

# Evaluating the development of sustainable nanotechnology: Synthesis by bioreduction and applications in the decontamination of industrial waters

## Evaluando el desarrollo de la nanotecnología sostenible: Síntesis por bioreducción y aplicaciones en la descontaminación de aguas industriales

Jhordi Bautista-Guzman, Ing.<sup>1</sup>, Rosa Gomez-Morales, Ing.<sup>1</sup>, David Asmat-Campos, Dr.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Ingeniería Ambiental. Universidad Privada del Norte (UPN), Trujillo, Perú

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

[jhordibautista@outlook.com](mailto:jhordibautista@outlook.com), [rosarush1999@gmail.com](mailto:rosarush1999@gmail.com), [davidasm88@hotmail.com](mailto:davidasm88@hotmail.com), [david.asmat@upn.edu.pe](mailto:david.asmat@upn.edu.pe)

**Abstract-** Water contamination due to industrial activities has become a latent concern due to the environmental risk and the health of people, for this reason there are more proposals for environmental remediation. One of them and the most innovative is the application of nanotechnology which can be developed by various methods. This research seeks to collect and discuss information related to the sustainable method (green synthesis) for the production of iron nanoparticles, its effectiveness to decontaminate industrial waters and what are the variables that enhance its effectiveness, this from the analysis of scientific articles between the years 2015-2020; this analysis was guided by the PRISMA methodology. The identification of literature was carried out through a search in quality databases, considering those articles with less than five years of antiquity in English and Spanish. The results show the evolution of better methodologies for the management of green synthesis processes, in addition to the potential applications of iron nanoparticles in the decontamination of aqueous media.

**Keywords:** Water remediation, green synthesis, iron nanoparticles, sustainability.

**Resumen-** La contaminación del agua por actividades industriales se ha convertido en una preocupación latente debido al riesgo medioambiental y la salud de las personas, por este motivo son más las propuestas de remediación ambiental. Una de ellas y la más novedosa es la aplicación de la nanotecnología el cual puede desarrollarse por diversos métodos. Esta investigación busca recopilar y discutir la información vinculada al método sostenible (síntesis verde) para la elaboración de nanopartículas de hierro, su

efectividad para descontaminar aguas industriales y cuáles son las variables que potencian su efectividad, esto a partir del análisis de artículos científicos entre los años 2015-2020; este análisis fue guiado por la metodología PRISMA. La identificación de literatura se realizó a través de búsqueda en base de datos de calidad, considerando aquellos artículos con menos de cinco años de antigüedad en idioma inglés y español. Los resultados evidencian la evolución de mejores metodologías para el manejo de procesos de síntesis verde, además de las potenciales aplicaciones de las nanopartículas de hierro en la descontaminación de medios acuosos.

**Palabras clave:** Remediación de aguas, síntesis verde, nanopartículas de hierro, sostenibilidad.

### I. INTRODUCCIÓN

El agua representa aproximadamente las tres cuartas partes del espacio en la Tierra, pero solo el 1% es apto para el consumo humano. La Organización Mundial de la Salud [1] ha estimado que cerca de 1000 millones de personas carecen de servicios básicos de calidad, por difícil acceso o la falta de un tratamiento adecuado. La escasez del líquido elemental se atribuye al expansivo crecimiento poblacional, uso indiscriminado del recurso y al cambio climático [2]. Por ello, mantener la calidad del agua se convierte en un desafío que debemos afrontar desde ahora, ya que su disponibilidad es fundamental para la existencia de vida en el planeta tal y como la conocemos [3], [4]. El estudio de He [5] analizó la presencia de arsénico en agua de pozo y obtuvo como resultado que estos exceden los estándares regulatorios o al límite de poder estarlo, generando impacto en la salud de las personas. Así mismo, la investigación de Qian-Qian [6] advierte que el mal tratamiento de excretas animales generaría

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.37>

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

el aumento de contaminación en aguas superficiales por esteroides; que se convierte en una responsabilidad para el sector ganadero. Los contaminantes depositados en el agua se acumulan y generan efectos ecológicos adversos, ya que son fuente de nutrientes y hábitat valioso a nivel ecológico, sociocultural y económico [6]. A través de los años se han aplicado diferentes metodologías que permiten purificar el agua y cada una enfocada en tratar un contaminante diferente. Para la categoría de agua residuales industriales se consideran aquellas que resultan del desarrollo de un proceso productivo como minería, agricultura, energía, agroindustria, entre otras [7]. Según el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos (2017), la industria de alimentos, textiles, minera y canteras; contienen contaminantes como tintes, aceites, metales, entre otros. Diversas investigaciones vinculadas a la nanotecnología han demostrado su capacidad para reducir contaminantes; sin embargo, la experimentación ha sido bajo criterios específicos que deja en interrogante el nivel de efectividad que pueda tener a distintas condiciones, tipo de nanopartículas usadas, el tipo de extractos orgánicos y la parte usada de la misma, con la finalidad de conocer la mejor opción y garantizar el mejor resultado; así iniciamos la recopilación de información. La nanotecnología es el manejo de la materia a escala nanométrica es decir con tamaño entre 1 a 100 [8], [9]. Ha captado la atención debido a que conservan sus propiedades a pequeña escala y tienen aplicación en la industria textil, nanomedicina, tratamiento de aguas residuales y muchas más [8], [10].

La síntesis de nanopartículas por métodos físicos, químicos o biológicos han experimentado un gran avance para el desarrollo de nuevas metodologías, en particular las NPs de hierro que poseen una gran superficie y reactividad; además de baja toxicidad, biodegradabilidad, susceptibilidad magnética y propiedades redox en el agua. Sin embargo, su aplicación implica alto consumo de energía, costos elevados y uso de sustancia corrosiva e inflamables que causan daños ambientales. Es así como se propone el uso de extractos de plantas o frutas que contienen fitoquímicos y metabolitos con propiedades únicas, que pueden ser utilizados como agentes reductores para la síntesis y estabilización de NPs [11]. A partir del análisis del contenido fenólico total se puede comprobar la capacidad de reducción de iones y óxido de grafeno a nanopartículas; y se corrobora la presencia de compuestos fenólicos mediante análisis UV-Vis y/o FTIR responsables de reducir, y quelar NPs [8]. Los extractos de plantas como *Rosa damascene*, *Thymus vulgaris* y *Urtica dioica*, *Mentha pulegium*, Té verde, *Nephrolepis auriculata*; en algunas investigaciones usan cáscara de frutas, logrando así el aprovechamiento de residuos del sector industrial para darles un valor agregado [12], [13].

La síntesis de NPs a partir del uso de plantas (flor, hoja, fruto y otras partes) son un tema llamativo de investigación para la comunidad científica, sobre todo su papel como precursores y su acción como agente reductor, estabilizador, de cobertura y/o plantilla de los nanomateriales; que de manera adicional tienen ventajas por su bajo costo, diversidad y fácil disponibilidad para ser aplicados en aguas contaminadas. Es así como a partir de la problemática ambiental que significan los efluentes industriales y la diversidad de tratamientos existentes; vemos enfocado el metaanálisis a informar y plantearnos como objetivo conocer el desarrollo metodológico utilizado para realizar la síntesis verde de nanopartículas de hierro, su efectividad para descontaminar aguas industriales y cuáles son las variables que potencian esta efectividad, todo ello a partir del análisis de artículos científicos entre los años 2015-2020.

## METODOLOGÍA

Se realizó un metaanálisis de la literatura científica. Para el estudio de la información se apoyó de la metodología PRISMA [Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyse] [14], [15]. Las preguntas de investigación que sustentan el metaanálisis son las siguientes: *¿Cuál es la metodología adecuada con el que se realiza la síntesis verde de nanopartículas de hierro en los últimos cinco años? ¿Qué efectividad tiene para descontaminar aguas industriales? y ¿Qué variables afectan al índice de efectividad?*

La identificación de la literatura científica se realizó a través de búsqueda en base de datos de calidad como ScienceDirect, Springerlink, SciELO, CellPress, Hindawi; así como revistas destacadas en ACS Publications. Se estimó como criterio de selección aquellos artículos que comprendían los años 2015- 2020, con estructura Introducción + Metodología + Resultados + Discusión (IMDR) en idiomas inglés y español.

Para asegurar la calidad del proceso de búsqueda de la información se consideraron palabras claves a partir de la pregunta de investigación: “nanoparticles”, “plants extract”, “biosynthesis” “wastewater”, “contaminated water”, “iron nanoparticles”, “green synthesis of nanoparticles”. Para complementar la búsqueda de literatura científica se realizó a combinación de términos establecidos con operadores booleanos: (“nanoparticles”) AND (“iron nanoparticles”) OR (“green synthesis of nanoparticles”) AND (“plants extract” OR “biosynthesis”) AND (“wastewater”, “contaminated water”). Así mismo, la base de datos especializada fue ScienceDirect, Hindawi; además de Springerlink; de revista científicas con revisión por pares se eligió ACS Publications y buscadores alternativos como SciELO y CellPress.

El total de artículos encontrados por cada base de datos a través de las rutas de búsqueda fueron 400 en ScienceDirect, 629 en Springerlink, 616 en ACS Publications, 15 Redalyc, 3 en SciELO y 1 en CellPress, todo únicamente seleccionados

de fuentes primarias, se excluyó revistas de revisión, tesis y libros. A los artículos de fuentes primarias se les aplicó criterios de inclusión y exclusión. Se incluyó aquella literatura científica que son de calidad al presentar una descripción de la investigación, objetivos, métodos claros y concisos, resultados y discusiones contundentes y bien fundamentadas. Además, se seleccionó aquellos artículos que incluían ambas variables de la revisión sistemática. Se evitó trabajar con artículos que sintetizaron nanopartículas de las cuales no eran metálicas, también en el ámbito del estudio deben ser aplicadas en aguas contaminadas, así mismo se estableció como criterio excluyente a aquellas nanopartículas que no fueron sintetizadas mediante el método de síntesis verde con hojas, tallos, cascara, frutas, raíces o subproductos de procesos productivos de la materia prima antes mencionada (Figura 1). La selección de datos luego de proceso de inclusión y exclusión determinó 58 artículos de investigación, los cuales fueron abordados analizando el año, tipo de metodología empleada, tiempo, tamaño de las nanopartículas, la aplicación en el contaminante y el porcentaje de remoción para la simplificación y análisis de los datos, dicho proceso fue extraído por trabajo de investigación.

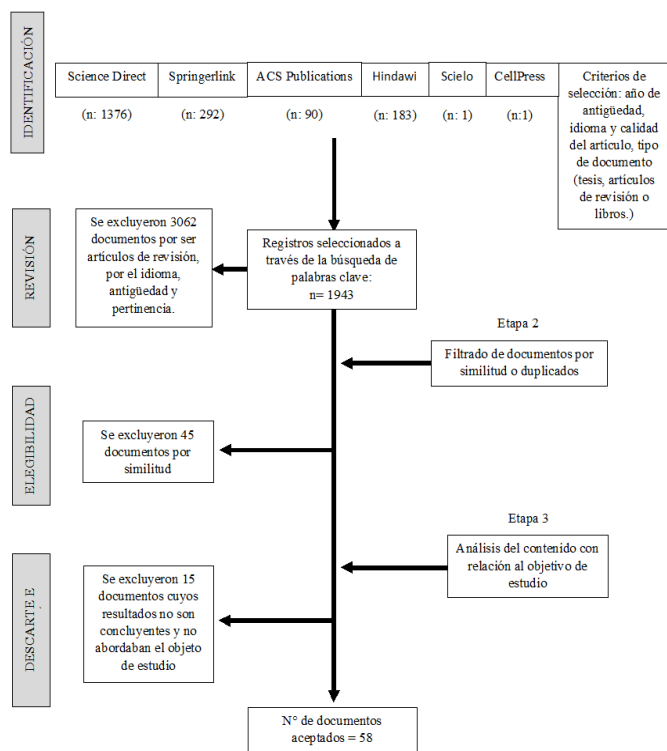


Figura 1. Diagrama de flujo de la búsqueda de artículos.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de la búsqueda de la literatura científica y siguiendo los criterios de selección mencionados en la Figura 1 se lograron recopilar 1943 artículos de investigación de los cuales 58 pasaron los filtros y fueron analizados según distintos criterios como el título, la fuente (Tabla 1), los años de publicación (Figura 2), su procedencia (Figura 3).

En una evaluación metaanalítica se recopile información que provenga de bases de datos confiables y de calidad, por es motivo se realizó la búsqueda de artículos científicos tuvo como fuente: ScienceDirect, ACS Publication, CellPress, Hindawi, Scielo y Springer; siendo más de la mitad artículos encontrados en ScienceDirect como lo demuestra la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los artículos científicos utilizados

Tipo de documento	Base de Datos	Cantidad	Porcentaje
Artículo científico	ACS Publication	4	7%
Artículo científico	CellPress	1	2%
Artículo científico	Hindawi	5	9%
Artículo científico	Scielo	1	2%
Artículo científico	Science Direct	41	70%
Artículo científico	Springer	6	10%
<b>Total</b>		<b>58</b>	<b>100%</b>

Fuente: Bases de datos mencionadas en las tablas.

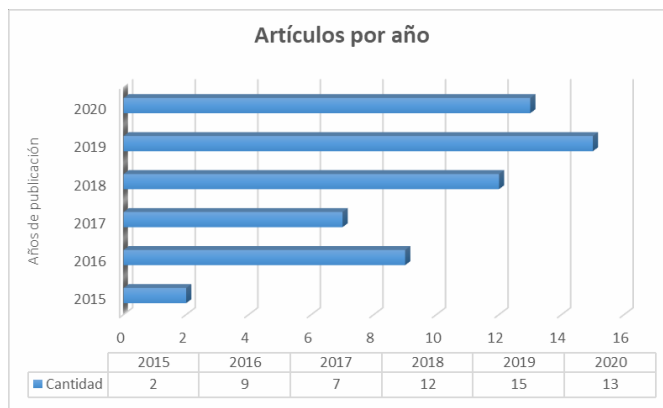
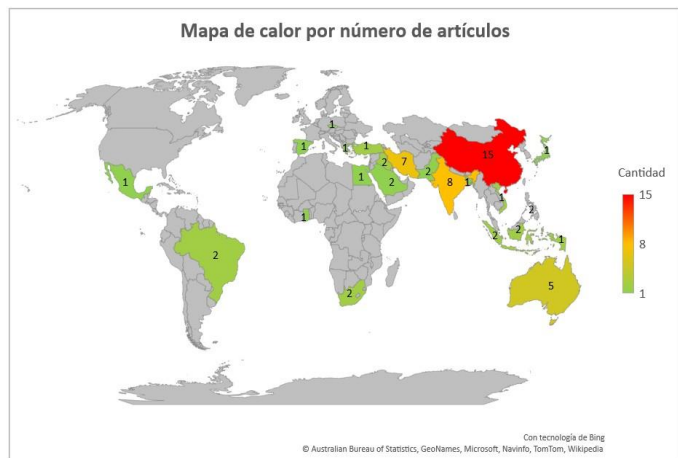


Figura 2. Cantidad de artículos por año.

En relación con los artículos recopilados por su ubicación se encuentran en su mayoría se encuentran al oriente del mapa en específico al continente asiático. Los países que presentan mayor cantidad de artículos del tema son China, India e Irán;

esta información puede ser visualizada en la Figura 3 que se



**Figura 3.** Número de artículos según su procedencia.

En la matriz expuesta a continuación (Tabla 2) se observa el análisis de los 58 artículos respecto al tipo de nanopartícula utilizada para la síntesis, el tipo de contaminante que se intenta remover y demás especificaciones usadas para descontaminar el agua en los diferentes trabajos.

**Tabla 2.** Características de las nanopartículas de hierro

N°	Nanopartícula	Tipo		Contaminante	Concentración	Tiempo de exposición	Eficiencia de remoción
		Metálica	Magética				
1	Óxido de Fe (FeO)	X		Cr (IV)	50 mg/L	-4-9 horas	96.2% - 58.7%
2	Hierro (Fe)	X		Verde de Malaquita	50 mg/L	12 horas	1399 mg/g
3	Óxido de Fe (Fe3O4)		X	Tinte	500 mg/L	30 min	92%
4	Hierro (Fe)	X	X	Verde de Malaquita	125 mg/L	60 min	93%
5	Óxido de Fe (FeO)	X		Orgánico	100 mg/L	Inmediato	20%
6	Hierro cero valente (ZVINP)	X		Azul de bromotolol	150 mg/L	15 minutos	90%
7	Biocarbón magnético Fe3O4		X	Reactive Red 21	50 mg/L	60 min	18.59-26.25 mg/g
8	Zeolita A/Fe3O4		X	Azul de metileno	10 mg/L	3 horas	97.5 %
9	Hierro	X		Cr (IV)	1 g/L	148 min	90%
10	Ni @ Fe3O4	X		Rojo congo, azul de metileno y rodamina B	10 mg/L	30 min	86%
11	Óxido de hierro		X	Ca y Cd	10 g/L	60 min	50% - 40 %
12	Óxido de hierro	X		As (V)	26.53 g	3 horas	100%
13	Óxido de hierro		X	Pb y Cr (III)	0.5 g/L	100 min	95 - 80%
14	Hierro cero valente	X		Cr (VI)	15 mg/L	60 min	94.7%
15	Hierro (Fe-NP)	X		2,4-diclorofenol	1 g/L	50 min	64%
16	Óxido de hierro (II)	X		Tinte indigo carmin	100 mg/L	60 min	86.7%
17	Hierro (III)	X		Cr (IV)	0.7 g/L	8 horas	100%
18	Hexaácidoferato de hierro (FeHCF)	X		HAP tóxicos	25 mg/L	48 horas	80-90%
19	Hierro	X		Tintes	0.53 ppm	20 min	90%
20	Hierro de valencia cero (NZVI)	X		Violeta cristal	454.5 mg/g	120 min	100%
21	Hierro (NP Fe)	X		Cr (VI)	10 mg/L	45 min	82%
22	Hierro (nFe)	X		As (V)	1 mg/L	24 horas	21.59 mg g-1
23	Hierro (NPs Fe)	X		Pb (II) y Rifampicina	50 mg/L	120 mi	97.5% - 68.8%
24	Fe 3O4 y Fe2O3		X	Azul de bromofenol	5 mg/L	30 min	98%
25	Fe ZnNP	X		Colorante azoico tóxico, Reactive Red 2 (RR-2)	0.1 g/L	90 min	96%
26	Hierro nano-cero valente (nZVI)	X		Cr (VI)	10 mg/L	10 min	61%
27	NP de Fe	X		Cr (VI)	100 mg/L	45 min	89.9%
28	Fe3O4	X		4-NP, MB, MG y MO	40 mg/L	241 s	-
29	Hierro cero valente (NZVI)	X		Cr (VI)	0.2 g/L	30 min	100%
30	Hierro (Fe)	X		Cr (VI)	0.38-3.20 mol	5 min	500 mg/g
31	Nanocompuesto de Fe3O4/Au		X	Matamb, Impenem, naranja de metilo	0.1 mg/ml	1200 - 3600 s	96 % en luz UV 84% en luz visible
32	Hematita		X	Azul de bromofenol y violeta de metilo	30 mg/L	60 min	94.6% - 96.7%

encuentra a continuación.

33	NP Fe	X		Bisfenol A (BPA)	0.3 g/L	10 min	96.4%
34	Ppy/FeO NC	X		Cr (VI)	25 mg/L	75 min	65%
35	Fe3O4		X	Pb (II)	0.2 g/L	60 min	94%
36	Fe NPs	X		OFL y ENR	0.8 g/L	180 min	91.8% - 90.7%
37	Hierro cero valente	X		Cr (VI)	0.02 g	120 min	99.1%
38	Óxido de hierro		X	Amónico y Fosfato	10 mg/L	12 horas	43.3% - 99.8%
39	FeO		X	Violeta cristal	75 ug/mL	150 min	80%
40	Hierro cero valente	X		Colorante azul 238	0.5 g/L	0.5 g/L	96.2%
41	Hierro cero valente	X		Naranja de metilo	30 mg	90 min	95%
42	Óxido de hierro		X	Cd (II)	2.5 g/L	120 min	98.5%
43	Fe NPs	X		NM/RC, AM, esoma-Y /VM / rodamina B	11.1 mg/L	30 min	98.1%
44	Fe NPs	X		Nitratos	0.5 mL	24 h	74%
45	Fe NPs	X		Amarillo de Alizarina R	100 mg/L	42 h	93.7%
46	Hierro cero valente	X		Fenol	1 g/L	25 min	94.8%
47	Hierro cero valente	X		Cr (VI)	10 mg/L	10 min	91.68%
48	Fe2O3 NPs		X	Azul 4	15 mg	56 min	95.08%
49	FeO NPs		X	Tartrazina y colorante rojo burdeo	0.5 g/L	1200 min	59.78 mg/g
50	NZVI y Fe3O4	X	X	Cr (VI)	2 ml	90 min	99.29%
51	FB-ZVI-Cu	X		Carbamazepina	0.4 g/L-1	20 min	95%
52	ZVIN		X	Azul metileno y anilina	1.7 g	30 min - 12 h	85.5% - 74.8%
53	ZVINP	X		Pb	20 mL.L <sup>-1</sup>	24 horas	84%
54	NZVI	X		Cr (VI)	1.6 g/L	120 min	98.28%
55	IONP		X	Naranja de metilo (MO)	10 mg/L	6 horas	81%
56	Óxido de hierro		X	Cd	20 mg/L	90 min	90%
57	NP Hierro	X		Tinte	8 g/L	90 min	95%
58	Óxido de hierro		X	RR amarillo remazol	0.8 g/L	6 horas	76.6%

En la Tabla 3, la aplicación de nanopartículas se puede evidenciar que se realiza en su mayoría para la remoción de metales y tinte; exactamente de Cr (V), As, Cd, azul de metileno, naranja de metilo y verde malaquita. Aunque la tabla no caracteriza el total de investigaciones utilizadas, existen otros enfoques de aplicación, pero en menor incidencia.

Con relación a la Figura 2 y los años que tienen la mayor cantidad de artículos publicados, se evidencia que del 2017 al 2019 hay un aumento progresivo que se asocia al avance en la ciencia años tras año y el interés creciente hacia la nanotecnología y su aplicación en remediación ambiental. La gravedad del daño ambiental es confirmada por un informe del 2019 de la OMS [1] sobre las 10 principales amenazas a la salud siendo la contaminación una de ellas. Vásquez [16] afirma que la problemática actual amplía el abanico de opciones que busca descontaminar, siendo una de estas opciones el uso de la nanotecnología (párr. 1). Sin embargo, para el año 2020 se presenta un descenso de publicaciones de biosíntesis para la remoción de metales que se relacionaría con el brote de la COVID-19 y el enfoque de esta ciencia en el rubro médico. Como lo demuestra la investigación de Ortiz-Núñez [17] que hizo un análisis de la producción científica sobre COVID-19, de 2 artículos en el 2019 aumentó a 674 en 2020.

Asimismo, respecto a la ubicación de los estudios elegidos en su mayoría provienen de países asiáticos. Entre las razones sería que alberga a la nación más contaminada del mundo; asimismo, presenta un acelerado avance tecnológico en el rubro y apoyo para su desarrollo ligado a la contaminación industrial de las empresas. Dicho apoyo se evidencia con la creación de la Asian Nano Forum (ANF) desde 2004, integrada por 13 países del continente y desde ese entonces se hacen aportes de millones de dólares que impulsa la nanotecnología en países como Japón, Australia, India e Irak [18], que coincide con los resultados de la Figura 3. Sin embargo, esto no monopoliza la información pues según estima el grupo Iberdrola para 2024 la industria nanotecnológica sería liderada por Estados Unidos, Alemania y en representación de Sudamérica, Brasil.

Las nanopartículas poseen características específicas que se han categorizado en la Tabla 2 para identificar la influencia que éstas tienen en el porcentaje de remoción de los contaminantes a los que se han sometido. En la bibliografía analizada se reconocen diferentes tipos de nanopartículas de óxido de hierro como las de valencia cero, oxidativas, de magnetita y únicamente hierro, que se agrupan en dos tipos generales las magnéticas y las metálicas, siendo exactamente 25 artículos que utilizan el primer tipo y 33 para el siguiente. Por otro lado, es importante considerar que independientemente del tipo de nanopartícula utilizada, éstas se someten a la remoción de diversos contaminantes que pueden ser de fácil degradación u otros que necesiten un tratamiento adicional o condiciones más específicas. Allí radica la variabilidad del índice de efectividad como por ejemplo el artículo N° 5 y 16 en los cuales se trabajó con nanopartículas sintetizadas de óxido de hierro magnéticas y la concentración en ambos trabajos fue de 100 mg/L sin embargo se busca eliminar materia orgánica en el artículo N° 5 y tinte índigo carmín para el caso de la investigación N° 16, pero el porcentaje de remoción para el último fue 86.7% y para el primero solo 20%, la diferencia es notable [19], [20].

Para la variable del extracto, se encontró similitud en el procedimiento para su preparación, en su mayoría se realiza con agua destilada, desionizada o ultrapura [21]–[26]. A continuación, el secado del material para proceder a triturar y obtener polvo, que se mezcla con una solución acuosa en un centrifugador o agitador, para finalmente filtrar para almacenar y usarlo posteriormente [27]–[30].

Asimismo, las plantas, como agente reductor, tienen un extenso abanico de partes que pueden aprovecharse para su uso e incluso los residuos de estas. De la revisión se ha identificado el nombre científico de la especie vegetal y las partes utilizadas como las hojas, cáscaras, semillas, flores y la pulpa que en gran parte pertenecen a *Camellia sinensis* “té verde” y *Eucalyptus globulus* “eucalipto” [19], [23], [24], [31]–[35]; es relevante mencionar la existencia de

publicaciones que emplean un extracto de la combinación de tres o más especies vegetales [36].

En la actualidad, la nanotecnología verde está pasando a tener todo un abanico de aplicaciones, la remoción de metales es uno de ellos, esto debido a la importancia de acortar los protocolos, reducir el impacto ambiental, y reducir los costos, asimismo, se está llegando a desarrollar metodologías de síntesis verde conjugadas con otros tipos de nanomateriales, especialmente de tipo polimérico, lo cual apertura todo un campo de investigación de impacto.

Un punto importante que resaltar es que muy pocas son las investigaciones vinculadas a la síntesis verde en donde evalúan el mecanismo de formación de las nanopartículas, considerando que en los extractos existen diversidad de grupos funcionales, de los cuáles no todos tienen un efecto reductor, es así como únicamente consideran su caracterización por intermedio de técnicas como el FTIR, pero sin dar importancia a una evaluación más sensible.

#### IV. CONCLUSIONES

Finalmente, se concluye que la metodología adecuada para realizar la síntesis verde de nanopartículas de hierro consiste en los siguientes pasos: Preparación del extracto vegetal empezando por el secado de la especie elegida y diluida en medio acuoso, seguido de la preparación del precursor y la síntesis de las nanopartículas de hierro con el extracto almacenado gota a gota y en constante agitación para terminar realizando la caracterización de las nanopartículas y comprobar si la metodología fue exitosa. La aplicación de nanopartículas de hierro sintetizadas con extractos de plantas para descontaminar aguas industriales logra un alto porcentaje de efectividad que en el caso de los metales la remoción llega a ser del 90% y para los tintes 80%. Entre las variables que potencian la efectividad de la remoción de contaminantes en las aguas residuales de industrias, se encuentra el pH como lo mencionan casi el total de artículos estudiados, asimismo la concentración de nanopartículas y el tiempo de contacto.

#### 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.

**Tabla 3.** Enfoque de aplicación de las Fe NP

Remoción	Aporte	Autor (es)
Cr (VI)	La temperatura, el tamaño de las partículas, su monodispersidad y la concentración de cromo hexavalente inicial potencian la eliminación del contaminante en soluciones acuosas. La respuesta destaca el papel de la concentración, el pH y la carga inicial de cromo, siendo pH el mayor contribuyente para obtener un porcentaje de eliminación alto.	[12], [24], [34], [37], [38]
As	Desarrollo de nuevos materiales híbridos magnéticos mediante la encapsulación de nanopartículas de óxido de hierro en una matriz de quitosano que logran buena capacidad de sorción en dependencia del pH. El As presenta características de simplicidad de síntesis lo que permite ser adsorbido por los enlaces Fe.	[26], [32]
Metales	Absorción eficaz de las nanopartículas de óxido de hierro al Cd en medio acuoso. La adsorción de Cd se ajustaba bien a la isoterma de Langmuir que indica la pertenencia a la adsorción química monocapa. Los factores tienen un efecto sobre la remoción que va de mayor a menor en el siguiente orden: pH, dosis, fuerza iónica, temperatura.	[39], [40]
Pb (II)	Pb (II) se adsorbiera en la superficie de las NP de Fe debido a la fuerte adsorción innata de iones metálicos en óxidos de hierro. Además, también encontramos que la adsorción de Pb (II) en nanopartículas siguió un proceso endotérmico. La adsorción en equilibrio corresponde al modelo de pseudo segundo orden.	[35], [41]
Azul metileno	Se observó una buena estabilidad fotocatalítica de las NP en la degradación de MB bajo irradiación de luz UV. Obteniendo la máxima eficiencia de adsorción de azul de metileno con un pH alrededor de 7.	[42]–[44]
Tintes	Naranja de metilo Debido a la procedencia contaminante se evalúa su eliminación bajo radiación UV y luz visible, que a su vez comprueban la actividad antibacteriana y antimicrobiana de las nanopartículas siendo está muy eficiente en el tratamiento de efluentes farmacéuticos.	[45]
Verde malaquita	Mantener una alta capacidad de adsorción en una amplia gama de condiciones de pH, permanecer estable en un entorno de almacenamiento ambiental, tener un buen potencial de reciclaje. Logrando la eliminación del contaminante arriba del 90%.	[46], [47]

### REFERENCIAS

[1] Organización Mundial de la Salud, “Agua potable,” Jun. 14, 2019. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> (accessed Jan. 22, 2022).

[2] M. Anjum, R. Miandad, M. Waqas, F. Gehany, and M. A. Barakat, “Remediation of wastewater using various nano-materials,” *Arab. J. Chem.*, vol. 12, no. 8, pp. 4897–4919, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.ARABJC.2016.10.004.

[3] F. O. Arimoro, M. D. Abubakar, G. E. Obi-Iyeye, and U. N. Keke, “Achieving sustainable river water quality for rural dwellers by prioritizing the conservation of macroinvertebrates biodiversity in two Afrotropical streams,” *Environ. Sustain. Indic.*, vol. 10, p. 100103, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.INDIC.2021.100103.

[4] P. Punia *et al.*, “Recent advances in synthesis, characterization, and applications of nanoparticles for contaminated water treatment- A review,” *Ceram. Int.*, vol. 47, no. 2, pp. 1526–1550, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2020.09.050.

[5] X. He, M. R. Karagas, and C. Murray, “Impact of receipt of private well arsenic test results on maternal use of contaminated drinking water in a U.S. population,” *Sci. Total Environ.*, vol. 643, pp. 1005–1012, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.06.228.

[6] Q. Q. Zhang, C. Xing, Y. Y. Cai, X. T. Yan, and G. G. Ying, “How much do human and livestock actually contribute to steroids emission and surface water pollution from past to the future: A global research,” *Sci. Total Environ.*, vol. 772, p. 145558, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.145558.

[7] Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, “Fiscalización Ambiental en Aguas Residuales,” Lima, May 2014. Accessed: Jan. 22, 2022. [Online]. Available:

[https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=7827](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827).

[8] A. Waris *et al.*, “A comprehensive review of green synthesis of copper oxide nanoparticles and their diverse biomedical applications,” *Inorg. Chem. Commun.*, vol. 123, p. 108369, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.INOCHE.2020.108369.

[9] G. Tailor, B. L. Yadav, J. Chaudhary, M. Joshi, and C. Suvalka, “Green synthesis of silver nanoparticles using *Ocimum canum* and their anti-bacterial activity,” *Biochem. Biophys. Reports*, vol. 24, p. 100848, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.BBREP.2020.100848.

[10] K. S. Ilinger *et al.*, “Copper nanoparticles: Green synthesis and managing fruit rot disease of chilli caused by *Colletotrichum capsici*,” *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. 28, no. 2, pp. 1477–1486, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SJBS.2020.12.003.

[11] V. Kshtriya, B. Koshti, and N. Gour, “Green synthesized nanoparticles: Classification, synthesis, characterization, and applications,” *Compr. Anal. Chem.*, vol. 94, pp. 173–222, Jan. 2021, doi: 10.1016/BS.COAC.2020.12.009.

[12] M. Fazlzadeh, K. Rahmani, A. Zarei, H. Abdoallahzadeh, F. Nasiri, and R. Khosravi, “A novel green synthesis of zero valent iron nanoparticles (NZVI) using three plant extracts and their efficient application for removal of Cr(VI) from aqueous solutions,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 122–130, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.APT.2016.09.003.

[13] Y. Wei, Z. Fang, L. Zheng, L. Tan, and E. P. Tsang, “Green synthesis of Fe nanoparticles using *Citrus maxima* peels aqueous extracts,” *Mater. Lett.*, vol. 185, pp. 384–386, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.MATLET.2016.09.029.

[14] N. Humana Dietética *et al.*, “Ítems de referencia para publicar Protocolos de Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis: Declaración PRISMA-P 2015,” *Rev. Española Nutr. Humana y Dietética*, vol. 20, no. 2, pp. 148–160, Feb. 2016, doi: 10.14306/renhyd.20.2.223.

[15] B. Hutton, F. Catalá-López, and D. Moher, “The PRISMA statement extension for systematic reviews incorporating network meta-analysis: PRISMA-NMA,” *Med. Clínica (English Ed.)*, vol.

- 147, no. 6, pp. 262–266, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.MEDCLE.2016.10.003.
- [16] V. Vásquez, “Avances de la nanotecnología para la salud | UPB,” Apr. 14, 2020. <https://www.upb.edu.co/es/central-blogs/divulgacion-cientifica/avances-nanotecnologia-salud> (accessed Jan. 22, 2022).
- [17] R. Ortiz-Núñez, “Análisis métrico de la producción científica sobre COVID-19 en SCOPUS,” *Rev. Cuba. Inf. en Ciencias la Salud*, vol. 31, pp. 1–10, 2020, Accessed: Jan. 22, 2022. [Online]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2307-21132020000300002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2307-21132020000300002).
- [18] N. Takeuchi and M. E. M. Ramos, “Divulgación y formación en nanotecnología en México,” *Mundo Nano. Rev. Interdiscip. en Nanociencias y Nanotecnología*, vol. 4, no. 2, 2011, doi: 10.22201/CEIICH.24485691E.2011.2.44978.
- [19] C. A. De León-Condés, G. Roa-Morales, G. Martínez-Barrera, P. Balderas-Hernández, C. Menchaca-Campos, and F. Ureña-Núñez, “A novel sulfonated waste polystyrene / iron oxide nanoparticles composite: Green synthesis, characterization and applications,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 7, no. 1, p. 102841, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.JECE.2018.102841.
- [20] S. P. Rajendran and K. Sengodan, “Synthesis and Characterization of Zinc Oxide and Iron Oxide Nanoparticles Using Sesbania grandiflora Leaf Extract as Reducing Agent,” *J. Nanosci.*, vol. 2017, pp. 1–7, Jan. 2017, doi: 10.1155/2017/8348507.
- [21] K. Pakzad, H. Alinezhad, and M. Nasrollahzadeh, “Green synthesis of Ni@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and CuO nanoparticles using Euphorbia maculata extract as photocatalysts for the degradation of organic pollutants under UV-irradiation,” *Ceram. Int.*, vol. 45, no. 14, pp. 17173–17182, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2019.05.272.
- [22] E. S. Önal, T. Yatkin, T. Aslanov, M. Ergüt, and A. Özer, “Biosynthesis and Characterization of Iron Nanoparticles for Effective Adsorption of Cr(VI),” *Int. J. Chem. Eng.*, vol. 2019, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1155/2019/2716423.
- [23] F. Zhu, S. Ma, T. Liu, and X. Deng, “Green synthesis of nano zero-valent iron/Cu by green tea to remove hexavalent chromium from groundwater,” *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 184–190, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.302.
- [24] Y. Liu, X. Jin, and Z. Chen, “The formation of iron nanoparticles by Eucalyptus leaf extract and used to remove Cr(VI),” *Sci. Total Environ.*, vol. 627, pp. 470–479, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.SCIOTENV.2018.01.241.
- [25] J. Nasiri, E. Motamedi, M. R. Naghavi, and M. Ghafoori, “Removal of crystal violet from water using  $\beta$ -cyclodextrin functionalized biogenic zero-valent iron nano-adsorbents synthesized via aqueous root extracts of Ferula persica,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 367, pp. 325–338, Apr. 2019, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2018.12.079.
- [26] Z. Wu, X. Su, Z. Lin, G. Owens, and Z. Chen, “Mechanism of As(V) removal by green synthesized iron nanoparticles,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 379, p. 120811, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2019.120811.
- [27] L. P. Lingamdinne *et al.*, “Biogenic reductive preparation of magnetic inverse spinel iron oxide nanoparticles for the adsorption removal of heavy metals,” *Chem. Eng. J.*, vol. 307, pp. 74–84, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.CEJ.2016.08.067.
- [28] B. D. Yirsaw, M. Megharaj, Z. Chen, and R. Naidu, “Reduction of hexavalent chromium by green synthesized nano zero valent iron and process optimization using response surface methodology,” *Environ. Technol. Innov.*, vol. Complete, no. 5, pp. 136–147, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.ETI.2016.01.005.
- [29] S. H. Adyani and E. Soleimani, “Green synthesis of Ag/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/RGO nanocomposites by Punica Granatum peel extract: Catalytic activity for reduction of organic pollutants,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 2711–2730, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2018.12.012.
- [30] I. Bibi *et al.*, “Green synthesis of iron oxide nanoparticles using pomegranate seeds extract and photocatalytic activity evaluation for the degradation of textile dye,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 6, pp. 6115–6124, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.JMRT.2019.10.006.
- [31] R. K. Sharma, S. Yadav, R. Gupta, and G. Arora, “Synthesis of Magnetic Nanoparticles Using Potato Extract for Dye Degradation: A Green Chemistry Experiment,” *J. Chem. Educ.*, vol. 96, no. 12, pp. 3038–3044, Dec. 2019, doi: 10.1021/ACS.JCHEMED.9B00384.
- [32] M. Martínez-Cabanas, M. López-García, J. L. Barriada, R. Herrero, and M. E. Sastre de Vicente, “Green synthesis of iron oxide nanoparticles. Development of magnetic hybrid materials for efficient As(V) removal,” *Chem. Eng. J.*, vol. 301, pp. 83–91, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.CEJ.2016.04.149.
- [33] A. Truskewycz, R. Shukla, and A. S. Ball, “Iron nanoparticles synthesized using green tea extracts for the fenton-like degradation of concentrated dye mixtures at elevated temperatures,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 4409–4417, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.JECE.2016.10.008.
- [34] X. Jin, Y. Liu, J. Tan, G. Owens, and Z. Chen, “Removal of Cr(VI) from aqueous solutions via reduction and adsorption by green synthesized iron nanoparticles,” *J. Clean. Prod.*, vol. 176, pp. 929–936, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.12.026.
- [35] Z. Lin, X. Weng, G. Owens, and Z. Chen, “Simultaneous removal of Pb(II) and rifampicin from wastewater by iron nanoparticles synthesized by a tea extract,” *J. Clean. Prod.*, vol. 242, p. 118476, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.118476.
- [36] A. Truskewycz, R. Shukla, and A. S. Ball, “Phytofabrication of Iron Nanoparticles for Hexavalent Chromium Remediation,” *ACS Omega*, vol. 3, no. 9, pp. 10781–10790, Sep. 2018, doi: 10.1021/ACSOMEGA.8B00410/SUPPL\_FILE/AO8B00410\_SI\_01.PDF.
- [37] K. Rong, J. Wang, Z. Zhang, and J. Zhang, “Green synthesis of iron nanoparticles using Korla fragrant pear peel extracts for the removal of aqueous Cr(VI),” *Ecol. Eng.*, vol. 149, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.ECOLENG.2020.105793.
- [38] K. Sravanthi, D. Ayodhya, and P. Y. Swamy, “Eco-friendly synthesis and characterization of phyto-genic zero-valent iron nanoparticles for efficient removal of Cr(VI) from contaminated water,” *Emergent Mater.*, vol. 2, no. 3, pp. 327–335, Sep. 2019, doi: 10.1007/S42247-019-00041-9.
- [39] 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.SCIOTENV.2018.01.170.
- [40] M. H. Ehrampoush, M. Miria, M. H. Salmani, and A. H. Mahvi, “Cadmium removal from aqueous solution by green synthesis iron oxide nanoparticles with tangerine peel extract,” *J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–7, Dec. 2015, doi: 10.1186/S40201-015-0237-4/TABLES/2.
- [41] P. K. Gautam, S. Shivalkar, and S. Banerjee, “Synthesis of M. oleifera leaf extract capped magnetic nanoparticles for effective lead [Pb (II)] removal from solution: Kinetics, isotherm and reusability study,” *J. Mol. Liq.*, vol. 305, p. 112811, May 2020, doi: 10.1016/J.MOLLIQ.2020.112811.
- [42] F. Harjati, P. W. Citradewi, G. Purwiandono, and I. Fatimah, “Green synthesis of hematite/TUD-1 nanocomposite as efficient photocatalyst for bromophenol blue and methyl violet degradation,” *Arab. J. Chem.*, vol. 13, no. 11, pp. 8395–8410, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.ARABJC.2020.05.032.
- [43] A. K. Hassan, G. Y. Al-Kindi, and D. Ghanim, “Green synthesis of bentonite-supported iron nanoparticles as a heterogeneous Fenton-like catalyst: Kinetics of decolorization of reactive blue 238 dye,” *Water Sci. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 286–298, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.WSE.2020.12.001.
- [44] H. Xin, X. Yang, X. Liu, X. Tang, L. Weng, and Y. Han, “Biosynthesis of Iron Nanoparticles Using Tie Guanyin Tea Extract for Degradation of Bromothymol Blue,” *J. Nanotechnol.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/4059591.

- [45] I. A. Radini, N. Hasan, M. A. Malik, and Z. Khan, "Biosynthesis of iron nanoparticles using *Trigonella foenum-graecum* seed extract for photocatalytic methyl orange dye degradation and antibacterial applications," *J. Photochem. Photobiol. B.*, vol. 183, pp. 154–163, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.JPHOTOBIOL.2018.04.014.
- [46] P. Plachtová, Z. Medříková, R. Zbořil, J. Tuček, R. S. Varma, and B. Maršálek, "Iron and Iron Oxide Nanoparticles Synthesized with Green Tea Extract: Differences in Ecotoxicological Profile and Ability to Degrade Malachite Green," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 8679–8687, Jul. 2018, doi: 10.1021/ACSSUSCHEMENG.8B00986/SUPPL\_FILE/SC8B00986\_SI\_001.PDF.
- [47] P. Zhang *et al.*, "Green and Size-Specific Synthesis of Stable Fe-Cu Oxides as Earth-Abundant Adsorbents for Malachite Green Removal," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 9229–9236, Jul. 2018, doi: 10.1021/ACSSUSCHEMENG.8B01547/SUPPL\_FILE/SC8B01547\_SI\_001.PDF.