

Biosíntesis de nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos. Aplicación en remediación ambiental

Nanoparticle biosynthesis metallic and metallic oxides. Application in environmental remediation

Autores: AHUMADA, Richard R; FORESI, Martina; GRANADOS, Alejandro M.

Filiación Institucional: Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Químicas. Departamento de Química Orgánica. INFIQC-CONICET. Córdoba, Argentina.

Fecha de Recepción: Agosto de 2024

Fecha de Aceptación: Octubre de 2024

Contacto: ale.granados@unc.edu.ar

Resumen

En los últimos tiempos, es bastante notorio el elevado ritmo de avances innovadores en diferentes sectores industriales tales como el farmacéutico, agrícola, alimentario, textil, entre otros, provocando así la generación de infinidad de contaminantes emergentes (CE) que afectan en forma desmedida la salud humana y especialmente el medio ambiente. Es así que resulta imperante el uso de estrategias que permitan la mitigación de los impactos aquí ocasionados. Como solución a esta problemática, la nanotecnología ofrece herramientas sencillas, poco costosas y amigables para el medio ambiente, permitiendo obtener nanomateriales con una gran variedad de aplicaciones en este ámbito. La síntesis "Green" o biosíntesis se ha convertido en un método eco-amigable, sostenible y confiable para la obtención de nanomateriales, en especial metálicos/óxidos metálicos que permiten reducir el efecto nocivo de los CE y a su vez promueven metodologías menos destructivas que las convencionalmente estipuladas para este tipo de síntesis. En este trabajo, nos enfocamos en realizar una revisión exhaustiva sobre las alternativas de síntesis biológica de nanopartículas metálicas/óxidos metálicos, así como sus aplicaciones en remediación ambiental, destacando su uso en el biosensado, captura de contaminantes y como catalizadores heterogéneos en reacciones de degradación de CE.

Abstract

In recent times, the high pace of innovative advances in different industrial sectors such as pharmaceutical, agricultural, food, textile, among others, has been quite noticeable, thus causing the generation of countless emerging pollutants (EP) that disproportionately affect human health and especially the environment. Thus, the use of strategies that allow the

mitigation of the impacts caused here is imperative. As a solution to this problem, nanotechnology offers simple, inexpensive and environmentally friendly tools, allowing the obtaining of nanomaterials with a wide variety of applications in this field. "Green" synthesis or biosynthesis has become an eco-friendly, sustainable and reliable method for obtaining nanomaterials, especially metallic/metallic oxides, which allow reducing the harmful effect of EP and at the same time promote less destructive methodologies than those conventionally stipulated for this type of synthesis. In this work, we focus on conducting a comprehensive review of alternatives for biological synthesis of metal/metal oxide nanoparticles as well as their applications in environmental remediation, highlighting their use in biosensing, contaminant capture, and as heterogeneous catalysts in EP degradation reactions.

Palabras Claves

Nanotecnologías, vesículas, geles, fármacos, alimentos

Introducción

Las nanopartículas metálicas (MNPs) y de óxidos metálicos (OMNPs) son un tipo de sistemas nanométricos que se caracterizan por tener una alta relación superficie/volumen en comparación con el material en *bulk*, lo cual resulta en áreas específicas grandes que le aportan reactividad al sistema y, de hecho, se caracterizan por tener una gran capacidad catalítica. En la actualidad, muchos científicos consideran que los nanomateriales son uno de los principales pilares de la ciencia en desarrollo (1). Lo que hace especiales a estos sistemas es la capacidad de poder ajustar sus propiedades variando las condiciones en las que se sintetizan.

Existen dos enfoques para la síntesis de NPs. Uno de ellos es el *Top-Down*, en donde se parte del metal *bulk*, y a partir de diferentes métodos físicos se rompe ese material llevándolo a partículas de tamaños nanométricos. El otro enfoque es el *Bottom-Up*, en donde se parte de los cationes metálicos, y por diferentes métodos químicos y biológicos se puede lograr la formación de clústeres que van a dar lugar a las NPs (2). Los métodos biológicos están generando un gran interés en esta área, ya que se pueden utilizar organismos vivos para la síntesis de estas NPs. Se puede hacer uso de microorganismos como biorreactores, como bacterias, levaduras u hongos, o también se pueden utilizar las diferentes partes de plantas en forma de extractos para dar lugar a la reducción química. El principio de formación de las NPs es el mismo que en la síntesis química, solo que en este caso los agentes que reducen al ion metálico y los estabilizantes son proporcionados por los organismos (3).

En la actualidad, la excesiva actividad de las industrias resulta en un gran desecho de compuestos químicos a los ambientes acuáticos, tales como agroquímicos, fármacos, toxinas, colorantes. La gran utilidad de los colorantes promueve su producción en grandes cantidades, lo que resulta en enormes volúmenes de residuos que contienen estas moléculas. Muchos de estos compuestos, de naturaleza orgánica, son poco o no biodegradables, por lo que su remoción no resulta una tarea sencilla (4). Por otro lado, metales pesados como plomo, cadmio, cromo, zinc, mercurio, entre otros, son liberados hacia ecosistemas acuáticos, así como a los suelos principalmente debido a diversas actividades antropogénicas. Estos contaminantes debido a su persistencia, bioacumulación, propiedad no biodegradable y su toxicidad incluso a bajas concentraciones, presentan una seria amenaza para las plantas, animales e incluso los humanos. Normalmente, la toxicidad de todos estos contaminantes es subestimada, pero en la literatura ya hay reportes de que producen

inhibición de crecimiento bacteriano, deformaciones celulares, comportamientos alterados en especies acuáticas, entre otras (5,6).

Debido a las tendencias *Green* que se vienen adoptando en los últimos tiempos, que tienen que ver con la necesidad de generar el menor impacto posible en el medio ambiente, el desarrollo de métodos y estrategias para la remoción de contaminantes es una exigencia ineludible, por lo tanto el desarrollo de catalizadores, y específicamente nanocatalizadores con grandes áreas superficiales, dispersables en solventes inocuos para el medio ambiente, reciclables y de bajo costo, es un desafío permanente.

Síntesis biológica de NPs

A continuación, se desarrollarán conceptos sobre la síntesis biológica que fue introducida anteriormente. La Tabla 1 resume algunos ejemplos que dan evidencia que es posible la obtención de nanoestructuras con el uso de microorganismos y extractos de plantas.

Nanoestructuras	Organismo	Clasificación	Tamaño	Morfología	Ref.
Ag	<i>Penicillium citreonigrum</i>	Hongo	10-50 nm	Esférica	37
Ag	<i>Talaromyces purpurogenus</i>	Hongo	4-41 nm	Esférica, hexagonal, triangular y forma de varilla	38
Au	<i>Azospirillum brasilense</i>	Bacteria	5-50 nm	Esférica	39
Au	<i>Streptomyces sp. NK52</i>	Bacteria	10-100 nm	Forma de varilla, hexagonal, triangular, esférica	40
Fe ₃ O ₄	<i>Thermoanaerobacter ethanolicus</i>	Bacteria	40 nm	No definida	41
Pd y Pt	<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	Bacteria	No definido	No definida	42
Au y Ag	<i>Cinnamomum camphora</i>	Planta	55-80 nm	Esférica, triangular, formas no definidas	8
Ag	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Hongo	10,3-18,9 nm	Esférica	18
CuO	<i>Bifurcaria bifurcata</i>	Alga	5-45 nm	Mayormente esférica	43
ZnO	<i>Sargassum muticum</i>	Alga	30-57 nm	Hexagonal	44
Au	<i>Polianthes tuberosa</i>	Planta	38,76 nm	Varilla, pentagonal, hexagonal, triangular, esférica	22

Tabla 1
Resumen de microorganismos utilizados para la síntesis de NPs.

Mecanismo de síntesis de NPs basada en microorganismos

La síntesis de NPs con microorganismos se puede dar de dos maneras, extracelular e intracelular. En la síntesis extracelular, los cationes metálicos difunden hasta la superficie de las células, en donde van a interactuar con moléculas extracelulares y con la membrana celular mediante interacciones electrostáticas. En este punto, tanto la membrana como algunas de esas moléculas extracelulares, que pueden ser por ejemplo enzimas reductasas, van a actuar como agentes reductores de los cationes metálicos ya que pueden ceder electrones en la reacción, mientras que otras moléculas presentes en el medio pueden actuar como agentes estabilizantes (7), (Figura 1).

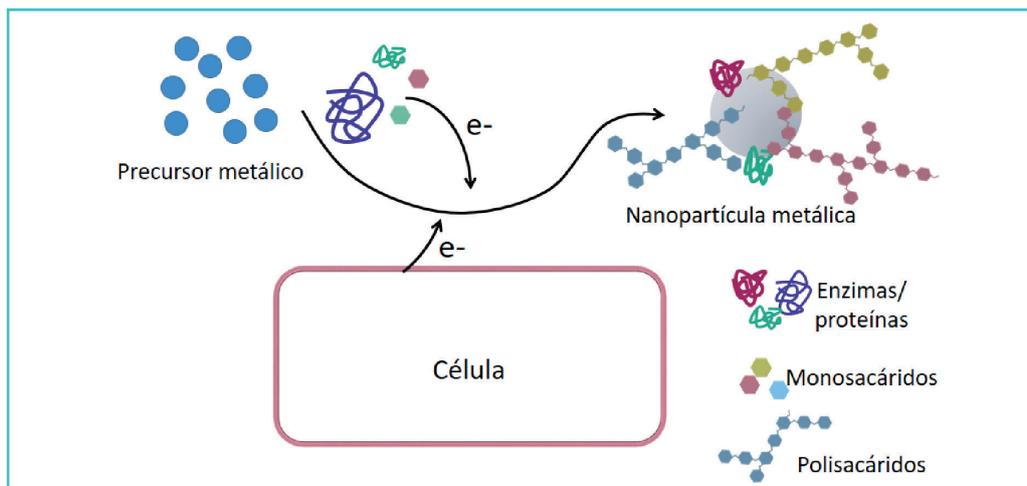


Figura 1
Representación esquemática de la síntesis extracelular de MNPs y OMNPs

En la síntesis intracelular, las enzimas reductasas y otros reductores en el citoplasma son los que proveen los electrones para la reducción de los cationes metálicos, mientras que los péptidos, proteínas y también azúcares actúan como agentes dispersantes (7), (Figura 2).

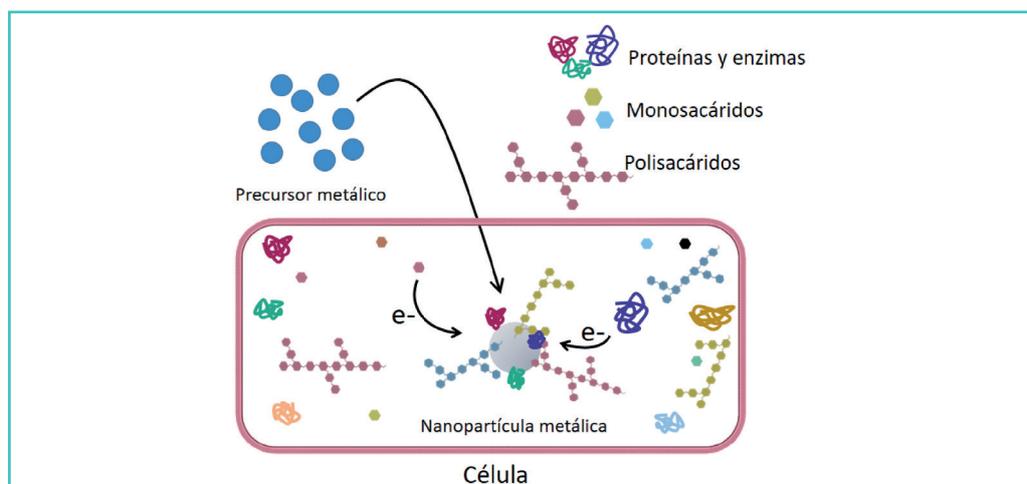
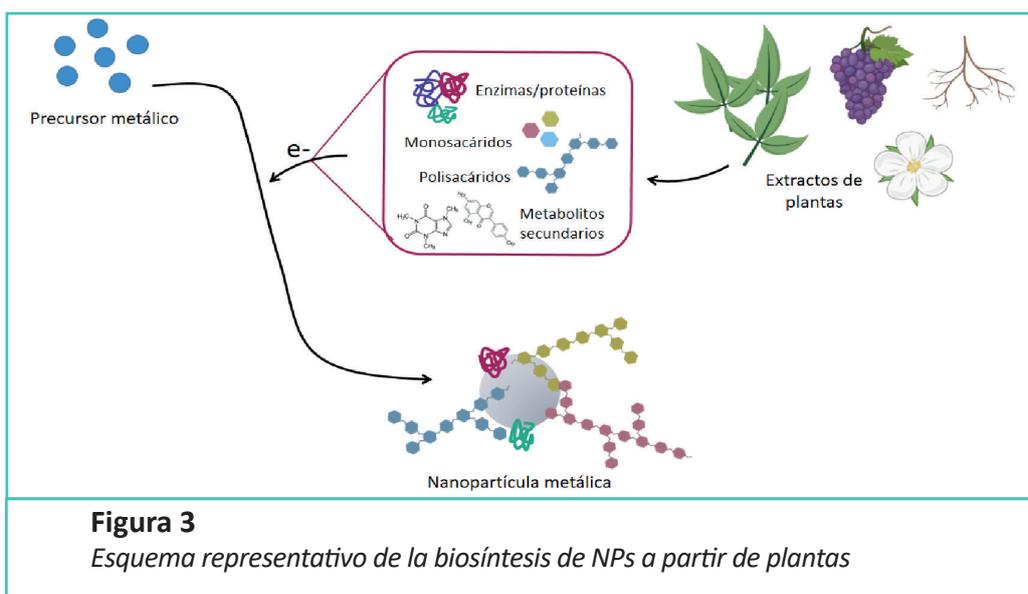


Figura 2
Representación esquemática de la síntesis intracelular de MNPs y OMNPs

Mecanismo de síntesis de NPs basada en plantas

La biosíntesis de NPs metálicas es un método sencillo que involucra la mezcla del precursor metálico con el extracto. Variando las condiciones de reacción, como la temperatura, el pH, la agitación, el tiempo de reacción y las concentraciones de reactantes utilizadas se puede controlar la velocidad de formación y el tamaño de las NPs (8). En los extractos vegetales hay una gran cantidad de moléculas, tales como azúcares, fenoles, flavonoides, proteínas, coenzimas que tienen una gran capacidad para reducir cationes metálicas y a su vez, estabilizar las NPs resultantes. Los grupos funcionales presentes en estas moléculas, tales como hidroxilos, carboxilatos, aminos, son los responsables de la estabilización de las nanoestructuras, ya que pueden interactuar con los átomos de la superficie por interacciones no covalentes (9), (Figura 3).



Organismos utilizados en la biosíntesis de NPs

Bacterias

Estos microorganismos tienen la capacidad de acumular y descontaminar iones metálicos. Una de las vías de interés por las cuales las bacterias son muy utilizadas en esta área es porque pueden formar NPs a partir de la reducción de los iones metálicos. La biosíntesis se puede llevar a cabo en el medio extracelular, a través de las enzimas reductasas extracelulares o haciendo uso de extractos bacterianos, y también en el medio intracelular, mediante la acción de las enzimas reductasas y moléculas reductoras presentes en el interior celular (10). Este segundo método implica tres procesos importantes: captura, biorreducción y recubrimiento de la nanopartícula. No todas las bacterias pueden cumplir esta función, ya que los iones metálicos tienen una toxicidad intrínseca sobre los microorganismos, como ya se ha visto para el caso de los cationes Ag^+ y Cu^{+2} , entre otros (11). Las bacterias tolerantes a metales son capaces de soportar concentraciones de cationes metálicos que están por encima del valor normal (12), y son estas las que normalmente se usan para la biosíntesis de NPs (13).

Hongos (14,15)

La síntesis de NPs con hongos es un proceso bastante eficiente ya que se pueden obtener estructuras con cierta monodispersidad. Con respecto al uso de bacterias, estos microorganismos presentan ciertas ventajas tales como la facilidad para escalar el proceso, la presencia de micelio que proporciona una mayor área superficial y el bajo costo de los procesos (16). De modo similar al descrito para bacterias, la

síntesis intracelular de las NPs está mediada por enzimas reductasas que se encuentran en el medio intracelular. La síntesis extracelular en hongos tiene sus ventajas porque tiene una etapa de procesamiento posterior más simple, y permite escalar la producción (17).

Levaduras

En estos microorganismos también se puede llevar a cabo la síntesis de NPs de forma intracelular y extracelular, de forma muy similar a la descrita anteriormente para bacterias y para hongos. Se ha demostrado la obtención exitosa de NPs de plata en presencia de extractos de levaduras; las mismas presentaron morfología esférica con muy buena monodispersidad (18). Una de las cepas más utilizadas es la de *Saccharomyces cerevisiae*, aunque se puede hacer uso de muchas más cepas para la obtención de NPs.

Algas (19)

Las algas se caracterizan por ser organismos que acumulan enormes cantidades de cationes metálicos, lo cual contribuye a la descontaminación de los ambientes. En estos procesos de acumulación, las algas pueden transformar a los cationes de metales a otras formas como lo son las NPs. Hay reportes de NPs de oro sintetizadas con algas azules y rojas que presentan formas generalmente irregulares, con tamaños menores a 50 nm (20,21).

Plantas

El uso de plantas es uno de los métodos más comúnmente utilizados en el área de la biosíntesis de NPs. Normalmente se hace uso de extractos de las diferentes partes de las plantas: se ha reportado el uso de flores para la síntesis de NPs de oro (AuNPs) (22), el uso de hojas para la síntesis de NPs de óxido cúprico (CuONPs) (23), también de frutos como el limón para la obtención de NPs de cobre (CuNPs) (24) así como también el uso de raíces, cáscaras de frutos y semillas. Estos extractos pueden ser de naturaleza acuosa, en donde los componentes presentes en las diferentes materias primas mencionadas anteriormente se extraen a partir de su infusión en agua a diferentes temperaturas, mediante técnicas que pueden requerir procesamientos como moliendas, y también pueden ser extractos orgánicos, donde la extracción se realiza con el uso de solventes orgánicos. La elección del tipo de extracto va a depender de las moléculas de interés que sean requeridas en la síntesis.

Aplicación en remediación ambiental

El incremento en la demanda de los consumidores, de la mano del aumento poblacional ha generado un notable crecimiento del sector industrial con el concomitante desarrollo socioeconómico. Sin embargo, al mismo tiempo, la generación excesiva de compuestos tóxicos y dañinos que contaminan el medio ambiente se ha convertido en un tema de extrema preocupación. Por esta razón en los últimos tiempos se ha convertido en una necesidad la búsqueda de acciones y alternativas para la mitigación de esta problemática (25). En este sentido, la nanotecnología ofrece diversidad de herramientas eficientes y rentables para limitar el impacto de estos contaminantes. La remediación ambiental mediante el uso de MNPs y de OMNPs representa uno de los últimos avances desarrollados en este ámbito (26).

La nano-remediación ofrece una gran ventaja con respecto a las alternativas convencionales, teniendo en cuenta que su aplicación puede realizarse *in situ*. Adicionalmente, las MNPs pueden modificarse superficialmente con grupos funcionales que mejoren su especificidad y eficacia dependiendo la aplicación deseada (27). Puntualmente, en el ámbito ambiental, su aplicación puede enfocarse en tres campos: identificación o detección de contaminantes utilizando el nanomaterial como sensor (27), captura selectiva de contaminantes (29) o para catalizar reacciones de degradación de estos compuestos (30)- (Figura 4).

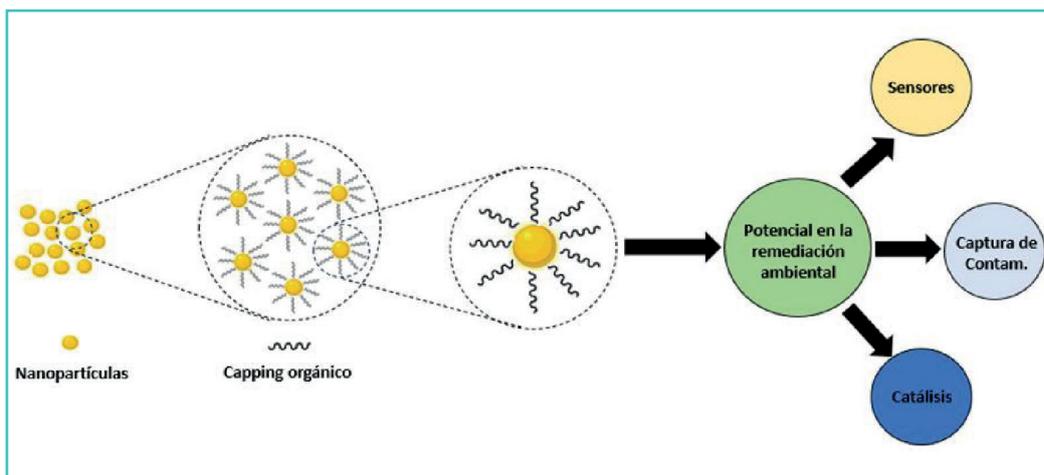


Figura 4

Esquema representativo de las aplicaciones de las MNPs en remediación ambiental

NPs como instrumento de detección y monitoreo ambiental

La detección química o biológica de analitos utilizando nanomateriales se basa en interacción molecular entre un analito específico y la superficie de la nanopartícula. El diseño de nanoestructuras con superficies convenientemente modificadas las hace aptas para una detección con alta sensibilidad y selectividad.

Los iones de metales pesados poseen una toxicidad intrínseca sobre la salud humana y de otras especies. Entre una serie de iones metálicos, se ha descubierto que Hg^{+2} , Cd^{+2} y Pb^{+2} afectan notoriamente la banda de resonancia de plasmón superficial de CuNPs, alterando el color de su solución. Estudios recientes evaluaron la posibilidad de interacción entre NPs de Cu y los iones de Hg^{+2} , evidenciando una reacción redox entre estos componentes traducido en un cambio de color de la solución coloidal de CuNPs seguido por técnicas colorimétricas y espectrofotométricas. Esto hizo posible el diseño de tiras de papel recubiertas con CuNPs para la detección de iones de mercurio en aguas (31).

Así mismo, se han evidenciado estudios donde se biosintetizan NPs de cobre utilizando extracto acuoso de hojas de *Ziziphus mauritiana L.*, observando su gran utilidad como sensor colorimétrico en la detección del ión metálico de Ag^+ . El método descrito en esta investigación representa una estrategia más ecológica, económica y sencilla para producir CuNPs altamente estables a través del tiempo (32).

Captura selectiva de contaminantes

La capacidad de las MNPs para secuestrar formas cerovalentes, aniónicas o catiónicas de metales pesados ofrece un enfoque para el tratamiento de aguas. Tanto las propiedades ópticas como la reactividad química de estos nanomateriales desempeñan un papel fundamental. La modificación superficial de las NPs representa una estrategia versátil teniendo en cuenta la variedad de ligandos que pueden utilizarse dependiendo de la aplicación que deba tener el material. En este sentido, se suele utilizar sustancias orgánicas con cavidades internas que permitan la captura selectiva de determinados contaminantes ya sea por afinidad química o por el tamaño específico de dichas cavidades.

J. Ma, et al (2019) en su estudio, realizó la síntesis de nanotubos de titanio funcionalizados con di-ciclohexano-18-crown-6 éter, dicho compuesto posee una cavidad con un tamaño entre 1,34 – 1,55 Å facilitando la captura selectiva del catión Sr^{+2} , el cual solubilizado en agua puede generar riesgos en la salud (32).

Catalizadores en reacciones de degradación de contaminantes

Los compuestos nitrados son altamente dañinos y representan uno de los principales contaminantes generados por la industria agroquímica y de textiles. En la actualidad se buscan el mayor número de alternativas para la degradación de estos componentes o en su defecto sus transformaciones químicas a otros compuestos menos nocivos. El uso de MNPs es una de las principales estrategias para la degradación de estas sustancias, teniendo en cuenta su aplicabilidad elevada como catalizadores heterogéneos. Básicamente, estos nanomateriales a través de sus altas áreas superficiales facilitan sitios activos que favorecen el desarrollo de reacciones químicas específicas disminuyendo la barrera energética de activación, permitiendo que ocurran en tiempos considerablemente menores (34).

Hasta ahora, una amplia variedad de NPs, incluido las de Au, ZnO, TiO₂, Fe, entre otras, se han utilizado con éxito para la degradación de colorantes. Recientemente se reportó la síntesis de FeNPs utilizando extracto acuoso de hojas de *Chlorophytum comosum* como agente reductor y estabilizante. Las NPs obtenidas fueron evaluadas como catalizador heterogéneo en la reacción de reducción del colorante naranja de metilo mediado por H₂O₂, logrando una eficiencia del 77% de degradación (35).

Por otro lado, se han reportado estudios donde se sintetizaron nanohilos de FePd funcionalizados con derivados anfífilos de la β-ciclodextrina, para su utilización como catalizador en la reacción de reducción de 4-nitrofenol mediada por NaBH₄ en medio acuoso (36). Los resultados evidenciados son bastante prometedores y representan una estrategia muy útil para la remediación ambiental.

Así como se mencionó anteriormente, existe un sin número más de aplicaciones en el campo de remediación ambiental por parte de estos nanomateriales. A continuación, se muestra un breve resumen de otras investigaciones relacionadas con esta temática:

Biomasa	Organismo	NPs	Tamaño (nm)	Aplicación Ambiental	Ref.
BACTERIA	<i>A. faecalis HCB2</i>	Fe	-	Remoción de contaminantes	45
	<i>Bacillus Pumilus</i> <i>Bacillus Paralicheniformis</i> <i>Sphingomonas paucimobilis</i>	Ag	4 - 20	Remoción de contaminantes	46
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	ZnO	3,1	Adsorción	47
EXTRACTO DE PLANTAS	<i>Ocimum Sanctum</i>	Ni	12 - 36	Adsorción	48
	<i>Salvia Hydrangea</i>	Pd	10	Degradación / Catálisis	49
	<i>Aloe Vera</i>	Cu ₂ O	24 - 61	Degradación / Catálisis	50
HONGOS	<i>Manglicolous</i>	Fe ₂ O ₃	2 - 16	Adsorción	51
	<i>Aspergillus Niger L3</i> <i>Trichoderma Longibrachiatum</i> L2	Ag/ Au	7 - 52,5	Degradación	52
	<i>Aspergillus Niger BSC-1</i>	Fe ₃ O ₄	20 - 40	Adsorción	53
ALGAS	<i>Spirulina sp.</i>	ZnO	3,1	Degradación	54
	<i>Botryococcus Braunii</i>	Ag	40 - 90	Catálisis	55

Tabla 2

Resumen de aplicaciones de MNPs y OMNPs en remediación ambiental.

Conclusión

Actualmente, es clara la necesidad de encontrar nuevos métodos de síntesis más amigables con el medio ambiente para la obtención de nanoestructuras. Ya se han estudiado una elevada cantidad de extractos naturales que han funcionado con éxito en la síntesis de MNPs. Esta revisión pretende dar un panorama general actual acerca de la utilización de NPs obtenidas biológicamente en la descontaminación ambiental, evidenciando el elevado potencial de este tipo de materiales. Si bien la nanotecnología es un área prometedora, no hay que olvidar que aún se desconoce en gran medida el efecto que tienen estos sistemas, tanto en la salud humana como en otros organismos vivos, por lo que se deberá estudiar en mayor profundidad el impacto biológico que puedan producir. Teniendo en cuenta esto, aún queda mucho por explorar en la síntesis biogénica de MNPs.

Referencias Bibliográficas

1. Zhu, Y., Liu, X., Hu, Y., Wang, R., Chen, M., Wu, J., y col. Behavior, remediation effect and toxicity of nanomaterials in water environments. *Env. Res.*, (2019) 174, 54-60.
2. Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., Kalaskar, M. G. Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *J.D.D.S.T.* (2019) 53-101174.
3. Maheshwari, N., Atneriya, U. K., Tekade, M., Sharma, M. C., Elhissi, A., & Tekade, R. K. Biomaterials and Bionanotechnology. (2019).
4. Carmen, Z., & Daniel, S. Textile Organic Dyes – Characteristics, Polluting Effects and Separation/Elimination Procedures from Industrial Effluents – A Critical Overview. En *InTech eBooks*. (2012).
5. Croce, R., Cinà, F., Lombardo, A., Crispeyn, G., Cappelli, C. I., Vian, M., y col. Aquatic toxicity of several textile dye formulations: Acute and chronic assays with *Daphnia magna* and *Raphidocelis subcapitata*. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, (2017) 144, 79-87.
6. Sudova, E., Machova, J., Svobodova, Z., & Vesely, T. Negative effects of malachite green and possibilities of its replacement in the treatment of fish eggs and fish: a review. *Veterinárni Medicina*, (2007) 52(12), 527-539.
7. Kato, Y., & Suzuki, M. Synthesis of Metal Nanoparticles by Microorganisms. *Crystals*, (2020) 10(7), 589.
8. Huang, J., Li, Q., Sun, D., Lu, Y., Su, Y., Yang, X., y col. Biosynthesis of silver and gold nanoparticles by novel sundried *Cinnamomum camphora* leaf. *Nanotechnology*, (2007) 18(10), 105104.
9. Ovais, M., Khalil, A. T., Islam, N. U., Ahmad, I., Ayaz, M., Saravanan, M., y col. Role of plant phytochemicals and microbial enzymes in biosynthesis of metallic nanoparticles. *Applied Microbiology And Biotechnology*, (2018) 102(16), 6799-6814.
10. Garg, K. K., Jain, D., Rajpurohit, D., Kushwaha, H. S., Daima, H. K., Stephen, B. J., y col. Agricultural Significance of Silica Nanoparticles Synthesized from a Silica Solubilizing Bacteria. *Comments On Inorganic Chemistry*, (2021) 42(4), 209-225.
11. Nie, P., Zhao, Y., & Xu, H. Synthesis, applications, toxicity and toxicity mechanisms of silver nanoparticles: A review. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, (2023) 253, 114636.
12. Jain, D., Kour, R., Bhojiya, A. A., Meena, R. H., Singh, A., Mohanty, S. R., y col. Zinc tolerant plant growth promoting bacteria alleviates phytotoxic effects of zinc on maize through zinc immobilization. *Scientific Reports*, (2020) 10(1).
13. Singh, D., Jain, D., Rajpurohit, D., Jat, G., Kushwaha, H. S., Singh, A., y col. Bacteria assisted green synthesis of copper oxide nanoparticles and their potential applications as antimicrobial agents and plant growth stimulants. *Frontiers In Chemistry*, (2023) 11.
14. Priyadarshini, E., Priyadarshini, S. S., Cousins, B. G., & Pradhan, N. Metal-Fungus interaction: Review on cellular processes underlying heavy metal detoxification and synthesis of metal nanoparticles. *Chemosphere*, (2021) 274, 129976.
15. Altammar, K. A. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers In Microbiology*, (2023) 14.
16. Pantidos, N. Biological Synthesis of Metallic Nanoparticles by Bacteria, Fungi and Plants. *Journal Of Nanomedicine & Nanotechnology*, (2014) 05(05).
17. Das, V. L., Thomas, R., Varghese, R. T., Soniya, E. V., Mathew, J., & Radhakrishnan, E. K. Extracellular synthesis of silver nanoparticles by the *Bacillus* strain CS 11 isolated from industrialized area. *3 Biotech*, (2013) 4(2), 121-126.
18. Shu, M., He, F., Li, Z., Zhu, X., Ma, Y., Zhou, Z., Yang, Z., Gao, F., & Zeng, M. (2020). Biosynthesis and Antibacterial Activity of Silver Nanoparticles Using Yeast Extract as Reducing and Capping Agents. *Nanoscale Research Letters*, 15(1).
19. Fawcett, D., Verduin, J. J., Shah, M., Sharma, S. B., & Poinern, G. E. J. (2017). A Review of Current Research into the Biogenic Synthesis of Metal and Metal Oxide Nanoparticles via Marine Algae and Seagrasses. *Journal Of Nanoscience*, (2017), 1-15.
20. Khan, A. U., Khan, M., Malik, N., Cho, M. H., & Khan, M. M. Recent progress of algae and blue-green algae-assisted synthesis of gold nanoparticles for various applications. *Bioprocess And Biosystems Engineering*, (2018) 42(1), 1-15.
21. Senthilkumar, P., Surendran, L., Sudhagar, B., & Kumar, D. S. R. S. Facile green synthesis of gold nanoparticles from marine algae *Gelidium acerosa* and evaluation of its biological Potential. *SN Applied Sciences*, (2019) 1(4).

22. Alghuthaymi, M. A., Rajkuberan, C., Santhiya, T., Krejcar, O., Kuča, K., Periakaruppan, R., & Prabukumar, S. Green Synthesis of Gold Nanoparticles Using *Polianthes tuberosa* L. Floral Extract. *Plants*, (2021) 10(11), 2370.
23. Shamsuddin, M., & Nordin, N. R. Biosynthesis of copper(II) oxide nanoparticles using *Murayya koenigii* aqueous leaf extract and its catalytic activity in 4-nitrophenol reduction. *Malaysian Journal Of Fundamental And Applied Sciences*, (2019) 15(2), 218-224.
24. Amer, M., & Awwad, A. Green Synthesis of Copper Nanoparticles by Citrus Limon Fruits Extract, Characterization and Antibacterial Activity. *Chemistry International*, (2021) 7(1) 1-8.
25. Ally, N., & Gumbi, B. A review on metal nanoparticles as nano-sensors for environmental detection of emerging contaminants. *Mater. Today* (2023).
26. De Jesus, R. A., De Assis, G. C., De Oliveira, R. J., Costa, J. A. S., Da Silva, C. M. P., Bilal, M., Iqbal, H. M., Ferreira, L. F. R., & Figueiredo, R. T. Environmental remediation potentialities of metal and metal oxide nanoparticles: Mechanistic biosynthesis, influencing factors, and application standpoint. *Environ. Technol. & Inno.* (2021), 24, 101851.
27. Das, P. K., Mohanty, C., Purohit, G. K., Mishra, S., & Palo, S. Nanoparticle assisted environmental remediation: Applications, toxicological implications and recommendations for a sustainable environment. *Environ. Nanotechnol. Monit. & Manag.* (2022), 18, 100679.
28. Proposito, P., Burratti, L., & Venditti, I. Silver Nanoparticles as Colorimetric Sensors for Water Pollutants. *Chemosensors* (2020), 8(2), 26.
29. Wu, A., Zhao, X., Wang, J., Tang, Z., Zhao, T., Niu, L., Yu, W., Yang, C., Fang, M., Lv, H., Liu, S., & Wu, F. Application of solid-phase extraction based on magnetic nanoparticle adsorbents for the analysis of selected persistent organic pollutants in environmental water: A review of recent advances. *Crit. Rev. In Environ. Sci. And Technol.* (2020), 51(1), 44-112.
30. Fu, Y., Yin, Z., Qin, L., Huang, D., Yi, H., Liu, X., Liu, S., Zhang, M., Li, B., Li, L., Wang, W., Zhou, X., Li, Y., Zeng, G., & Lai, C. Recent progress of noble metals with tailored features in catalytic oxidation for organic pollutants degradation. *J. Hazard. Mat.* (2022), 422, 126950.
31. Baral, T., Datta, C., & Das, S. Cu Nanoparticle-Based Solution and Paper Strips for Colorimetric and Visual Detection of Heavy Metal Ions. *ACS Omega* (2022), 7(42), 37279-37285.
32. Memon, R., Memon, A. A., Sherazi, S. T. H., Sirajuddin, S., Balouch, A., Shah, M. R., Mahesar, S. A., Rajar, K., & Agheem, M. H. Application of synthesized copper nanoparticles using aqueous extract of *Ziziphus mauritiana* L. leaves as a colorimetric sensor for the detection of Ag⁺. *Turk. J. Chem.* (2020), 44(5), 1376-1385.
33. Ma, J., Zhang, Y., Ouyang, J., Wu, X., Luo, J., Liu, S., & Gong, X. A facile preparation of dicyclohexano-18-crown-6 ether impregnated titanate nanotubes for strontium removal from acidic solution. *Solid State Sci.* (2019), 90, 49-55.
34. Herrera, E., Aprea, M. S., Riva, J. S., Silva, O. F., Bercoff, P. G., & Granados, A. FePd nanowires modified with cyclodextrin. Characterization and catalytic properties evaluated by a model reduction reaction. *Appl. Surf. Sci.* (2020), 529, 147029.
35. Ardakani, L. S., Alimardani, V., Tamaddon, A. M., Amani, A. M., & Taghizadeh, S. Green synthesis of iron-based nanoparticles using *Chlorophytum comosum* leaf extract: methyl orange dye degradation and antimicrobial properties. *Heliyon* (2021), 7(2), e06159.
36. Herrera, E., Riva, J., Aprea, S., Silva, O. F., Bercoff, P. G., & Granados, A. M. FePd nanowires modified with cyclodextrin as improved catalysts: effect of the alloy composition on colloidal stability and catalytic capacity. *Catal. Sci. & Technol.* (2022), 12(9), 2962-2971.
37. Ali, F.T., El-Sheikh, H.H., El-Hady, M. M., Elaasser, M. M., El-Agamy, D. M. Silver Nanoparticles Synthesized by *Penicillium citreonigrum* and *Fusarium moniliforme* Isolated from El-Sharkia, Egypt. *International Journal of Scientific & Engineering Research.* (2014), 5(14), 181-192.
38. Bhatnagar, S., Kobori, T., Ganesh, D., Ogawa, K., Aoyagi, H. Biosynthesis of Silver Nanoparticles Mediated by Extracellular Pigment from *Talaromyces purpurogenus* and Their Biomedical Applications. *Nanomaterials.* (2019), 9(7), 1042.
39. Kupryashina, M. A., Vetchinkina, E. P., Burov, A. M., Ponomareva, E. G., Nikitina, V. E. Biosynthesis of gold nanoparticles by *Azospirillum brasilense*. *Microbiology.* (2013), 82, 833-840.
40. Prakash D, Mahale V, Bankar A, Nakwani N, Mahale V, Prakash D. Biosynthesis of colloidal gold nanoparticles by *Streptomyces* sp. NK52 and its anti-lipid peroxidation activity. *Indian J Exp Biol.* (2013), 51(11), 969-972.
41. Yeary, L. W., Moon, J. W., Love, L. J., Thompson, J. R., Rawn, Phelps, T. J. Magnetic properties of biosynthesized magnetite nanoparticles. *IEEE Transactions on Magnetics.* (2005), 41(12), 4384-4389.
42. Martins, M., Mourato, C., Sanches, S., Noronha, J. P., Barreto Crespo, M. T., Pereira, I. A. C. Biogenic platinum and palladium nanoparticles as new catalysts for the removal of pharmaceutical compounds. *Water Research.* (2017), 108, 160-168.
43. Abboud, Y., Saffaj, T., Chagraoui, A., El Bouari, A., Brouzi, K., Tanane, O., Ihsane, B. Biosynthesis, characterization and antimicrobial activity of copper oxide nanoparticles (CONPs) produced using brown alga extract (*Bifurcaria bifurcata*). *Applied Nanoscience.* (2014), 4, 571-576.
44. Azizi, S., Ahmad, M. B., Namvar, F., Mohamad, R. Green biosynthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles using brown marine macroalga *Sargassum muticum* aqueous extract. *Materials Letters.* (2014), 116, 275-277.
45. Nkosinathi, DG, Albertus, BK, Jabulani, SSE et al. Biosynthesis, Characterization, and Application of Iron Nanoparticles: in Dye Removal and as Antimicrobial Agent. *Water, Air & Soil Pollut* 231, 130 (2020).
46. Allam, NG, Ismail, GA, El-Gemizy, WM et al. Biosynthesis of silver nanoparticles by cell-free extracts from some bacteria species for dye removal from wastewater. *Biotechnol Lett* 41, 379–389 (2019).

47. Debnath, B., et al. The effective adsorption of tetracycline onto zirconia nanoparticles synthesized by novel microbial green technology. *J. Environ. Manage.*, Volume 261,2020,110235.
48. Pandian, Ch., Palanivel, R., Dhananasekaran, S., Green synthesis of nickel nanoparticles using *Ocimum Sanctum* and their application in dye and pollutant adsorption. *Chin. J. Chem. Eng.*, Volume 23, 2015, 1307-1315.
49. Khodadadi, B., Bordbar, M., Nasrollahzadeh, M., Green synthesis of Pd nanoparticles at Apricot kernel shell substrate using *Salvia Hydrangea* extract: Catalytic activity for reduction of organic dyes. *J. Colloid. Interface Sci.*, Volume 490, 2017, Pages 1-10.
50. Kerour, A., Boudjadar, S., Bourzami, R., Allouche, B., Eco-friendly synthesis of cuprous oxide (Cu₂O) nanoparticles and improvement of their solar photocatalytic activities. *J. Solid. State Chem.*, Volume 263, 2018, Pages 79-83.
51. Mahanty, S., et al., Mycosynthesis of iron oxide nanoparticles using manglicolous fungi isolated from Indian sundarbans and its application for the treatment of chromium containing solution: Synthesis, adsorption isotherm, kinetics and thermodynamics study, *Environ. Nanotechnol. Monit. & Manage.*, Volume 12, 2019, 100276.
52. Elegbede, JA. , Lateef, A. , Azeez, MA. , et al. Silver – gold alloy nanoparticles biofabricated by fungal xylanases exhibited potent biomedical and catalytic activities. *Biotechnol. Progress* . 2019 ; 35 :e2829.
53. Chatterjee, S., Mahanty, S., Das, P., Chaudhuri, P., Das, S., Biofabrication of iron oxide nanoparticles using manglicolous fungus *Aspergillus niger* BSC-1 and removal of Cr(VI) from aqueous solution, *J. Chem. Eng.*, Volume 385, 2020, 123790.
54. Bhattacharya, P., Mukherjee, D., Deb, N., Swarnakar, S., Aneerjee, S., Application of green synthesized ZnO nanoparticles coated ceramic ultrafiltration membrane for remediation of pharmaceutical components from synthetic water: Reusability assay of treated water on seed germination. *J. Environ. Chem. Eng.*, Volume 8, 2020, 103803.
55. Arya, A., Mishra, V., Chundawat, T. S., Green synthesis of silver nanoparticles from green algae (*Botryococcus braunii*) and its catalytic behavior for the synthesis of benzimidazoles, *Chem. Data Collect.*, Volume 20, 2019, 100190.

Para citación de este artículo: AHUMADA, Richard R; FORESI, Martina; GRANADOS, Alejandro M. (2024) "Biosíntesis de nanopartículas metálicas y de óxidos metálicos. Aplicación en remediación ambiental", en *Revista Bitácora Digital* Volumen 11. N° 15 Pp. 52-62 (FCQ-UNC) Córdoba, Argentina.



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