Recibido 28 Ene 2026 *ReCIBE, Año 15 No. 2, junio 2026*

Aceptado 09 Jul 2026

Biosíntesis de nanopartículas utilizando extractos de origen vegetal: fundamentos bioquímicos, biomateriales funcionales y aplicaciones en biosensores para la integración ciber-humana.

Biosynthesis of nanoparticles using plant-based extracts: biochemical fundamentals, functional biomaterials and applications in biosensors for cyber-human integration.

Diego Carlos Bouttier Figueroa[1]
diego.bouttier@unison.mx
Francisco Humberto González-Gutiérrez[1]
humberto.gonzalez@unison.mx
Luisa Alondra Rascón-Valenzuela[1]
luisa.rascon@unison.mx
José Manuel Cortez-Valadez[1]
jose.cortez@unison.mx

1 Universidad de Sonora, México

Resumen
La síntesis verde de nanopartículas empleando extractos de plantas es una estrategia clave dentro de la bionanotecnología, al integrar principios de bioquímica, sustentabilidad y funcionalidad tecnológica. Este artículo analiza los fundamentos bioquímicos de la biosíntesis de nanopartículas empleando extractos de plantas, enfatizando el papel de los metabolitos secundarios como polifenoles, flavonoides, alcaloides, azúcares reductores y proteínas en los procesos de reducción, nucleación, crecimiento y estabilización de nanomateriales. Además, se discuten los principales tipos de nanopartículas obtenidas mediante rutas verdes y se comparan sus ventajas y limitaciones frente a los métodos de síntesis química convencionales, destacando su mayor biocompatibilidad y menor impacto ambiental. La revisión aborda también las propiedades bioquímicas y funcionales de las nanopartículas verdes que las posiciona como biomateriales funcionales idóneos para aplicaciones en biosensores. Se presentan casos del uso de nanopartículas biosintetizadas en plataformas de detección de biomarcadores relevantes para la salud humana, como glucosa, lactato y antígenos específicos. Finalmente, se analizan los principales retos asociados a la reproducibilidad, estandarización y escalabilidad de la síntesis verde y se discuten tendencias futuras orientadas al desarrollo de nanopartículas inteligentes, biosensores multianalito y estrategias de medicina personalizada, en el marco de la integración ciber-humana.

Palabras clave: Síntesis verde de nanopartículas; Metabolitos secundarios; Biosensores bioquímicos; Biomateriales funcionales; Integración ciber-humana

Abstract
Green synthesis of nanoparticles using plant extracts is a key strategy within bionanotechnology, integrating principles of biochemistry, sustainability and technological functionality. This article discusses the biochemical underpinnings of nanoparticle biosynthesis employing plant extracts, emphasizing the role of secondary metabolites such as polyphenols, flavonoids, alkaloids, reducing sugars, and proteins in the processes of reduction, nucleation, growth, and stabilization of nanomaterials. In addition, the main types of nanoparticles obtained through green routes are discussed and their advantages and limitations compared to conventional chemical synthesis methods are compared, highlighting their greater biocompatibility and lower environmental impact. The review also addresses the biochemical and functional properties of green nanoparticles that position them as functional biomaterials suitable for applications in biosensors. Cases of the use of biosynthesized nanoparticles in detection platforms for biomarkers relevant to human health, such as glucose, lactate and specific antigens, are presented. Finally, the main challenges associated with the reproducibility, standardization and scalability of green synthesis are analyzed and future trends aimed at the development of smart nanoparticles, multi-analyte biosensors and personalized medicine strategies are discussed, within the framework of cyber-human integration.

Keywords: Green synthesis of nanoparticles; Secondary metabolites; Biochemical biosensors; Functional biomaterials; Cyber-human integration

Introducción

Bionanotecnología y sustentabilidad

La bionanotecnología ha transformado múltiples áreas de la ciencia y la ingeniería mediante el desarrollo de metodologías para la síntesis de nanopartículas con aplicaciones en salud humana, biomateriales y sistemas de monitoreo fisiológico. Tradicionalmente, las nanopartículas se han obtenido mediante métodos fisicoquímicos como la reducción química, el método sol-gel, la coprecipitación, la síntesis hidrotermal y otros procesos que permiten un elevado control sobre el tamaño, la morfología y la composición de los nanomateriales. Sin embargo, muchos de estos métodos requieren agentes reductores y estabilizantes sintéticos, solventes orgánicos, temperaturas elevadas o un importante consumo energético, lo que ha generado preocupaciones relacionadas con su impacto ambiental, biocompatibilidad y sustentabilidad. En respuesta a estas limitaciones, las tendencias actuales en bionanotecnología buscan desarrollar metodologías de síntesis más seguras, eficientes y ambientalmente sostenibles (Shahcheraghi et al., 2022).

La alternativa que ha surgido es la síntesis verde de nanopartículas empleando organismos biológicos, especialmente extractos de plantas. Este método utiliza la diversidad de fitoquímicos presentes en los extractos vegetales, los cuales actúan como agentes reductores, estabilizantes y funcionalizantes durante la síntesis de nanopartículas. (Jadoun et al., 2021).

El uso de extractos de plantas es una estrategia de química verde, al emplear recursos renovables, reducir la generación de subproductos tóxicos y minimizar el consumo energético. Además, existe la posibilidad de utilizar plantas o subproductos agroindustriales locales ayudando a generar lo que se conoce como bioeconomía circular. Una de las ventajas de la síntesis verde es su capacidad para modular la velocidad de formación de núcleos de crecimiento, produciendo nanopartículas con tamaños más pequeños, aspecto crítico para su interacción con otros sistemas (Sah et al., 2024).

En ciencias de la salud e integración ciber-humana, las nanopartículas poseen potencial para el desarrollo de biosensores bioquímicos, dispositivos portátiles y plataformas de monitoreo fisiológico en tiempo real (del Valle, 2021). La bionanotecnología verde conecta la bioquímica vegetal con el diseño de nanomateriales funcionales y su aplicación en plataformas bioelectrónicas. A través del aprovechamiento de metabolitos secundarios presentes en extractos de plantas, es posible generar nanopartículas capaces de interactuar con biosensores, estableciendo un puente entre los procesos moleculares de origen biológico y los sistemas digitales orientados a la salud humana, como se ilustra en la Figura 1.

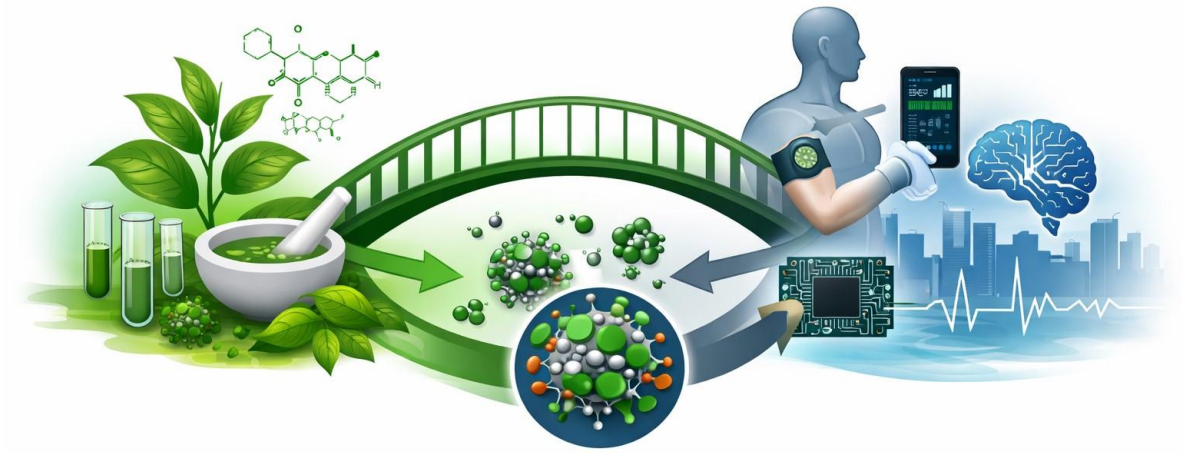

Figura 1. Bionanotecnología verde como puente entre la bioquímica vegetal, los nanomateriales funcionales y la integración ciber-humana. Imagen generada usando IA

A pesar de los avances alcanzados, persisten desafíos en la reproducibilidad y estandarización de la biosíntesis de nanopartículas debido a que aún se necesita comprender los mecanismos bioquímicos involucrados en la nucleación y estabilización de las nanopartículas. El presente artículo tiene como objetivo analizar los avances en la síntesis verde de nanopartículas usando extractos de plantas desde una perspectiva bioquímica, destacando su relevancia como biomateriales funcionales y su aplicación en biosensores y sistemas de interfaces bioelectrónicas orientados a las ciencias de la salud.

Fundamentos bioquímicos de la síntesis verde de nanopartículas

La síntesis verde de nanopartículas empleando extractos de plantas tiene su fundamento en interacciones entre los iones metálicos proveniente de sales precursoras y los fitoquímicos presentes en los extractos de plantas. A diferencia de los métodos convencionales, donde los agentes reductores y estabilizantes son moléculas conocidas, la síntesis verde involucra sistemas con una diversidad de fitoquímicos dependientes de la naturaleza del extracto (Soltys et al., 2021).

Rol de los metabolitos secundarios en la síntesis verde de nanopartículas.

Los metabolitos secundarios en la síntesis verde actúan como agentes reductores, estabilizantes y funcionalizantes. Los fitoquímicos principales que se ven involucrados en el mecanismo de reacción son polifenoles, flavonoides, taninos, alcaloides, terpenos, azúcares reductores y proteínas. Estas moléculas presentan una alta densidad de grupos funcionales, como hidroxilos, carbonilos, carboxilos y aminas, capaces de interactuar con especies metálicas en solución (Al Saiqali et al., 2025).

Estos compuestos participan en la formación de las nanopartículas en distintas etapas. Por ejemplo, los polifenoles y flavonoides poseen grupos hidroxilo aromáticos con capacidad de donar electrones, lo que les permite reducir iones metálicos como Zn^{2+}, Ag^{+} o Fe^{3+} a sus estados de oxidación inferiores o formas de óxido metálico. Estos compuestos incluso pueden coordinarse a la superficie de las nanopartículas, creando una capa orgánica que ayuda a limitar el crecimiento cristalino y previene la agregación (Sysak et al., 2023). Los taninos y alcaloides contribuyen a la estabilización coloidal mediante interacciones electrostáticas, mientras que los azúcares reductores y las proteínas pueden participar en la nucleación (Villagrán et al., 2024). Esta multifuncionalidad distingue a la síntesis verde de otros enfoques biológicos y explica la variabilidad observada en tamaño, morfología y propiedades superficiales de las nanopartículas obtenidas. La diversidad estructural y funcional de los metabolitos de origen vegetal explica la amplia variedad de extractos empleados en la síntesis verde de nanopartículas. En la Tabla 1 se muestran ejemplos representativos de plantas, metabolitos implicados y su función bioquímica durante el proceso de síntesis.

Planta	Fitoquímico involucrado	Nanoparticula sintetizada	Rol bioquímico	Referencia
Camellia sinensis	Compuestos fenólicos	Ag	Agentes reductores y estabilizantes	(Demir, 2025)
Malus domestica	Pectina (polisacárido)	Fe_3O_4	Estabilización coloidal y control de crecimiento	(Wang et al., 2022)
Moringa oleifera	Flavonoides, taninos, alcaloides	MgO y $CaCO_3$	Reducción redox y funcionalización superficial	(Nelwamondo et al., 2023)
Zadirachta indica	Grupos fenólicos, flavonoides y grupos carbonilo	ZnO, CuO y NiO	Reducción metálica y estabilización estructural	(Yadeta Gemachu & Lealem Birhanu, 2024)
Nicotiana plumbaginifolia	Polifenoles, flavonoides, carbohidratos, taninos	FeO	Reducción redox, estabilización y control morfológico	(Duan et al., 2024)

Tabla 1. Metabolitos secundarios implicados en la síntesis verde de nanopartículas y su función bioquímica

Mecanismos redox en la reducción de iones metálicos

La síntesis verde de nanopartículas es un proceso redox controlado, en el cual las biomoléculas presentes en los extractos vegetales actúan como donadores de electrones y los iones metálicos como aceptores. Como se muestra en la Figura 2, la biosíntesis comprende una secuencia de etapas que incluye la reducción de los iones metálicos, la nucleación, el crecimiento cristalino y la estabilización superficial mediante biomoléculas de origen vegetal. La figura resume las principales reacciones involucradas en la formación de nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos, las variables experimentales como el pH, la temperatura, el tiempo de reacción y la relación extracto/precursor que controlan la cinética

del proceso y las características finales de los nanomateriales. La eficiencia de esta biosíntesis depende del potencial redox de los metabolitos y de dichas condiciones de reacción (Madani et al., 2022). Durante el proceso, los grupos funcionales presentes en los extractos sufren procesos de oxidación, generando especies quinónicas u oxidadas, mientras que los iones metálicos son reducidos y participan en la formación de núcleos. Esta transferencia electrónica inicial da lugar a eventos de nucleación, seguidos por etapas de crecimiento y estabilización (Patra & El Kurdi, 2021).

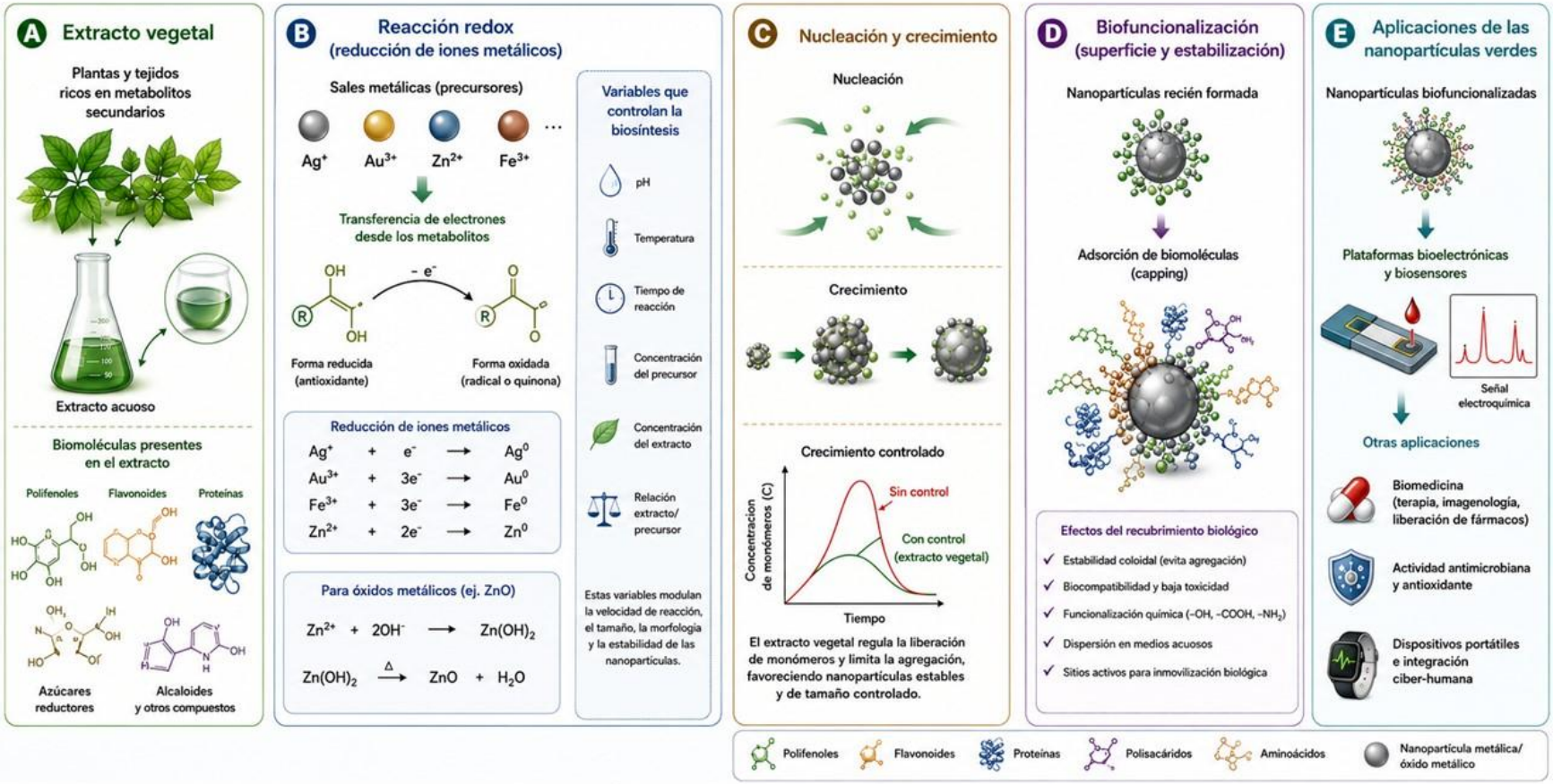

Figura 2. Mecanismo bioquímico propuesto para la biosíntesis de nanopartículas mediada por extractos vegetales. Se ilustran las etapas de extracción de biomoléculas, reducción de iones metálicos mediante metabolitos secundarios, nucleación, crecimiento y biofuncionalización superficial de nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos. Asimismo, se muestran las principales variables experimentales que controlan el proceso de biosíntesis y las aplicaciones potenciales de los nanomateriales obtenidos. Imagen generada usando IA

En el caso de nanopartículas de óxidos metálicos, como ZnO o MgO, los mecanismos redox se combinan con procesos de hidroxilación, deshidratación y condensación, en los cuales el entorno bioquímico del extracto modula la velocidad de reacción y la estructura cristalina final (Radulescu et al., 2023). Los fundamentos bioquímicos de la síntesis verde no solo determinan la formación de las nanopartículas, sino también sus propiedades funcionales. La presencia de restos orgánicos de origen vegetal en la superficie de las nanopartículas influye en la carga superficial, la hidrofobicidad y la afinidad por biomoléculas, aspectos para su desempeño como biomateriales funcionales (Kar et al., 2024). Desde la perspectiva de las aplicaciones, estas características favorecen la inmovilización enzimática y la eficiencia en la transducción de señales bioquímicas. En consecuencia, las nanopartículas verdes se posicionan como plataformas ideales para el desarrollo de dispositivos de biosensado y biomédicos inteligentes.

Síntesis verde de nanopartículas empleando extractos vegetales

La síntesis verde de nanopartículas empleando extractos vegetales comprende una secuencia de etapas que inicia con la selección del material vegetal y la obtención del extracto, seguida por su caracterización fitoquímica, la preparación del precursor metálico, el control de las condiciones de reacción, la formación y purificación de las nanopartículas, así como su caracterización fisicoquímica y evaluación para diversas aplicaciones. La Figura 3 resume el flujo general de este proceso, mientras que las etapas involucradas en la reducción de los iones metálicos, la nucleación y la estabilización superficial fueron descritas previamente en la Figura 2 (Jain et al., 2024).

El proceso es una secuencia de eventos que incluye: (1) la reducción de iones metálicos por metabolitos, (2) nucleación de átomos u óxidos metálicos, (3) crecimiento controlado de los núcleos y (4) estabilización mediante compuestos orgánicos del extracto (Figura 2). La composición fitoquímica del extracto controla la cinética de reacción, permitiendo el control del tamaño, la morfología y la funcionalidad de las nanopartículas obtenidas (Shreyash et al., 2021).

Figura 3. Flujo general del proceso de síntesis verde de nanopartículas empleando extractos vegetales. Imagen generada por IA

Tipos de nanopartículas obtenidas por síntesis verde

La síntesis verde que emplea extractos vegetales ha permitido obtener una amplia variedad de nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos con aplicaciones en biomedicina, biosensores y otras áreas tecnológicas. Entre las más estudiadas se encuentran las nanopartículas de plata (AgNPs), oro (AuNPs), cobre (CuNPs), óxido de zinc (ZnO), óxido de magnesio (MgO), óxido de hierro (Fe_3O_4) y óxido de titanio (TiO_2), cuyas principales propiedades y aplicaciones se resumen en la Tabla 2. La elección del tipo de nanopartícula depende del perfil fitoquímico del extracto vegetal, el precursor metálico empleado y las condiciones de reacción, factores que determinan las propiedades fisicoquímicas y funcionales del nanomaterial obtenido:

Tipo	Nanopartícula	Principales propiedades	Aplicaciones representativas	Referencia
Metálica	Plata (AgNPs)	Alta actividad antimicrobiana, elevada conductividad eléctrica y actividad catalítica	Biosensores electroquímicos, recubrimientos antimicrobianos, dispositivos biomédicos	Vidyasagar et al., 2023
	Oro (AuNPs)	Biocompatibilidad, estabilidad química y propiedades plasmónicas	Biosensores ópticos, diagnóstico clínico, liberación controlada de fármacos	Hammami et al., 2021
	Cobre (CuNPs)	Actividad catalítica, conductividad eléctrica y actividad antimicrobiana	Catálisis, recubrimientos funcionales, sensores	Chakraborty et al., 2022
Óxido metálico	Óxido de zinc (ZnO)	Propiedades semiconductoras, fotocatalíticas y antimicrobianas	Biosensores, fotocatálisis, biomedicina, dispositivos electrónicos	Samuel et al., 2022
	Óxido de magnesio (MgO)	Biocompatibilidad, capacidad adsorbente y actividad antimicrobiana	Adsorción de contaminantes, aplicaciones biomédicas, materiales antimicrobianos	Rotti et al., 2023
	Óxido de hierro (Fe_3O_4)	Propiedades magnéticas y superparamagnéticas	Liberación dirigida de fármacos, separación magnética, biosensores	Campos et al., 2015
	Óxido de titanio (TiO_2)	Fotoactividad, estabilidad química y semiconductividad	Sensores, fotocatálisis, recubrimientos funcionales	Rajaram et al., 2023

Tabla 2. Principales nanopartículas obtenidas mediante síntesis verde y sus aplicaciones.

Comparación con métodos de síntesis química tradicionales

Entre los métodos convencionales para la síntesis de nanopartículas destacan la reducción química, el método sol-gel, la coprecipitación y la síntesis hidrotermal, ampliamente utilizados por su capacidad para controlar el tamaño, la morfología y la composición de los nanomateriales. La

reducción química destaca por su simplicidad y elevada eficiencia; el método sol-gel por permitir obtener materiales altamente homogéneos; la coprecipitación por su sencillez experimental y potencial de escalamiento; y la síntesis hidrotermal por producir nanopartículas con alta cristalinidad y un mejor control de la estructura cristalina. Estos métodos suelen emplear agentes reductores como borohidruro de sodio, hidrazina o citrato, además de solventes orgánicos y condiciones de reacción energéticamente intensivas. Aunque estas metodologías permiten un elevado control sintético, presentan limitaciones importantes en términos de sustentabilidad, seguridad y compatibilidad biológica. En contraste, la síntesis verde empleando extractos de plantas ofrece múltiples ventajas, como el empleo de solventes acuosos, biomoléculas renovables, la eliminación de reactivos tóxicos, la reducción del consumo energético y la obtención de nanopartículas con superficies bioactivas (Singh, 2022). Aun así, también presenta retos asociados a la variabilidad fitoquímica, reproducibilidad entre lotes y estandarización de los extractos, aspectos que continúan siendo objeto de investigación activa. La Tabla 3 muestra una comparación entre las principales características de ambos enfoques de síntesis.

Parámetro	Síntesis verde	Síntesis convencional
Agentes reductores	Metabolitos del extracto	Borohidruro, hidrazina, citrato
Estabilizantes	Biomoléculas del extracto	Polímeros sintéticos, surfactantes
Solvente	Agua	Solventes orgánicos
Condiciones de reacción	Suaves (baja temperatura y presión)	Moderadas a altas
Impacto ambiental	Bajo	Moderado a alto
Biocompatibilidad	Alta	Variable
Funcionalización superficial	Natural (biofuncionalización)	Requiere modificación química
Escalabilidad	Media (en desarrollo)	Alta (industrial)
Reproducibilidad	Dependiente del extracto	Alta

Tabla 3. Comparación entre síntesis verde y métodos químicos convencionales para la obtención de nanopartículas.

Propiedades bioquímicas y funcionales de las nanopartículas verdes

Las nanopartículas obtenidas por síntesis verde utilizando extractos de plantas presentan propiedades distintivas derivadas de su proceso de formación. A diferencia de los nanomateriales producidos por rutas químicas convencionales, las nanopartículas verdes poseen en su superficie restos orgánicos del extracto vegetal, lo que influye en su biocompatibilidad, estabilidad e interacción con biomoléculas (Salem & Fouda, 2021). Estas características resultan especialmente relevantes para aplicaciones en biosensores, biomateriales funcionales y sistemas bioelectronicos.

La biocompatibilidad de las nanopartículas verdes se atribuye a la capa de biomoléculas de origen vegetal que permanece adsorbida sobre su superficie tras el proceso de biosíntesis. Esta

biofuncionalización superficial reduce la citotoxicidad y favorece la interacción con sistemas biológicos. Además, esta capa favorece interacciones no covalentes (enlaces de hidrógeno, fuerzas electrostáticas e interacciones hidrofóbicas) con proteínas, enzimas y membranas celulares. Estudios recientes han demostrado que nanopartículas verdes de óxidos metálicos, como ZnO y MgO, exhiben una mayor tolerancia celular en comparación con sus equivalentes sintetizados químicamente, lo que amplía su potencial en aplicaciones biomédicas (Saadh et al., 2025)(Anbazhagi et al., 2025). Además, la biocompatibilidad intrínseca de estas nanopartículas facilita su integración en plataformas de monitoreo fisiológico, donde el contacto prolongado con tejidos, fluidos biológicos o la piel humana es un requisito para los sistemas inteligentes.

La actividad superficial de las nanopartículas verdes está relacionada con los grupos funcionales presentes en su superficie tales como hidroxilos, carboxilos, aminas y carbonilos que confieren reactividad química. Esta actividad superficial se aprovecha en la inmovilización enzimática, un proceso en el diseño de dispositivos de detección bioquímica. Estas interacciones bioquímicas, que favorecen la inmovilización enzimática y la transferencia electrónica, se ilustran en la Figura 4. Las nanopartículas actúan como andamios que facilitan la orientación de enzimas y optimizan la transferencia electrónica entre el sitio activo enzimático y el transductor del sensor. En sistemas electroquímicos, las nanopartículas favorecen la transducción eficiente de señales bioquímicas hacia señales eléctricas medibles (Oliveira et al., 2021)(Ma et al., 2025).

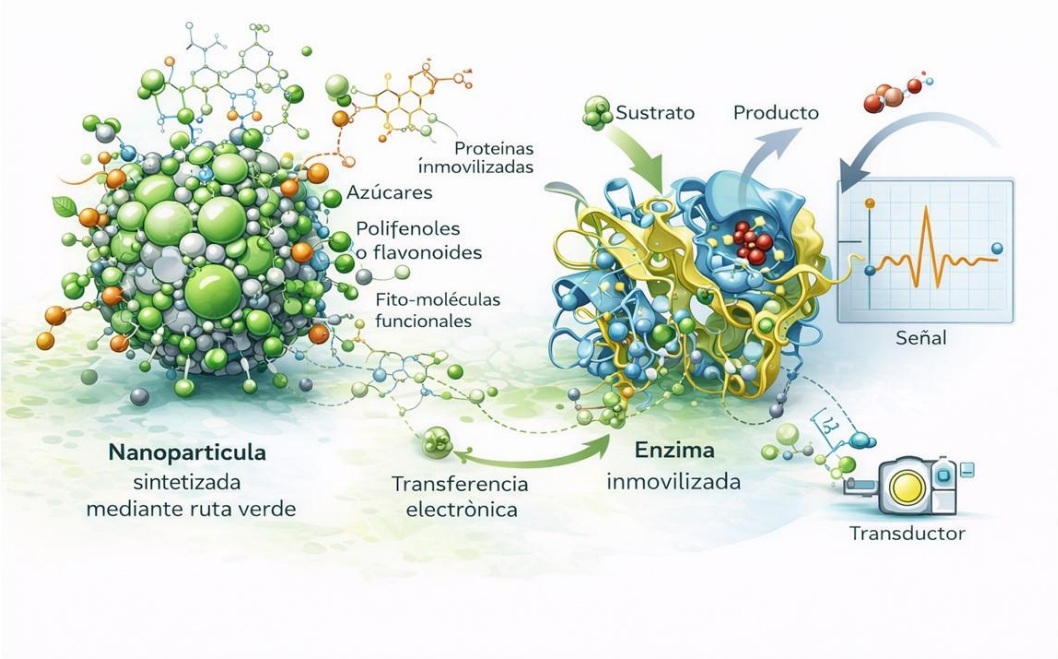

Figura 4. Interacción entre nanopartículas y biomoléculas enzimáticas Imagen generada por IA

Aplicaciones en biosensores e integración ciber-humana

La unión de la síntesis verde de nanopartículas con el desarrollo de biosensores ha abierto posibilidades en el ámbito de las ciencias de la salud. Las nanopartículas obtenidas por síntesis verde actúan como elementos estructurales y como interfaces capaces de traducir eventos moleculares en señales eléctricas u ópticas procesables por sistemas digitales. Esta capacidad es útil para el diseño de dispositivos de monitoreo continuo, portátiles e implantables, orientados a la adquisición de información fisiológica en tiempo real (Kim et al., 2024).

Las nanopartículas sintetizadas por extractos de plantas se han utilizado en plataformas de biosensado aplicadas a la salud humana. Entre los casos se encuentran los biosensores electroquímicos y ópticos para la detección de biomarcadores asociados al metabolismo energético, al estrés fisiológico y enfermedades crónicas (Harshita, Wu, et al., 2023). Los biosensores de glucosa que usan nanopartículas de ZnO y F_e3O_4 funcionalizadas con glucosa oxidasa, han mostrado sensibilidad y respuesta rápida en fluidos biológicos como sudor y sangre intersticial. De manera similar, los biosensores de lactato han sido aplicados en el monitoreo del esfuerzo físico y la fatiga muscular, integrándose en dispositivos portátiles utilizados en el ámbito deportivo y de rehabilitación (Das, 2023) (Ding et al., 2025).

Asimismo, nanopartículas de plata y oro se han empleado tanto en biosensores para la detección de cortisol, un biomarcador del estrés, como en plataformas destinadas al diagnóstico temprano de enfermedades metabólicas y cardiovasculares. Estos dispositivos tienen compatibilidad con sistemas de adquisición de datos digitales y potencial para aplicaciones de monitoreo personalizado (Ahmad et al., 2024). En la Tabla 4 se presentan algunos ejemplos de biomarcadores detectados, tipos de sensores y su contribución a sistemas de integración ciber-humana.

.

Nanoparticula	Biomarcador	Tipo de biosensor	Plataforma	Aplicación	Referencia
ZnO	Glucosa y paracetamol	Electroquímico	Dispositivo portátil	Monitoreo de diabetes	(Avinash et al., 2023)
Au	lactato	colorimétrico	Papel	Medir esfuerzo físico	(Mirzaei et al., 2021)
Mo	epinefrina	Fluorescente	Dispositivo portátil	Medir los niveles de adrenalina en tiempo real	(Harshita, Jha, et al., 2023)
Ag	Antígeno prostático específico	Electroquímico	Dispositivo portátil	Detección de cáncer de prostata	(Mandal et al., 2023)
Ag	Urea	Colorimétrico	Teléfono inteligente	Detección de infecciones renales y hepáticas	(Choi et al., 2021)

Tabla 4. Aplicaciones de biosensores que usan nanopartículas sintetizadas utilizando extractos de plantas

La integración de tecnologías emergentes, la microelectrónica, el Internet de las cosas (IoT) y las herramientas basadas en inteligencia artificial, ha impulsado la evolución de los biosensores donde los datos bioquímicos obtenidos se procesan, interpretan y retroalimentan en tiempo real. Las nanopartículas verdes, facilitan la miniaturización de los sensores y su integración en wearables, parches cutáneos o dispositivos implantables (Ataei Kachouei et al., 2023). Estos sistemas permiten la conversión del evento bioquímico en información digital, lo que posibilita aplicaciones como: monitoreo continuo de pacientes, prevención de enfermedades crónicas, optimización del rendimiento físico y personalización de tratamientos médicos (Jafleh et al., 2024).

La incorporación de nanopartículas verdes en estos dispositivos apoya los principios de sustentabilidad y biotecnología responsable, participando en el desarrollo de tecnologías de nueva generación.

Retos en la síntesis verde de nanopartículas e integración en biosensores

A pesar de los avances en la síntesis verde de nanopartículas usando extractos de plantas y su aplicación en biosensores, persisten retos científicos y tecnológicos que limitan su producción a gran escala y su integración en sistemas ciber-humanos. Estos desafíos se concentran en la reproducibilidad de los procesos, la estandarización de los materiales biológicos empleados y la escalabilidad de las rutas de síntesis, aspectos críticos para la transición de la investigación académica hacia aplicaciones industriales y clínicas.

La reproducibilidad como desafío en la síntesis verde de nanopartículas se debe a que los extractos de plantas son sistemas biológicos complejos cuya composición fitoquímica puede variar por múltiples factores, como la especie vegetal, la parte utilizada, el estado fisiológico de la planta, la estación del año, las condiciones climáticas y el método de extracción (Abegunde et al., 2024). Estas variaciones afectan la cinética de nucleación y crecimiento de las nanopartículas, dando lugar a diferencias en tamaño, morfología, carga superficial y propiedades funcionales entre distintos lotes. En el desarrollo de biosensores, incluso pequeñas variaciones pueden causar cambios en la sensibilidad, selectividad y estabilidad del dispositivo. Para abordar este reto, se han propuesto estrategias como la caracterización fitoquímica previa de los extractos y el uso de extractos estandarizados (Kumar et al., 2025).

La estandarización es otro reto asociado a la reproducibilidad. La ausencia de protocolos homogenizados para la preparación de extractos y la síntesis verde de nanopartículas dificulta la comparación directa de resultados entre diferentes estudios y limita la transferencia tecnológica. La estandarización implica además de establecer concentraciones y condiciones de reacción, establecer perfiles fitoquímicos mínimos que garanticen la funcionalidad del extracto como agente reductor y estabilizante. Asimismo, resulta necesario emplear métodos de caracterización, incluyendo técnicas espectroscópicas, microscópicas y electroquímicas, para asegurar la consistencia de los materiales producidos (Pattoo, 2023).

La escalabilidad de la síntesis verde de nanopartículas continúa siendo un desafío importante para su implementación industrial y comercial. Si bien los procesos a escala de laboratorio suelen ser simples y eficientes, su extrapolación a escalas mayores enfrenta obstáculos relacionados con el control de la cinética de reacción, la homogeneidad del producto y la disponibilidad sustentable de biomasa. La producción a gran escala requiere el diseño de sistemas que permitan mantener condiciones bioquímicas controladas, como biorreactores adaptados para síntesis verde, así como el aprovechamiento de biomasa residual agroindustrial para garantizar la sustentabilidad del proceso (Bharali et al., 2023). Además, la integración de las nanopartículas verdes en biosensores comerciales demanda compatibilidad con procesos de manufactura estandarizados y con tecnologías de microfabricación

Tendencias futuras en bionanotecnología verde e integración ciber-humana

La evolución de la bionanotecnología verde se encuentra estrechamente ligada a la necesidad de desarrollar tecnologías más sustentables, inteligentes y centradas en el ser humano. Las nanopartículas inteligentes constituyen una de las principales tendencias de la bionanotecnología moderna. Tanto los nanomateriales obtenidos mediante síntesis convencional como aquellos producidos por síntesis verde pueden diseñarse para responder a estímulos específicos del entorno

biológico, como cambios de pH, potencial redox, temperatura o concentración de metabolitos. En el caso de las nanopartículas biosintetizadas, la presencia de fitoquímicos adsorbidos sobre su superficie proporciona una biofuncionalización natural que puede facilitar la inmovilización de biomoléculas de reconocimiento, como enzimas, anticuerpos o aptámeros, además de favorecer interacciones específicas con biomoléculas. Estas características amplían su potencial para el desarrollo de biosensores adaptativos, sistemas de liberación controlada y otras plataformas de medicina personalizada (Dejene, 2024).

Otra tendencia emergente es el desarrollo de biosensores multianalito, capaces de detectar de forma simultánea varios biomarcadores bioquímicos. Estos dispositivos responden a la necesidad de obtener una visión más integral del estado fisiológico del individuo, superando las limitaciones de los sensores monoanalito tradicionales. Las nanopartículas verdes son ideales para la inmovilización de múltiples biomoléculas de reconocimiento en un solo dispositivo (Vasudevan et al., 2024). De este modo, un único biosensor podría integrar la detección de glucosa, lactato, cortisol y pH, proporcionando información combinada sobre metabolismo energético, estrés y equilibrio homeostático.

La medicina personalizada es un objetivo de la integración ciber-humana para usar sistemas de monitoreo fisiológico. El acceso continuo a datos fisiológicos individuales, obtenidos mediante dispositivos portátiles o implantables, permitirá adaptar tratamientos, estrategias de prevención y programas de rehabilitación a las necesidades específicas de cada paciente (Alghamdi et al., 2022). Las nanopartículas verdes, integradas en biosensores, podrían facilitar el seguimiento a largo plazo de pacientes con enfermedades crónicas, atletas de alto rendimiento o poblaciones vulnerables, reduciendo la carga sobre los sistemas de salud y mejorando la calidad de vida.

Conclusiones

La síntesis verde de nanopartículas empleando extractos de plantas se ha consolidado como una estrategia clave de la bionanotecnología al integrar principios de bioquímica, sustentabilidad y funcionalidad tecnológica. En esta revisión se mostró que los metabolitos secundarios de las plantas desempeñan un papel central en los procesos de reducción, nucleación y estabilización de nanopartículas, dando lugar a nanomateriales con superficies biofuncionalizadas y propiedades adecuadas para aplicaciones en biosensores y dispositivos biomédicos.

La biofuncionalización superficial conferida por los metabolitos de origen vegetal favorece la biocompatibilidad, la estabilidad y la interacción con biomoléculas, características que resultan de gran interés para el diseño de biosensores bioquímicos sensibles, selectivos y compatibles con plataformas de monitoreo continuo. Asimismo, la revisión de la literatura demuestra que las nanopartículas obtenidas mediante síntesis verde han sido incorporadas exitosamente en plataformas para la detección de biomarcadores como glucosa, lactato y antígeno prostático específico, evidenciando su potencial para aplicaciones clínicas, deportivas y de monitoreo personalizado.

No obstante, la transición de estas tecnologías desde el laboratorio hacia aplicaciones industriales y clínicas aún enfrenta desafíos importantes. La variabilidad inherente de los extractos vegetales, la reproducibilidad de los procesos de biosíntesis, la estandarización de protocolos, la escalabilidad de la producción y la integración de las nanopartículas en plataformas de biosensado continúan siendo aspectos que requieren investigación adicional. Del mismo modo, la validación preclínica y clínica, el cumplimiento de requisitos regulatorios y la evaluación de la estabilidad y confiabilidad de los dispositivos a largo plazo serán factores determinantes para su implementación en escenarios reales.

En conjunto, la evidencia disponible indica que la bionanotecnología verde constituye una plataforma con un elevado potencial para el desarrollo de biomateriales funcionales y biosensores de nueva generación. La materialización de este potencial requerirá un trabajo interdisciplinario que integre la bioquímica, la ciencia de materiales, la ingeniería, la electrónica y las ciencias de la salud, con el propósito de transformar los avances actuales en tecnologías sustentables, seguras y clínicamente confiables para la integración ciber-humana.

Agradecimientos

D. C. Bouttier-Figueroa agradece la beca de posición postdoctoral en la Universidad de Sonora a SECIHTI.

Referencias

Abegunde, S. M., Afolayan, B. O., & Ilesanmi, T. M. (2024). Ensuring sustainable plant-assisted nanoparticles synthesis through process standardization and reproducibility: Challenges and future directions – A review. *Sustainable Chemistry One World*, *3*(June), 100014. https://doi.org/10.1016/j.scowo.2024.100014

Ahmad, S., Ahmad, S., Ali, S., Esa, M., Khan, A., & Yan, H. (2024). Recent Advancements and Unexplored Biomedical Applications of Green Synthesized Ag and Au Nanoparticles: A Review. *International Journal of Nanomedicine*, *19*, 3187–3215. https://doi.org/10.2147/IJN.S453775

Al Saiqali, M., Aziz, S. S., & Reddy, A. V. (2025). Current Status on Phytochemicals Classification, Structure-Activity Relationship, Stereochemistry and AI-Driven Applications: A Systematic Review. *Pharmacognosy Reviews*, *19*(38), 186–211. https://doi.org/10.5530/phrev.20252344

Alghamdi, M. A., Fallica, A. N., Virzì, N., Kesharwani, P., Pittalà, V., & Greish, K. (2022). The Promise of Nanotechnology in Personalized Medicine. *Journal of Personalized Medicine*, *12*(5). https://doi.org/10.3390/jpm12050673

Anbazhagi, S., Murugesan, A., Muthukrishnan, P., Paramanantham, M., & Rajasekar, S. (2025). Synthesis and characterization of ZnO / MgO nanocomposites : Targeted drug delivery strategies for cancer treatment. *Inorganic Chemistry Communications*, *180*(P2), 115014. https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115014

Ataei Kachouei, M., Kaushik, A., & Ali, M. A. (2023). Internet of Things-Enabled Food and Plant Sensors to Empower Sustainability. *Advanced Intelligent Systems*, *5*(12). https://doi.org/10.1002/aisy.202300321

Avinash, B., Ravikumar, C. R., Basavaraju, N., Abebe, B., Kumar, T. N., Manjula, S. N., & Murthy, H. C. A. (2023). Facile green synthesis of zinc oxide nanoparticles: Its photocatalytic and electrochemical sensor for the determination of paracetamol and D-glucose. *Environmental Functional Materials*, *2*(2), 133–141. https://doi.org/10.1016/j.efmat.2024.01.002

Bharali, A., Deka, B., Sahu, B. P., & Laloo, D. (2023). Major challenges and probable scientific solutions toward the large-scale production of plant-based metallic nanoparticles: a systematic review. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, *8*(4), 933–941. https://doi.org/10.1007/s41204-023-00347-4

Campos, E. A., Pinto, D. V. B. S., de Oliveira, J. I. S., Mattos, E. da C., & Dutra, R. de C. L. (2015). Synthesis, characterization and applications of iron oxide nanoparticles - A short review. *Journal of Aerospace Technology and Management*, *7*(3), 267–276. https://doi.org/10.5028/jatm.v7i3.471

Chakraborty, N., Banerjee, J., Chakraborty, P., Banerjee, A., Chanda, S., Ray, K., Acharya, K., & Sarkar, J. (2022). Green synthesis of copper/copper oxide nanoparticles and their applications: a review. *Green Chemistry Letters and Reviews*, *15*(1), 185–213. https://doi.org/10.1080/17518253.2022.2025916

Choi, C. K., Shaban, S. M., Moon, B. S., Pyun, D. G., & Kim, D. H. (2021). Smartphone-assisted point-of-care colorimetric biosensor for the detection of urea via pH-mediated AgNPs growth. *Analytica Chimica Acta*, *1170*, 338630. https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338630

Das, R., Nag, S., & Banerjee, P. (2023). Electrochemical nanosensors for sensitization of sweat metabolites: From concept mapping to personalized health monitoring. *Molecules*, 28(3), 1259. https://doi.org/10.3390/molecules28031259

Dejene, B. K. (2024). Biosynthesized ZnO nanoparticle-functionalized fabrics for antibacterial and biocompatibility evaluations in medical applications: A critical review. *Materials Today Chemistry*, *42*(August), 102421. https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102421

del Valle, M. (2021). Sensors as green tools in analytical chemistry. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *31*, 100501. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100501

Demir, A. (2025). Green-synthesized silver nanoparticles from Camellia sinensis: mechanistic insights into phenolic-mediated multifunctional biological activities. *BMC Plant Biology*, *25*(1). https://doi.org/10.1186/s12870-025-07881-0

Ding, Y., Yang, L., Wen, J., Ma, Y., Dai, G., Mo, F., & Wang, J. (2025). A comprehensive review of advanced lactate biosensor materials, methods, and applications in modern healthcare. *Sensors*, 25(4), 1045. https://doi.org/10.3390/s25041045.

Duan, Y. T., Soni, K., Patel, D., Choksi, H., Sangani, C. B., Sharaf Saeed, W., Lalit Ameta, K., & Kumar Ameta, R. (2024). Green synthesis of iron oxide nanoparticles using Nicotiana plumbaginifolia and their biological evaluation. *Journal of Molecular Liquids*, *396*(October 2023), 123985. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.123985

Hammami, I., Alabdallah, N. M., jomaa, A. Al, & kamoun, M. (2021). Gold nanoparticles: Synthesis properties and applications. *Journal of King Saud University - Science*, *33*(7). https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101560

Harshita, Jha, S., Park, T. J., & Kailasa, S. K. (2023). Synthesis of molybdenum nanoclusters from Vitex negundo leaves for sensing epinephrine in a pharmaceutical composition†. *Sensors and Diagnostics*, *2*(4), 893–901. https://doi.org/10.1039/d3sd00063j

Harshita, Wu, H. F., & Kailasa, S. K. (2023). Recent advances in nanomaterials-based optical sensors for detection of various biomarkers (inorganic species, organic and biomolecules). *Luminescence*, *38*(7), 954–998. https://doi.org/10.1002/bio.4353

Jadoun, S., Arif, R., Jangid, N. K., & Meena, R. K. (2021). Green synthesis of nanoparticles using plant extracts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, *19*(1), 355–374. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01074-x

Jafleh, E. A., Alnaqbi, F. A., Almaeeni, H. A., Faqeeh, S., Alzaabi, M. A., & Al Zaman, K. (2024). The Role of Wearable Devices in Chronic Disease Monitoring and Patient Care: A Comprehensive Review. *Cureus*, *16*(9). https://doi.org/10.7759/cureus.68921

Jain, K., Takuli, A., Gupta, T. K., & Gupta, D. (2024). Rethinking Nanoparticle Synthesis: A Sustainable Approach vs. Traditional Methods. *Chemistry - An Asian Journal*, *19*(21). https://doi.org/10.1002/asia.202400701

Kar, P., Oriola, A. O., & Oyedeji, A. O. (2024). Molecular Docking Approach for Biological Interaction of Green Synthesized Nanoparticles. *Molecules*, *29*(11), 1–16. https://doi.org/10.3390/molecules29112428

Kim, H., Rigo, B., Wong, G., Lee, Y. J., & Yeo, W. H. (2024). Advances in Wireless, Batteryless, Implantable Electronics for Real-Time, Continuous Physiological Monitoring. In *Nano-Micro Letters* (Vol. 16, Issue 1). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/s40820-023-01272-6

Kumar, M., Sharma, A., Juneja, R., Parashar, T., Arif, M., Dev Singh, A., & Kumar, A. (2025). Biological Evaluation Of Herbal Preparations And Formulation Standardization: A Literature Study. *Journal of Neonatal Surgery*, *14*(8S), 273–288. https://doi.org/10.52783/jns.v14.2537

Ma, X., Pronay, T. S., Gao, B., & Zhao, J. (2025). Nanoengineered Enzyme Immobilization : Toward Biomedical , Orthopedic , and Biofuel Applications. *ACS Omega*. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c05589

Madani, M., Hosny, S., Alshangiti, D. M., Nady, N., Alkhursani, S. A., Alkhaldi, H., Al-Gahtany, S. A., Ghobashy, M. M., & Gaber, G. A. (2022). Green synthesis of nanoparticles for varied applications: Green renewable resources and energy-efficient synthetic routes. *Nanotechnology Reviews*, *11*(1), 731–759. https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0034

Mandal, N., Mitra, R., & Pramanick, B. (2023). Bio-synthesized silver nanoparticle modified glassy carbon electrode as electrochemical biosensor for prostate specific antigen detection. *Carbon Trends*, *13*(November), 100315. https://doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100315

Mirzaei, Y., Gholami, A., & Bordbar, M. M. (2021). A distance-based paper sensor for rapid detection of blood lactate concentration using gold nanoparticles synthesized by Satureja hortensis. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *345*(June), 130445. https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130445

Nelwamondo, A. M., Kaningini, A. G., Ngmenzuma, T. Y. ang, Maseko, S. T., Maaza, M., & Mohale, K. C. (2023). Biosynthesis of magnesium oxide and calcium carbonate nanoparticles using Moringa oleifera extract and their effectiveness on the growth, yield and photosynthetic performance of groundnut (Arachis hypogaea L.) genotypes. *Heliyon*, *9*(9), e19419. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19419

Oliveira, T. M. De, Mafud, A. C., & Alves, D. (2021). Synthesis , characterization and use of enzyme. *Journal of Materials Chemistry B*, 6825–6835. https://doi.org/10.1039/D1TB01164B

Patra, D., & El Kurdi, R. (2021). Curcumin as a novel reducing and stabilizing agent for the green synthesis of metallic nanoparticles. *Green Chemistry Letters and Reviews*, *14*(3), 474–487. https://doi.org/10.1080/17518253.2021.1941306

Pattoo, T. A. (2023). Flora to Nano: Sustainable Synthesis of Nanoparticles via Plant-Mediated Green Chemistry. *Plant Science Archives*, *8*(1), 12–17. https://doi.org/10.51470/psa.2023.8.1.12

Radulescu, D. M., Surdu, V. A., Ficai, A., Ficai, D., Grumezescu, A. M., & Andronescu, E. (2023). Green Synthesis of Metal and Metal Oxide Nanoparticles: A Review of the Principles and Biomedical Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(20). https://doi.org/10.3390/ijms242015397

Rajaram, P., Jeice, A. R., & Jayakumar, K. (2023). Review of green synthesized TiO2 nanoparticles for diverse applications. *Surfaces and Interfaces*, *39*(December 2022), 102912. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2023.102912

Rotti, R. B., Sunitha, D. V., Manjunath, R., Roy, A., Mayegowda, S. B., Gnanaprakash, A. P., Alghamdi, S., Almehmadi, M., Abdulaziz, O., Allahyani, M., Aljuaid, A., Alsaiari, A. A., Ashgar, S. S., Babalghith, A. O., Abd El-Lateef, A. E., & Khidir, E. B. (2023). Green synthesis of MgO nanoparticles and its antibacterial properties. *Frontiers in Chemistry*, *11*(March), 1–13. https://doi.org/10.3389/fchem.2023.1143614

Saadh, M. J., Ali, A. B. M., Hanoon, Z., Jain, V., Kumar, P., Kumar, A., Almehizia, A. A., & Pratap, D. (2025). Journal of Molecular Graphics and Modelling The ability of ZnO and MgO nanocages for adsorption and sensing performance of anticancer drug detection. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, *137*(February), 109003. https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2025.109003

Sah, M. K., Thakuri, B. S., Pant, J., Gardas, R. L., & Bhattarai, A. (2024). The Multifaceted Perspective on the Role of Green Synthesis of Nanoparticles in Promoting a Sustainable Green Economy. *Sustainable Chemistry*, *5*(2), 40–59. https://doi.org/10.3390/suschem5020004

Salem, S. S., & Fouda, A. (2021). Green Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Prospective Biotechnological Applications : an Overview. *Biological Trace Element Research*, 344–370.

Samuel, M. S., Ravikumar, M., John, A., Selvarajan, E., Patel, H., Chander, P. S., Soundarya, J., Vuppala, S., Balaji, R., & Chandrasekar, N. (2022). A Review on Green Synthesis of Nanoparticles and Their Diverse Biomedical and Environmental Applications. *Catalysts*, *12*(5). https://doi.org/10.3390/catal12050459

Shahcheraghi, N., Golchin, H., Sadri, Z., Tabari, Y., Borhanifar, F., & Makani, S. (2022). Nano-biotechnology, an applicable approach for sustainable future. *3 Biotech*, *12*(3), 1–24. https://doi.org/10.1007/s13205-021-03108-9

Shreyash, N., Bajpai, S., Khan, M. A., Vijay, Y., Tiwary, S. K., & Sonker, M. (2021). Green Synthesis of Nanoparticles and Their Biomedical Applications: A Review. *ACS Applied Nano Materials*, *4*(11), 11428–11457. https://doi.org/10.1021/acsanm.1c02946

Singh, N. B. (2022). Green synthesis of nanomaterials. *Handbook of Microbial Nanotechnology*, 225–254. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823426-6.00007-3

Soltys, L., Olkhovyy, O., Tatarchuk, T., & Naushad, M. (2021). Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles: Principles of green chemistry and raw materials. *Magnetochemistry*, *7*(11). https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7110145

Sysak, S., Czarczynska-Goslinska, B., Szyk, P., Koczorowski, T., Mlynarczyk, D. T., Szczolko, W., Lesyk, R., & Goslinski, T. (2023). Metal Nanoparticle-Flavonoid Connections: Synthesis, Physicochemical and Biological Properties, as Well as Potential Applications in Medicine. *Nanomaterials*, *13*(9). https://doi.org/10.3390/nano13091531

Vasudevan, M., Perumal, V., Karuppanan, S., Ovinis, M., Bothi Raja, P., Gopinath, S. C. B., & Immanuel Edison, T. N. J. (2024). A Comprehensive Review on Biopolymer Mediated Nanomaterial Composites and Their Applications in Electrochemical Sensors. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, *54*(7), 1871–1894. https://doi.org/10.1080/10408347.2022.2135090

Vidyasagar, N., Patel, R. R., Singh, S. K., & Singh, M. (2023). Green synthesis of silver nanoparticles: methods, biological applications, delivery and toxicity. *Materials Advances*, *4*(8), 1831–1849. https://doi.org/10.1039/d2ma01105k

Villagrán, Z., Anaya-Esparza, L. M., Velázquez-Carriles, C. A., Silva-Jara, J. M., Ruvalcaba-Gómez, J. M., Aurora-Vigo, E. F., Rodríguez-Lafitte, E., Rodríguez-Barajas, N., Balderas-León, I., & Martínez-Esquivias, F. (2024). Plant-Based Extracts as Reducing, Capping, and Stabilizing Agents for the Green Synthesis of Inorganic Nanoparticles. *Resources*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/resources13060070

Wang, C., Li, G., Karmakar, B., AlSalem, H. S., Shati, A. A., El-kott, A. F., Elsaid, F. G., Bani-Fwaz, M. Z., Alsayegh, A. A., Salem Alkhayyat, S., & El-Saber Batiha, G. (2022). Pectin mediated green synthesis of Fe3O4/Pectin nanoparticles under ultrasound condition as an anti-human colorectal carcinoma bionanocomposite. *Arabian Journal of Chemistry*, *15*(6), 103867. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103867

Yadeta Gemachu, L., & Lealem Birhanu, A. (2024). Green synthesis of ZnO, CuO and NiO nanoparticles using Neem leaf extract and comparing their photocatalytic activity under solar irradiation. *Green Chemistry Letters and Reviews*, *17*(1). https://doi.org/10.1080/17518253.2023.2293841

El **Dr. Francisco Humberto González Gutiérrez** es Profesor del Departamento de Ciencias Qu|ímico-Biológicas de la Universidad de Sonora y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), Nivel C. Obtuvo los grados de Maestría (2017) y Doctorado (2023) por la Universidad de Sonora. Su actividad académica comprende la docencia en licenciatura en las áreas de química clínica, hematología, virología, química orgánica, química verde y análisis bacteriológicos. Sus líneas de investigación se centran en la actividad biológica y bioquímica de productos naturales, con énfasis en la evaluación de compuestos con potencial antimicrobiano, antioxidante y antiproliferativo. Asimismo, ha dirigido tesis de licenciatura orientadas al estudio de plantas medicinales y sus aplicaciones en biotecnología y ciencias de la salud.

La Dra. Luisa Alondra Rascón Valenzuela es Profesora-Investigadora de Tiempo Completo del Departamento de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad de Sonora. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), Nivel 1, y cuenta con el reconocimiento de Perfil Deseable PRODEP. Obtuvo el grado de Doctora en Biociencias con especialidad en Biotecnología de Recursos Naturales por la Universidad de Sonora en 2015. Su investigación se enfoca en la bioquímica y biotecnología de productos naturales, particularmente en el aislamiento, caracterización y evaluación de compuestos bioactivos con actividades antiproliferativa, antimicrobiana, antioxidante y antiinflamatoria, así como en su aprovechamiento sustentable. Ha publicado artículos científicos en revistas internacionales arbitradas, participa activamente en la formación de recursos humanos de licenciatura, maestría y doctorado, y colabora en proyectos relacionados con productos naturales y biotecnología aplicada.

El **Dr. José Manuel Cortez Valadez** es Catedrático SECIHTI adscrito al Departamento de Investigación en Física de la Universidad de Sonora y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), Nivel 2. Su investigación se centra en la síntesis verde y caracterización de nanomateriales, con énfasis en las propiedades ópticas, vibracionales y estructurales de nanoestructuras metálicas, semiconductoras y de carbono, así como en sus aplicaciones en espectroscopía Raman mejorada por superficie (SERS), sensores y ciencia de materiales. Ha publicado de manera continua en revistas científicas internacionales de alto impacto, participa activamente en la formación de recursos humanos de licenciatura y posgrado, y dirige proyectos de investigación orientados al desarrollo de materiales funcionales mediante enfoques experimentales y de nanobiotecnología.

El **Dr. Diego Carlos Bouttier Figueroa** es Posdoctorante SECIHTI adscrito al Departamento de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad de Sonora y miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), Nivel 1. Es Ingeniero en Biotecnología, Maestro en Procesos Biotecnológicos y Doctor en Ciencia de Materiales. Su investigación integra la nanobiotecnología, la ciencia de materiales y la química sostenible, con énfasis en la síntesis verde de nanomateriales funcionales mediante extractos vegetales y el estudio de sus propiedades estructurales, ópticas y biológicas para aplicaciones biomédicas y ambientales. Asimismo, participa en proyectos relacionados con la valorización de biomasa, el desarrollo de nanomateriales sustentables y la biotecnología de productos naturales, además de colaborar en la formación de recursos humanos y actividades docentes en el área de las ciencias químico-biológicas.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.