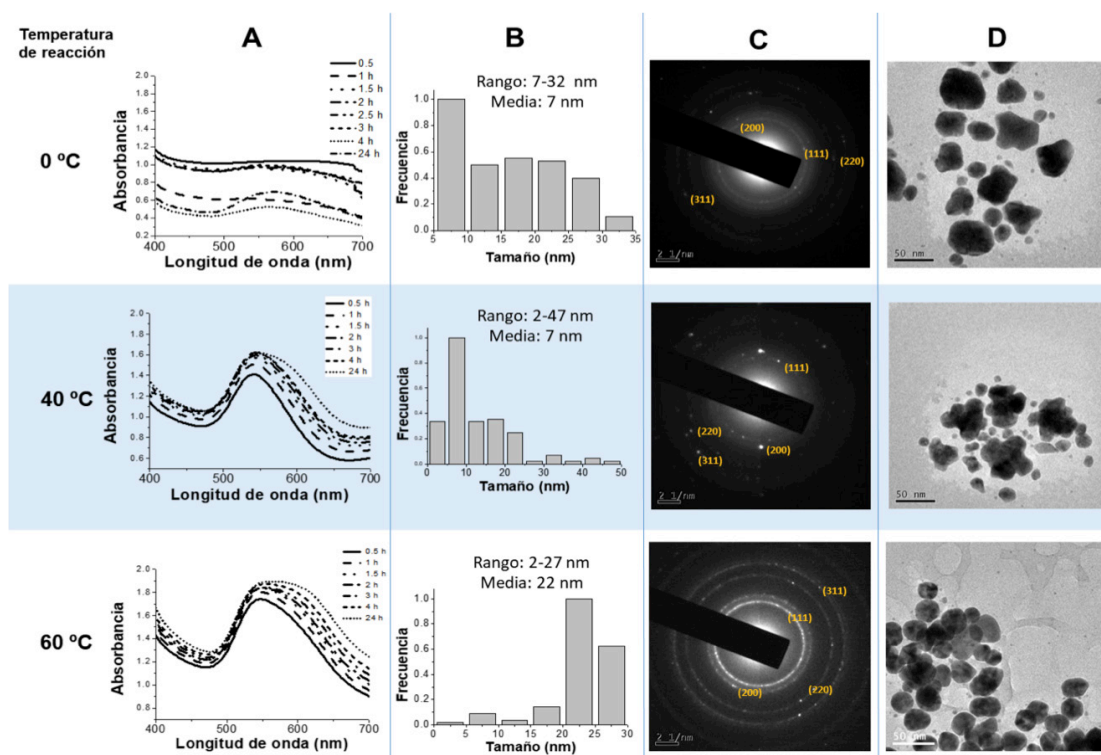


Figura 1. NPs-Au sintetizadas con extracto de *Citrus paradisi* a diferentes temperaturas (0°C, 40°C y 60°C). A: espectros UV-Vis tomados a diferentes intervalos de tiempo. B: histogramas del tamaño de partícula. C: patrones de difracción de área selecta (SAED) con los planos a los que corresponde cada fase identificada. D: Micrografías obtenidas con microscopio electrónico de transmisión (TEM).

Para controlar mejor la temperatura durante la biosíntesis de NPs-Au se utilizó baño de hielo para alcanzar 0°C y *baño María* para conseguir 40°C y 60°C, respectivamente, cada temperatura fue mantenida durante las 24 h de reacción. Para asegurar la reproducibilidad metodológica y evitar variaciones, tanto al extracto acuoso como a la sal precursora, como primer paso, se llevó a las temperaturas mencionadas. Otros métodos para mantener la temperatura a 40°C y 60°C pueden resultar difíciles de controlar, como por ejemplo con la parrilla de agitación electromagnética. El hielo en el baño frío debe cambiarse para mantener la temperatura constante.

En la síntesis de las NPs-Au obtenidas a 0°C, el pico de mayor intensidad se observa en 570 nm de longitud de onda, dicho plasmón se presenta desde las 4 h hasta las 24 h después de la síntesis, manteniendo esa longitud de onda, lo cual coincide con lo reportado previamente (Noguez, 2007). En lo que refiere al tamaño de partícula obtenido durante esta síntesis, el histograma de distribución muestra un rango de 7 a 32 nm, con una mayor cantidad de partículas de 7 nm, exhibiendo una alta polidispersidad, tanto en tamaño como en forma, ya que las morfologías observadas son irregulares, consistiendo en semiesferas y esferoides.

Por otro lado, en la síntesis de las NPs-Au obtenidas a 40°C, el PSR está centrado entre 542 a los 30 min de reacción, a los diferentes intervalos medidos ocurre un desplazamiento al rojo hasta llegar a 550 nm a las 24 h, lo cual podría atribuirse a que las partículas están sufriendo un aumento de tamaño o un fenómeno de coalición entre las partículas, como se ha reportado previamente (Guo *et al.*, 2015; Liz-Marzán, 2006; Noguez, 2007 & Yu *et al.*, 2017). La aglomeración de las NPs-Au se confirmó en las micrografías de TEM. En cuanto al tamaño, se puede apreciar una alta polidispersidad de tamaño, ya que exhiben un rango de 7 a 47 nm, con una mayor cantidad de partículas de 7 nm (al igual que en la síntesis a 0°C). En cuanto a la morfología, se notan partículas esféricas y la formación de estructuras triangulares y, también, se presenta el fenómeno de coalescencia.

Para las NPs-Au obtenidas a 60 °C, el PRS está centrado en 548 nm desde los 30 min hasta las 4 h, presentando un ensanchamiento constante del plasmón a las 24 h con un desplazamiento al rojo hasta los 562 nm. La distribución de tamaño fue de 2 a 27 nm con una mayor cantidad de partículas de 22 nm, existiendo una disminución en la polidispersidad de tamaño, así como mayor definición en la forma, teniendo una cantidad superior de partículas esféricas. Esto se encuentra en concordancia con lo reportado previamente, en donde la cantidad de nanopartículas esféricas aumenta cuando se eleva la temperatura de reacción, ya que el incremento de la temperatura genera un mayor número de centros de nucleación teniendo como resultado una mayor cantidad de AuNPs esféricas (Sneha *et al.*, 2010).

Por otro lado, los patrones SAED permitieron determinar que las tres síntesis de NPs-Au poseen una estructura policristalina, identificándose los planos (111), (200), (220) y (311) de la estructura cubica centrada en las caras (FCC).

Finalmente, la síntesis que mostró un tamaño de partícula más homogéneo, así como morfológica, fue la de 60°C. Un tamaño de partícula con menos polidispersidad permite que su aplicación pueda ser más específica. Por ejemplo, se ha reportado que para la actividad antibacteriana se requiere un tamaño promedio de 20nm, ya que tamaños muy pequeños, cercanos a los puntos cuánticos –*quantum dots* <2 nm– son muy tóxicas para las células somáticas; mientras que tamaños mayores a 30 nm, han mostrado un efecto antimicrobiano muy exiguo (Argueta *et al.*, 2014 & García *et al.*, 2011). Así mismo, en estudios *in vitro*, se ha atribuido la actividad antimicrobiana de los cítricos a los compuestos fenólicos, limoneno y citral que poseen (Rodov *et al.*, 1995 & Viuda *et al.*, 2008). En este sentido, una de las potenciales aplicaciones de estas NPs podría ser como bactericida o antifúngico.

Se han sintetizado NPs de plata a través de microondas y extracto acuoso de la cáscara de *Citrus paradisi* y han mostrado efecto inhibitorio contra patógenos grampositivos y gramnegativos comunes del agua, además, los autores postularon que, considerando sus resultados de la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, la presencia, la interacción y el desplazamiento de las bandas anteriores del extracto de cáscara de *Citrus paradisi*, sugieren que sus compuestos activos actúan como agentes reductores, protectores y estabilizadores de las NPs obtenidas (Ayinde *et al.*, 2019), lo cual coincide con lo que se observa en el espectro Uv-vis de este trabajo.

Al parecer, la presencia de grupos carboxilo y otros compuestos presentes en el extracto acuoso de *Citrus paradisi* permite la obtención de NPs-Au por un método ecoamigable, eficiente y simple (Silva De Hoyos *et al.*, 2017).

Ajustando los parámetros de síntesis es posible modificar forma y tamaño de las partículas. En este caso, se estudió la reacción de síntesis a diferentes temperaturas logrando obtener partículas con tamaños específicos. Sin embargo, más estudios son necesarios para la optimización de las condiciones de síntesis, el escalamiento de la producción, así como las potenciales aplicaciones que pueden probarse en diferentes campos de estudio.

CONCLUSIONES

El tamaño y morfología de las NPs por biosíntesis mediada por extractos de plantas depende de la concentración del extracto y de la sal precursora, la temperatura, el pH así como el tiempo de reacción. En el presente trabajo, las NPs-Au obtenidas a 0°C exhibieron en su mayoría un tamaño de 7 nm y fueron generalmente de morfología esferoide; mientras que a 40°C presentaron un tamaño de 7 nm, de forma esféricas y triangulares; y las partículas obtenidas en la síntesis a 60°C fueron principalmente de 22 nm y esféricas. Por lo que es importante continuar con el estudio del sistema con distintos parámetros para obtener los tamaños y formas más homogéneos.

AGRADECIMIENTOS

LESDH agradece a CONAHCyT por el apoyo para realizar su estancia posdoctoral. LAF agradece al Programa de Investigadoras e investigadores por México (Cátedras) CONAHCyT. LESDH, LAF y JLGR agradecen a la División de Estudios de Posgrado e Investigación y al Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Toluca.

REFERENCIAS

1. Ahmed, S., Annu, Ikram, S., & Yudha S, S. (2016). Biosynthesis of gold nanoparticles: A green approach. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 161, 141-153. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2016.04.034
2. Argueta-Figueroa, L., Morales-Luckie, R. A., Scougall-Vilchis, R. J., & Olea-Mejía, O. F. (2014). Synthesis, characterization and antibacterial activity of copper, nickel and bimetallic Cu-Ni nanoparticles for potential use in dental materials. *Progress in Natural Science: Materials International*, 24(4), 321-328. DOI: 10.1016/j.pnsc.2014.07.002

3. Aruoma, O. I., Landes, B., Ramful-Baboolall, D., Bourdon, E., Neergheen-Bhujun, V., Wagner, K. H., & Bahorun, T. (2012, May). Functional benefits of citrus fruits in the management of diabetes. *Prev Med*, *54 Suppl*, S12-16. DOI: 10.1016/j.ypmed.2012.02.012
4. Ayinde, W. B., Gitari, W. M., & Samie, A. (2019, 2019/07/03). Optimization of microwave-assisted synthesis of silver nanoparticle by Citrus paradisi peel and its application against pathogenic water strain. *Green Chemistry Letters and Reviews*, *12*(3), 225-234. DOI: 10.1080/17518253.2019.1627427
5. Balalakshmi, C., Gopinath, K., Govindarajan, M., Lokesh, R., Arumugam, A., Alharbi, N. S., Kadaikunnan, S., Khaled, J. M., & Benelli, G. (2017, Aug). Green synthesis of gold nanoparticles using a cheap Sphaeranthus indicus extract: Impact on plant cells and the aquatic crustacean Artemia nauplii. *J Photochem Photobiol B*, *173*, 598-605. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2017.06.040
6. Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2020). The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical-Physical Applications to Nanomedicine. *Molecules*, *25*(1), 125. DOI:10.3390/molecules25010112.
7. Beyene, H. D., Werkneh, A. A., Bezabh, H. K., & Ambaye, T. G. (2017, 2017/09/01). Synthesis paradigm and applications of silver nanoparticles (AgNPs), a review. *Sustainable Materials and Technologies*, *13*, 18-23. DOI: 10.1016/j.susmat.2017.08.001
8. Elia, P., Zach, R., Hazan, S., Kolusheva, S., Porat, Z., & Zeiri, Y. (2014). Green synthesis of gold nanoparticles using plant extracts as reducing agents. *Int J Nanomedicine*, *9*, 4007-4021. DOI: 10.2147/ijn.S57343
9. Fragoon, A., Li, J., Zhu, J., & Zhao, J. (2012, Mar). Biosynthesis of controllable size and shape gold nanoparticles by black seed (Nigella sativa) extract. *J Nanosci Nanotechnol*, *12*(3), 2337-2345. DOI: 10.1166/jnn.2012.5739
10. García-Contreras, R., Argueta-Figueroa, L., Mejía-Rubalcava, C., Jimenez-Martinez, R., Cuevas-Guajardo, S., Sanchez-Reyna, P. A., & Mendieta-Zerón, H. (2011, Dec). Perspectives for the use of silver nanoparticles in dental practice. *International Dental Journal*, *61*(6), 297-301. DOI: 10.1111/j.1875-595X.2011.00072.x
11. Guo, M., Li, W., Yang, F., & Liu, H. (2015, 2015/05/05). Controllable biosynthesis of gold nanoparticles from a Eucommia ulmoides bark aqueous extract. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *142*, 73-79. DOI: 10.1016/j.saa.2015.01.109
12. Kumar, K. M., Mandal, B. K., Kumar, H. A. K., & Maddinedi, S. B. (2013, Dec). Green synthesis of size controllable gold nanoparticles. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, *116*, 539-545. DOI: 10.1016/j.saa.2013.07.077
13. Liz-Marzán, L. M. (2006, 2006/01/01). Tailoring Surface Plasmons through the Morphology and Assembly of Metal Nanoparticles. *Langmuir*, *22*(1), 32-41. DOI: 10.1021/la0513353
14. Noguez, C. (2007, 2007/03/01). Surface Plasmons on Metal Nanoparticles: The Influence of Shape and Physical Environment. *The Journal of Physical Chemistry C*, *111*(10), 3806-3819. DOI: 10.1021/jp066539m

15. Noruzi, M. (2015, Jan). Biosynthesis of gold nanoparticles using plant extracts. *Bioprocess Biosyst Eng*, 38(1), 1-14. DOI: 10.1007/s00449-014-1251-0
16. Pachón, L. D., & Rothenberg, G. (2008). Transition-metal nanoparticles: synthesis, stability and the leaching issue. *Applied Organometallic Chemistry*, 22(6), 288-299. DOI: 10.1002/aoc.1382
17. Panda, T., & Deepa, K. (2011, Dec). Biosynthesis of gold nanoparticles. *J Nanosci Nanotechnol*, 11(12), 10279-10294. DOI: 10.1166/jnn.2011.5021
18. Patil, S., & Chandrasekaran, R. (2020, Oct 26). Biogenic nanoparticles: a comprehensive perspective in synthesis, characterization, application and its challenges. *J Genet Eng Biotechnol*, 18(1), 67. DOI: 10.1186/s43141-020-00081-3
19. *Producción de cítricos en México*. (2022). Biblioteca de Publicaciones Oficiales del Gobierno de México. Acceso 02/03/2023 disponible en <https://www.gob.mx/publicaciones/articulos/produccion-de-citricos-en-mexico>
20. Rodov, V., Ben-Yehoshua, S., Fang, D. Q., Kim, J. J., & Ashkenazi, R. (1995, 1995/04/01). Preformed antifungal compounds of lemon fruit: citral and its relation to disease resistance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(4), 1057-1061. DOI: 10.1021/jf00052a039
21. Silva De Hoyos, L. E., Sanchez-Mendieta, V., Vilchis-Nestor, A., & Camacho, M. (2017). Biogenic Silver Nanoparticles as Sensors of Cu²⁺ and Pb²⁺ in Aqueous Solutions. *Universal Journal of Materials Science*, 5, 29-37. DOI: 10.13189/ujms.2017.050201
22. Silva-De Hoyos, L. E., Sánchez-Mendieta, V., Camacho-López, M. A., Trujillo-Reyes, J., & Vilchis-Nestor, A. R. (2020). Plasmonic and fluorescent sensors of metal ions in water based on biogenic gold nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 1975-1985. DOI: 10.1016/j.arabjc.2018.02.016
23. Silva-De Hoyos, L. E., Sánchez-Mendieta, V., Vilchis-Nestor, A. R., Camacho-López, M. A., Trujillo-Reyes, J., & Avalos-Borja, M. (2019). Plasmonic Sensing of Aqueous-Divalent Metal Ions by Biogenic Gold Nanoparticles. *Journal of Nanomaterials*, 2019(1), 11, Article 9846729. DOI: 10.1155/2019/9846729
24. Slepíčka, P., Slepíčková Kasálková, N., Siegel, J., Kolská, Z., & Švorčík, V. (2020). Methods of Gold and Silver Nanoparticles Preparation. *Materials*, 13(1). DOI:10.3390/ma13010001.
25. Sneha, K., Sathishkumar, M., Kim, S., & Yun, Y.-S. (2010, 2010/09/01/). Counter ions and temperature incorporated tailoring of biogenic gold nanoparticles. *Process Biochemistry*, 45(9), 1450-1458. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.019>
26. Song, J. Y., & Kim, B. S. (2009, Jan). Rapid biological synthesis of silver nanoparticles using plant leaf extracts. *Bioprocess Biosyst Eng*, 32(1), 79-84. DOI: 10.1007/s00449-008-0224-6
27. Sujitha, M. V., & Kannan, S. (2013). Green synthesis of gold nanoparticles using Citrus fruits (Citrus limon, Citrus reticulata and Citrus sinensis) aqueous extract and its characterization. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 102, 15-23. DOI: 10.1016/j.saa.2012.09.042

28. Vanamala, J., Cobb, G., Turner, N. D., Lupton, J. R., Yoo, K. S., Pike, L. M., & Patil, B. S. (2005). Bioactive Compounds of Grapefruit (*Citrus paradisi* Cv. Rio Red) Respond Differently to Postharvest Irradiation, Storage, and Freeze Drying. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(10), 3980-3985. DOI: 10.1021/jf048167p
29. Viuda-Martos, M., Ruiz-Navajas, Y., Fernández-López, J., & Pérez-Álvarez, J. (2008, 2008/12/01/). Antifungal activity of lemon (*Citrus lemon* L.), mandarin (*Citrus reticulata* L.), grapefruit (*Citrus paradisi* L.) and orange (*Citrus sinensis* L.) essential oils. *Food Control*, 19(12), 1130-1138. DOI: 10.1016/j.foodcont.2007.12.003
30. Wang, M., Li, H., Li, Y., Mo, F., Li, Z., Chai, R., & Wang, H. (2020). Dispersibility and Size Control of Silver Nanoparticles with Anti-Algal Potential Based on Coupling Effects of Polyvinylpyrrolidone and Sodium Tripolyphosphate. *Nanomaterials*, 10(6), 1042. DOI:10.3390/nano10061042.
31. Yu, R., Liz-Marzán, L. M., & García de Abajo, F. J. (2017). Universal analytical modeling of plasmonic nanoparticles. *Chemical Society Reviews*, 46(22), 6710-6724. DOI: 10.1039/C6CS00919K

Título: *Divinidad alienada*

Artista: *Uriel Cruz Roque*

Técnica: *Modelado 3D*

Medida: *n/a*

Año: *2022*

