

The potential of nanoparticles synthesized by green route, for its application in the remediation of contaminated soils

El potencial de las nanopartículas sintetizadas por ruta verde, para su aplicación en la remediación de suelos contaminados

Karin Andrade-Zavaleta, Ing.¹, Yessica Chacon-Laiza, Ing.², and David Asmat-Campos, Dr.^{1,*}

¹ Ingeniería Ambiental. Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú

² Dirección de Investigación, Innovación y Responsabilidad Social. Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú.

* davidasmatt88@hotmail.com, david.asmat@upn.edu.pe

Abstract- *Currently, environmental awareness has allowed the development of a growing wave of research focused on the evaluation and remediation of soils. This research was developed in the field of nanotechnology, specifically with the aim of knowing and contributing to the scientific community on the latest advances in the various types of nanoparticles (NP) synthesized by the green route (biosynthesized) and applied to soil remediation, from the analysis of research articles. For this purpose, the PRISMA methodology was used, selecting research between the years 2010 and 2020. As a final result, based on terms of inclusion and exclusion, a total of 20 publications were obtained that contained the necessary variables. The information was indexed in article registration matrices, study characteristics and finally in one of categories. From this, 25% of articles published in 2020 and another 25% of publications in 2018 were found, which indicates that nanotechnology is in constant progress. In the same way, the category matrix addressed various methods for soil decontamination. Finally, it can be concluded that the biosynthesized NP application poses excellent viability, since its application is profitable and does not generate harmful impacts on the environment.*

Keywords: *Biosynthesis, green synthesis, soil remediation, iron nanoparticles, sustainability.*

Resumen- *En la actualidad, la conciencia medioambiental ha permitido el desarrollo de una ola creciente en investigaciones enfocadas a la evaluación y remediación de suelos. La presente investigación se desarrolló en el ámbito de la nanotecnología, específicamente con el objetivo de conocer y aportar a la comunidad científica sobre los últimos avances de los diversos tipos de nanopartículas (NP) sintetizadas por ruta verde (biosintetizadas) y aplicadas a la remediación de suelos, a partir del análisis de artículos de investigación. Para tal fin, se utilizó la metodología PRISMA, seleccionándose investigaciones entre los años 2010 hasta 2020. Como resultado final a partir de términos de inclusión y exclusión se obtuvo un total de 20 publicaciones que contenían las variables necesarias. La información fue indexada en matrices de registro de artículos, características de estudio y finalmente en una de categorías. A partir de ello, se encontró 25% de artículos publicados en el año 2020 y otro 25% de publicaciones en el año 2018, lo que indica que la nanotecnología se encuentra en un constante avance. De la misma manera, en la matriz de categoría se abordaron diversos métodos para la descontaminación de suelos. Finalmente se puede concluir que la aplicación NP biosintetizadas plantea una excelente viabilidad, pues su aplicación es rentable y no genera impactos nocivos en el ambiente.*

Palabras clave: *Biosíntesis, síntesis verde, remediación suelo, nanopartículas de hierro, sostenibilidad.*

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la cantidad de suelo fértil en el planeta ha ido disminuyendo a un ritmo alarmante. Según las previsiones la capacidad agrícola debería alcanzar para alimentar a los nueve mil millones de personas de aquí a 2050 [1]. La creciente expansión demográfica, así como el impulso del desarrollo tecnológico en actividades como la minería y agricultura, pueden incluirse como la introducción directa de contaminantes en el suelo, así como procesos ambientales complejos que pueden llevar a una contaminación indirecta del suelo a través del agua o de la deposición atmosférica [2].

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.36>

ISBN: 978-628-95207-0-5 ISSN: 2414-6390

El suelo es uno de los componentes esenciales más importantes del ambiente, pues se considera uno de los recursos base para la sostenibilidad de vida en la Tierra y de los ecosistemas, en este se concentra la mayoría de los organismos vivos como fuente principal de nutrientes minerales. Así pues, es utilizado para fines muy diversos como: agricultura, ganadería, extracción de minerales y de materiales para la construcción, soporte para las edificaciones, eliminación de residuos y otras actividades [3]. Cabe resaltar que el suelo es un recurso no renovable, debido a que su formación desde la placa madre tarda miles de años, además que la calidad de vida y alimentación depende mucho de la calidad de nuestro suelo. Se entiende como “contaminación del suelo” a la presencia de un químico o una sustancia fuera de sitio presente en la corteza terrestre con una concentración más alta de lo normal que tiene efectos adversos sobre cualquier organismo al que no está destinado [4]. Como ya se ha venido mencionando, nos encontramos en una situación precaria en cuanto al estado de nuestro suelo, por lo que actualmente se está incluyendo el mejoramiento de suelos degradados mediante la prevención, mitigación y rehabilitación de estos. El Ministerio del Ambiente-Perú en su Decreto Supremo No. 002-2013 [5], define remediación “como un conjunto de tareas a desarrollarse en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir contaminantes, a su vez de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas”. Actualmente se vienen incluyendo distintos métodos de remediación de suelos, uno de ellos es la aplicación de nanopartículas, esta se presenta como una rama de la nanotecnología con mayor interés de investigación debido a los bajos costos de producción, uso mínimo de sustancias químicas y fácilmente de sintetizar [6]. La obtención de nanopartículas mediado por síntesis verde se basa en el uso de extractos provenientes de una variedad de especies vegetales, esto se debe al gran contenido de antioxidantes y metabolitos secundarios presentes en los tejidos vegetales, que son sometidos a contacto con soluciones de iones metálicos en una reacción redox en la que estos metabolitos aportan electrones a los cationes metálicos, generando así metales con carga cero a escala nanométrica [7], [8]. Se han estudiado como una alternativa de solución las nanopartículas producidas por síntesis verde para la remediación de suelos, con resultados favorables, esto respaldado por la investigación hecha por Lin et al. [9], el cual describe que usando el extracto de hojas de *Escaeceria cochinchinensis*, logró estabilizar la concentración de Cadmio (Cd), así como las fracciones de Cd enlazadas con carbonato disminuyeron en un 14.2-83.5% y un 18.3-85.8%. También, nos encontramos con Wang et al. [10], que evidencia la eficiencia de la aplicación de NP sintetizada a partir del extracto de *Euphorbia cochinchinensis* para la estabilización de Arsénico (As), siendo este metal pesado uno de los más peligrosos para la salud humana.

Por ende, con lo anteriormente expuesto y con los conocimientos obtenidos en esta revisión sistemática es que se pretende saber ¿Cuál ha sido el grado de aporte científico de las nanopartículas obtenidas por ruta verde aplicadas a la remediación de suelos contaminados entre los años 2010 - 2020?, de tal modo es que se plantea como objetivo conocer los diversos tipos de nanopartículas biosintetizadas aplicadas en la remediación de suelos contaminados, a partir del análisis de artículos de investigación. La contaminación del suelo es un tema alarmante que se posiciona como la tercera amenaza más importante a las funciones del suelo en Europa y Eurasia, cuarta en África del Norte, quinta en Asia, séptima en Pacífico del Noroeste, octava en Norteamérica y novena en el África Sub-Sahariana y Latinoamérica [4]. En la actualidad, la conciencia medioambiental ha permitido una creciente en investigaciones sobre la evaluación y remediación de la contaminación del suelo, la nanotecnología tiene constantes avances aplicados al ámbito ambiental, por ello que la presente investigación busca dar a conocer los diferentes tipos de nanopartículas biosintetizadas que tengan la capacidad de remediar suelos con presencia de contaminantes exógenos.

II. METODOLOGÍA

Para la revisión bibliográfica se utilizó fuentes de información de fiabilidad y sobre todo que sea una base de datos con amplia información científica, debido a que la nanotecnología se encuentra en constante avance de investigación alrededor del mundo. Por ello, se acudió a revistas intencionales que contienen artículos indexados como ScienceDirect, HINDAWI, WorldWideScience, SciELO, ResearchGate y Google Académico.

Para obtener los artículos de interés, la búsqueda se delimitó con palabras claves como “Síntesis verde”, “Nanopartículas biosintetizadas”, “Nanopartículas verde en el suelo”, “Biorremediación con nanopartículas”, “Nanopartículas biogénicas”, “Nanoparticles biosynthesized for soil remediation”, “Nanoparticles applied to the soil”, a ello se sumó el intervalo de 2010 al 2020.

Se encontró un total de 38 artículos científicos en distintos idiomas en el rango de años considerado. Se seleccionó solo los artículos que contenían una o las dos variables de la revisión sistemática. Adicional a ello, se tomaron las que cumplieran con el periodo de publicación entre los años 2010 y 2020. En cuanto a las tesis de investigación, se consideró solo tesis de doctorado y maestría de universidades. Así mismo, se tomaron las investigaciones que cumplieran el formato IMRD (Introducción, Métodos, Resultados y Discusión). En consecuencia, se consideró artículos de investigación y revisión científica en los idiomas de inglés, español y portugués.

Se encontró una diversidad de artículos y revisiones científicas, la cual se consideró información basada en investigaciones científicas a nivel experimental de laboratorio

y campo. De la misma manera, se encontraron artículos con un enfoque distinto a las variables trabajadas, siendo estas descartadas. Por ello, al tener en cuenta los criterios de selección se descartaron dieciocho artículos que se repetían, no cumplían el intervalo de tiempo y/o relación con las variables.

Para la selección a artículos científicos, se tuvo en cuenta el formato IMRD, su indexación y que cumpla con los criterios de las variables de la investigación. Finalmente se recopiló la información obtenía y se organizó en una matriz de información, la cual clasificó a la información por la base de datos, autor, año y título. Adicionalmente, se tomó en cuenta las características del estudio, tales como: el tipo de documento, año de clasificación y revista de publicación del artículo.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se lograron obtener 39 artículos en total, a través de la base de datos de Google Académico, HINDAWI, ScienceDirect, SciELO, ResearchGate, WorldWideScience. Para la selección de artículos se usaron palabras clave en español y en inglés, también se consideró el periodo de tiempo entre 2010 al 2020, finalmente se filtraron y se seleccionó un total de 20 artículos los cuales cumplían con los requisitos necesarios.

En la primera tabla se registró los artículos seleccionados teniendo en cuenta la metodología descrita anteriormente; además se consideró información necesaria de cada artículo como: la base de datos, autor, año y título (Tabla 1).

En la segunda tabla encontramos la clasificación de los artículos seleccionados en tipo de documento, año de antigüedad y la revista de publicación; además se revisó que contengan la metodología, resultados discusión y conclusiones (Tabla 2).

Finalmente se clasificó los 20 artículos en 5 categorías: Contaminantes orgánicos, contaminantes inorgánicos, Asociación con otras tecnologías verdes para la remoción de residuos de pesticidas, aplicación en subsuelo y mejora para el proceso de remediación de contaminantes farmacéuticos; generando así cada categoría un aporte.

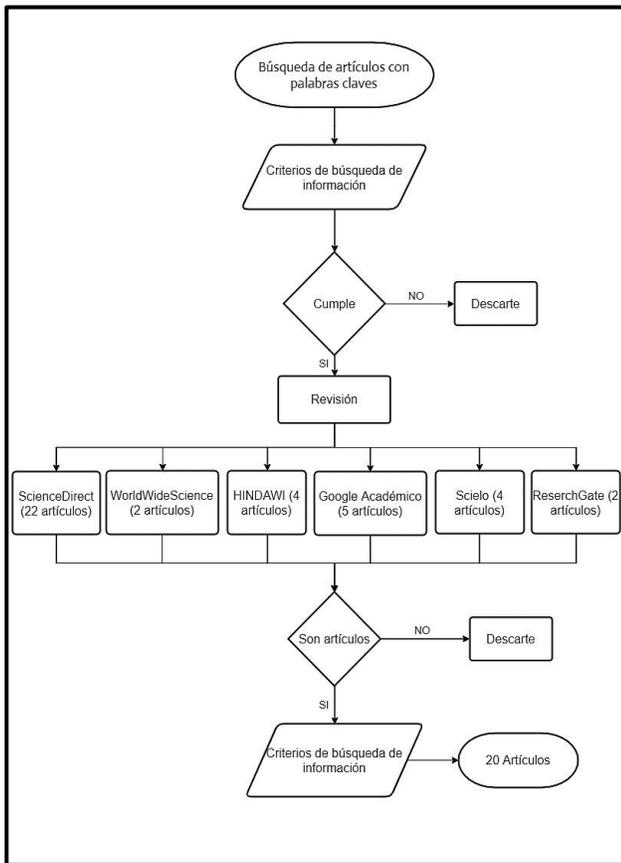


Figura 1. Diagrama de flujo para la selección de artículos científicos.

Tabla 1. Matriz de registro de artículos científicos.

Nº	BASE DE DATOS	Autor / Autores	Año	Título de artículo de investigación
1	Google Académico	Murgueto Herrera, Erika Sofia	2018	Síntesis, caracterización y aplicación de nanopartículas de hierro, en la remoción de HTPs en suelos y aguas de la provincia de Francisco de Orellana – Ecuador
2	Google Académico	Alvarez, María Alisa	2017	Eficacia del uso de nanopartículas de Fe (0) en la inmovilización de Cu y Ni en un suelo ácido
3	HINDAWI	Erika Murgueto, Luis Cumbal, Mayra Abril, Andrés Izquierdo, Alexis Debut y Oscar Tinoco	2018	Green synthesis of iron nanoparticles: application in the removal of petroleum oil from contaminated water and soils
4	HINDAWI	Mayra Abril, Hugo Ruiz y Luis H. Cumbal	2018	Biosynthesis of multicomponent nanoparticles with extract of Mortiño berry (<i>Vaccinium floribundum</i> Kunth): application in the removal of heavy metals from water and immobilization in soils
5	ResearchGate	Ahmed Ali Ali Romeh	2018	Green silver nanoparticles to improve phytoremediation of soil and water contaminated by fipronil and degradation products
6	ScienceDirect	Ahmed Ali Romeh y Refaat Ahmed Ibrahim	2020	Green nano phytoremediation and solubility enhancement agents for remediation of chlorfenapir contaminated soil and water
7	ScienceDirect	YinanWanga, David O'Connor, Zhangtao Shen, Irene M. C. Lo, Daniel C.W.Tsang, Sino Pehkonen, Shengyan Pu y Deyi Houa	2019	Green synthesis of nanoparticles for the remediation of contaminated water and soils: constituents, synthesis methods and influencing factors
8	ScienceDirect	Binglin Sua, Jiayang Lina, Gary Owens y Zuliang Chen	2020	Impact of iron oxide nanoparticles synthesized in green on the distribution and transformation of As species in contaminated soils
9	ScienceDirect	Jiayang Lin, Fengxin He, Binglin Su, Mengqiang Sun, Gary Owens y Zuliang Chen	2019	The mechanism of stabilization of cadmium in contaminated soil using iron oxide nanoparticles synthesized in green under long-term incubation
10	ScienceDirect	Jiayang Lin, Binglin Su, Mengqiang Sun, Gary Owens, Zuliang Chen	2019	Cadmium immobilization in soils contaminated by photogenic iron oxide nanoparticles
11	ScienceDirect	Akshaykranth, T. Venkatappa Rao, K. Venkateswar Raab y R. Rakesh Kumar	2020	Green synthesis of Cu nanoparticles using Curcuma longa extract and its application in antimicrobial activity
12	ScienceDirect	D. Baragaño, J. Alonso, J.R. Gallego, M.C. Lobo, M. Gil-Díaz	2020	Iron nanoparticles and zero valence goethite as promising new remediation techniques for As-contaminated soils
13	ScienceDirect	Siwar Jebri, Raoudha Khanfir Ben Jenana, Chérif Dridi	2020	Green synthesis of silver nanoparticles using Melia azedarach leaf extract and its antifungal activities: in vitro and in vivo
14	ScienceDirect	Jiayang Lin, Binglin Su, Mengqiang Sun, Bo Chen, Zuliang Chen	2018	Biosynthesized Iron Oxide Nanoparticles Used for Optimized Cadmium Removal with Response Surface Methodology
15	ScienceDirect	Iziquiel Cecchin, Krishna R. Reddy, Antônio Thomé, Eloisa Fernanda Tessaro, Fernando Schnaid	2017	NanoBiorremediation: integration of nanoparticles and bioremediation for the sustainable remediation of chlorinated organic pollutants in soils
16	ScienceDirect	Byungryul An, Dongye Zhao	2012	Immobilization of As (III) in soil and groundwater using a new class of Fe-Mn oxide nanoparticles stabilized with polysaccharides
17	ScienceDirect	S. Machado, W. Stawiński, P. Slonina, A.R. Pinto, J.P. Grosso, H.P.A. Nouws, J.T. Albergaria, C. Delerue-Matos	2013	Application of zero valence green iron nanoparticles for the remediation of soils contaminated with ibuprofen
18	ScienceDirect	Akbar Soltani-zadeh, Majid Fekri	2016	The application of green tea extract to prepare nanoscale zero valence iron supported by bentonite and its performance in the removal of Cr (VI): effect of relative parameters and soil experiments
19	ScienceDirect	C. Mystrioti, T.D Xanthopoulou, P. Tsakiridis, N. Papassopi, A. Xenidis	2016	Comparative evaluation of five plant extracts and juices for nano iron synthesis and application for hexavalent chromium reduction
20	WorldWideScience	Azevedo	2013	Remediação de solos contaminados por compostos farmacêuticos

Nota de tabla: Se muestra la selección de estudios por base de datos, autores, año y título.

Tabla 2. Características de estudio

Tipo de documento	F		Año de publicación		Revista de Publicación del artículo		F	
	%		F	%	F	%	F	%
Artículos científicos	14	70	2020	5	25	Google Académico	2	10
Revisión Sistemática	3	15	2019	3	15	HINDAWI	2	10
Tesis Master	2	10	2018	5	25	ResearchGate	1	5
Tesis de doctorado	1	5	2017	2	10	ScienceDirect	14	70
			2016	2	10	WorldWideScience	1	5
			2013	2	10			
			2012	1	5			
TOTAL	20	100	TOTAL	20	100	TOTAL	20	100

Nota de tabla: Se muestra las características cuantitativas de los estudios, donde se aprecia el tipo de documento, año de publicación y la revista de publicación del artículo.

a) Categoría contaminantes orgánicos: Aportes

Las NP Fe obtenidas de *Vaccinium floribundum* alcanzan un porcentaje de remoción alto cuando tienen mayor concentración del contaminante HTPs. Siendo el método de Columnas en Lecho Fijo el que obtiene una mejor capacidad de remoción de los hidrocarburos de petróleo en suelo [11].

Las partículas a nano-escala contienen óxidos e hidróxidos de hierro que abastecen sitios reactivos para la inmovilización de grandes hidrocarburos de petróleo y la formación de complejos químicos. Esta remediación de suelos contaminados con petróleo puede ser realizada en menos tiempo en comparación con un convencional, debido a que demuestra una reducción de contaminantes de un 81.90% en 32h [12].

La actividad antibacteriana de las nanopartículas sintetizadas en verde tiende a unirse a los iones que liberan a partir de NP. Las más pequeñas tienen propiedades de una alta relación superficie/volumen y alta dispersión que beneficia en la interacción con la superficie de los diferentes microorganismos. Esta actividad antibacteriana se debe a la alteración de sus estados de oxidación [13].

Las nanopartículas de plata biosintetizadas demuestran una excelente actividad antifúngica contra microorganismos patógenos y un efecto positivo en la inhibición de la sanidad vegetal [7], [14].

b) Categoría contaminantes inorgánicos: Aportes

El uso de hojas y frutos proporcionan una opción de remediación ecológica y de bajo costo, así lo demuestran diversos estudios centrados en este tema y realizados en esta última década. La aplicación de NP Fe obtenidas de extracto de bayas de Mortiño, para la inmovilización de metales pesados como Cu, Ni, Zn, Mn, Cr, Cd; tiene un resultado con un 99% de eficiencia en remoción, así mismo, demuestra que estos metales presentes en el suelo no se filtran incluso cuando fluye agua de lluvia, agua potable y agua desionizada a través del suelo. Sin embargo, la lixiviación de metales pesados es moderada cuando se usa agua ácida como solución extractora [15].

El cromo es un contaminante presente en dos formas principales: el Cr trivalente (III) y el Cr hexavalente (VI),

siendo el último más tóxico y cancerígeno, por ello, se realizó la aplicación de nanopartículas sintetizadas a partir del extracto de té verde para la liberación y disminución de dicho metaloide. Determinaron que las NP de hierro valencia cero si puede ser utilizado para la estabilización y adsorción de Cr (VI) en suelos contaminados y acuosos [16].

En una comparación de cinco materias primas: *Camellia sinensis*, *Mentha spicata*, *Syzygium aromaticum*, jugo de granada - *Punica granatum* y vino tinto, se demostró que la reducción de hierro férrico con los extractos de hierbas y jugos probados fue parcial en todas las adiciones investigadas y el porcentaje de hierro en nanopartículas en total no superó el 50%, por lo que las suspensiones de nano-hierro fueron efectivas para la reducción de Cr (VI), alcanzando tasas de reducción de hasta 500 mg de Cr (VI) por g hierro en nanopartículas [17].

Por otro lado, se nos presenta al arsénico (As) como uno de los contaminantes con mayor presencia y concentración en suelos como As (III) y As (V), con la aplicación de FeO NP utilizando un *Euforbio cochinchinensis* brindando un resultado de disminución significativamente de la disponibilidad de As en el suelo después de 120 días de incubación. Aunque As (III) todavía estaba presente en el suelo, por debajo del 50%, la remoción de As (V) fue eficaz [18].

La aplicación de nanopartículas a partir de Goethita a muestras de suelo contaminado con arsénico muestra un rendimiento eficiente para la inmovilización de dicho metaloide, con un análisis de dosis del 0.2%, siendo esta la más baja [19]. El uso de almidón de papa hidrolizada como fuente para nanopartículas, muestra una alta capacidad de sorción de As (III) teniendo en cuenta un rango de 5–9 para el pH, logrando una eficacia del 91 - 96% [20].

El Cadmio (Cd) también es un contaminante con una elevada toxicidad, por lo que la aplicación de nanopartículas a partir del extracto de hoja de *Excoecaria cochinchinensis* brinda un resultado eficiente demostrando una estabilización significativa del Cd en el suelo a través de la respuesta de comunidades bacterianas con un 50% de WHC. También, utilizando el mismo extracto de hojas se logra inmovilizar el Cd en condiciones tanto tóxicas como anóxicas, tomando un papel importante el pH del suelo, DOC, Oxalato-Fe y DCB-Fe [18]. La tasa de eliminación de Cd (II) fue 98,50% en óptimas condiciones, teniendo en cuenta que las condiciones de adsorción fueron pH 8,07, dosis 2.5 g L⁻¹ y temperatura 45° C [21].

La implementación de método Tessier y TCLP son útiles para evaluar la biodisponibilidad de Cu y Ni en el suelo. La aplicación de nZVI resulta ser más efectiva para la inmovilización de Níquel (Ni) que para el Cobre (Cu) en un suelo ácido, obteniéndose reducciones del potencial de

lixiviación de alrededor del 25% para el Cu y 48% para el Ni [22].

c) **Categoría asociación con otras tecnologías verdes para la remoción de residuos de pesticidas: Aportes**

Los efectos combinados de AgNPs y *Plantago major* bajo el método de la inundación de suelo resulta ser muy efectiva con los plaguicidas que son persistentes en ambientes aeróbicos son fácilmente degradados en condiciones reductoras [23].

La fitorremediación cumplió el rol de agente potenciador de la solubilidad que jugaron un papel importante en la mejora de la absorción de Clorfenapir del suelo, mientras que la adición de nanopartículas generó la descomposición de Clorfenapir en el suelo. Es decir, la integración de ambas tecnologías (Fitorremediación y aplicación de NPs) logran un mayor alcance del beneficio y adicionalmente es un costo rentable a comparación de otras tecnologías tradicionales [24].

d) **Categoría aplicación en subsuelo: Aportes**

Las Nanopartículas poseen un tamaño menor que los poros del suelo, propiedad que facilita el movimiento en la superficie y se pueden dispersar en suspensiones acuosas. Así mismo se puede inyectar directamente en las zonas del subsuelo con el contaminante de preocupación [25].

Las NP verdes poseen una alta movilidad, superficie específica y reactividad. Todas estas propiedades las hace adecuadas para una efectiva remediación del suelo [10].

e) **Categoría mejora para el proceso de remediación de contaminantes farmacéuticos: Aportes**

La complementación de la remediación usando una reacción de tipo Fenton catalizada por nZVI logró eficiencias de degradación de hasta el 95% de ibuprofeno, lo que demuestra el potencial de esta estrategia de remediación. Esto se debe radical OH que reacciona rápidamente (en minutos o unas pocas horas) y pierde su reactividad mientras que el nZVI es más persistente (manteniendo su reactividad durante días) prolongando la reacción [26].

Según los resultados de la remediación de suelos con el permanganato de potasio y el reactivo de Fenton son los mejores oxidantes en la degradación de Acetaminofén, generando una degradación en su totalidad [27].

Se ha podido evidenciar que el 70% de los documentos encontrados son artículos de investigación científica, marcando una gran diferencia con el resto de tipología de documentos encontrados, esto quiere decir que la nanotecnología en la remediación de suelos es un campo de interés científico en continuo crecimiento. Adicionalmente, se

muestra que los años donde más se realizaron publicaciones fueron 2018 y el año 2020 con un total de 5 publicaciones en cada año, sin embargo, desde el año 2013 al año 2017 se denota una constante cantidad de investigaciones publicadas por año. Adicionalmente, el repositorio donde se obtuvo más información fue ScienceDirect, con un 70% del total de documentos recopilados, de esta manera se confirma que el 70% de artículos seleccionados son de una fuente de gran veracidad en información e investigación, siendo la base de datos ScienceDirect la más reconocida por importantes círculos científicos, debido a la calidad de artículos indexados en este repositorio que han pasado previamente a revisiones por pares de expertos y reconocidos en la temática investigada.

Finalmente, se encontró una gran cantidad de aportes en la categoría de contaminantes inorgánicos, que resalta a las investigaciones encontradas con similares autorías que han sido publicadas en años consecutivos, dando a notar el constante interés y crecimiento de la temática. Adicionalmente, en la categoría de remoción de contaminantes orgánicos solo se halló investigaciones indexadas en el rango de los dos últimos años (2018-2020). En la categoría de asociación con otras tecnologías verdes para la remoción de residuos de pesticidas, se pudo determinar que las investigaciones realizadas con esta temática fueron únicamente en Egipto, esto confirma que la presente temática es de interés a nivel mundial. Por otro lado, la categoría con la temática de aplicación en subsuelo se encontró información proveniente de Brasil y China, denotando el interés que existe de los investigadores. Finalmente, en la categoría de mejora para el proceso de remediación de contaminantes farmacéuticos, se encontró investigaciones indexadas en revistas con gran prestigio internacional. Con los aportes obtenidos se puede afirmar que la nanotecnología verde es aplicada para la remediación de una gran variedad de xenobióticos presentes en el suelo por las actividades antropogénicas a lo largo de los años.

IV. CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la aplicación de nanopartículas biosintetizadas para la reducción de una gran variedad de xenobióticos presentes en el suelo tienen altos porcentajes de remoción de contaminantes y en algunos casos logra removerlos en su totalidad. Así mismo, se plantea una excelente viabilidad en cuanto la aplicación, pues esta tecnología de NP verde es rentable y no genera impactos en el ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Privada del Norte, Dirección de Investigación, Innovación & Responsabilidad Social, por la gestión y apoyo recibido para la participación de LACCEI 2022. Asimismo, se agradece a los revisores por sus observaciones y alcances, los cuáles hacen de este manuscrito un trabajo de calidad y gran aporte científico.

REFERENCIAS

- [1] FAO, "5 razones por las que el suelo es clave para el futuro sostenible del planeta | Objetivos de Desarrollo Sostenible | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura," Feb. 09, 2015. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/news/detail-news/es/c/277124/> (accessed Jan. 27, 2022).
- [2] J. V. Tarazona, "Pollution, Soil," *Encycl. Toxicol. Third Ed.*, pp. 1019–1023, Jan. 2014, doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00531-5.
- [3] S. Milena, S. Arroyave, F. Javier, and C. Restrepo, "Análisis de la contaminación del suelo: Revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica," *Semest. Económico*, vol. 12, no. 23, pp. 1–22, Jun. 2009, Accessed: Jan. 27, 2022. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/seec/v12n23/v12n23a2.pdf?fbclid=IwAR30->
- [4] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, *La contaminación del suelo: Una realidad oculta*, 1st ed., vol. 1. Roma: FAO, 2018.
- [5] Ministerio del Ambiente-Perú, *Estándares de calidad ambiental (ECA) para suelo*. Lima: Decreto Legislativo N° 002-2013-MINAM, 2013.
- [6] A. Rana, K. Yadav, and S. Jagadevan, "A comprehensive review on green synthesis of nature-inspired metal nanoparticles: Mechanism, application and toxicity," *J. Clean. Prod.*, vol. 272, p. 122880, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.122880.
- [7] D. Asmat-Campos *et al.*, "Unraveling the Active Biomolecules Responsible for the Sustainable Synthesis of Nanoscale Silver Particles through Nuclear Magnetic Resonance Metabolomics," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 48, pp. 17816–17827, Dec. 2020, doi: 10.1021/ACSSUSCHEMENG.0C06903/SUPPL_FILE/SC0C06903_SI_001.PDF.
- [8] A. Berenice Morales-Díaz, A. Juárez-Maldonado, Á. Morelos-Moreno, S. González-Morales, and A. Benavides-Mendoza, "Biomufacturing of metal nanoparticles using plant cells or plants extracts," *Rev. Mex. Cienc. Agríc.*, vol. 7, p. 1226, Jun. 2016, Accessed: Jan. 27, 2022. [Online]. Available: <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7n5/2007-0934-remexca-7-05-1211.pdf>.
- [9] J. Lin, F. He, B. Su, M. Sun, G. Owens, and Z. Chen, "The stabilizing mechanism of cadmium in contaminated soil using green synthesized iron oxide nanoparticles under long-term incubation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 379, p. 120832, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2019.120832.
- [10] Y. Wang *et al.*, "Green synthesis of nanoparticles for the remediation of contaminated waters and soils: Constituents, synthesizing methods, and influencing factors," *J. Clean. Prod.*, vol. 226, pp. 540–549, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.128.
- [11] E. S. Murgueitio Herrera, "Síntesis, caracterización y aplicación de nanopartículas de hierro, en la remoción de HTPs en suelos y aguas de la provincia de Francisco de Orellana – Ecuador," Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2018.
- [12] E. Murgueitio, L. Cumbal, M. Abril, A. Izquierdo, A. Debut, and O. Tinoco, "Green Synthesis of Iron Nanoparticles: Application on the

Removal of Petroleum Oil from Contaminated Water and Soils,” *J. Nanotechnol.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/4184769.

- [13] N. Jayarambabu, A. Akshaykranth, T. Venkatappa Rao, K. Venkateswara Rao, and R. Rakesh Kumar, “Green synthesis of Cu nanoparticles using Curcuma longa extract and their application in antimicrobial activity,” *Mater. Lett.*, vol. 259, p. 126813, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.MATLET.2019.126813.
- [14] S. Jebril, R. Khanfr Ben Jenana, and C. Dridi, “Green synthesis of silver nanoparticles using Melia azedarach leaf extract and their antifungal activities: In vitro and in vivo,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 248, p. 122898, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2020.122898.
- [15] M. Abril, H. Ruiz, and L. H. Cumbal, “Biosynthesis of Multicomponent Nanoparticles with Extract of Mortifio (*Vaccinium floribundum* Kunth) Berry: Application on Heavy Metals Removal from Water and Immobilization in Soils,” *J. Nanotechnol.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/9504807.
- [16] A. Soliemanzadeh and M. Fekri, “The application of green tea extract to prepare bentonite-supported nanoscale zero-valent iron and its performance on removal of Cr(VI): Effect of relative parameters and soil experiments,” *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 239, pp. 60–69, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.MICROMESO.2016.09.050.
- [17] C. Mystrioti, T. D. Xanthopoulou, P. E. Tsakiridis, N. Papassiopi, and A. Xenidis, “Comparative evaluation of five plant extracts and juices for nanoiron synthesis and application for hexavalent chromium reduction,” *Sci. Total Environ.*, vol. 539, pp. 105–113, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2015.08.091.
- [18] B. Su, J. Lin, G. Owens, and Z. Chen, “Impact of green synthesized iron oxide nanoparticles on the distribution and transformation of As species in contaminated soil,” *Environ. Pollut.*, vol. 258, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2019.113668.
- [19] D. Baragaño, J. Alonso, J. R. Gallego, M. C. Lobo, and M. Gil-Díaz, “Zero valent iron and goethite nanoparticles as new promising remediation techniques for As-polluted soils,” *Chemosphere*, vol. 238, p. 124624, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.124624.
- [20] B. An and D. Zhao, “Immobilization of As(III) in soil and groundwater using a new class of polysaccharide stabilized Fe–Mn oxide nanoparticles,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 211–212, pp. 332–341, Apr. 2012, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2011.10.062.
- [21] J. Lin, B. Su, M. Sun, B. Chen, and Z. Chen, “Biosynthesized iron oxide nanoparticles used for optimized removal of cadmium with response surface methodology,” *Sci. Total Environ.*, vol. 627, pp. 314–321, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.01.170.
- [22] M. Alisa Alvarez, “Eficacia del uso de nanopartículas de Fe(0) en la inmovilización de Cu y Ni en un suelo ácido,” Universidad de Alcalá, Madrid, 2017.
- [23] A. A. Romeh, “Green Silver Nanoparticles for Enhancing the Phytoremediation of Soil and Water Contaminated by Fipronil and Degradation Products,” *Water, Air, Soil Pollut. 2018* 2295, vol. 229, no. 5, pp. 1–13, Apr. 2018, doi: 10.1007/S11270-018-3792-3.
- [24] A. A. Romeh and R. A. Ibrahim Saber, “Green nanophytoremediation and solubility improving agents for the remediation of chlorfenapyr contaminated soil and water,” *J. Environ. Manage.*, vol. 260, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2020.110104.
- [25] I. Cecchin, K. R. Reddy, A. Thomé, E. F. Tessaro, and F. Schnaid, “Nanobioremediation: Integration of nanoparticles and bioremediation for sustainable remediation of chlorinated organic contaminants in soils,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 119, pp. 419–428, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.IBIOD.2016.09.027.
- [26] S. Machado *et al.*, “Application of green zero-valent iron nanoparticles to the remediation of soils contaminated with ibuprofen,” *Sci. Total Environ.*, vol. 461–462, pp. 323–329, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2013.05.016.
- [27] I. E. Oliveira Azevedo, “Remediación de suelos contaminados por compuestos farmacéuticos,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.