



MÉTODOS Y APLICACIONES DE LA BIOSÍNTESIS DE NANOMATERIALES

METHODS AND APPLICATIONS OF THE BIOSYNTHESIS OF NANOMATERIALS

Kevin Eduardo García Miranda

Instituto Tecnológico de Jiquilpan

Ana Angélica Feregrino Pérez*

Karen Esquivel-Escalante

Cristian Josué Mendoza Meneses

Universidad Autónoma de Querétaro

* feregrino.angge@hotmail.com

Resumen

Hoy en día, los nanomateriales son de suma importancia debido a sus diversas formas de aplicación en campos tanto industriales como de investigación. La relevancia de estos nanomateriales radica en las propiedades físicas, químicas y biológicas que presentan una oportunidad para posibles soluciones a problemas actuales. En este trabajo de revisión se expone un acercamiento a los tipos de nanomateriales, así como una breve descripción de la síntesis verde, síntesis por hongos, síntesis por plantas y síntesis por algas. Incluso, se abordan los factores que influyen en la biosíntesis de nanomateriales, como pH, temperatura, tiempo de reacción, concentración de precursores, cantidad de luz y agentes estabilizantes. Finalmente, se mencionan las aplicaciones de los nanomateriales en el ámbito agrícola como promotores del crecimiento vegetal y agentes de control biológico de enfermedades y plagas. Aunado a esto, la utilización de nanomateriales en la seguridad alimentaria se aplica en los procesos de envasado, con la capacidad de modificar la vida útil de los alimentos.

Palabras clave: nanomateriales, nanopartículas, síntesis verde, aplicaciones agrícolas.

Abstract

Nowadays, nanomaterials are of utmost importance due to its diverse forms of application in industrial and research fields. The relevance of these nanomaterials lies in the physical, chemical and biological properties that present an opportunity for possible solutions to current problems. In this review work, an approach to the types of nanomaterials is presented, as well as a brief description of green synthesis, synthesis by fungi, synthesis by plants and synthesis by algae. It even addresses the factors that influence the biosynthesis of nanomaterials, such as pH, temperature, reaction time, concentration of precursors, amount of light and stabilizing agents. Finally, the applications of nanomaterials in the agricultural field as a plant growth promoter and biological control agent for diseases and pests are mentioned. In addition to this, the use of nanomaterials in food safety is applied in packaging processes, with the ability to modify the shelf life of food.

Keywords: nanomaterials, nanoparticles, green synthesis, agricultural applications.

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

Introducción

En el campo de la ciencia, el prefijo nano- es utilizado cuando se hace referencia a estructuras que equivalen a la mil millonésima parte de algo. La nanotecnología podría definirse como una disciplina centrada en el estudio, síntesis, diseño, manipulación y aplicación de materiales y sistemas funcionales, mediante el control de la materia y las distintas propiedades que se experimentan trabajando en una escala nano (Gómez-Garzón, 2018).

Los nanomateriales (NMs) se pueden entender como un material con un tamaño de unos pocos nanómetros o más pequeño que unas pocas decenas de nanómetros. Es importante destacar que las propiedades físicas y químicas de los NMs dependen de su composición, forma y tamaño precisos, dando así como resultado que sus efectos sobre la salud y el medio ambiente también dependan de dichas características (Bhardwaj *et al.*, 2020).

Para la producción de NMs pueden utilizarse métodos químicos, físicos y biológicos; dichos métodos también se pueden clasificar como descendentes y ascendentes. Los descendentes (en inglés, *top-down*) implican una gran estructura que se divide en unidades de tamaño nanométrico, mientras que los ascendentes (en inglés, *bottom-up*) implican reacciones químicas que conducen a la agregación de átomos en compuestos para la formación de partículas (Rivas-Ramírez y Torres-Pacheco, 2021).

Una nueva propuesta de método de síntesis de NMs, de los conocidos como alternativos, es la síntesis verde o biosíntesis, que busca la utilización de sistemas biológicos, como extractos de microorganismos y plantas, con propiedades que presentan como agentes reductores. Gracias a ello, este método es visto como novedoso y contamina menos el ambiente comparado con otros que implican químicos que podrían ser perjudiciales al dejar en sus procesos residuos tóxicos para los seres vivos (Baig, Kammakakam y Falath, 2021).

La importancia de por qué se ha estado investigando sobre la fabricación de NMs es debido a sus propiedades únicas y las características que presentan, como el área superficial, el comportamiento magnético, los efectos

cuánticos, la alta conductividad térmica y eléctrica, las excelentes propiedades mecánicas y la actividad microbiana. Estas propiedades difieren en comportamiento cuando se comparan con el mismo material, pero en *bulk*.

Las nanopartículas (NPs) derivadas de una síntesis verde tienden a tener ciertas propiedades ópticas, físicas y químicas, como un alto rendimiento cuántico, una alta fotoestabilidad, una excelente biocompatibilidad y una adecuada capacidad de absorción de luz infrarroja cercana (NIR, por sus siglas en inglés). Por ello, se consideran de interés para su potencial aplicación en diversos productos químicos, la medicina, la catálisis y la industria alimentaria.

Este trabajo tiene como objetivo realizar una recopilación sobre la información más novedosa afín al tema de la obtención de NMs por síntesis verde utilizando extractos biológicos. Se hará hincapié en la síntesis verde y su característica de evitar la contaminación que generan otro tipo de métodos de síntesis.

Tipos de los nanomateriales

Los NMs se pueden separar en varios grupos según la dimensión, tipo, morfología u origen que presentan (Sanino, 2021). De acuerdo con su tipo, es posible clasificarlos en i) estructuras basadas en carbono, ii) estructuras de base inorgánica y iii) estructuras híbridas (Barhoum *et al.*, 2022; García-Ovando *et al.*, 2022).

Nanomateriales basados en carbono

Fullerenos

Los fullerenos (C₆₀) son moléculas de carbono esféricas formadas por átomos de carbono unidos por hibridación sp². La estructura esférica se compone de alrededor de 28 a 1,500 átomos de carbono, con diámetros que van desde 8,2 nm para capas simples hasta 4-36 nm para fullerenos multicapa. Los NMs compuestos de jaulas huecas globulares, como los alotrópicos, formas de carbono, se encuentran en los fullerenos. Debido a su conductividad eléctrica, alta resistencia, estructura, afinidad electrónica y adaptabilidad, han atraído el interés comercial

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

(Salem, Hammad, Mohamed y El-DougDoug, 2023; Singh, Yadav y Mishra, 2020).

Se han hecho investigaciones sobre heteroestructuras con comportamiento (foto)electrocatalítico sin precedentes que implica la combinación de fullerenos y nanohíbridos de baja dimensión (LD, por sus siglas en inglés). Actualmente se está ampliando el campo de los materiales energéticos. Las propiedades físicas y químicas de los fullerenos han ofrecido nuevas oportunidades para adaptar tanto las estructuras electrónicas como las actividades catalíticas de las estructuras nanohíbridadas (Puente *et al.*, 2021; Saleh, 2020).

Grafeno

El grafeno es un alótropo de carbono. En específico, es un hexágono plano bidimensional de redes en forma de panal compuestas por átomos de carbono. El espesor de una lámina de grafeno suele ser de aproximadamente 1 nm (Ijaz, Gilani, Nazir y Bukhari, 2020; Salem, Hammad, Mohamed y El-DougDoug, 2023).

Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono (CNT, por sus siglas en inglés) se producen a partir de una nanolámina de grafeno con una estructura de panal de átomos en espirales huecas para formar nanotubos con diámetro de entre 0,7 nm para CNT de pared simple y 100 nm para CNT de pared múltiple, y longitudes que van desde unos pocos micrómetros hasta varios milímetros. Los extremos pueden ser huecos o pueden cerrarse con moléculas de medio fullereno. Estos tienen una estructura similar a una lámina de grafito que rueda sobre sí misma. Debido a que estas láminas pueden enrollarse, al hacerlo pueden tener una pared (nanotubos de carbono de pared simple; SWNT, por sus siglas en inglés) o dos o varias paredes (de pared múltiple; MWNT, por sus siglas en inglés). Se ha investigado el uso que se le puede dar a los CNT en fuentes fotovoltaicas, pudiendo tener importantes ramificaciones en el mercado comercial de paneles solares (Saleh, 2020; Singh, Yadav y Mishra, 2020; Wieland *et al.*, 2021).

Nanofibra de carbono

La nanofibra de carbono se produce de la misma manera que la de grafeno, la diferencia es que se enrolla en forma de cono en lugar de tubos cilíndricos regulares (Salem, Hammad, Mohamed y El-DougDoug, 2023; Singh, Yadav y Mishra, 2020). Este tipo de NMs son utilizados para los polímeros reforzados con fibra de carbono y son materiales livianos para aplicaciones de alto nivel (como en la aeronáutica o la industria automotriz) con el fin de reforzar posibles fracturas. Las propiedades de los materiales sin estas modificaciones son sobresalientes, pero incluso se pueden mejorar mediante la aplicación de resina polimérica modificada por este tipo de nanofibras y otros NMs (Ijaz, Gilani, Nazir y Bukhari, 2020; Rennhofer y Zanghellini, 2021; Saleh, 2020).

Nanomateriales de base inorgánica

Metales

Los NMs de base metálica se sintetizan a partir de metales hasta tamaños nanométricos utilizando procesos destructivos o constructivos. El aluminio, el cadmio, el cobalto, el cobre, el oro, el hierro, el plomo, la plata y el zinc son comúnmente utilizados como precursores para la síntesis de nanoestructuras metálicas (nanopartículas, nanoalambre y películas delgadas). Las NPs resultantes tienen distintas propiedades tales como tamaños que van desde 10 a 100 nm, y características de la superficie como el tamaño de los poros, una alta relación superficie-volumen, carga superficial, estructuras cristalinas, formas, color, reactividad y sensibilidad. Debido a la resonancia de plasmones de superficie confinada (SPR, por sus siglas en inglés), las NPs tienen características optoelectricas. Las NPs de metales nobles y alcalinos, como Cu, Au y Ag, exhiben una banda de absorción notable en el espectro electromagnético que da información sobre su forma y tamaño (Salem, Hammad, Mohamed y El-DougDoug, 2023; Saravanan *et al.*, 2021).

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

Óxidos metálicos y no metálicos

Estos tipos de NMs pueden tener varias formas y tamaños, entre los que se incluyen los amorfos, policristalinos, densos, porosos y huecos. Estos NMs pueden ser importantes por sus aplicaciones, por ejemplo, en la catálisis, fotocatálisis, fotodegradación de tintes y aplicaciones de imágenes, debido a lo cual están atrayendo mucha atención de investigadores. Los materiales semiconductores tienen propiedades dadas entre los metales y los no metales, presentando una amplia gama de usos en la literatura. Son cruciales en fotocatálisis, foto óptica y dispositivos electrónicos (Salem, Hammad, Mohamed y El-DougDoug, 2023; Saravanan *et al.*, 2021).

Nanomateriales híbridos

Polímeros

Suelen ser NPs de base orgánica y, por lo general, tienen forma nanoesférica o nanocapsular. Las primeras son partículas de matriz con una masa total sólida, mientras que las otras moléculas son adsorbidas en el borde exterior de la superficie esférica. En este último caso, la masa sólida es completamente encapsulado dentro de la partícula. Estos materiales son fáciles de hacer funcionar y, como resultado, tienen una amplia gama de usos. La nanotecnología de lípidos es un tema especializado relacionado con el diseño y fabricación de NMs híbridos para aplicaciones, como la administración y la liberación de fármacos (Park *et al.*, 2020; Salem, Hammad, Mohamed y El-DougDoug, 2023).

Síntesis de nanomateriales

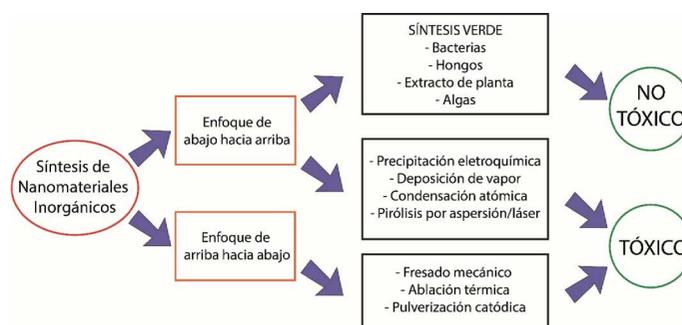
Síntesis verde

Muchos de los efectos adversos de los NMs obtenidos por métodos químicos y físicos han sido vinculados a la presencia de sustancias tóxicas que se absorben en su superficie. Por esta razón, se ha hecho un enfoque en la búsqueda de nuevas alternativas para síntesis de NMs que eviten efectos perjudiciales al entorno. Se ha considerado la síntesis biológica como una alternativa presumiblemente no tóxica y amigable con el medio ambiente, igualando e incluso sobrepasando las expectativas

de los NMs sintetizados por los métodos tradicionales (Barhoum *et al.*, 2022; Ijaz, Gilani, Nazir y Bukhari, 2020; Jadoun, Arif, Jangid y Meena, 2020). La síntesis biogénica de NMs se puede llevar a cabo mediante el uso de organismos como hongos, algas, bacterias, plantas y sus metabolitos, que sirven como agentes reductores y estabilizadores (Saravanan *et al.*, 2021). En la Figura 1 se muestran todos los diferentes enfoques que se pueden utilizar para sintetizar NMs.

Figura 1

Diferentes enfoques para la síntesis de nanopartículas de plata



Fuente: elaborada con base en el concepto de Bhardwaj *et al.*, 2020

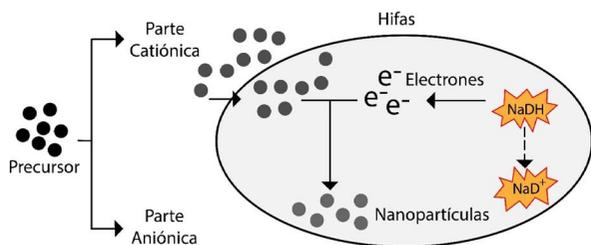
Método intracelular

Este método incluye la síntesis de NPs dentro de las células mediante el transporte de iones durante la exposición de las enzimas presentes. Los NMs formados por técnica intracelular tienen un tamaño más pequeño en comparación con los fabricados por el método extracelular; la nucleación de partículas dentro del organismo podría ser la causa detrás de la variación de tamaños. Esta técnica es más lenta en comparación con el método extracelular para sintetizar NPs metálicas. Este tipo de técnica de síntesis es adecuada para hacer películas compuestas. En la Figura 2 se observa un resumen de este método.

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FERREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

Figura 2

Método intracelular de síntesis de nanopartículas



Fuente: elaborada con base en el concepto de Bhardwaj *et al.*, 2020

Método extracelular

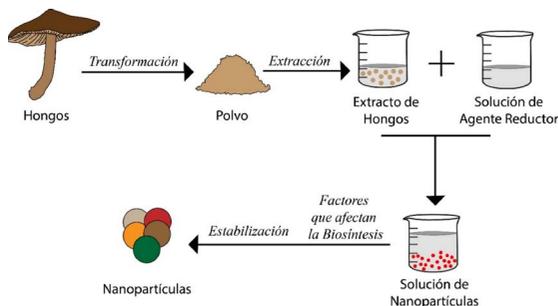
El método de síntesis extracelular, que es sencillo y rentable, implica el tratamiento de filtrado acuoso de biomoléculas con un precursor de metal, donde estos iones metálicos son adsorbidos en la superficie de las células. En esta técnica, el procesamiento posterior no es requerido, por lo que este enfoque es más eficaz en comparación con el intracelular y es más utilizado para la síntesis de NPs. Los metabolitos sintetizados por los organismos juegan un papel crucial en su supervivencia cuando se exponen a diversos tipos de estrés ambiental, como variaciones de temperatura, materiales tóxicos (por ejemplo, iones metálicos) y antagonistas. Además, este método de síntesis muestra la capacidad de inmovilización de metales iones en un portador adecuado. [Esquivel-Figueroa y Mas-Diego, 2021].

El mecanismo aceptado para la síntesis de NPs metálicas es la reducción enzimática vía enzima reductasa, dentro de la célula o en la membrana celular. Este mecanismo propone la síntesis de NPs mediada por organismos, es decir, la acción de quinonas transportadoras de electrones, nitrato reductasa, o por ambas cosas. Se observa en bacterias y hongos principalmente dos formas de enzimas: el nitrato reductasa y las reductasas dependientes de α -NADPH, las cuales son responsables de la síntesis de las NPs metálicas y nanopartículas de óxido de metal. Las NPs sintetizadas extracelularmente fueron estabilizadas por las enzimas y proteínas formadas por los organismos. Se ha observado que la proteína de alto peso molecular se asocia a la síntesis de NPs, como

la reductasa dependiente de NADH. También, los fitoquímicos que se encuentran en las plantas son importantes para la biorreducción de las NPs [Bhardwaj *et al.*, 2020]. En la Figura 3 se muestra una representación gráfica de los mecanismos para la síntesis por método extracelular.

Figura 3

Método extracelular de síntesis de nanopartículas



Fuente: elaborada con base en el concepto de Bhardwaj *et al.*, 2020

Síntesis verde con extractos de hongos

Los hongos pueden considerarse fábricas naturales para la biosíntesis de NPs, ya que pueden acumular metales intracelularmente y sintetizarlos extracelularmente por mecanismos biológicos y fisicoquímicos. Tienen numerosas ventajas respecto a otros organismos para sintetizar NPs, debido principalmente a su facilidad para ser aislados y cultivados, así como a que secretan numerosas enzimas extracelulares. Resulta más fácil la obtención de NPs de manera extracelular porque en la intracelular son necesarios métodos más complejos para aislarlas, a partir de la biomasa fúngica [Sannino, 2021].

Aunque se ha demostrado el uso de hongos para producir NPs metálicas de plata, oro y platino, la mayoría de los estudios dan un enfoque prioritario a la síntesis de las de plata, las cuales han presentado una amplia actividad antimicrobiana contra bacterias Gram negativas, Gram positivas y hongos patógenos de humanos y plantas, así como actividad citotóxica contra células cancerosas [Esquivel-Figueroa y Mas-Diego, 2021]. En la Tabla 1 se muestran algunas especies de hongos empleadas para la síntesis de NPs metálicas.

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FERREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

Tabla 1

Variedades de *Pleurotus* spp. y sus nanopartículas

Especie	Tipos de NPs sintetizadas y tamaño (nm)	Químicos utilizados	Tiempo de reacción (horas)	Agente reductor	Agente estabilizador	Temperatura específica [°C]	Morfología
<i>Pleurotus citrinopileatus</i>	Ag, 6-10	AgNO ₃	24	Hongo extracto, nitrato	Hongo extracto	60	Esférico
<i>P. cornucopiae</i> (<i>citrinopileatus</i>)	Ag, 20-30	AgNO ₃	24	Extracto acuoso	Extracto acuoso	25	Esférico
<i>P. cystidiosus</i>	Ag, 2-100	AgNO ₃	24	Extracto acuoso	Extracto acuoso	25	ND
<i>P. cystidiosus</i>	Au, ND	HAuCl ₄	24	Extracto acuoso	Extracto acuoso	29	ND
<i>P. djamor</i>	Ag, 5-50	AgNO ₃	48, 24	Extracto acuoso	Extracto acuoso	RT	Esférico
<i>P. djamor</i>	ZnO, 70-80	Zn(NO ₃) ₂ ·5H ₂ O	24	ND	ND	RT	Esférico
<i>P. djamor</i>	TiO ₂	TiCl ₄	20 min	Extracto acuoso	Extracto acuoso	RT	Esférico
<i>P. eryngii</i>	Ag, 18.45	AgNO ₃	5 días	Extracto acuoso	Extracto acuoso	RT	Esférico
<i>P. flabellatus</i>	Ag, 2-100	AgNO ₃	24	Extracto acuoso	Extracto acuoso	25	ND
<i>P. flabellatus</i>	Au, ND	HAuCl ₄	24	Extracto acuoso	Extracto acuoso	29	ND
<i>P. florida</i>	Ag, 20	AgNO ₃	Durante la noche; 72	Extracto acuoso	Extracto acuoso	RT	Esférico
<i>P. florida</i>	Au, 2-14	HAuCl ₄	1.5	Extracto acuoso, glucano	Glucano	70	Esférico
<i>P. florida</i>	Au, 20	HAuCl ₄	24	Extracto acuoso	AQUEOUS S extracto	RT	Esférico
<i>P. giganteus</i>	Ag, 5-25	AgNO ₃	3 días	Extracto acuoso	Extracto acuoso	37	Esférico
<i>P. ostreatus</i>	Ag, 4,28,50	AgNO ₃	24; 72; 1	Extracto acuoso; hongo caldo	Extracto acuoso	28; 75	Esférico
<i>P. ostreatus</i>	Au, 22.9	HAuCl ₄	24 h	Extracto acuoso	Extracto acuoso	29	Esférico

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FERREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

<i>P. ostreatus</i>	ZnS, 2-5	ZnCl ₂	Durante la noche	Hongo	Hongo extracto	70	Esférico con cristalino
<i>P. ostreatus</i>	Zn, 15	ZnS-N ₃	1	Extracto acuoso	Extracto acuoso	4	Uniforme
<i>P. platypus</i>	Ag, 0.56 µm	AgNO ₃	72	Extracto acuoso	Extracto acuoso	37	Esférico
<i>P. pulmonarius</i>	Ag, 2-100	AgNO ₃	24	Extracto acuoso	Extracto acuoso	25	ND
<i>P. pulmonarius</i>	Au, ND	HAuCl ₄	24	Extracto acuoso	Extracto acuoso	29	ND
<i>P. sajor-caju</i>	Ag, 5-50	AgNO ₃	48	Extracto acuoso	Extracto acuoso	25	Esférico
<i>P. sajor-caju</i>	Au, 16-18	HAuCl ₄ .3H ₂ O	Durante la noche	Extracto acuoso	Extracto acuoso	RT	Esférico
<i>P. tuber-regium</i>	Ag, 50	AgNO ₃	2	Extracto acuoso	Extracto acuoso	80	Esférico y cúbico

Fuente: Bhardwaj *et al.*, 2020

Síntesis verde con extractos de plantas

En algunas plantas conocidas por sus propiedades antioxidantes se encuentran presentes metabolitos como los compuestos fenólicos que contienen propiedades reductoras; entre los más importantes están el ácido gálico, benzoico y cafeico. También se han obtenido nanopartículas de oro y plata a una temperatura ambiente utilizando ácido gálico como agente reductor, el cual se encuentra en algunos vegetales [Esquivel-Figueroa y Mas-Diego, 2021].

La primera ocasión que se reportó la obtención de nanopartículas a partir de plantas vivas fue en una publicación en 2002 donde se hace referencia a la formación de NPs de oro de 2 a 20 nm dentro de plantas de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Después, se llegó a la conclusión de que también se formaban NPs de plata con la exposición a un medio rico en iones de plata [Esquivel-Figueroa y Mas-Diego, 2021].

De las plantas es posible obtener extractos que contengan un alto poder antioxidante para el uso en síntesis verde de NMs. La reducción inicial de iones metálicos provoca una formación de centros de nucleación. Estos centros secuestran iones metálicos adicionales y también agregan lugares vecinos de nucleación para dar formación a los NMs. Y como estos NMs están asociados a restos orgánicos de los extractos de plantas, se consigue estabilizar esos NMs de tamaño nanométrico e impedir que se agreguen más y crezcan a un tamaño mayor al rango nanométrico. En ocasiones es necesario adicionar agentes estabilizantes para evitar la aglomeración de los NMs obtenidos [Esquivel-Figueroa y Mas-Diego, 2021]. En la Tabla 2 se encuentran algunos ejemplos de extractos de plantas utilizados para la síntesis verde de NMs inorgánicos.

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

Tabla 2

Extractos de plantas utilizados para generar nanopartículas

Año	Tipo de nanopartícula	Planta origen	Tamaño	Morfología	Aplicación
2020	Au	<i>Gelidium pusillum</i>	12±4.2	Esférica	Actividad anticáncer
2020	Au	<i>Hibiscus sabdarifa</i>	15–45	Esférica	Contra leucemia mieloide aguda
2020	Au	<i>Pimenta dioica</i>	13±4	Esférica	Actividad anticáncer
2020	Au	<i>Croton sparsiflorus</i>	16.6–17	Esférica	Protección UV, antibacteriano y agentes anticancerígenos
2020	Au	<i>Desmodium gangeticum</i>	16±4	Esférica	Antioxidante
2020	Au	<i>Litsea cubeba</i>	8–18	Esférica	Reducción catalítica de 4-nitrofenol
2020	Ag	<i>Dionaea muscipula</i>	5–10	Cuasi-esférica	Antioxidante
2020	Ag	<i>Elaeagnus umbellata</i>	40	Esférica	Antimicrobiano
2020	Ag	<i>Reishi Mushroom</i>	15–22	Esférica	Antifúngico
2020	Ag	<i>Cestrum nocturnum</i>	20	Esférica	Antioxidante y antibacteriano
2020	Ag	<i>Malus domestica</i>	16	-	Antimicrobiano
2020	Ag	<i>Nauclea latifolia</i>	12	Irregular	Antimicrobiano y antioxidante
2020	Cu	<i>Orobancha aegyptiaca</i>	<50	Esférica	Actividad nematocida
2020	Cu	Walnut shells	15–22	-	Antibacteriano, antioxidante y anticancerígeno
2020	Cu	<i>Anacardium occidentale</i>	<20	Esférica irregular	Eliminación eficiente de uranio
2020	Cu	<i>Hagenia abyssinica</i>	34.76	Esférica, hexagonal, triangular, cilíndrica	Antimicrobiano
2020	Pd	<i>Cotton boll peels</i>	9.44	Esférica	Actividad catalítica contra colorantes azo tóxicos
2020	Pd	<i>Syzygium aqueum</i>	5–20	Irregular	Catálisis en el acoplamiento de reacción
2020	Pd	<i>Rosmarinus officinalis</i>	15–90	Semi-esférica	Actividades catalíticas, antibacterianas y antifúngicas de Mizoroki-Heck
2020	Pt	<i>Nigella sativa</i> L.	1–6	Esférica	Agente antimicrobiano y anticancerígeno
2020	Pt	<i>Prosopis farcta</i> fruits	3.5	Irregular	-
2020	Pt	<i>Phoenix dactylifera</i> L.	2.3–3	Esférica	Efectos tóxicos y protectores sobre la hepatotoxicidad inducida por CCl4 en ratas Wistar
2020	Pt	<i>Tragia involucrata</i>	10	Esférica	Aplicaciones biomédicas y farmacéuticas
2020	ZnO	<i>Prosopis juliflora</i>	31.80–32.39	Irregular	Aplicaciones biomédicas y farmacéuticas
2020	ZnO	<i>Acalypha fruticosa</i>	50	Esférica, hexagonal	Antimicrobiano

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

2020	ZnO	<i>Calotropis gigantea</i>	31	Hexagonal y piramidal	Detección de nitrito, fotocatalítica y antibacteriana
2020	ZnO	<i>Urtica dioica</i>	20–22	Esférica	Antidiabético
2020	TiO ₂	<i>Lemon peel extract</i>	80–140	Esférica	Actividad fotocatalítica
2020	TiO ₂	<i>Mentha arvensis</i>	20–70	Esférica	Antimicrobiano
2020	TiO ₂	<i>Alcea and Thyme extract</i>	10	Poliedro e irregular	Actividad fotocatalítica
2020	TiO ₂	<i>Syzygium cumini</i>	11	Esférica	Eliminación fotocatalítica de plomo
2020	TiO ₂	<i>Ledebouria revoluta</i>	47	Tetragonal	Actividad histopatológica, larvicida, antibacteriana y anticancerígena

Fuente: Jadoun, Arif, Jangid y Meena, 2020

Síntesis verde con extracto de algas marinas

Actualmente es común el uso de algas para la biosíntesis de NMs. El uso de algas se debe principalmente a su alta capacidad para absorber metales y reducir iones metálicos, sus costos de producción relativamente bajos y, en particular, su capacidad para producir NMs a gran escala. Otra característica interesante para resaltar es la tolerancia que presentan a condiciones atmosféricas adversas, la cual es más eficaz que en otros microorganismos. Tanto la biomasa seca viva como la biomasa muerta de algas se pueden utilizar para la biosíntesis de NMs; se las conoce como bionanofábricas. Otra ventaja añadida del uso de algas es el tiempo necesario para la síntesis, ya que requiere menos tiempo en comparación con otros microbios. Los NMs sintetizados por algas contienen grupos superficiales hidrofílicos como sulfato, carboxilo e hidroxilo, lo que les otorga una potencial aplicabilidad única. Los NMs sintetizados se pueden utilizar en tratamientos médicos, ya que las algas por sí mismas no fabrican ninguna sustancia tóxica o dañina (Chugh, Viswamalya y Das, 2021). En la Tabla 3 se muestran algunos ejemplos de algas que se han utilizado para la síntesis de nanopartículas, y el tamaño promedio de las NPs obtenidas.

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

Tabla 3

Propiedades de las nanopartículas de plata sintetizadas
utilizando varias clases de algas potenciales

Algas	Especie	Tipo de nanopartícula	Síntesis	Tamaño (nm)	Forma	Temperatura
Cianobacterias	<i>Microcoleus</i>	Ag	Extracelular	44-79	Esférica	RT
	<i>Phormidium willei</i>	Ag	Extracelular	100-200	Esférica	25
	<i>Plectonema boryanum</i>	Ag	Intracelular y extracelular	1-15, 1-40, 5-200	Esférica y octaédrica	25, 60, 100 °C
	<i>Espirulina platensis</i>	Ag	Extracelular	~12	Esférica	25
Microalgas	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Ag	Intracelular y extracelular	5-15 (in vitro), 5-35 (in vivo)	Redondo/rectangular	RT
	<i>Chlorella vulgaris</i>	Ag	Intracelular	~10	Esférico	28
	<i>Nannochloropsis ocula</i>	Ag	Intracelular	~19	Esférico	28
Macroalgas	<i>Caulerpa racemosa</i>	Ag	Extracelular	5-25	Esférico/triangular	RT
	<i>Codium Capitatum</i>	Ag	-	~30		RT
	<i>Ulva fasciata</i>	Ag	Extracelular	28-41	Esférico	RT
	<i>Padina Gymnospor</i>	Ag	-	25-40	Esférico	30
	<i>Padina pavonica</i>	Ag	Extracelular	45-64	Esférico	-
	<i>Gelidiella acerosa</i>	Ag	-	22	Esférico	RT
	<i>Gracilaria dura</i>	Ag	-	6	Esférico	25, 60 y 100
	<i>Hipnea musciforme</i>	Ag	-	40-65	Esférico	RT

Fuente: Chugh, Viswamalya y Das, 2021

Factores que afectan la biosíntesis

Es posible usar cultivos de algas, hongos y plantas de manera muy eficiente para la síntesis de nanopartículas, pero para cada uno de los procesos se deben mantener ciertas condiciones de manera adecuada, como factores físicos, químicos y ambientales que afectan la biosíntesis

de las nanopartículas. Algunos de los factores importantes son la concentración de extracto o biomasa, el pH, el tiempo de incubación, la iluminación, la concentración de precursores y la temperatura [Chugh, Viswamalya y Das, 2021]; en la Tabla 4 se ejemplifican.

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

Tabla 4

Factores que influyen en la síntesis de nanomateriales

Factor	Efecto
Concentración del extracto	La concentración de biomasa/extracto está directamente relacionada con el rendimiento de NPs. Además, el tamaño y la estructura de las NPs también están significativamente influenciados por la concentración del sustrato.
pH	El tamaño y la morfología de las NPs sintetizadas biológicamente pueden verse muy influenciados por el cambio de pH. Esto se debe a que la carga eléctrica de la biomasa y los agentes de protección se alteran fuertemente en diferentes condiciones de pH, lo que provoca una alteración en su capacidad para unir y reducir los iones metálicos.
Temperatura	La velocidad de reacción y producción de NPs aumenta con el incremento de la temperatura. No solo aumenta la velocidad de la reacción, sino que también puede ayudar a que haya una mayor producción de NPs y a regular su tamaño.
Tiempo de incubación/ tiempo de reacción	Con un aumento en el tiempo de reacción, aumenta el número de NPs, pero solo durante un tiempo determinado. Después de eso, podría crearse una aglomeración de NPs debido a su inestabilidad. Sin embargo, si las NPs sintetizadas son estables, no habrá efecto de aumentar el tiempo sobre ellas. El efecto del tiempo de incubación también depende del organismo que se esté utilizando para la síntesis. El tiempo de exposición también puede influir en el tamaño de las NPs.
Concentración de precursores	La concentración de precursores no solo influye en el rendimiento, sino que también afecta la morfología de las NPs sintetizadas. También se ha observado que la concentración del precursor afecta directamente el número de NPs sintetizadas, es decir, a mayor concentración, mayor rendimiento.
Iluminación	La iluminación es un factor físico crítico que puede afectar la síntesis de NPs. Estudios han indicado claramente que no se trata solo de iluminación; hay longitudes de onda particulares que ayudan en la síntesis de NPs por diferentes métodos.
Agente estabilizante	Los agentes estabilizantes generalmente utilizados son polímeros y tensioactivos iónicos y no iónicos. Se pueden utilizar diferentes agentes estabilizantes para obtener la forma y el tamaño deseados de las nanopartículas. Algunos agentes estabilizantes tienen funciones duales en la reducción y protección de las NPs.

Fuente: Chugh, Viswamalya y Das, 2021

Aplicación de nanomateriales en la agricultura y seguridad alimentaria

Las aplicaciones de NMs inorgánicos han sido de mucho interés en el desarrollo sostenible de la agricultura y la seguridad alimentaria. Se han empleado diferentes recursos biológicos para reemplazar productos químicos nocivos con el fin de reducir las sales metálicas y estabilizar los NMs; es decir, los métodos verdes para la síntesis han prestado atención a los avances nanobiotecnológicos. Debido a los nuevos dominios, los NMs biosintetizados podrían ser útiles en las diferentes áreas de la agricultura, como la promoción del crecimiento de las plantas, el control de las enfermedades de las plantas y

el control de insectos/plagas, siendo agente fungicida, en la seguridad alimentaria para el envasado de alimentos, para aumentar la vida útil y para protegerlos del deterioro, entre otros propósitos (Shende *et al.*, 2022).

Conclusiones

Los NMs obtenidos a partir de plantas, hongos y microorganismos son una propuesta novedosa y que genera una menor contaminación en comparación con otro tipo de síntesis. La variedad de los métodos de obtención da como producto NPs con aplicaciones específicas importantes como la protección UV, agentes antibacterianos, agentes anticancerígenos y agentes antifúngicos, posi-

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

bles aplicaciones en biomedicina, farmacéutica y la industria alimentaria (empacado), así como en la producción agrícola, y sus propiedades dan posibilidad para muchas otras aplicaciones. La utilización de NMs en la agricultura es una herramienta novedosa que puede contribuir en la calidad de la producción de alimentos. Aunado a lo anterior, los NMs verdes incrementan la producción en diversos cultivos e influyen positivamente en aspectos como el desarrollo, la germinación y la producción de metabolitos secundarios en dichas plantas. Cabe resaltar que, dependiendo de la especie de planta, hongo o alga utilizada, éstas generarán NMs con diferentes características que tendrán aplicaciones específicas.

Referencias bibliográficas

- Baig, N., Kammakam, I. y Falath, W. [2021]. "Nanomaterials: a review of synthesis methods, properties, recent progress, and challenges". *Materials Advances*, 2(6), 1821-1871. Doi: <https://doi.org/10.1039/D0MA00807A>
- Barhoum, A. García-Betancourt, M.L., Jeevanandam, J., Husien, E.A., Mekkaawy, S.A., Mostafa, M., Omran, M.M., Abdalla, M.S. y Bechelany, M. [2022]. "Review on natural, incidental, bioinspired, and engineered nanomaterials: history, definitions, classifications, synthesis, properties, market, toxicities, risks, and regulations". *Nanomaterials*, 12(2). Doi: <https://doi.org/10.3390/nano12020177>
- Bhardwaj, K., Sharma, A., Tejwan, N., Bhardwaj, S., Bhardwaj, P., Nepovimova, E., Shami, A., Kalia, A., Kumar, A., Abd-El salam, K. y Kuca, K. [2020]. "Pleurotus macrofungi-assisted nanoparticle synthesis and its potential applications: a review". *Journal of Fungi*, 6(4). Doi: <https://doi.org/10.3390/jof6040351>
- Chugh, D., Viswamalya, V.S. y Das, B. [2021]. "Green synthesis of silver nanoparticles with algae and the importance of capping agents in the process". *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(1), 126. Doi: <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00228-w>
- Esquivel-Figueroa, R. de la C. y Mas-Diego, S.M. [2021]. "Síntesis biológica de nanopartículas de plata: Revisión del uso potencial de la especie *Trichoderma*". *Revista Cubana de Química*, 33(2), 23-45.
- García-Ovando, A.E., Ramírez, J.E., Esquivel, E.U., Cervantes, J.A. y Esquivel, K. [2022]. "Biosynthesized nanoparticles and implications by their use in crops: Effects over physiology, action mechanisms, plant stress responses and toxicity". *Plant Stress*, 6. Doi: 100109. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100109>
- Gómez-Garzón, M. [2018]. "Nanomateriales, nanopartículas y síntesis verde". *Repertorio de Medicina y Cirugía*, 27(2). Doi: <https://doi.org/10.31260/RepertMedCir.v27.n2.2018.191>
- Ijaz, I., Gilani, E., Nazir, A. y Bukhari, A. [2020]. "Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles". *Green Chemistry Letters and Reviews*, 13(3), 223-245. Doi: <https://doi.org/10.1080/17518253.2020.1802517>
- Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N.K. y Meena, R.K. [2020]. "Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: a review". *Environmental Chemistry Letters*, 19(1), 355-374. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01074-x>
- Park, W., Shin, H., Choi, W.-K., Na, K. y Keun Han, D [2020]. "Advanced hybrid nanomaterials for biomedical applications". *Progress in Materials Science*, 114. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100686>
- Puente, A.R., Fernandez-Delgado, O., Gomez, A., Ahsan, M.A. y Echegoyen, L. [2021]. "Fullerenes as key components for low-dimensional (photo)electrocatalytic nanohybrid materials". *Angewandte Chemie (International Edition)*, 60(1), 122-141. Doi: <https://doi.org/10.1002/anie.202009449>
- Rennhofer, H. y Zanghellini, B. [2021]. "Dispersion state and damage of carbon nanotubes and carbon nanofibers by ultrasonic dispersion: a review". *Nanomaterials*, 11(6). Doi: <https://doi.org/10.3390/nano11061469>
- Rivas-Ramírez, L.K. y Torres-Pacheco, I. [2021]. "Nanopartículas: nuevas aliadas de la agricultura". *Digital Ciencia@UAQRO*, 14(2), 19-27.
- Saleh, T.A. [2020]. "Nanomaterials: classification, properties, and environmental toxicities". *Environmental Technology & Innovation*, 20. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101067>
- Salem, S.S., Hammad, E.N., Mohamed, A.A. y El-Dougdoug, W. [2023]. "A comprehensive review of nanomaterials:

KEVIN EDUARDO GARCÍA MIRANDA, ANA ANGÉLICA FEREGRINO PÉREZ,
KAREN ESQUIVEL ESCALANTE, CRISTIAN JOSUÉ MENDOZA MENESES

- types, synthesis, characterization, and applications”. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(1).
- Sannino, D. (2021). “Types and classification of nanomaterials”. En M.B. Tahir, M. Rafique y M. Sagir (eds.), *Nanotechnology: Trends and Future Applications* (pp. 15–38). Springer. Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-15-9437-3_2
- Saravanan, A., Kumar, P.S., Karishma, S., Vo, D.-V. N., Jeevanantham, S., Yaashikaa, P.R. y George, C.S. (2021). “A review on biosynthesis of metal nanoparticles and its environmental applications”. *Chemosphere*, 264. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128580>
- Shende, S., Rajput, V.D., Gade, A., Minkina, T., Fedorov, Y., Sushkova, S., Mandzhieva, S., Burachevskaya, M. y Boldyreva, V. (2022). “Metal-based green synthesized nanoparticles: boon for sustainable agriculture and food security”. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 21(1), 44–54. Doi: <https://doi.org/10.1109/TNB.2021.3089773>
- Singh, V., Yadav, P. y Mishra, V. (2020). “Recent advances on classification, properties, synthesis, and characterization of nanomaterials”. En *Green synthesis of nanomaterials for bioenergy applications* (pp. 83–97). John Wiley & Sons, Ltd. Doi: <https://doi.org/10.1002/9781119576785.ch3>
- Wieland, L., Li, H., Rust, C., Chen, J. y Flavel, B.S. (2021). “Carbon nanotubes for photovoltaics: from lab to industry”. *Advanced Energy Materials*, 11(3). Doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202002880>