

Extractos de plantas para la síntesis de nanopartículas de oro y su aplicación como sensores de iones metálicos: Un panorama general

Plant extracts for the synthesis of gold nanoparticles and their application as metal ion sensors: An overview

Dra. Luisa Elena Silva-De Hoyos¹, Dra. Liliana Argueta-Figueroa², Dra. Nayely Torres-Gómez³, Dr. José Luis García-Rivas^{4*}

Fecha de recepción: 23 de enero de 2024

Fecha de aceptación: 26 de abril de 2024

Resumen - Los sensores que existen en la actualidad están basados en el cambio de temperatura o en la generación de una corriente eléctrica, lo cual resulta costoso, ya que se requiere de cierta infraestructura para llevar a cabo la detección, debido a esto, las nuevas tendencias se encuentran enfocadas a la generación de sensores colorimétricos. En este sentido, las nanopartículas de oro (NPs-Au) son materiales que presentan propiedades ópticas, que pueden ser aprovechadas como sensores de iones metálicos en medio acuoso. El funcionamiento de estos sensores se ha explicado a través de los cambios del ambiente y morfología de las NPs, lo que genera que el plasmón de resonancia superficial característico de las NPs-Au se desplace, permitiendo la detección colorimétrica

Abstract - The current sensors are based on the change in temperature or on the generation of electric energy, which is expensive, since a certain infrastructure is required to conduct the detection, due to this, current trends are focused on the generation of colorimetric sensors. In this sense, gold nanoparticles (NPs-Au) are materials with optical properties, which can be used as sensors of metal ions in aqueous media. The operation of these sensors has been explained through changes in the environment and morphology of the NPs, which causes the characteristic surface resonance plasmon of the Au-NPs to shift, allowing colorimetric detection, which is a qualitative method, which consists of a color change of the test solution, which can be observed with

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 Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Toluca • Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México, México • 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.

3 Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Toluca • Av. Tecnológico s/n, Col. Agrícola Bellavista, C.P. 52149, Metepec, Estado de México, México • nayely.tg@toluca.tecnm.mx • ORCID: 0000-0002-3945-2552.

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

que es un método cualitativo, que consiste en un cambio de color de la solución de prueba, que puede observarse a simple vista y en tiempo real. También es importante considerar un método que sea amigable con el ambiente para la fabricación de dichas nanoestructuras.

El presente trabajo pretende brindar un panorama de las NPs-Au obtenidas por métodos biológicos con aplicación para la detección de iones metálicos en medio acuoso.

Palabras claves: Sensor; biosíntesis; nanopartículas.

the naked eye and in real-time. It is also important to consider an environmentally friendly method for manufacturing said nanostructures.

The present work aims to provide an overview of Au-NPs obtained by biological methods with application for the detection of metal ions in an aqueous medium.

Keywords: Sensor; biosynthesis; nanoparticles.

INTRODUCCIÓN

La nanotecnología es un área de interés que sigue creciendo a nivel mundial. En los primeros años, los esfuerzos realizados estaban completamente enfocados a identificar y cuantificar el efecto que tenía la reducción del tamaño de las nanopartículas –NPs–, más adelante, los estudios fueron dirigidos a entender la relación que hay entre el tamaño y las propiedades eléctricas y ópticas, así como las técnicas de síntesis que permiten un mayor control en el tamaño de dichas NPs (Bayda *et al.*, 2020) debido a que las propiedades ópticas y eléctricas de las nanopartículas están directamente relacionadas con su tamaño (Liz, 2006). Así, las aplicaciones de las NPs han ido creciendo en distintos campos, entre los cuales están la medicina, la biología, la farmacéutica, la agronomía, la electrónica o la remediación medioambiental por nombrar algunas (Ahmed *et al.*, 2016).

Por lo tanto, para obtener NPs que tengan las propiedades necesarias para ser aplicadas a resolver un problema concreto, se conocen dos rutas generales, “de arriba hacia abajo” –conocida en inglés como *top to bottom*– y “de abajo hacia arriba” –*bottom to top*–. En el caso de la primera, normalmente se utiliza la reducción química y los métodos de biosíntesis, los cuales involucran el ensamblaje de los átomos a un núcleo, formando “semillas” que van creciendo hasta formar partículas con tamaño en la escala nanométrica; mientras que, en los métodos de “de arriba hacia abajo” se utiliza un material en bulto –en una escala macro– que se divide hasta reducir su tamaño a nanómetros a través de diferentes métodos (Panigrahi *et al.*, 2004).

Así mismo, la tendencia actual de síntesis de NPs está centrada en las rutas “verdes” ya que se reduce la generación de contaminantes. La síntesis biológica disminuye la cantidad de residuos y subproductos de la reacción, así como el riesgo de toxicidad y el costo de obtención de las NPs en sí. En este tipo de síntesis se pueden utilizar dos estrategias para el proceso de reducción, 1) enzimas de algunos microorganismos –como levaduras, hongos, bacterias u organismos fotosintéticos– y 2) de extractos de plantas, principalmente en medio acuoso. En este último tipo de síntesis se obtienen fitoquímicos necesarios para la reacción tales como alcoholes, fenoles, terpenos, alcaloides, saponinas, proteínas, carbohidratos, entre otros (Ovais *et al.*, 2018).

La síntesis de NPs mediada por extractos de plantas tiene como ventaja que la cinética de esta ruta es considerablemente más rápida que en otros enfoques de síntesis biológica. Prácticamente de todas las partes de las plantas –pulpa, huesos y cáscaras de los frutos, así como las hojas, los tallos y las raíces– es posible extraer fitoquímicos que sean útiles para la síntesis de las NPs. Para llevar a cabo este proceso, la parte de la planta que se va a utilizar debe lavarse para evitar contaminaciones de agentes como tierra, polvo, polen, entre otros. Los extractos acuosos se obtienen por infusión o cocción en agua destilada y, posteriormente, filtrando la solución.

Una parte importante de la síntesis mediada por plantas es la estandarización del tiempo y condiciones idóneas para la obtención de un extracto con los fitoquímicos necesarios para llevar a cabo dicha síntesis. Finalmente, se agrega el extracto acuoso a una solución que contiene la sal precursora. En el caso de las NPs-Au, el color de la solución cambia durante la reacción, lo cual señala la formación de éstas. La síntesis a través de extractos de plantas naturales es un proceso económico, ecológico y simple, es decir, la reacción puede realizarse en un sólo paso (Aljabali *et al.*, 2018 & Jadoun *et al.*, 2021).

En lo que se refiere al área de aplicación de la nanotecnología para remediación medioambiental, uno de los enfoques que se han investigado es la detección de metales para así poder medir los niveles en el agua de fuentes de consumo humano.

Aún pequeñas cantidades de algunos metales son tóxicas para los humanos y pueden generar enfermedades graves o incluso mortales. Debido a esto, es indispensable la detección oportuna y precisa de la contaminación a través del monitoreo del contenido de estos metales en los cuerpos de agua y suministros de agua potable (Priyadarshini & Pradhan, 2017). En este sentido, las NPs que exhiben un plasmón de resonancia superficial (PRS) son útiles para este tipo de aplicación como nanosensores. El PRS se define como oscilaciones colectivas de los electrones libres que poseen un pico máximo de la banda de resonancia de las NPs y se encuentra dentro del espectro visible e infrarrojo cercano, lo cual permite observar cambios en la coloración de éstas a simple vista. Además, el PRS depende de la forma, tamaño, geometría y composición de las NPs, por lo que estas variables son relevantes para la fabricación de nanosensores (Langer *et al.*, 2015 & Saha *et al.*, 2012).

El presente trabajo tiene como objetivo brindar un panorama de trabajos publicados sobre las NPs de oro –NPs-Au– obtenidas mediante extractos de plantas con aplicación para la detección de iones metálicos en medios acuosos, con el propósito de identificar las condiciones de síntesis más eficientes y las áreas de oportunidad que pueden abordarse en trabajos futuros.

NANOPARTÍCULAS DE ORO CON APLICACIÓN PARA DETECCIÓN DE IONES METÁLICOS EN AGUA

El uso de extractos de plantas para la síntesis de NPs metálicas es una ruta amigable con el medio ambiente, económica y fácil de llevar a cabo, se le conoce como *síntesis mediada por plantas*. Diversas partes de las plantas como las raíces, las hojas, las semillas, los pétalos, así como la cáscara y los huesos de los frutos pueden utilizarse para obtener extractos, éstos contienen biomoléculas que actúan como agentes reductores y de protección para la síntesis de NPs (Noruzi, 2015). Los compuestos obtenidos en los extractos van desde flavonoides, polifenoles, alcaloides, aminoácidos u otros compuestos con menor peso molecular, entre otros. En el mecanismo general de síntesis, los agentes reductores donan electrones a los iones metálicos, lo que permite la formación de los núcleos y la posterior obtención de las NPs.

En este caso, los compuestos presentes en el extracto, por ejemplo, las moléculas con al menos dos grupos hidroxilo en posición *-orto* o *-para* ejercen esa función. Las NPs obtenidas poseen una alta energía superficial, lo que genera que las partículas continúen creciendo o que atraigan a otras partículas, y éstas se aglomeren entre sí; disminuyendo así su energía superficial y alcanzando la estabilidad; para cuando esto ocurre, es posible que las partículas hayan alcanzado un tamaño micrométrico, perdiendo las propiedades y características inherentes al tamaño nanométrico. Sin embargo, si durante el proceso de síntesis se tiene un exceso en la cantidad de agente reductor y/o de protección se promueve la obtención de NPs con menor tamaño porque se detiene el crecimiento, en este sentido, las moléculas que poseen grupos carboxilo permiten la estabilización de las NPs. Otra forma en la que se puede controlar el tamaño y forma de las NPs es dependiendo de tipo de extracto que se utilice, ya que cada planta puede aportar diferentes fitocompuestos que actúen como agentes reductores. Al igual que en la síntesis por reducción química, juegan un papel importante la concentración de la sal precursora, así como el pH, la temperatura y el tiempo de reacción (Bao *et al.*, 2021 & Guo *et al.*, 2015).

Las semillas de las plantas son una fuente de fitocompuestos que pueden ser muy útiles en el proceso de biosíntesis de NPs; en este sentido, se sintetizaron NPs-Au utilizando *Momordica charantia*, conocida popularmente como melón amargo.

Para obtener los extractos utilizaron el tejido que recubre las semillas y la semilla de la planta, los autores reportaron que la velocidad de la síntesis se reduce cuando se prepararon las NPs con el extracto de la semilla. Sin embargo, las NPs obtenidas con el tejido que recubre las semillas de la planta son las más estables —mantienen su distribución y tamaño por un tiempo mayor a un año—. Posteriormente, realizaron pruebas para detección con estas últimas NPs. El color de la solución al agregar el extracto a la solución de HAuCl_4 cambia de amarillo a rojo, que es característico de las NPs-Au. El equipo de trabajo realizó las síntesis variando diferentes parámetros como las concentraciones del extracto, la temperatura, el pH, la foto-radiación, entre otros. En este estudio se encontró que las NPs-Au monodispersas y estables, con un tamaño de 4-8 nm, obtenidas con el extracto de *Momordica charantia* fueron apropiadas como sensores de distintos iones metálicos, presentando selectividad por los iones Cadmio (Cd^{2+}) con una sensibilidad de $0.186 \mu\text{M}$ y un rango de cuantificación de 0.01 - 1 ppm, lo cual se verificó a través de espectrofotometría (Singh *et al.*, 2018).

En otro estudio se empleó extracto de semillas de *Michelia tonkinensis*, modificando algunos de los parámetros de la reacción como tiempo y temperatura para determinar las mejores condiciones para la síntesis. La formación de las NPs fue confirmada por el cambio de color en la solución y por espectroscopia UV-Vis, obteniendo un PRS característico. Las condiciones más adecuadas para la reacción fueron 90°C , por 40 min, con una concentración de Au^{3+} de 1.25 mM. Gracias a los resultados obtenidos después de realizar la caracterización de las NPs por diferentes métodos, se sabe que las partículas son esféricas de 15 nm con una capa orgánica rodeando la NPs. Los estudios de detección colorimétrica muestran buena selectividad y sensibilidad al ion plomo (Pb^{2+}), siendo el límite de detección de 0.03 mM y un límite cuantificable de 0.09 mM (Huynh *et al.*, 2022).

Por otro lado, las hojas de las plantas son quizá la parte de las plantas que se estudia más a menudo en busca de moléculas bioactivas. Se han realizado diversos estudios para utilizar los extractos de las hojas como agente reductor. Se realizó la síntesis de NPs-Au con 0.4 mL de extracto acuoso de *Camellia sinensis* —té verde—, la solución presentó una coloración roja después de 30 minutos de reacción indicando la formación de partículas a escala nanométrica. Las NPs obtenidas se analizaron por medio de UV-Vis para observar el PRS característico, el cual se obtuvo entre 529 a 536 nm. El desplazamiento del PRS se atribuyó al cambio de forma y tamaño de las NPs. Los análisis de caracterización de las NPs mostraron que el tamaño promedio fue de 18 nm, con forma triangular, hexagonal y esférica y con una estructura cristalina FCC, característica del oro metálico. La adición de diferentes iones metálicos divalentes (Zn^{2+} , Sr^{2+} , Ca^{2+} y Cu^{2+}) a las soluciones de NPs-Au obtenidas con *C. sinensis* dio como resultado el cambio de color de rojo a morado.

El cambio de color se debe a la formación de agregados por la interacción del metal con el agente protector de la NPs. Debido a este fenómeno, el PRS también sufre un desplazamiento al azul, de 529 nm a 539 nm para el ion zinc (Zn^{2+}), 529 nm a 540 nm para los iones de estroncio (Sr^{2+}), de 529 nm a 549 nm para los iones de plomo (Pb^{2+}) y de 529 nm a 544 nm para los iones de calcio (Ca^{2+}). La sensibilidad del estudio es la detección de los iones con concentración de 10^{-3} M, por debajo de esta concentración no se detectó ningún cambio. Por último, las NPs fueron soportadas en celulosa formando un nanocomposito que, al ponerse en contacto con diferentes iones metálicos, fueron capaces de realizar la detección, permitiendo que fuera observable a simple vista (Silva *et al.*, 2019).

También se han sintetizado NPs-Au utilizando extracto acuoso de hojas de *Cinnamomum tamala*. Las NPs presentaron un PSR de 530 nm. El plasmón característico ayuda al sistema a monitorear la presencia de diferentes iones debido a los cambios que se observan en el PSR.

Se agregaron diferentes concentraciones de NPs-Au en presencia de diferentes metales, agregando borohidruro para realizar la reducción *in-situ* en presencia de las NPs, dejándolas incubar por 30 min. Cada experimento se realizó con diferentes iones: Co^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Na^+ , Hg^{2+} y K^+ . Se obtuvieron nanoestructuras de Au con diferentes morfologías, nanoplatos triangulares y hexagonales, así como algunas partículas esféricas, en este caso, se siguió la cinética de reacción cambiando la cantidad de extracto, por lo que fue posible controlar la morfología y las propiedades ópticas de las NPs. La naturaleza cristalina de las partículas fue cúbico, centrado en las caras (FCC), lo cual corresponde a la estructura del oro metálico. Las NPs-Au obtenidas por este método son capaces de detectar iones de mercurio (Hg^{2+}). Con esta estrategia de detección hay un cambio en el PRS, debido a que la presencia del Hg^{2+} produce la pérdida de integridad estructural de los nanoplatos-Au triangulares dando como resultado el aumento de NPs-Au esféricas (Zohora *et al.*, 2017).

Las cáscaras de los frutos son ricas en fitocompuestos, de ahí que se han sintetizado NPs-Au utilizando extracto acuoso de la cáscara de *Citrus Paradisi* para su aplicación como sensores plasmónicos y fluorescentes. Se utilizaron diferentes cantidades de HAuCl_4 con concentración 10^{-3} M. Se realizó la caracterización y posterior aplicación con las NPs obtenidas con 2 mL de extracto, en donde se comprueba la obtención de las partículas con el cambio de color de la solución, de amarillo a morado oscuro con un PRS centrado en 549 nm. El cambio en el PRS se debe al cambio relacionado a la forma y tamaño de las partículas. Las partículas obtenidas tienen la estructura cristalina FCC correspondiente a oro metálico (Silva *et al.*, 2020).

Por otro lado, también se utilizan a menudo plantas empleadas en la herboloría, en un estudio obtuvieron NPs-Au utilizando extracto acuoso de *Cistanche deserticola*, conocido comúnmente como *Rou Cong Rong*, utilizada en China como hierba medicinal, estas NPs también fueron obtenidas con poli(estireno-co-maleico anhídrido –PSMA por sus siglas en inglés– como agente estabilizante, el PSMA se disuelve en el extracto acuoso de *Cistanche deserticola* con pH de 9. Posteriormente, se llevó a cabo la reacción, dejando la suspensión en refrigeración. Las NPs fueron utilizadas para la detección colorimétrica del ion plomo (Pb^{2+}). Se realizó el estudio de selectividad de las NPs con diferentes metales, en donde no se obtuvo ningún cambio en el PRS ni en el color de la solución excepto en presencia del ion Pb^{2+} . La intensidad del color de la solución disminuyó y esto se debió a la reducción en la intensidad del PRS, como resultado de la fuerte interacción del grupo carboxilo del PSMA presente en la superficie de las NPs-Au con el ion metálico Pb^{2+} , así como el mecanismo de agregación entre partículas. De esta manera, el sensor genera un cambio colorimétrico en función con la concentración de los iones de Pb^{2+} , siendo semicuantitativo. Además, se determinó que el límite de detección es de 0.03mM (Nguyen *et al.*, 2022).

Otra planta medicinal utilizada para biosíntesis es *Siraitia grosvenorii*, la cual es nativa de China y ha sido utilizada en la herboloría tradicional y como edulcorante natural. El equipo de Van Thuan Le *et al.*, obtuvo NPs-Au utilizando extracto acuoso de ésta. El estudio realizado muestra la obtención de NPs esféricas con tamaño promedio de 7.5 nm, comprobando la obtención de NPs-Au con la presencia de coloración rosa en la muestra, la presencia PRS, los estudios de caracterización muestran la naturaleza cristalina de la muestra. Las NPs fueron aplicadas para la reducción de 2-nitrofenol y 3-nitrofenol, logrando la conversión completa en 14 min, así como para la detección colorimétrica del ion Pb^{2+} , la cual presenta alta sensibilidad al ion obteniendo límites de detección de 0.018 mM. El estudio se llevó a cabo probando diferentes iones metálicos para determinar la selectividad en la detección de Pb^{2+} . Se realizó el análisis cuantitativo utilizando diferentes concentraciones de ion desde 0 mM a 5000 mM. La banda del PRS sufrió un decremento en su intensidad que es dosis dependiente cuando el Pb^{2+} es agregado, siendo la razón principal de este fenómeno, debido a que el ion tiene menor habilidad de quelación que las NPs (Le *et al.*, 2021).

PERSPECTIVAS FUTURAS

Los estudios colorimétricos para la detección de iones metálicos en agua que utilizan NPs-Au dan como resultado un cambio de color en la solución de morado oscuro a morado claro; esto se debe a la interacción de los iones metálicos con las moléculas que actúan como agentes protectores de dichas NPs, es decir, la interacción metal-molécula protectora. Los estudios de detección por PRS, en los cuales se observa un desplazamiento al azul del plasmón debido a la interacción mencionada, provoca la agregación de las partículas. El desplazamiento que se observa es de 546 nm a 554 nm para los iones de zinc (Zn^{2+}) y de 554 nm a 557 nm para los iones de cobre (Cu^{2+}), y de mercurio (Hg^{2+}) (Silva *et al.*, 2020). Las ventajas que tienen las NPs, como estabilidad, compatibilidad para obtenerse en medio acuoso, fácil protección y funcionalización en la superficie de las NPs, así como la disminución de tamaño del material, hacen a las NPs excelentes candidatos para la detección de diferentes iones contaminantes (Priyadarshini & Pradhan, 2017).

Como prospecto para el futuro, aún es necesario establecer las condiciones ideales de biosíntesis para obtener NPs con menor polidispersidad y que éstas sean selectivas para diferentes contaminantes a la vez, así como más rentables que las técnicas tradicionales, como la espectroscopía de absorción atómica, la cual se lleva a cabo a través de un protocolo más complicado y costoso. Además, otra área de oportunidad es el desarrollo de nanocompuestos en donde las NPs sean soportadas en materiales que faciliten la detección en tiempo real.

CONCLUSIONES

El panorama actual de la obtención de NPs-Au por medio de extractos de plantas se encuentra en crecimiento. Las NPs-Au exhiben propiedades adecuadas para la detección de iones metálicos en agua, esta detección se basa en el cambio de color en la solución a simple vista por el desplazamiento del plasmón de resonancia superficial característico inducido por la presencia de iones metálicos en la solución. Este tipo de sensores colorimétricos serán de mucha utilidad ya que permitirán monitorear la detección en tiempo real.

AGRADECIMIENTOS

LES DH agradece a CONAHCyT por el apoyo para realizar su estancia posdoctoral. LAF agradece al Programa de Investigadores por México (Cátedras) CONAHCyT. LES DH, LAF, NTG 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, I., S. & Yudha S, S. (2016, 2016/08/01/). Biosynthesis of gold nanoparticles: A green approach. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 161, 141-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.04.034>

2. Aljabali, A. A. A., Akkam, Y., Al Zoubi, M. S., Al-Batayneh, K. M., Al-Trad, B., Abo Alrob, O., Alkilany, A. M., Benamara, M. & Evans, D. J. (2018). Synthesis of Gold Nanoparticles Using Leaf Extract of Ziziphus zizyphus and their Antimicrobial Activity. *Nanomaterials*, 8(3), 174. DOI: <https://www.mdpi.com/2079-4991/8/3/174>
3. Bao, Y., He, J., Song, K., Guo, J., Zhou, X. & Liu, S. (2021, 2021/08/19). Plant-Extract-Mediated Synthesis of Metal Nanoparticles. *Journal of Chemistry*, 2021, 6562687. DOI: 10.1155/2021/6562687
4. 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), 112. DOI: <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/1/112>
5. 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: <https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.01.109>
6. Huynh, B. A., Doan, V. D., Nguyen, V. C., Nguyen, A. T. & Le, V. T. (2022, Sep 22). Highly sensitive and selective colorimetric detection of Pb(II) ions using Michelia tonkinensis seed extract capped gold nanoparticles. *RSC Adv*, 12(42), 27116-27124. DOI: 10.1039/d2ra04981c
7. Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N. K. & Meena, R. K. (2021, 2021/02/01). Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(1), 355-374. DOI: 10.1007/s10311-020-01074-x
8. Langer, J., Novikov, S. M. & Liz, M., L. M. (2015, 2015/07/24). Sensing using plasmonic nanostructures and nanoparticles. *Nanotechnology*, 26(32), 322001. DOI: 10.1088/0957-4484/26/32/322001
9. Le, V. T., Duong, T. G., Le, V. T., Phan, T. L., Huong, N., T. L., Chau, T. P. & Doan, V. D. (2021, Apr 21). Effective reduction of nitrophenols and colorimetric detection of Pb(II) ions by Siraitia grosvenorii fruit extract capped gold nanoparticles. *RSC Adv*, 11(25), 15438-15448. DOI: 10.1039/d1ra01593a
10. Liz, M., 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
11. Nguyen, T. H. A., Le, T. T. V., Huynh, B. A., Nguyen, N. V., Le, V. T., Doan, V. D., Tran, V. A., Nguyen, A. T., Cao, X. T. & Vasseghian, Y. (2022, 2022/09/01/). Novel biogenic gold nanoparticles stabilized on poly(styrene-co-maleic anhydride) as an effective material for reduction of nitrophenols and colorimetric detection of Pb(II). *Environmental Research*, 212, 113281. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113281>
12. Noruzi, M. (2015, 2015/01/01). Biosynthesis of gold nanoparticles using plant extracts. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 38(1), 1-14. DOI: 10.1007/s00449-014-1251-0
13. Ovais, M., Khalil, A. T., Islam, N. U., Ahmad, I., Ayaz, M., Saravanan, M., Shinwari, Z. K. & Mukherjee, S. (2018, 2018/08/01). Role of plant phytochemicals and microbial enzymes in biosynthesis of metallic nanoparticles. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(16), 6799-6814. DOI: 10.1007/s00253-018-9146-7

14. Panigrahi, S., Kundu, S., Ghosh, S., Nath, S. & Pal, T. (2004, 2004/08/01). General method of synthesis for metal nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 6(4), 411-414. DOI: 10.1007/s11051-004-6575-2
15. Priyadarshini, E. & Pradhan, N. (2017, 2017/01/01/). Gold nanoparticles as efficient sensors in colorimetric detection of toxic metal ions: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 238, 888-902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.06.081>
16. Saha, K., Agasti, S. S., Kim, C., Li, X. & Rotello, V. M. (2012, 2012/05/09). Gold Nanoparticles in Chemical and Biological Sensing. *Chemical Reviews*, 112(5), 2739-2779. DOI: 10.1021/cr2001178
17. Silva, De H., L. E., Sánchez, M., V., Camacho, L., M. A., Trujillo, R., J. & Vilchis, N., 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
18. Silva, De H., L. E., Sánchez, M., V., Camacho, L., M. A., Trujillo, R., J., Vilchis, N., A. R. & Ávalos, B., 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
19. Singh, K., Kukkar, D., Singh, R., Kukkar, P. & Kim, K. H. (2018, 2018/12/25/). Exceptionally stable green-synthesized gold nanoparticles for highly sensitive and selective colorimetric detection of trace metal ions and volatile aromatic compounds. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 68, 33-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.07.026>
20. Zohora, N., Kumar, D., Yazdani, M., Rotello, V. M., Ramanathan, R. & Bansal, V. (2017, 2017/11/05/). Rapid colorimetric detection of mercury using biosynthesized gold nanoparticles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 532, 451-457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.04.036>