



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Revisión sistemática y meta-análisis sobre el uso de  
nanopartículas metálicas en la remediación de suelos  
contaminados con As y Pb**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
Ingeniera Ambiental

**AUTORAS:**

Bach. Guadalupe Sandoval, Geraldine Karito (orcid.org/0000-0002-8070-9671)

Bach. Rojas Díaz, Sheyla Thalía (orcid.org/0000-0003-1820-6798)

**ASESOR:**

Dr. Castañeda Olivera, Carlos Alberto (orcid.org/0000-0002-8683-5054)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

**LIMA - PERÚ**

**2020**

## **Dedicatoria**

A nuestros padres, por ser el soporte y la fuerza de todos los días.

A nuestro asesor (Dr. Carlos A. Castañeda Olivera), por enseñarnos y ser un bonito recuerdo en nuestra vida profesional.

## **Agradecimiento**

Después de 5 años en la UCV, concluimos una de las etapas más importantes en nuestra vida profesional. Se torna imposible describir en este corto espacio todo el aprecio que sentimos por las personas que contribuyeron en el desarrollo de la investigación. Por ello, a cada uno de ustedes, nuestro más sincero agradecimiento:

A nuestro asesor, el Dr. Carlos A. Castañeda Olivera, muchas gracias por sus enseñanzas que están plasmadas en esta investigación y en muchas de nuestras rutinas personales y profesionales.

A nuestros padres, el amor de ustedes siempre nos acompañó y motivó a seguir adelante.

A los familiares y amigos que nos apoyaron en todo este largo camino de formación, con sus consejos y recomendaciones para continuar en el proceso de formación profesional.

A la Universidad César Vallejo, por darnos la formación académica y permitirnos seguir nuestros sueños de convertirnos en profesionales.

## Índice de contenido

Índice de tablas	v
Índice de figuras	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	3
III. METODOLOGÍA	10
3.1. Tipo y diseño de investigación	10
3.2. Variables y operacionalización	10
3.3. Población, muestra y muestreo	11
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	11
3.5. Procedimientos	12
3.5.1. Criterios de inclusión y exclusión	15
3.5.2. Evaluación de la calidad	16
3.6. Análisis de datos	17
3.7. Aspectos éticos	17
IV. RESULTADOS	18
4.1. Evaluación de la calidad metodológica de las investigaciones	19
4.2. Descripción de las investigaciones	21
4.3. Máxima reducción de los metales (As y Pb) utilizando nanopartículas metálicas: gráficos en Excel	37
4.4. Meta-análisis	38
V. DISCUSIÓN	42
VI. CONCLUSIONES	46
VII. RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS	48
ANEXOS	55

## Índice de tablas

Tabla 1. Estrategia de búsqueda para el arsénico.....	14
Tabla 2. Estrategia de búsqueda para el plomo .....	15
Tabla 3. Calidad metodológica de los estudios seleccionados .....	20
Tabla 4. Características de los estudios seleccionados en la revisión sistemática sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con arsénico .....	22
Tabla 5. Características de los estudios seleccionados en la revisión sistemática sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con plomo .....	25
Tabla 6. Características del suelo contaminado con arsénico .....	27
Tabla 7. Características del suelo contaminado con plomo .....	28
Tabla 8. Características de las nanopartículas metálicas para remover Arsénico .....	29
Tabla 9. Características de las nanopartículas metálicas para remover plomo .....	31
Tabla 10. Dosis de aplicación y porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas para remover arsénico .....	33
Tabla 11. Dosis de aplicación y porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas para remover plomo .....	35
Tabla 12. Investigaciones incluidas para el meta-análisis de las concentraciones de nanopartículas metálicas en la remediación de arsénico .....	39
Tabla 13. Investigaciones incluidas para el meta-análisis de las concentraciones de nanopartículas metálicas en la remediación de plomo .....	39

## Índice de figuras

Figura 1. Lavado del suelo mediante el pretratamiento con nZVI.....	4
Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento de la investigación .....	13
Figura 3. Proceso de obtención de las investigaciones seleccionadas en la revisión sistemática sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con As y Pb .....	18
Figura 4. Máximo porcentaje de remediación del arsénico (As) .....	37
Figura 5. Máximo porcentaje de remediación del plomo (Pb) .....	38
Figura 6. Meta-análisis de las concentraciones de nanopartículas metálicas en la remediación de arsénico .....	40
Figura 7. Meta-análisis de las concentraciones de nanopartículas metálicas en la remediación de plomo .....	41

## Resumen

El uso de nanopartículas metálicas para aplicaciones ambientales viene siendo de gran interés debido a sus propiedades físicas y químicas que les permite actuar como agentes inmovilizadores en suelos contaminados con metales pesados. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar mediante revisión sistemática y meta-análisis la eficiencia de las nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con arsénico (As) y plomo (Pb). Para la revisión sistemática se trabajaron con investigaciones seleccionadas a partir de las bases de datos de Scopus, Web of Science y ScienceDirect publicados entre enero de 2010 hasta septiembre de 2020. Para el meta-análisis de los estudios incluidos se utilizó el software Review Manager 5.4 (RevMan) y los datos estadísticos fueron interpretados con los rangos de valores de Higgins & Green en un intervalo de confianza del 95%. Los resultados mostraron que las nanopartículas metálicas son buenos absorbentes y reductores, y tienen mayor eficiencia con tamaños menores a 100 nm. Los estudios incluidos para el meta-análisis mostraron una heterogeneidad moderada y homogénea de 60% y 0% para el As y Pb, respectivamente. Finalmente, se concluyó que las nanopartículas metálicas son eficientes para la remediación de suelos contaminados con As y Pb, mostrando porcentajes promedio de remoción de 84.4 y 81.2%, respectivamente.

**Palabras claves:** revisión sistemática, meta-análisis, nanopartículas metálicas, remediación, suelos contaminados, plomo, arsénico

## **Abstract**

The use of metallic nanoparticles for environmental applications has been of great interest due to their physical and chemical properties that allow them to act as immobilizing agents in soils contaminated with heavy metals. The aim of this research was to evaluate the efficiency of metal nanoparticles in the remediation of soils contaminated with arsenic (As) and lead (Pb) by means of a systematic review and meta-analysis. For the systematic review we worked with research selected from the Scopus, Web of Science and ScienceDirect databases published between January 2010 and September 2020. For the meta-analysis of the included studies, Review Manager 5.4 (RevMan) software was used and the statistical data were interpreted with Higgins & Green's value ranges at a 95% confidence interval. The results showed that metallic nanoparticles are good adsorbents and reducers, and have higher efficiency at sizes smaller than 100 nm. The studies included for the meta-analysis showed a moderate and homogeneous heterogeneity of 60% and 0% for As and Pb, respectively. Finally, it was concluded that metallic nanoparticles are efficient for the remediation of As and Pb contaminated soils, showing average removal percentages of 84.4% and 81.2%, respectively.

**Keywords:** systematic review, meta-analysis, metallic nanoparticles, remediation, contaminated soil, lead, arsenic

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, la contaminación del suelo es una preocupación importante, de manera que altera su biodiversidad, disminuye su materia orgánica y capacidad filtrante. Esto es generado por diversas actividades industriales, agricultura, doméstica, entre otros, donde los contaminantes más frecuentes hallados en el suelo son los orgánicos persistentes, contaminantes emergentes y metales pesados que afectan también de esta manera a la salud y producción de alimentos. Se calcula que el 95% de los recursos alimentarios se generan de manera directa e indirectamente del suelo (FAO, 2018).

Los suelos contaminados por metales pesados son generalmente causados por actividades urbanas, industriales y agrícolas, que podrían afectar la seguridad alimentaria, la salud humana y la sostenibilidad del ecosistema (C. Li et al., 2020). El aumento de estos contaminantes ha incrementado considerablemente en las últimas tres décadas incluyéndose entre ellos al cromo, arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo, selenio, zinc, níquel y otros, estimándose que a nivel mundial más de 10 millones de lugares han sido contaminados, lo que representa a más del 50% del grado de contaminación por los metales pesados causados por la industrialización y urbanización (Khalid et al., 2017).

A nivel nacional se cuenta con más de 7000 pasivos ubicados comúnmente en la sierra, donde resalta la ciudad de La Oroya que cuenta con concentraciones de 3177 ppm de plomo en los suelos, cabe resaltar que la minería en el Perú va creciendo en grandes cantidades, invirtiendo en nuevos proyectos en las ciudades de Cuzco, Cajamarca, Moquegua, Ica, Lima, Ancash y entre otras (Reuer et al., 2012)

De esta manera, se formula como **problema general**: ¿Cuál es la eficiencia de las nanopartículas metálicas en la remediación de suelo contaminados con As y Pb?, y como **problemas específicos**: ¿Cuáles son las dosis de nanopartículas metálicas para la remediación de suelos contaminados con As y Pb? ¿Cuáles son los tipos de nanopartículas metálicas?

La investigación se **justifica** en el aspecto ambiental, social y económico. Ambiental por que busca ofrecer una nueva alternativa eco amigable al usar nanopartículas mediante la técnica de remediación, ayudando a remover gran porcentaje de contaminantes en el suelo, mientras en el aspecto social, debido a esta nueva aplicación sobre la nanotecnología mediante la investigación sistemática y meta-análisis, busca contribuir con la recopilación de información sobre el uso de nanopartículas para la remoción de suelos contaminados, ya que viene siendo una alternativa de solución, ya para el aspecto económico se busca introducir nuevas alternativas de solución a bajos costos y de forma eficiente.

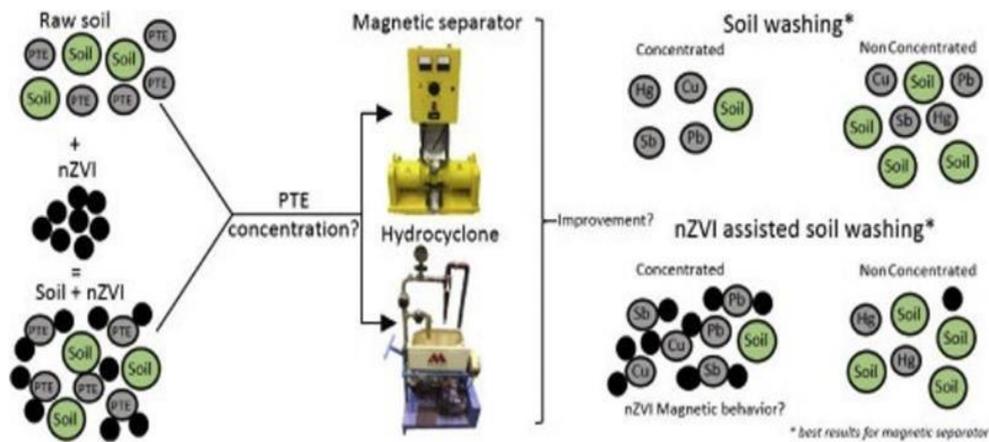
Dentro de la investigación revisión sistemática y meta análisis se planteó como **objetivo general**: Evaluar la eficiencia de las nanopartículas metálicas en la remediación de suelo contaminados As y Pb y como **objetivos específicos**: Determinar las dosis de nanopartículas metálicas para la remediación de suelos contaminados con As y Pb e identificar los tipos de nanopartículas metálicas.

De esta manera se genera la siguiente **hipótesis**: Las nanopartículas metálicas son eficientes en la remediación de suelo contaminados As y Pb.

## II. MARCO TEÓRICO

La **remediación** está constituida por un conjunto de acciones que sean necesarias para la depuración de cualquier tipo de contaminante al realizar un estudio preliminar para así determinar las facilidades y acciones que se deban realizar para contrarrestar el daño. Existen diferentes técnicas, de manera que, si es necesario la implementación de dos o más técnicas para descontaminar, va depender de acuerdo a las necesidades del suelo, sea por depuración química o biorremediación donde intervienen estímulos propios (Domènech & Peral, 2006). De la misma forma, Volke Sepúlveda & Velasco (2002) indican que la remediación fisicoquímica puede realizarse *in situ* o *ex situ* donde se pueden encontrar variedad de técnicas tales como la remediación electrocinética (RE), lavado de suelos (LS), extracción por solventes (ES), extracción por vapores (EV) y la solidificación / estabilización (S/E), las cuales se pueden aplicar para la eliminación o disminución de contaminantes presentes en suelos.

**El lavado de suelos** es una técnica que se aplica *in situ* para eliminar los contaminantes. Para la eliminación de esos contaminantes se utilizan varias soluciones quelantes y ácidas, entre ellas, el EDTA es el agente más efectivo en la movilización de metales (L. Liu et al., 2018). Además, estos sistemas de lavado pueden implicar otros tipos de combinación como separación física/extracción química, en función de las características de la matriz del suelo, la especiación del metal y el tipo de metal a tratar (Dermont et al., 2008).



**Figura 1. Lavado del suelo mediante el pretratamiento con nZVI (Boente et al., 2018)**

**Estabilización química** es una técnica de bajo costo y buen efecto que reduce los peligros potenciales de los suelos contaminados, convirtiendo los contaminantes en formas insolubles, móviles y tóxicas (Yang et al., 2020). Este proceso aplica varias enmiendas estabilizadoras, reduciendo la biodisponibilidad, bioaccesibilidad y movilidad de los contaminantes en el suelo (Komárek et al., 2013). Es un método de remediación temporal para suelos poco o moderadamente contaminados (L. Liu et al., 2018).

**Solidificación y estabilización (S/E)**, la solidificación es la encapsulación de los desechos materiales para llevarlo a un estado sólido, lo que impide que el químico se disperse; la estabilización es el proceso que modifica los químicos del suelo contaminado para tonarlos menos nocivos o volátiles (Chen et al., 2009).

Por lo que, L. Wang et al. (2019), en su investigación remediación verde de suelos contaminados con As y Pb, usó el método S/E (solidificación/estabilización) a base de arcilla con dosis de cal. Los resultados de TCLP indicaron que las concentraciones de As y Pb del suelo contaminado fueron 1.04mg/L a 0.03mg/L y 3.30mg/L a 0.01mg/L respectivamente, después del tratamiento de Ca S/E a base de arcilla se redujo en un 96.2% en As y 98.8% en Pb. La unión del Ca en los minerales arcillosos fue eficiente para S/E de As y Pb. De la misma forma, Tan et al. (2020), en su estudio de remediación de suelos contaminado con Cr (VI), usó el

método remediación química combinada con ácidos húmicos (HA) y nano FeS, este tratamiento logró disminuir en 89.14% el Cr (VI), dando un efecto positivo en la calidad del suelo.

El **suelo** se representa como una capa delgada en la superficie terrestre, constituida en su mayoría por residuos de roca, proveniente de alteraciones físicas y químicas la cual produce cambios entre la litosfera, biosfera y la atmósfera. Existen diferentes tipos de suelos, procedentes de distintas formaciones, de modo que sus características y propiedades van a depender del tipo de suelo (Porta et al., 2013). Además, en el suelo se aprecian una serie de capas, inferior, intermedia y superior, las cuales se diferencian por su aspecto y textura, también se define por su capacidad de uso según los efectos combinados las cuales se agrupan por su capacidad señalando su adaptabilidad al entorno (Hernández et al., 2006).

**Suelos contaminados por metales pesados** cuentan con presencia de concentraciones nocivas de algunos elementos químicos y compuestos contaminantes que pueden ser hallados de 6 formas diferentes, tales como partículas, películas líquidas, adsorbidos, absorbidos, disueltos en el agua intersticial de los poros y fases sólidas en los poros (Galán Huertos & Romero Baena, 2008). La persistencia y acumulación de metales pesados como el cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), vanadio (V), zinc (Zn), mercurio (Hg), molibdeno (Mo) y entre otros, afectan el equilibrio del ecosistema, el suelo, animales, vegetales y la salud humana por exposición directa o por entrar en la red alimentaria (Shah & Daverey, 2020). Según Khalid et al. (2017), numerosas técnicas de remediación de suelos han sido desarrolladas con la finalidad de reducir las fracciones totales y/o biodisponibles de los metales pesados en los suelos y su posterior acumulación en la cadena alimentaria, basándose en métodos físicos, químicos y biológicos que pueden utilizarse en combinación con otros. Los métodos físicos incluyen la sustitución del suelo, el aislamiento del suelo, la vitrificación y la electrocinética; los métodos biológicos incluyen la fitoestabilización, la fitoevaporación y la fitoextracción, y los métodos químicos contienen la inmovilización y el lavado del suelo.

La contaminación por el **arsénico (As)** puede ser muy extendida ya que presenta una fácil dispersión; a presencia de este elemento en el suelo, es el resultado de procesos geológicos naturales de arsénicos o por consecuencia de actividades humanas, tales como, la fundición de metales industriales, industrias de semiconductores y la liberación de minerales con alta concentración de arsénico que se generan a través de las extracciones mineras de otros compuestos para su producción, el arsénico es altamente soluble al agua los cuales pueden ser absorbidos por microorganismos y trayendo como consecuencia altos niveles de biodisponibilidad (Montoya et al., 2015).

El **plomo (Pb)** es un metal pesado extremadamente tóxico, flexible, inelástico y es fácilmente fundible (Marrugo et al., 2020). Este metal se encuentra mayormente en el suelo como consecuencia de actividades como la minería, los procesos industriales químicos y la fundición, teniendo una alta persistencia en el suelo por no ser degradable (Xia et al., 2019). Por ello, el uso desmedido de plomo conduce a una amenaza para el ambiente y la salud humana, necesitando estudiar intensamente la remediación de suelos contaminados (Jiang et al., 2020).

La **nanotecnología** es una ciencia que ayuda a entender a nivel atómico y molecular, todos los fenómenos que ocurren a escalas manométricas, comprendiendo su estructura muy pequeña que va desde 1 a los 100 nanómetros (Gutiérrez Wing, 2006; Poole & Owens, 2007). Para Organización Internacional de Normalización (ISO) existe una diferencia entre los términos nanomaterial y nanopartícula; nanomaterial es definido como un material con cualquier dimensión externa en la nanoescala o que tiene una estructura interna o superficial en la nanoescala, y nanopartícula como un nanoobjeto con las tres dimensiones externas en la nanoescala (1-100 nm) (Boverhof et al., 2015). Las nanopartículas y materiales nanoestructurados pueden organizarse en cuatro categorías basadas en materiales; entre ellas tenemos a los nanomateriales de carbono, nanomateriales inorgánicos, nanomateriales orgánicos y nanomateriales compuestos (Jeevanandam et al., 2018).

**Las nanopartículas metálicas** utilizadas en el ambiente para descontaminar el suelo mediante la técnica de remediación, poseen características como adsorbente, reductor, oxidante y catalizador para eliminar varios metales pesados, contaminantes orgánicos y contaminantes inorgánicos (J. Liu et al., 2020). El uso de las nanopartículas ha surgido como una tecnología de remediación eficaz, proporcionando condiciones de reducción química en el área contaminada, llevando de esta manera a la nanoremediación (Saravanan et al., 2021).

**Nanopartículas de hierro nano zerovalente** debido a su tamaño muy pequeño, facilita el contacto cercano con los contaminantes elevando la eficiencia de descontaminación, por otro lado, cuenta con propiedades y características que permiten absorber y reaccionar con los metales pesados, convirtiéndolas en especies menos tóxicas o se vuelven menos disponibles en el suelo (Borja-Borja et al., 2020). El uso de nZVI para la remediación del suelo *in situ* es eficaz debido a su potencial y baja toxicidad; la combinación de nZVI y la tecnología, es una técnica que utiliza agentes quelantes, ácidos inorgánicos y sales para extraer metales tóxicos, y las nanopartículas mejoran el lavado del suelo mediante la absorción (Boente et al., 2018).

**Nanopartículas de hierro** funcionan como fuertes agentes reductores ya que su mecanismo de acción involucra reacciones de oxidación reducción (redox) que se da a través del contacto con el medio, se oxidan rápidamente y donan sus electrones a los contaminantes, y de esa manera reduciéndolos; así mismo, los contaminantes se vuelven más estables, menos móviles y menos tóxicos (Galdames et al., 2017).

Las **nanopartículas magnéticas o magnetitas** se obtienen por la síntesis de expansión reductiva (RES), extraendose de la urea junto a otros compuestos de nitrato en una atmósfera inerte para partículas metálicas con cero valencias. También se puede extraer de fuentes naturales como el azúcar por medio de la cáscara de banano y entre otros, estas nanopartículas se caracterizan por ser de menor tamaño a las metálicas, ya que mientras el tamaño de la nanopartícula sea

menor se magnetizan, y son utilizadas para la remediación de suelos contaminados ya sea por metales pesados u otros contaminantes (Robles Ardila et al., 2019).

En la revisión de la literatura se encontraron diferentes investigaciones sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de metales pesados, entre ellas: Gil-Díaz et al. (2016) realizaron la inmovilización del arsénico por medio de nanopartículas de hierro cero valente (nZVI) en dos dosis de 1% y 10%, mostrando disminución del As en un 85 % con la mayor dosis, y esto indujo a un mejor desarrollo de las plantas de cebada y una menor absorción de arsénico. Similarmente, Sun et al. (2020) estudiaron los efectos combinados del hierro nano cero valente (nZVI) con biochar y ácido húmico en la remediación de suelos contaminados con Cr(VI), trabajando con dosis de 100 y 1000 mg/kg de nZVI y nZVI reforzadas con almidón. La más alta remoción (95 %) de Cr(VI) fue alcanzada en el tratamiento combinado con 1000 mg/kg de S-nZVI y ácido húmico.

Singh et al. (2011) eliminaron Cr(VI) utilizando nanopartículas de hierro de cero valente (nZVI) en suelos contaminados por desechos de curtiembre, aplicando dosis de 0.01, 0.05, 0.10 y 0.15 mg/L de nZVI. Los resultados mostraron que la dosis de 0.15 mg/L de nZVI alcanzó una reducción completa del Cr(VI), en un tiempo de 120 min. Así mismo, S. Liu et al. (2020) removieron Cr(VI) utilizando nanopartículas de hierro de cero valente reforzado con bentonita (nZVI@Bent) en el líquido suspendido del suelo contaminado, alcanzando valores de eliminación del Cr(VI) mayores del 99% para una relación 1:0,5 de Fe y bentonita en las partículas de nZVI@Bent, dosis de 5 g/L, pH 5 y a 35 °C. Además, los autores indicaron que la eliminación del Cr(VI) puede dividirse en dos procesos como reducción y adsorción, teniendo como producto el complejo de Cr(OH)<sub>3</sub> y Fe(III)-Cr(III).

Otros investigadores como Gómez-Sagasti et al. (2019) evaluaron el efecto de las nanopartículas de hierro cero valente (nZVI) en las propiedades microbianas de un suelo franco-arcilloso frente a un suelo franco-arenoso, aplicando dosis de nZVI de 0, 1, 5, 10 y 20 mg/g de suelo. Los resultados mostraron que el suelo franco-arenoso fue más vulnerable a la presencia de nZVI que el suelo franco-arcilloso (efecto protector de un alto contenido de arcilla y materia orgánica). Fajardo et al.

(2019) trabajaron con nanopartículas de hierro (nZVI y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), con dosis de 2.5 y 5% y tiempos de exposición de 24, 48 y 72 horas para evaluar la capacidad de inmovilización de metales pesados. Los resultados experimentales mostraron que los metales pesados como Pb, Cd y Zn fueron estabilizados satisfactoriamente por las nanopartículas nZVI, pero no por las nanopartículas Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

**Revisión sistemática** es una metodología científica específica que permite obtener resultados relevantes y cuantificados que va más allá de una simple descripción general, inicia con el planteamiento de una pregunta o de un tema en específico y estructurada que determinará los términos que serán utilizados en la búsqueda en las bases de datos y el tipo de artículos útiles para responder dicha pregunta teniendo como objetivo evaluar, identificar y combinar la evidencia de estudios primarios siguiendo un protocolo para ser incluidos (Moreno et al., 2018).

**Meta-análisis** también denominado revisión sistemática, revisión cuantitativa o síntesis cuantitativa, es una metodología de búsqueda rigurosa, mediante la aplicación de análisis estadístico, resultados de estudios empíricos sobre un mismo problema de investigación, lo que ha llevado al meta-análisis a ser una metodología de investigación imprescindible, de comparar resultados de la forma más exacta y fiable (Huedo-Medina & Johnson, 2010).

La **herramienta PICO** puede ser utilizada para construir diversos tipos de preguntas de investigación, describiéndose de cada acrónimo como Problema (P), Intervención (I), Comparación (C) y Resultados (R), así mismo sirve para mejorar la especificidad y claridad conceptual para obtener mejor resultados de búsquedas (Landa-Ramírez & Arredondo-Pantaleón, 2014).

### III. METODOLOGÍA

La presente investigación de revisión sistemática siguió las indicaciones del libro “Systematic Reviews and Meta-Analysis” (Littell et al., 2008).

#### 3.1. Tipo y diseño de investigación

La investigación sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con As y Pb fue de enfoque cuantitativo porque se trabajó con los valores de porcentaje de remediación. Además, es de tipo aplicada, porque se enfoca en la obtención de datos recolectados y análisis estadísticos extraídos de artículos de investigación que conlleva a responder las incógnitas establecidas y los objetivos que se plantearon. Rodríguez Moguel (2005) menciona que la investigación de tipo aplicada depende de los descubrimientos y aportes teóricos, aplicándola a problemas concretos, en circunstancias y características, de manera que se encamina a una utilización inmediata y no al desarrollo de teorías.

El presente trabajo sobre revisión sistemática y meta-análisis sobre el uso de nanopartículas en la remediación de suelos contaminados, fue de diseño no experimental debido a que se analizaron los estudios incluidos según los criterios establecidos. El diseño no experimental es aquel que se realiza sin manipular las variables, ya que es una búsqueda sistemática y empírica, donde el investigador no tiene el control directo de las variables (Toro Jaramillo & Parra Ramírez, 2006).

El nivel de investigación es descriptivo, ya que se detallan las características de los estudios seleccionados, enfocándose en las concentraciones, dosis y tipo de nanopartículas que se utilizaron para el cumplimiento y desarrollo de la revisión.

#### 3.2. Variables y operacionalización

En la presente investigación se trabajó tanto con variables independiente y dependiente que incluían las dimensiones de acuerdo a las investigaciones revisadas. En el Anexo 1 se muestra la operacionalización de dichas variables.

**Variable independiente:** Uso de nanopartículas metálicas

**Dimensiones:**

- Dosis de aplicación de las nanopartículas metálicas
- Características de las nanopartículas metálicas

**Variable dependiente:** Remediación de suelos contaminados con As y Pb

**Dimensiones:**

- Características de suelo
- Porcentaje de remediación

### 3.3. Población, muestra y muestreo

**La población** corresponde a todos los estudios que realizaron el uso de nanopartículas en la remediación de suelo contaminado, en total fueron 414 investigaciones. Robles Pastor (2019) define a la población como el conjunto total de elementos de interés a estudiar, la cual cumple con los objetivos de la investigación, permitiendo generalizar los resultados que se obtienen con la población seleccionada.

**La muestra** para la presente investigación fueron aquellos estudios que cumplieron con los criterios de inclusión, siendo un total de 26 investigaciones. La muestra es una representación precisa y completa de la población que fue elegida (Bairagi & Munot, 2019), se evidencia el fenómeno a ser estudiado y por consiguiente obtener las conclusiones generalizables en la población.

**El muestreo** fue no probabilístico y a conveniencia del investigador, considerándose los diferentes criterios de la revisión sistemática, y **la unidad de análisis** fue cada documento (artículos y reviews) seleccionado a partir de las bases de datos consideradas.

### 3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se empleó la **técnica** de revisión sistemática, dado que está constituido por múltiples artículos y síntesis de evidencia científica, cuyo objetivo es resolver la interrogante del tema central. Posterior a ello, se realizó el meta-análisis con los

estudios incluidos según los criterios de la revisión sistemática para aceptar o rechazar la hipótesis planteada.

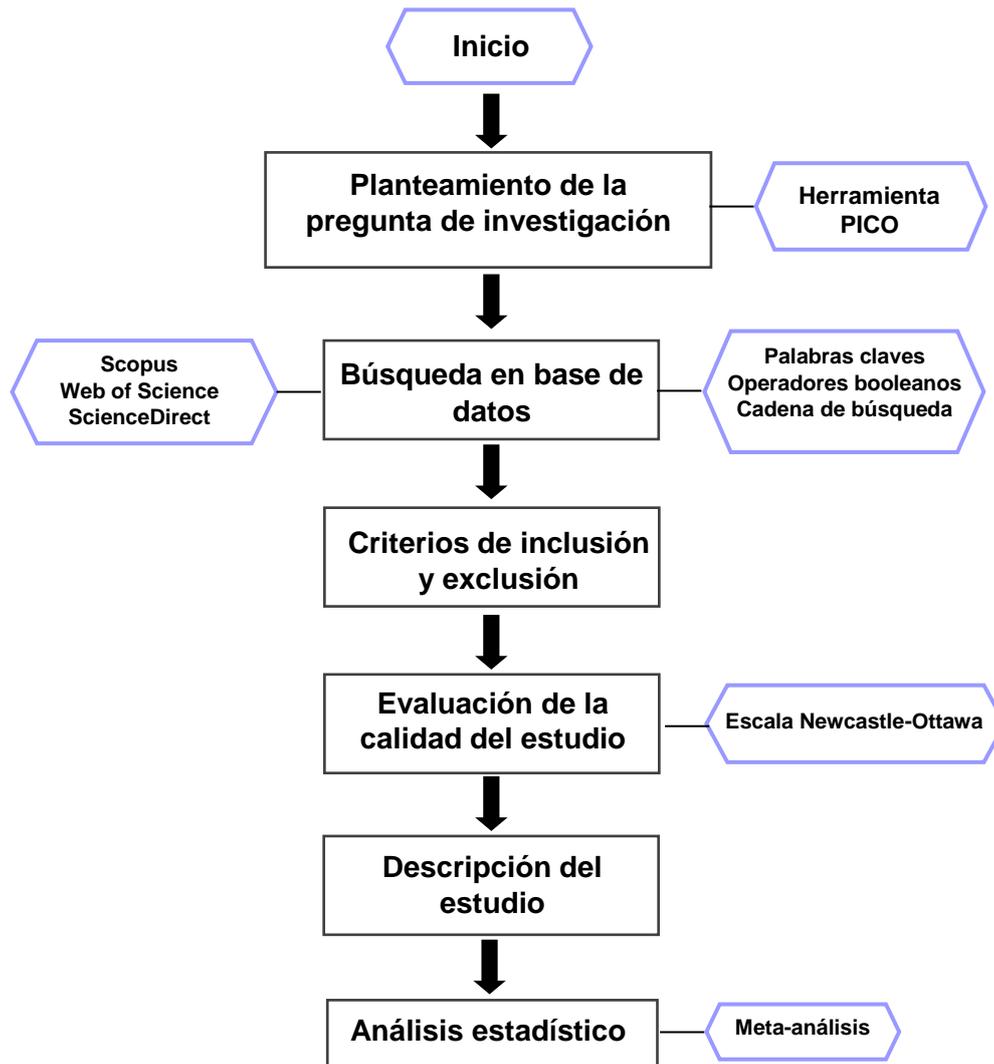
En la presente investigación se tomaron como **instrumentos** fichas de registro que contenían las variables establecidas para el estudio, tales como:

- Ficha 1: Características de los estudios seleccionados en la revisión sistemática sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con As y Pb
- Ficha 2: Dosis de aplicación de las nanopartículas metálicas
- Ficha 3: Características de las nanopartículas metálicas
- Ficha 4: Características del suelo
- Ficha 5: Porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas

Las fichas de registro fueron validadas por 3 expertos que tenían un amplio conocimiento del tema estudiado. Las mismas son mostradas en el **Anexo 2**.

### **3.5. Procedimientos**

La presente investigación se llevó a cabo de acuerdo al siguiente diagrama de flujo, tal como se muestra en la **Figura 2**.



**Figura 2. Diagrama de flujo del procedimiento de la investigación**

Para ello se planteó la pregunta de investigación, haciendo uso de la herramienta PICO.

**P:** Suelo contaminados con As y Pb

**I:** Aplicación de nanopartículas metálicas

**C:** Sin aplicación de nanopartículas metálicas

**O:** Remediación

¿Cuál es la eficiencia del uso de las nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con As y Pb?

La búsqueda de información en las bases de datos se llevó a cabo sistemáticamente de acuerdo con las palabras clave como “nanoparticles”, “soils”, “remediation”, “removal” y “arsenic”, utilizando los operadores booleanos “AND” y “OR”, y en el idioma inglés. Además, se verificó que todos los estudios incluidos no superen los 10 años de antigüedad a partir del año actual (2020).

La búsqueda se hizo por separado para el metal As y para el Pb, tal como se muestra en la Tabla 1 y Tabla 2.

**Tabla 1. Estrategia de búsqueda para el arsénico**

<b>Base de datos</b>	<b>Scopus</b>	<b>Web of Science</b>	<b>ScienceDirect</b>
<b>Cadena de búsqueda</b>	nanoparticles and soils and (remediation or removal) and arsenic	(nanoparticles AND soils and ("remediation" OR "removal") AND arsenic	nanoparticles and soils and (remediation or removal) and arsenic
<b>Periodo de publicación</b>	Enero de 2010 hasta septiembre de 2020		
<b>Áreas</b>	Environmental Science, Chemistry, Chemical Engineering, Agricultural and Biological Sciences and Energy.	Environmental Science, Engineering Environmental, Engineering Chemical, Nanoscience nanotechnology, Agronomy and Soil Sciences.	Environmental Science, Chemical Engineering, Energy, Chemistry and Agricultural and Biological Sciences.
<b>Tipo de documento</b>	Articles y reviews		
<b>Idioma</b>	Inglés		
<b>Resultados</b>	73	59	341

**Tabla 2. Estrategia de búsqueda para el plomo**

<b>Base de datos</b>	<b>Scopus</b>	<b>Web of Science</b>	<b>ScienceDirect</b>
<b>Cadena de búsqueda</b>	nanoparticles and soils and (remediation or removal) and lead	(nanoparticles AND soils and ("remediation" OR "removal") AND lead	nanoparticles and soils and (remediation or removal) and lead
<b>Periodo de publicación</b>	Enero de 2010 hasta septiembre de 2020		
<b>Áreas</b>	Environmental Science, Chemistry, Chemical Engineering, Agricultural and Biological Sciences and Energy.	Environmental Science, Engineering Environmental, Engineering Chemical, Nanoscience nanotechnology, Agronomy, Soil Sciences and Agricultural Engineering	Environmental Science, Chemical Engineering, Energy, Chemistry and Agricultural and Biological Sciences.
<b>Idioma</b>	Ingles		
<b>Resultados</b>	121	151	638

### 3.5.1. Criterios de inclusión y exclusión

Inicialmente, las investigaciones que no contenían las palabras claves en el título, resumen y keywords fueron excluidos. Las investigaciones duplicadas se eliminaron de acuerdo con el título. Posteriormente, todas las investigaciones se descargaron para su revisión de acuerdo con los criterios de inclusión. Por último, todas las investigaciones seleccionadas fueron evaluadas mediante lectura de acuerdo a los criterios de inclusión y exclusión descritos de la siguiente manera:

1. Los estudios que muestran la eficacia del uso de NPs metálicas o NPs combinadas usando dosis de aplicación se incluyeron.

2. Los estudios que trabajaron con suelos contaminados con metales pesados como el As y Pb se incluyeron.
3. Los estudios que trabajaron en la eliminación de As y Pb en otros medios (agua, plantas, etc.) fueron excluidos.
4. Los estudios con datos insuficientes se excluyeron.

### **3.5.2. Evaluación de la calidad**

Para la evaluación de la calidad de los estudios se utilizó la lista de verificación de la herramienta Newcastle – Ottawa Quality Assessment Scale. La lista de verificación fue adaptada de acuerdo con el interés de la presente investigación, evaluando la calidad de cada estudio seleccionado, que se refiere a la representatividad y la exposición. La representatividad se manifiesta si la muestra representa realmente los suelos contaminados con As y Pb y la exposición evalúa las características del suelo y si la aplicación de las NPs es eficiente para disminuir la concentración del As y Pb.

La sección de resultados midió el porcentaje de remediación (si la concentración inicial disminuyó después de la aplicación de las nanopartículas) y el periodo de aplicación (muestra el tiempo en que las nanopartículas inmovilizan las concentraciones de As y Pb).

Por último, cada sección (selección y resultados) se evaluó con los criterios de “Sí” y “No” para determinar los estándares de calidad entre buena, aceptable y mala, según la Newcastle – Ottawa Quality Assessment Scale. Esta escala, se utiliza para evaluar la calidad de los estudios. Cada estudio se evalúa en base a ítems y categorizaciones, en el que un estudio se juzga desde tres amplias perspectivas: la selección de los grupos de estudio, la comparabilidad de los grupos y la determinación de la exposición o el resultado de interés para los estudios de casos. Las estrellas otorgadas por cada artículo de calidad sirven como una evaluación visual rápida (Boland et al., 2017).

### **3.6. Análisis de datos**

Se realizó el análisis de los datos usando el programa Review Manager (RevMan 5.4). Este software estadístico permite realizar adecuadamente una revisión de las investigaciones incluidas. Además, se utilizó el programa Microsoft Excel para generar tablas con las investigaciones incluidas.

Se realizó el meta-análisis utilizando datos dicotómicos, los cuales se presentaron y se compararon con la razón de momio (Odds Ratio), con el intervalo de confianza del 95%.

Para la interpretación de los datos estadísticos se utilizaron los siguientes rangos de valores (Higgins & Green, 2011):

- 0% al 40%: posiblemente no sería importante.
- 30% al 60%: puede representar heterogeneidad moderada.
- 50% al 90% puede representar heterogeneidad significativa.
- 75% al 100% representa heterogeneidad considerable.

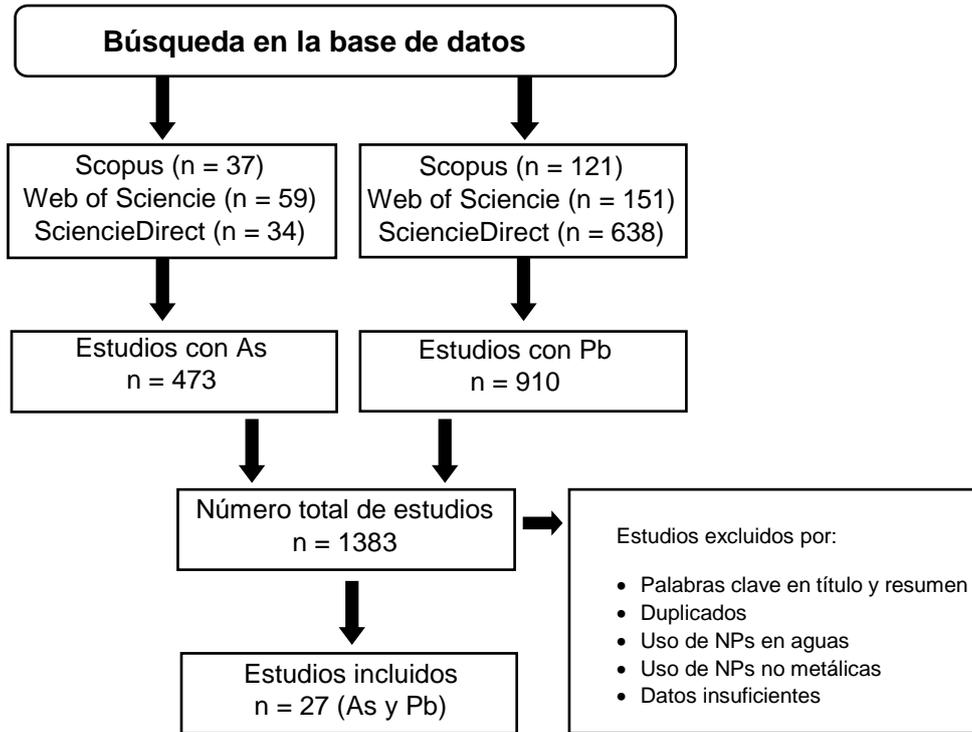
### **3.7. Aspectos éticos**

La presente investigación titulada “Revisión Sistemática y Meta-análisis sobre el uso de nanopartículas metálicas para la remediación de suelos contaminados con As y Pb” se desarrolló bajo los lineamientos establecidos por la “Guía de Elaboración del Trabajo de Investigación y Tesis para la obtención de Grados Académicos y Títulos Profesionales – 2020”, líneas de investigación, reglamento de investigación y código de ética de la Universidad César Vallejo.

Además, se respetó el derecho de autenticidad de los autores, citándolos de acuerdo a la norma International Organization for Standardization (ISO 690). También se verificó la originalidad de la investigación utilizando el Software Turnitin.

#### IV. RESULTADOS

En la **Figura 3**, se muestra el diagrama de flujo en donde se detalla las etapas del proceso de obtención de los estudios incluidos para la revisión sistemática y posterior meta-análisis.



**Figura 3. Proceso de obtención de las investigaciones seleccionadas en la revisión sistemática sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con As y Pb**

La Figura 3 mostró que se incluyeron 27 estudios y 1356 estudios fueron excluidos. En la primera fase, los estudios fueron excluidos ya que no tenían las palabras claves en el título y resumen. Ya, en la segunda fase, se excluyeron los estudios duplicados. En la última fase de exclusión, se tomó en cuenta los siguientes factores: uso de nanopartículas en aguas, nanopartículas no metálicas y datos insuficientes.

#### **4.1. Evaluación de la calidad metodológica de las investigaciones**

El resultado de la evaluación de la calidad metodológica de las investigaciones seleccionadas según la Escala Newcastle-Ottawa modificada se muestra en la Tabla 3. La calidad metodológica fue verificada por la selección (representatividad y exposición), resultado (porcentaje de adsorción y periodo de aplicación) y datos específicos (toxicidad y seguimiento).

**Tabla 3. Calidad metodológica de los estudios seleccionados**

N°	Estudios	Newcastle-Ottawa modificada				Datos específicos	
		Selección		Resultado		Toxicidad	Seguimiento
		Representatividad	Exposición	Porcentaje de adsorción	Periodo de aplicación		
1	(Baragaño et al., 2020a)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
2	(Baragaño et al., 2020b)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
3	(Cao et al., 2020)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
4	(Fajardo et al., 2020)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
5	(Fan et al., 2020)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
6	(Z. Li et al., 2020)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
7	(Ma et al., 2020)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
8	(Seleiman et al., 2020)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
9	(Su et al., 2020)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
10	(Vasarevičius et al., 2020)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
11	(Gil-Díaz et al., 2019)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
12	(Fajardo et al., 2019)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
13	(Zhou et al., 2019)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
14	(Hughes et al., 2018)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
15	(Okuo et al., 2018)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
16	(Babaee et al., 2018)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
17	(Azari & Bostani, 2017)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
18	(Gil-Díaz et al., 2017)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
19	(Mansouri et al., 2017)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
20	(Gil-Díaz et al., 2014)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
21	(Mar Gil-Díaz et al., 2014)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
22	(Liang & Zhao, 2014)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
23	(Micháľková et al., 2014)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
24	(G. Wang et al., 2014)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
25	(An & Zhao, 2012)	SI	SI	SI	SI	SI	SI
26	(Shipley et al., 2011)	SI	SI	NO	SI	SI	SI
27	(Zhang et al., 2010)	SI	SI	SI	SI	SI	SI

## 4.2. Descripción de las investigaciones

En la Tabla 4 y Tabla 5 muestra las principales características de los 27 estudios incluidos para remediar Arsénico (As) y Plomo (Pb), publicados entre enero de 2010 y septiembre de 2020. Dos investigaciones (Cao et al. 2020 y Li et al. 2020) utilizaron nanopartículas metálicas para remediar ambos metales (As y Pb). El máximo porcentaje de eficiencia de remediación del suelo para el As varió de 31 a 100%, y para el Pb vario de 18.87 a 100%. Las investigaciones se llevaron a cabo en 10 países, pero la gran mayoría fueron desarrolladas en España y China. Además, todos los estudios incluidos trabajaron la remediación del suelo en función del tipo de nanopartículas y dosis de aplicación.

En la Tabla 6 y Tabla 7 se muestra las características del suelo. Se observa que todos los estudios incluidos evaluaron el pH, y algunos estudios evaluaron la conductividad eléctrica, temperatura y materia orgánica.

Las características de las partículas metálicas como el tipo y tamaño, y el análisis que realizaron para su caracterización se muestra en la Tabla 8 y Tabla 9.

Las dosis de aplicación y máximo porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas se muestran en la Tabla 10 y Tabla 11. En algunos estudios tuvieron mejores resultados de remoción con dosis más altas que van desde 0.05 a 10 %.

**Tabla 4. Características de los estudios seleccionados en la revisión sistemática sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con arsénico**

N°	Tipo de contaminante	Tipo de NPs	Tipo de análisis estadístico	Resultados	País	Autor (es)
1	As	Magnetita	Análisis de varianza (ANOVA)	Con la dosis de 1% se redujo en un 42.5%, con 2% un 70% y con 5% un 92.3%.	España	(Baragaño et al., 2020a)
2	As	nZVI	Análisis de varianza (ANOVA) Prueba de homogeneidad de varianza	La aplicación de nZVI en diferentes dosis (0.5%, 2%, 5% y 10%) redujo la disponibilidad del As hasta un 97.6%. La dosis de 2% tuvo resultados notables, disminuyendo el As en un 89.5% y sin afectar los parámetros del suelo. La aplicación de la nGoethita (0.2%, 1%, 2%, 5%) redujo el As hasta un 99.8%. Los rendimientos de inmovilización del As fueron mejores, alcanzando un valor de 82.5% en la menor dosis de aplicación (0.2%).	España	(Baragaño et al., 2020b)
		nGoethita				
3	As	Nanosílice (RNS-SFe)	Media $\pm$ desviación estándar	RNS-SFe en dosis de 3,0% y 6,0% pueden reducir el contenido del metal pesado (As) biodisponible en el suelo contaminado en un 80.1% y 89.2%, respectivamente.	China	(Cao et al., 2020)
4	As	nZVI	Media $\pm$ desviación estándar	Los resultados mostraron que nZVI/BC (biochar) es un material prometedor para la remediación de suelos contaminados. La dosis de 5% nZVI/BC (3% BC and 2% nZVI), redujo el As en más del 93 %.	China	(Fan et al., 2020)
5	As	Z-nZVI	Prueba de rango múltiple de Duncan Coeficiente de correlación de Pearson (r)	La dosis de 30 g/kg de Hierro cero-valente a nanoescala soportado por zeolita (Z-NZVI) fue la más eficaz para reducir el As disponible en un 31,0% en suelos alcalinos a los 180 días	China	(Z. Li et al., 2020)
6	As	Óxido de hierro	Correlación de Pearson y análisis de varianza	El As se transformaría en fracciones más estables tras la aplicación de nanopartículas de óxido de hierro verde sintetizadas a partir de un extracto de hoja de <i>Euphorbia cochinchinensis</i> (GION), disminuyendo en un 67,3% tras 120 días de incubación.	China	(Su et al., 2020)
7	As	(nZVI)	Análisis de varianza (ANOVA)	El tratamiento tuvo una duración máxima de 32 meses, obteniéndose buenos resultados de inmovilización de As (70%) en 72 h, con una dosis de nZVI de 2,5%.	España	(Gil-Díaz et al., 2019)

8	As	Fe/Cu estabilizadas con almidón	Media ± error	Las NPS de Fe/Cu estabilizado con almidón fueron altamente eficaz para la inmovilización de As en suelo limoso. En la dosis de 0,4 g/L en una proporción suelo-líquido de 0.1, el arsénico lixiviable en agua se redujo de 55 a 4,2 µg/L y la lixiviación TCLP (procedimiento de lixiviación característico de la toxicidad) del arsénico se redujo en un 98%.	Canadá	(Babae et al., 2018)
9	As	Fe (nZVI)	Análisis factorial Análisis de varianza (ANOVA)	La concentración de NZVI en el rango de 2,5-25 g/kg de suelo seco inmovilizó eficazmente el As en un suelo calcáreo con diferentes partículas de arcilla y materia orgánica, y con el aumento de tiempo, la eficiencia del método aumentaba. Se alcanzaron eliminaciones totales del As con el tratamiento de 50 g/kg de NZVI.	Irán	(Azari & Bostani, 2017)
10	As	nZVI - RNIP	Distribución normal Análisis de varianza (ANOVA)	La eficacia de la inmovilización del metal depende del tipo de nZVI, propiedades del suelo y las características del metal. Los valores máximos de reducción de As alcanzados por los tres tipos de nanopartículas en las dosis de 1, 5 y 10% fueron de 66-68%, 88-90% y 91-95%, respectivamente.	España	(Gil-Díaz et al., 2017)
		nZVI - RNIP-D				
		Nano hierro (25S)				
11	As	Hematita	Comparación de medias con la prueba de rangos múltiples de Duncan	La aplicación de NPS de hematita a tasas de 0.1 y 0.2% tuvieron mejores resultados, disminuyendo el As en el suelo a valores de 51.83 y 65.31 %, respectivamente.	Irán	(Mansouri et al., 2017)
12	As	Fe (nZVI)	Análisis de varianza (ANOVA)	La inmovilización de As fue más eficaz y estable con la dosis del 10% que con la dosis del 1% de nZVI. Los valores de inmovilización de As alcanzados con las dosis de 1 y 10% en 72 h fueron de 45.44 y 95.39 %, respectivamente.	España	(Gil-Díaz et al., 2014)
13	As	Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	Media ± error	Las pruebas de columna mostraron que el As (V) del suelo (31,45 mg/kg) se redujo en ~93%, y la lixivabilidad TCLP en >83%, cuando el suelo fue tratado con 0,1 g-Fe/L de la suspensión de nanopartículas.	China	(Liang & Zhao, 2014)

14	As	Óxido binario de Fe-Mn estabilizadas	Media $\pm$ error	Las nanopartículas de Fe-Mn estabilizadas con carboximetilcelulosa (CMC) fueron muy eficaces para inmovilizar el arsénico en el suelo arenoso. Cuando el suelo cargado de As(III) fue tratado con Fe-Mn estabilizado con CMC a una relación molar Fe-As de 6,5-39, el arsénico lixiviable en el agua se redujo en un 91-96%, y la lixivabilidad TCLP (procedimiento de lixiviación característica de toxicidad) del arsénico se redujo en un 94-98%.	EE.UU	(An & Zhao, 2012)
15	As	Magnetita	Coeficientes de correlación Desviación estándar relativa	En las columnas que contenían 0,15 g (15 % en peso) de nanopartículas de magnetita o hematita en ~1 g de suelo de Lula, la carga total de arsénico fue de 2.9 $\mu\text{g As/m}^2$ (con nanopartículas de magnetita) y 5,3 $\mu\text{g As/m}^2$ (con nanopartículas de hematita)	EE.UU	(Shiple et al., 2011)
		Hematita				
16	As	ZVI	Media $\pm$ error	En tres días de tratamiento del suelo arenoso contaminado, la bioaccesibilidad del As basada en el PBET disminuyó de un 71,3 % inicial a un 30,9 % con ZVI, un 37,6 % con FeS, y un 29,8 % con Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> a una relación molar Fe/As de 100:1. La lixiviación basada en el TCLP del arsénico en el suelo disminuyó de un 0,51 % inicial a 0,24, 0,27 y 0,17% por las nanopartículas de ZVI, FeS y Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , respectivamente.	China	(Zhang et al., 2010)
		FeS				
		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>				

**Tabla 5. Características de los estudios seleccionados en la revisión sistemática sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con plomo**

N°	Tipo de contaminante	Tipo de NPs	Tipo de análisis estadístico	Resultados	País	Autor (es)
1	Pb	Nanosílice (RNS-SFe)	Media $\pm$ desviación estándar	RNS-SFe en dosis de 3,0% y 6,0% pueden reducir el contenido del metal pesado (As) biodisponible en el suelo contaminado en un 97.1% y 99.6 %, respectivamente.	China	(Cao et al., 2020)
2	Pb	NANOFER 25S nanopartículas de hierro (nZVI)	Análisis de varianza (ANOVA) Prueba de Tukey o postest de Bonferroni	La aplicación de la nZVI en dosis del 5%, destaca la efectividad en un tiempo de 15 días a comparación de los 120 días, inmovilizando el Pb en un 44.3%	España	(Fajardo et al., 2020)
3	Pb	Z- nZVI	Prueba de rango múltiple de Duncan Coeficiente de correlación de Pearson (r)	La enmienda de 30 g/kg de Z-NZVI fue la más eficaz para reducir el Pb disponible en un 73,8% en el suelo ácido y en un 96,8% en el suelo alcalino a los 180 d.	China	(Z. Li et al., 2020)
4	Pb	Fe3O4@C-COOH	Media $\pm$ desviación estándar Análisis de varianza (ANOVA) Prueba de rango múltiple de Duncan	La eficiencia de inmovilización alcanzada utilizando nanopartículas de Fe3O4@C-COOH fue 84.23%	China	(Ma et al., 2020)
5	Pb	ZnO	Análisis de varianza (ANOVA) Análisis estadístico combinado Prueba de rango múltiple de Tukey	La aplicación foliar de las nanopartículas ZnO (60mg/L) redujeron la disponibilidad de plomo en un 65%. pero el tratamiento en combinación (ZNO, biocarbón de paja de arroz y biocarbón de estiércol de vaca) alcanzó una reducción de 78.6% de Pb en suelos agrícolas.	Arabia Saudí	(Seleiman et al., 2020)
6	Pb	nZVI	Análisis de varianza (ANOVA)	La adición de nZVI en una concentración de 0.35 - 1.05 % al suelo contaminado, alcanzó reducciones de Pb de 48 - 64%.	Lituania	(Vasarevičius et al., 2020)
7	Pb	nZVI	Prueba de comparación múltiple de Tukey. Prueba t Análisis de varianza (ANOVA)	La adición de nZVI (5% p/v) mostró tasas de inmovilización del ion Pb entre el 88 y el 97%, tras 24, 48 y 72 h de tratamiento. Las NPs de Fe3O4 (5% v/v) fueron menos eficientes que nZVI. Los resultados obtenidos mostraron que, tras 72 h de tratamiento, sólo 12,25% del Pb fue inmovilizado.	España	(Fajardo et al., 2019)
		Fe3O4				

8	Pb	nZVI	Media $\pm$ error	La eficiencia de estabilización del Pb en la fracción intercambiable fue de 95.6 % para una dosis de 10 % de nZVI.	China	(Zhou et al., 2019)
9	Pb	Maghemita	Media $\pm$ desviación estándar Análisis de varianza (ANOVA) Prueba de Tukey	Las nanopartículas de maghemita alcanzaron valores de eficiencia de extracción de Pb de 97% en pH 3, a partir del lixiviado del suelo contaminado.	Reino Unido	(Hughes et al., 2018)
10	Pb	nZVI	Media $\pm$ error	La aplicación en concentraciones de 1000 mg/kg de nanopartículas de hierro zerovalente en el suelo redujeron las concentraciones de Pb en un 18.87%.	Nigeria	(Okuo et al., 2018)
11	Pb	nZVI	Análisis de varianza (ANOVA) Prueba de Tukey	La aplicación de nZVI disminuyó significativamente la disponibilidad del metal Pb en dos suelos con diferentes características físico-químicas (uno ácido y otro calcáreo). La dosis fue de 20% for 72 h y un mes, reduciendo el Pb en el suelo casi en un 100% tras la aplicación de las nanopartículas.	España	(Mar Gil-Díaz et al., 2014)
12	Pb	MnO <sub>1.26</sub> amorfo	Análisis de varianza (ANOVA) Prueba de Tukey	El tratamiento con MnO <sub>1.26</sub> amorfo fue el más efectivo en la estabilización del metal Pb con la dosis de 2%. La aplicación de $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en dosis de 1% logró una estabilización del Pb de 38.9%. Respecto a la Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> en dosis de 2%, alcanzó una estabilización del Pb de 47.2%	República Checa	(Michálková et al., 2014)
		$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				
		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>				
13	Pb	nZVI	Análisis de varianza (ANOVA)	En cuanto al efecto de nZVI, se pudo eliminar como máximo el 10% del Pb. Con el ácido málico (MA) solo, se eliminó el 22% y el 43% del Pb para el suelo de la mina y el suelo de la granja, respectivamente. Mientras que las eficiencias de eliminación de Pb alcanzaron el 39% y el 57% mediante el lavado con ácido cítrico (CA). En comparación con el ácido orgánico de bajo peso molecular (LMWOA) o nZVI solo, las eficiencias aumentaron significativamente cuando se combinaron ambos en diferentes proporciones	China	(G. Wang et al., 2014)

**Tabla 6. Características del suelo contaminado con arsénico**

Características del suelo								
N°	Tipo de contaminante	Tipo de suelo	Conductividad eléctrica	pH	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)	Autor (es)
1	As	Suelo contaminado con As y PAHs	0.30 dS/m	8.57	-	T° ambiente	0.69	(Baragaño et al., 2020a)
2	As	Suelo industrial contaminado con AS	0.30 dS/m	8.57	-	T° ambiente	0.69	(Baragaño et al., 2020b)
3	As	Suelo contaminado con Cd, Pb y As	-	7.61	-	T° ambiente	16.9	(Cao et al., 2020)
4	As	Suelos contaminados con As	-	7.91 y 8.19	-	T° ambiente	-	(Fan et al., 2020)
5	As	Suelos de tierras de cultivo contaminado con metales (Cd, Pb y As)	-	5.12 - 7.93	70	T° ambiente	-	(Z. Li et al., 2020)
6	As	Suelo de minería	-	5.4	-	T° ambiente	4.3	(Su et al., 2020)
7	As	Suelo contaminado con As y Hg	0.13 dS/m	7.17	-	12.5	3.14	(Gil-Díaz et al., 2019)
8	As	Limoso contaminado por arseniato de cobre cromado	-	7.6	-	20	4.5×10 <sup>-3</sup>	(Babae et al., 2018)
9	As	Suelo calcáreo contaminado con arsénico	-	7.64, 8.29 y 8.42	-	T° ambiente	-	(Azari & Bostani, 2017)
10	As	Suelo contaminado con As y Hg	0.13 dS/m	6.44	-	T° ambiente	3.13	(Gil-Díaz et al., 2017)
11	As	Suelo contaminado con As	0.49 dS/m	8	38	28	-	(Mansouri et al., 2017)
12	As	Suelo de zona industrial	0.93 dS/m	7.14	-	T° ambiente	6.9	(Gil-Díaz et al., 2014)
13	As	Suelo franco arenoso	-	6.0	0	22	0.2	(Liang & Zhao, 2014)
14	As	Suelo arenoso contaminado con As (III)	-	5 - 9	-	21	-	(An & Zhao, 2012)
15	As	Suelo de Lula contaminado con arsénico	-	8	-	24	-	(Shiple et al., 2011)
16	As	Suelo arenoso contaminado con As	-	4.83 - 6.75	-	T° ambiente	-	(Zhang et al., 2010)

**Tabla 7. Características del suelo contaminado con plomo**

Características del suelo								
N°	Tipo de contaminante	Tipo de suelo	Conductividad eléctrica	pH	Humedad (%)	Temperatura (°C)	Materia orgánica (%)	Autor (es)
1	Pb	Suelo contaminado con Cd, Pb y As	-	7.61	-	T° ambiente	16.9	(Cao et al., 2020)
2	Pb	Suelo contaminado con Cd, Pb y Zn	-	5.7	22	21	-	(Fajardo et al., 2020)
3	Pb	Suelos de tierras de cultivo contaminado con metales (Cd, Pb y As)	-	5.12 - 7.93	70	T° ambiente	-	(Z. Li et al., 2020)
4	Pb	Suelo de una granja situada cerca de una fundición de plomo-zinc	142.6 µS/cm	7.33	50	T° ambiente	20.13	(Ma et al., 2020)
5	Pb	suelo contaminado mediante el riego de aguas residuales (Cr, Pb, Cd, Ni, Cu y Zn)	1 - 1.04 dS/m	7.16 - 7.22	-	T° ambiente	2.29 - 2.37	(Seleiman et al., 2020)
6	Pb	Suelo contaminado con Cd, Cu, Pb y Ni	50.1 µS/cm	8.4	21.2	23	-	(Vasarevičius et al., 2020)
7	Pb	Suelo contaminado con Pb, Cd y Zn	-	4.4	-	T° ambiente	-	(Fajardo et al., 2019)
8	Pb	Suelo contaminado con Pb	46 mS/cm	8.09	56.9	T° ambiente	-	(Zhou et al., 2019)
9	Pb	Suelos contaminados con Pb, Zn, Cd, Ca, Co, Mg y Cu	-	2 - 8	-	T° ambiente	-	(Hughes et al., 2018)
10	Pb	Suelo contaminado con Pb	-	4.20	-	T° ambiente	4.73	(Okuo et al., 2018)
11	Pb	Suelo ácido y suelo calcáreo contaminado con Pb	0.10 y 0.25 dS/m	5.3 y 8	-	T° ambiente	0.61 y 1.05	(Mar Gil-Díaz et al., 2014)
12	Pb	Suelos de los alrededores de una fundición de Pb y Cu	-	4.25 - 5.85	-	T° ambiente	-	(Michálková et al., 2014)
13	Pb	Suelo contaminado con Pb	-	6.46 - 7.92	-	T° ambiente	-	(G. Wang et al., 2014)

**Tabla 8. Características de las nanopartículas metálicas para remover arsénico**

Características de las nanopartículas metálicas					
N°	Tipo de contaminante	Tipo de NPs	Tamaño (nm)	Tipo de análisis	Autor (es)
1	As	Magnetita	20	Microscopía electrónica de barrido y espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDX) Microscopio electrónico transmisión (TEM) Dispersión de luz dinámica (DLS) Difracción de rayos X en polvo (PXRD) Magnetómetro de muestra vibrante (VSM) Curva termogravimétrica (TGA) Calorimetría diferencial de barrido (DSC) Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) Área superficial específica (SSA)	(Baragaño et al., 2020a)
2	As	nZVI	60	Microscopio electrónico de barrido y espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDX) Microscopio electrónico de transmisión (TEM) Dispersión de luz dinámica (DLS) Zetasizer Nano (ZS)	(Baragaño et al., 2020b)
		nGoethita			
3	As	Nanosílice (RNS-SFe)	18	Microscopio electrónico de transmisión (TEM) Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)	(Cao et al., 2020)
4	As	nZVI	100	Microscopía electrónica de barrido acoplado a espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDS) Difracción de rayos X (XRD) Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) Haz de iones de doble foco (FIB)	(Fan et al., 2020)
		BC + nZVI			
		nZVI/BC			
5	As	Z-nZVI	<100	Microscopía electrónica de barrido (SEM) Espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDX) Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	(Z. Li et al., 2020)
6	As	Óxido de hierro	50 - 100	Microscopio electrónico de barrido y espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (SEM-EDX) Brunauer-Emmett-Teller (BET) Fluorescencia de rayos X (XRF) Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS)	(Su et al., 2020)
7	As	nZVI	-	Espectroscopia de rayos x de energía dispersiva (EDX) Microscopía electrónica de barrido (SEM)	(Gil-Díaz et al., 2019)

8	As	Fe/Cu estabilizadas con almidón	< 25	Cromatografía Líquida (LC)	(Babae et al., 2018)
9	As	Fe (nZVI)	45	Microscopía electrónica de barrido (SEM) Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo Hitachi	(Azari & Bostani, 2017)
10	As	nZVI - RNIP	70	Nanopartículas comerciales	(Gil-Díaz et al., 2017)
		nZVI - RNIP-D			
		Nano hierro (25S)			
11	As	Hematita	32.69	Microscopía electrónica de barrido (SEM) Microscopía electrónica transmisión (TEM) Difracción de rayos X (XRD)	(Mansouri et al., 2017)
12	As	nZVI	60	Nanopartículas comerciales	(Gil-Díaz et al., 2014)
13	As	Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	75 ± 17 y 129	Microscopía electrónica transmisión (TEM) Dispersión de luz dinámica (DLS)	(Liang & Zhao, 2014)
14	As	Óxido binario de Fe-Mn estabilizadas	247 ± 9 nm	Difracción de rayos X (XRD) Dispersión de luz dinámica (DLS) Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)	(An & Zhao, 2012)
15	As	Magnetita	19.3 nm	Microscopía electrónica de barrido (SEM) Método Brunauer, Emmett, Teller (BET) Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDX)	(Shiple et al., 2011)
		Hematita	20.5–269.6 nm,		
16	As	ZVI	< 120 nm	Microscopía electrónica transmisión (TEM) Dispersión de luz dinámica (DLS)	(Zhang et al., 2010)
		FeS			
		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>			

**Tabla 9. Características de las nanopartículas metálicas para remover plomo**

Características de las nanopartículas metálicas					
N°	Tipo de contaminante	Tipo de NPs	Tamaño (nm)	Tipo de análisis	Autor (es)
1	Pb	Nanosílice (RNS-SFe)	18	Microscopio electrónico de transmisión (TEM) Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM)	(Cao et al., 2020)
2	Pb	NANOFER 25S nanopartículas de hierro (nZVI)	61 - 71	Nanopartículas comerciales Potencial Zeta (ZP)	(Fajardo et al., 2020)
3	Pb	Z-nZVI	<100	Microscopía electrónica de barrido (SEM) Espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDX) Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	(Z. Li et al., 2020)
4	Pb	Fe3O4@C-COOH	400	Difracción de rayos X (XRD) Microscopio electrónico de transmisión (TEM) Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) Magnetómetro de muestra vibrante (VSM)	(Ma et al., 2020)
5	Pb	ZnO	18	Nanopartículas comerciales	(Seleiman et al., 2020)
6	Pb	nZVI	50	Nanopartículas comerciales	(Vasarevičius et al., 2020)
7	Pb	nZVI	-	Nanopartículas comerciales Potencial Zeta (ZP)	(Fajardo et al., 2019)
		Fe3O4			
8	Pb	nZVI	50	Nanopartículas comerciales	(Zhou et al., 2019)
9	Pb	Maghemita	47 ± 6.9	Microscopio electrónico de transmisión (TEM)	(Hughes et al., 2018)

				Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) Difracción de rayos X (XRD) Potencial zeta	
10	Pb	nZVI	1 - 100	Difracción de rayos X (XRD) Dispersión de luz dinámica (DLS) Magnetómetro de muestra vibrante (VSM)	(Okuo et al., 2018)
11	Pb	nZVI	60	Microscopía electrónica de barrido (SEM) Espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS)	(Mar Gil-Díaz et al., 2014)
12	Pb	MnO <sub>1.26</sub> amorfo	600 - 1000	Microscopio electrónico de transmisión (TEM) Brunauer-Emmett-Teller (BET) Analizador Nova e-Series Microscopía electrónica de barrido acoplado a espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDS)	(Michálková et al., 2014)
		$\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			
		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>			
13	Pb	nZVI	≤100 nm	Nanopartículas comerciales	(G. Wang et al., 2014)

**Tabla 10. Dosis de aplicación y porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas para remover arsénico**

Dosis de aplicación							
N°	Tipo de contaminante	Tipo de NPs	Muestra de suelo	Dosis de nanopartícula	Tiempo de tratamiento	Máx. reducción de As (%)	Autor (es)
1	As	Magnetita	20 g	0.2, 1, 2 y 5%	72h	92.3	(Baragaño et al., 2020a)
2	As	nZVI	20 g	0.5, 2, 5 y 10%	72h	97.6	(Baragaño et al., 2020b)
		nGeothita		0.2, 1, 2 y 5%		99.8	
3	As	Nanosílice (RNS-SFe)	25 g	3 y 6%	2h	89.2	(Cao et al., 2020)
4	As	nZVI	2 g	2%	15 días	56.9	(Fan et al., 2020)
		BC + nZVI		3% BC +2% nZVI		72.3	
		nZVI/BC		5% (3% BC and 2% nZVI)		97.7	
5	As	Z-nZVI	1.50 kg	0, 10 y 30 g/kg	1, 3, 6, 7, 15, 30, 60, 120 y 180 días	31	(Z. Li et al., 2020)
6	As	Óxido de hierro	100 g	9 %	30.60 y 120 días	58.3	(Su et al., 2020)
7	As	nZVI	5 m2	2.5 %	72h	70	(Gil-Díaz et al., 2019)
8	As	Fe/Cu estabilizadas con almidón	1.5 y 6 g	0.1 y 0.4 g/L	24h	92.2	(Babae et al., 2018)

9	As	Fe (nZVI)	5 g	2.5, 5, 25, 50 y 100 g/kg	0.5, 48, 96, 192, 384 y 768 h	100	(Azari & Bostani, 2017)
10	As	nZVI - RNIP	50g	0, 1, 5 y 10 %	72h	99.93	(Gil-Díaz et al., 2017)
		nZVI - RNIP-D		0, 1, 5 y 10 %		99.95	
		Nano hierro (25S)		0, 1, 5 y 10 %		99.88	
11	As	Hematita	5 kg	0, 0.05, 0.1 y 0.2 %	5 meses	90.13	(Mansouri et al., 2017)
12	As	nZVI	50 g	1 y 10 %	72 h y 3 meses	85	(Gil-Díaz et al., 2014)
13	As	Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	5.3, 12 y 21.2 g	26.5 g/L	Hasta 168 h	98	((Liang & Zhao, 2014)
14	As	Óxido binario de Fe-Mn estabilizadas	2 y 9 g	30 mL (relación molar Fe-As de 0-6,5, 13, 26 y 39)	18 h y 4 días	96	(An & Zhao, 2012)
15	As	Magnetita	~1 g	15 %	36 h	2.9 µg As/m <sup>2</sup>	(Shibley et al., 2011)
		Hematita		15 %		5,3 µg As/m <sup>2</sup>	
16	As	ZVI	2 g	2 mL (para relaciones molares Fe:As de 5:1, 10:1, 25:1) y 5 mL (para relaciones molares Fe:As de 50:1, 75:1, 100:1)	3 y 7 días	52.94	(Zhang et al., 2010)
		FeS				47.06	
		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>				66.67	

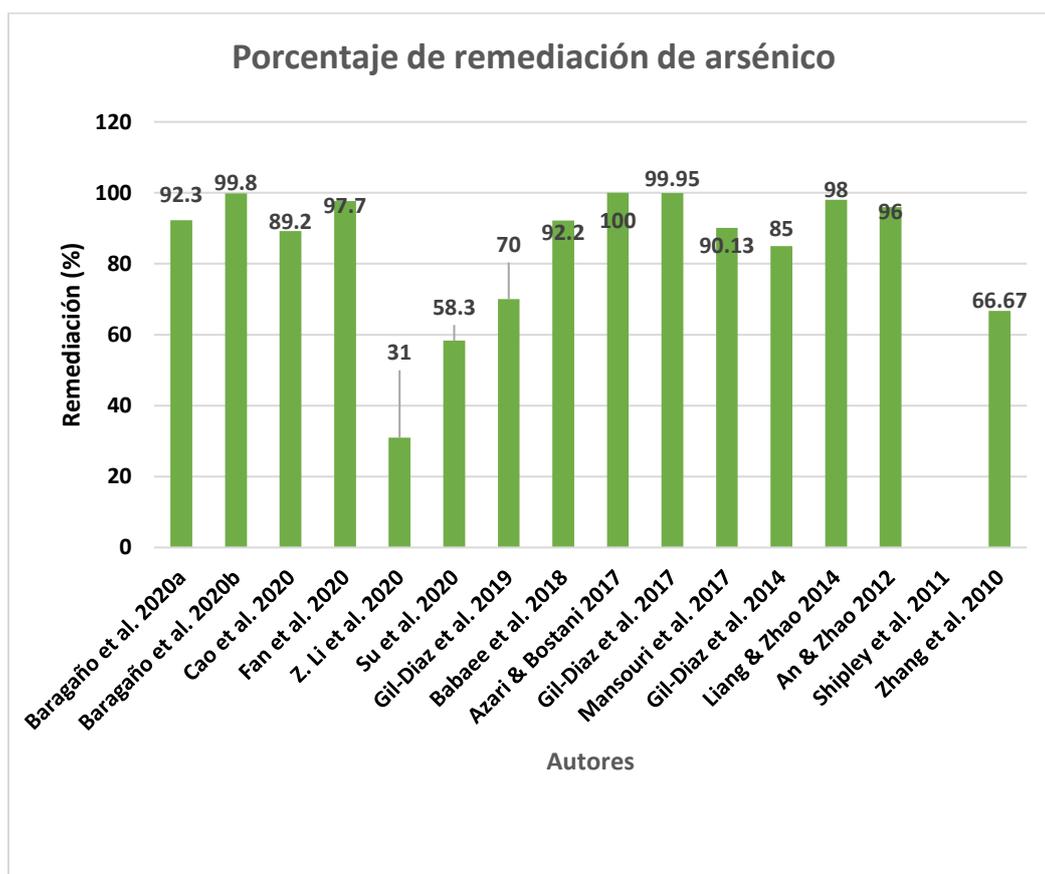
**Tabla 11. Dosis de aplicación porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas para remover plomo**

Dosis de aplicación							
N°	Tipo de contaminante	Tipo de NPs	Muestra de suelo	Dosis de nanopartícula	Tiempo de tratamiento	Máx. reducción de Pb (%)	Autor (es)
1	Pb	Nanosílice (RNS-SFe)	25 g	3 y 6%	2h	99.6	(Cao et al., 2020)
2	Pb	NANOFER 25S nanopartículas de hierro (nZVI)	2 kg	5%	120 días	44.3	(Fajardo et al., 2020)
3	Pb	Z-nZVI	1.50 kg	10 y 30 g/kg	1, 3, 6, 7, 15, 30, 60, 120 y 180 días	96.8	(Z. Li et al., 2020)
4	Pb	Fe3O4@C-COOH	-	0.6, 1.3, 2.0, 2.6, 3.3 y 4.0%	10 días	84.23	(Ma et al., 2020)
5	Pb	ZnO	25 m2	60 mg/L	25 y 45 días	78.6	(Seleiman et al., 2020)
6	Pb	nZVI	500 g	0, 0.35, 0.70 y 1.05%	35 días	64	(Vasarevičius et al., 2020)
7	Pb	nZVI	-	2.5 y 5%	24, 48 y 72 h	97.31	(Fajardo et al., 2019)
		Fe3O4				12.25	
8	Pb	nZVI	120 kg	0.2, 1, 5 y 10 %	2 semanas	95.6	(Zhou et al., 2019)
9	Pb	Maghemita	2.5 g	5 mg/L	18 h	97	(Hughes et al., 2018)
10	Pb	nZVI	1 g	0.001, 0.002, 0.003, 0.004 y 0.005 g	3 semanas	18.87	(Okuo et al., 2018)

11	Pb	nZVI	50 g	20%	72 h - 1 mes	~100	(Mar Gil-Díaz et al., 2014)
12	Pb	MnO <sub>1.26</sub> amorfo	40 y 100 g	1 y 2%	7, 14, 28 y 62 días	100	(Michálková et al., 2014)
		γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>				38.9	
		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>				47.2	
13	Pb	nZVI	10 g	0 - 0.4 g/L	24 h	79	(G. Wang et al., 2014)

### 4.3. Máxima reducción de los metales (As y Pb) utilizando nanopartículas metálicas: gráficos en Excel

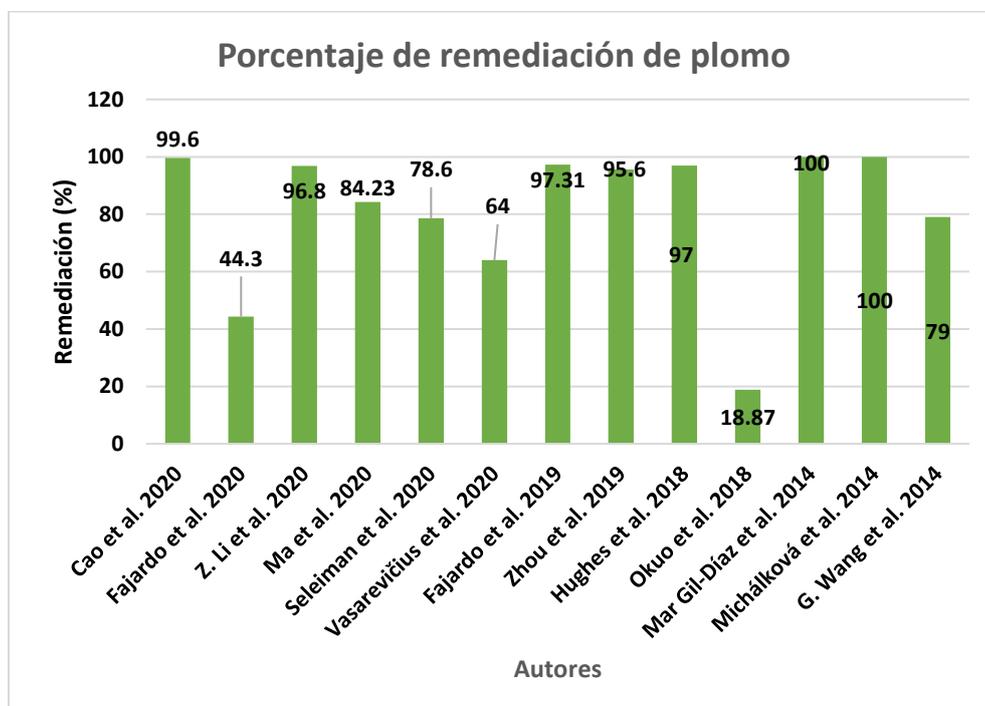
En la Figura 4, se aprecia los diferentes porcentajes de remediación del As. La mayoría de las nanopartículas metálicas tuvieron un alto porcentaje de remediación, sobrepasando el 80%.



**Figura 4. Máximo porcentaje de remediación del arsénico (As)**

La Figura 4 mostró que, los 3 estudios que tuvieron mayor porcentaje de remediación fueron de Azari & Bostani (2017) (100%), Gil-Diaz et al. (2017) (99.95%) y Baragaño et al. (2020b) (99.80%), utilizando las NPs de Fe (nZVI), Nano hierro (25S) y nGeothita, respectivamente. Sin embargo, no todos tuvieron el porcentaje más alto que se esperaba, el estudio de Z. Li et al. (2020) tuvo el valor más bajo (31%), utilizando NPs de Z-nZVI. El estudio de Shipley et al. (2011) no presentó porcentaje de remediación en su prueba de remediación en columnas.

En la Figura 7, se aprecia los diferentes porcentajes de remediación del Pb. La mayoría de las nanopartículas metálicas tuvieron un alto porcentaje de remediación, sobrepasando el 70%.



**Figura 5. Máximo porcentaje de remediación del plomo (Pb)**

La Figura 5 mostró que, los 3 estudios que tuvieron mayor porcentaje de remediación fueron de Mar Gil-Díaz et al. (2014) (~100%), Michálková et al. (2014) (100%) y Cao et al. (2020) (99.60%), utilizando las NPs de nZVI, MnO<sub>1.26</sub> amorfo y Nanosílice (RNS-SFe), respectivamente. Sin embargo, no todos tuvieron el porcentaje más alto que se esperaba, el estudio de Fajardo et al. (2020) tuvo el valor más bajo (44.3%), utilizando NANOFER 25S nanopartículas de hierro (nZVI).

#### 4.4. Meta-análisis

Para el meta-análisis se seleccionaron todas investigaciones que trabajaron con un mínimo de dos dosis de nanopartículas metálicas para la remediación de suelos contaminados con As y Pb. En algunas investigaciones se tuvo que convertir las dosis de aplicación a porcentajes, y en otras se consideró más de un tipo de NPs trabajadas. Las investigaciones incluidas se muestran en la Tabla 12 y Tabla 13.

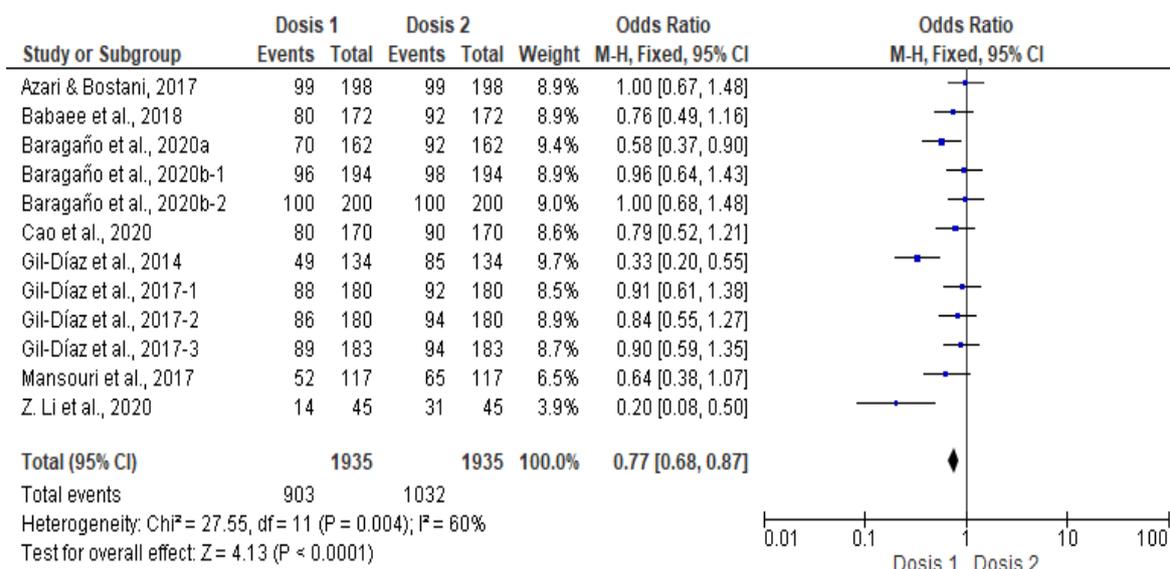
**Tabla 12. Investigaciones incluidas para el meta-análisis de las concentraciones de nanopartículas metálicas en la remediación de arsénico**

Arsénico (As)						
N°	Tipo de NPs	Dosis de NPs (%)		Remoción de As (%)		Autor (es) del estudio
		Dosis 1	Dosis 2	R1	R2	
1	Magnetita	2	5	70	92.3	(Baragaño et al., 2020a)
2	nZVI	5	10	96.2	97.6	(Baragaño et al., 2020b)
3	nGeothita	2	5	99,7	99.8	(Baragaño et al., 2020b)
4	Nanosílice (RNS-SFe)	3	6	80.1	89.2	(Cao et al., 2020)
5	Z-nZVI	1	3	14.3	31	(Z. Li et al., 2020)
6	Fe/Cu estabilizadas con almidón	0.01	0.04	80.4	92.2	(Babae et al., 2018)
7	Fe (nZVI)	0.5	2.5	98.9	98.9	(Azari & Bostani, 2017)
8	Nano hierro (25S)	5	10	87.79	92.38	(Gil-Díaz et al., 2017)
9	nZVI - RNIP	5	10	86.23	93.94	(Gil-Díaz et al., 2017)
10	nZVI - RNIP-D	5	10	89.35	93.94	(Gil-Díaz et al., 2017)
11	Hematita	0.1	0.2	51.83	65.31	(Mansouri et al., 2017)
12	nZVI	1	10	49	85	(Gil-Díaz et al., 2014)

**Tabla 13. Investigaciones incluidas para el meta-análisis de las concentraciones de nanopartículas metálicas en la remediación de plomo**

Plomo (Pb)						
N°	Tipo de NPs	Dosis de NPs (%)		Remoción de Pb (%)		Autor (es) del estudio
		Dosis 1	Dosis 2	R1	R2	
1	Nanosílice (RNS-SFe)	3	6	97.1	99.6	(Cao et al., 2020)
2	Z-nZVI	1	3	92.20	96.8	(Z. Li et al., 2020)
3	nZVI	0.7	1.05	52.3	63.6	(Vasarevičius et al., 2020)
4	nZVI	2.5	5	93.8	97.3	(Fajardo et al., 2019)
5	nZVI	5	10	90.8	95.6	(Zhou et al., 2019)
6	MnO <sub>1.26</sub> amorfo	1	2	100	100	(Micháľková et al., 2014)
7	γ-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	2	38.9	27.8	(Micháľková et al., 2014)
8	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1	2	44.4	47.2	(Micháľková et al., 2014)
9	nZVI	0.2	0.3	82	81	(G. Wang et al., 2014)

En la Figura 6 se aprecia los 12 estudios incluidos en la meta-análisis. En el mismo se observan los porcentajes de remediación del As



**Figura 6. Meta-análisis de las concentraciones de nanopartículas metálicas en la remediación de arsénico**

Para la adecuada interpretación de la medida de efecto (Odds Ratio), la cual evalúa el efecto del tratamiento en una población, se consideró los siguientes intervalos:

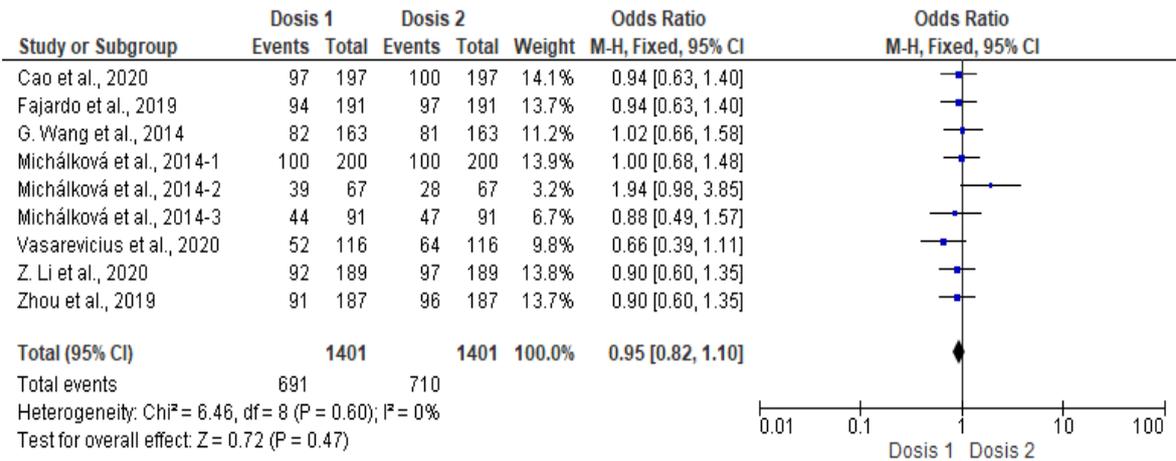
Odds > 1: El tratamiento disminuye el porcentaje de remediación

Odds < 1: El tratamiento incrementa el porcentaje de remediación

Odds = 1: El tratamiento no tiene efecto

De acuerdo a la medida de efecto Odds Ratio, se obtuvo un valor de 0.77, lo cual representa un incremento en el porcentaje de remediación de los suelos contaminados con As. La dosis 2 es favorecida con la medida del efecto Odds Ratio a diferencia de la dosis 1. Las investigaciones incluidas mostraron una heterogeneidad moderada ( $I^2 = 60\%$ ), lo que representa que los resultados de las investigaciones y los efectos son moderadamente homogéneos.

En la Figura 7 se aprecia los 9 estudios incluidos en la meta-análisis. En el mismo se observan los porcentajes de remediación del Pb.



**Figura 7. Meta-análisis de las concentraciones de nanopartículas metálicas en la remediación de plomo**

Para la adecuada interpretación de la medida de efecto (Odds Ratio), la cual evalúa el efecto del tratamiento en una población. Mediante los siguientes intervalos.

Odds > 1: El tratamiento disminuye el porcentaje de remediación

Odds < 1: El tratamiento incrementa el porcentaje de remediación

Odds = 1: El tratamiento no tiene efecto

De acuerdo a la medida de efecto Odds Ratio, se obtuvo un 0.95, lo cual representa un incremento en el porcentaje de remediación de los suelos contaminados con Pb. La dosis 2 es favorecida con la medida del efecto Odds Ratio a diferencia de la dosis 1. Las investigaciones incluidas mostraron no tener heterogeneidad ( $I^2 = 0\%$ ), lo que representa que los resultados de las investigaciones y los efectos son significativamente homogéneos.

## V. DISCUSIÓN

En los 16 estudios incluidos para la revisión sistemática del As se mostró que la eficiencia del uso de las nanopartículas metálicas está en un rango de 31 - 100%, presenciándose la mayor eficiencia de remediación del arsénico en el estudio de Azari & Bostani (2017), cuyo valor de concentración inicial (Ci) fue de 100 mg/kg, reduciéndose a 0 mg/kg al usar nanopartículas de Fe (nZVI) en tamaño de 45nm, similar fue del estudio de Gil-Díaz et al. (2017), cuyo valor de concentración inicial (Ci) fue de 70.2 mg/kg, reduciéndose al 0.035 mg/kg utilizando nZVI - RNIP-D en tamaños de 70 nm en la inmovilización del As al 10%. Estas reducciones fueron determinadas por las características del suelo, conductividad eléctrica, pH y materia orgánica mediante la prueba de TCLP.

Por otro lado, los resultados más significativos en la remediación del arsénico fueron presenciados en los estudios de Z. Li et al. (2020) y Su et al. (2020). El estudio de Su et al. (2020) empleó nanopartículas de óxido hierro con una concentración de 9%, el cual redujo en 58.3% el arsénico, presentando uno de los valores de remoción más bajos. Sin embargo, Baragaño et al. (2020a) Baragaño et al. (2020b) mostraron que la aplicación de nanopartículas de hierro alcanzó reducciones del arsénico mayores al 92%, utilizando nanopartículas de magnetita, nZVI y nGoethita. De la misma manera, el uso de nZVI combinado con biocarbón para la inmovilización del As demostró que reducen en un 85.4% en el TCLP (Fan et al., 2020). Los resultados de los estudios incluidos presentaron valores promedios de remediación máxima de As de 84.4%, siendo el porcentaje más bajo para Z. Li et al. (2020) que utilizaron nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (nZVI) con un tamaño menores a 100 nm y diferentes dosis (10 y 30 g/Kg), reduciendo la presencia de arsénico en un 31%, para un tiempo de 180 días de tratamiento.

Sin embargo, pocos estudios han abordado los efectos del nZVI y Fe (nZVI) en la remediación de suelos contaminados con As. Gil-Díaz et al. (2019) aplicó nanopartículas de nZVI, con una dosis de 2.5% obtuvo una inmovilización del arsénico de 70%, para un tiempo de 72h. Azari & Bostani (2017) demostraron que las nanopartículas de Fe(nZVI) a un tamaño de 45nm y dosis de 0.05mg/L pueden

reducir el As en 100%, esto se debe a las propiedades y tamaño de las nanopartículas de nZVI como buen absorbente y reductor al examinar los efectos de las nanopartículas de Hierro. Por ejemplo, Babae et al. (2018) usaron dosis de nanopartículas en 0.1 y 0.4mg/L, reduciendo al 92.2%.

En la mayoría de estudios utilizaron nanopartículas de Fe (nZVI), aprovechando sus dimensiones mínimas en las que se pueden magnetizar y obtener de esta manera una mayor eficiencia en la remediación de suelos contaminados por As, a diferencia de los estudios de Cao et al. (2020) y Mansouri et al. (2016) que optaron por utilizar otro tipo de nanopartículas incluyendo la sílice y la hematita usando diferentes dosis (0.05, 0.1 y 0.2%) con tamaños de 18 y 32.69 nm. Los resultados obtenidos fueron favorables en la remediación de As presentes en suelos, 89.2 % con las nanopartículas de sílice y 90.13% con hematita; no obstante, estos porcentajes son menores a diferencia de las nanopartículas de Fe (nZVI) utilizados en el 65% de estudios.

De la misma manera 13 estudios fueron incluidos para suelos contaminados con Pb, en el cual se mostró la eficiencia máxima del uso de las nanopartículas metálicas en un rango de 18.87% - 100%. La mayor eficiencia en la remediación de suelos contaminados por Pb fue presenciada en el estudio de Michalkova et al. 2014 y Mar Gil-Díaz et al. (2014), logrando reducciones del 100% al utilizar nanopartículas de  $MnO_{1.26}$  amorfo de 600 - 1000 nm y hierro cero valente (nZVI) de 60 nm en dosis de 2% y 20%, respectivamente. De la misma manera, se logró un resultado favorable y significativo en el estudio de Cao et al. (2020), Z. Li et al. (2020) y Fajardo et al. (2019), obteniendo valores de 99.6%, 96.8% y 97.31% de eficiencia en la reducción de Pb utilizando nanopartículas de nanosílice, Z-nZVI y nZVI en concentraciones de 6%, 3% y 5%, respectivamente.

Hughes et al. (2018) también lograron resultados favorables trabajando con nanopartículas magnéticas de maghemita recubiertas de sílice y funcionalizadas con ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA) de  $47 \pm 6.9$  nm, en la cual estas nanopartículas alcanzaron valores de eficiencia de extracción de Pb de 97% en pH 3 y en 18 horas de tratamiento, a partir del lixiviado del suelo.

Además, en los estudios seleccionados se muestra que Seleiman et al. (2020) realizaron su investigación basado en los efectos integradores y de ventaja en las nanopartículas foliares, seleccionando nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) y el trabajo en combinación del 50% con el ZnO el biocarbón de paja de arroz y biocarbon de estiércol de vaca. El tratamiento combinado mostró una reducción de la disponibilidad de plomo de 78.6% en suelos agrícolas.

Por otra parte, se determinó las eficiencias de remediación con respecto a dosis mínimas de nanopartículas metálicas utilizadas en las investigaciones seleccionadas, identificándose a los estudios de Zhou et al. (2019) y Ma et al. (2020), que utilizaron nanopartículas de hierro cero valente (nZVI) y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@COOH, logrando resultados favorables en la remediación de suelos, tales como 78.8% y 84.23%, aplicando dosis mínimas de 0.2% y 3.3%, respectivamente y un tamaño de nanopartículas de 50 nm y 400 nm mediante los análisis de difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de transmisión (TEM), Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y Magnetómetro de muestra vibrante (VSM). G. Wang et al. (2014) trabajaron de la misma manera con nanopartículas de hierro cero valente de  $\leq 100$  nm de tamaño y dosis de 0.1 - 0.4%, logrando un valor de 82% en la disminución de Pb en un día de tratamiento (24 horas).

De los 13 estudios incluidos, 8 usaron nanopartículas de hierro cero valente (nZVI), alcanzando remociones máximas de Pb de  $\sim 100\%$ ; sin embargo, otros tipos de nanopartículas metálicas también mostraron resultados significativos de 99.6% y 100% incluyendo el uso de nanosílice y MnO<sub>1.26</sub> amorfo de Cao et al. (2020) y Michalkova et al. (2014), respectivamente. Por otro lado, se muestra que las NPs de hierro cero valente (nZVI) en dosis mínimas no causan mayor cambio positivo en los suelos contaminados por Pb, tal y como se encontró en el estudio de Okuo et al. (2018) que trabajaron con nanopartículas de hierro nZVI a dosis de 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005 g, alcanzando una reducción de plomo máxima de 18.87% con 1000 mg/kg de nanopartículas de hierro cero valente al suelo madre en 21 días de tratamiento.

Otros estudios, por ejemplo, Piquette et al. (2012) utilizaron sulfuro de zinc nanocristalino para remover arsénico y plomo a partir de soluciones acuosas. Los autores indicaron que el pequeño tamaño de los cristalitas y la elevada superficie hacen del material resultante un sorbente extremadamente reactivo para el arsénico y los metales pesados, como el plomo.

## VI. CONCLUSIONES

La revisión sistemática y meta-análisis sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con As y Pb incluyó a 27 investigaciones, siendo 14 para el metal As, 11 para el Pb y 2 para ambos metales. Los valores de las eficiencias máximas promedio de remoción de As y Pb fueron del 84.4% y 81.2%, respectivamente. Entre los resultados más relevantes se tiene:

1. La dosis de aplicación de las nanopartículas en suelos contaminados con As y Pb depende de la concentración inicial del contaminante en relación al tiempo de contacto. Además, cabe resaltar el tipo de nanopartículas a usar.
2. Se identificaron veintisiete investigaciones que se refieren al uso de nanopartículas metálicas en suelos contaminados por metales pesados, estas fueron publicadas entre los años 2010 y 2020. Estas investigaciones se desarrollaron en los países de España, china, EEUU, Irán, Nigeria, Lituania, Suiza, Arabia y Reino unido.
3. Las características físicas, químicas y biológicas de los suelos contaminados por metales pesados utilizados en los estudios incluían potencial de hidrogeno (pH), temperatura (T°), conductividad eléctrica (C.E), humedad (H) y materia orgánica (MO). Asimismo, cabe resaltar que los suelos contaminados por metales pesados se caracterizan por tener efectos tóxicos en el medio y que la evaluación de los parámetros establecidos se encuentra disponible en los veintisiete artículos de investigación obtenidos de las bases de datos de Scopus, sciencedirect y Web of Science.

## **VII. RECOMENDACIONES**

Descargar y utilizar de manera explícita el software RevMan, preferiblemente que sea la última versión ya que contará con un mayor número de herramientas y funciones indispensables para el desarrollo y entendimiento de los datos, mejorando los resultados de la meta-análisis.

Optar por las técnicas de nanorremediación ya que el uso de las nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados por metales pesados logra inmovilizar o reducir su concentración, siendo muy eficientes en su uso individual o en combinación.

Buscar investigaciones que realizaron síntesis de nanopartículas metálicas de dimensiones nanométricas menores como las de valencia cero ya que se demostró mediante la selección de estudios que mientras más pequeñas sean las nanopartículas tienden a magnetizarse, aumentando de esta manera su eficiencia en la remediación de metales pesados presentes en el suelo.

## REFERENCIAS

- An, B., & Zhao, D. (2012). Immobilization of As(III) in soil and groundwater using a new class of polysaccharide stabilized Fe-Mn oxide nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 211–212, 332–341. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.062>
- Azari, P., & Bostani, A. A. (2017). Reducing As availability in calcareous soils using nanoscale zero valent iron. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(25), 20438–20445. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9447-x>
- Babae, Y., Mulligan, C. N., & Rahaman, M. S. (2018). Arsenic immobilization in soil using starch-stabilized Fe/Cu nanoparticles: a case study in treatment of a chromated copper arsenate (CCA)-contaminated soil at lab scale. *Journal of Soils and Sediments*, 18, 1610–1619. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1882-2>
- Bairagi, V., & Munot, M. V. (2019). *Research Methodology: A Practical and Scientific Approach*. CRC Press.
- Baragaño, D., Alonso, J., Gallego, J. R., Lobo, M. C., & Gil-Díaz, M. (2020a). Magnetite nanoparticles for the remediation of soils co-contaminated with As and PAHs. *Chemical Engineering Journal*, 399, 125809. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125809>
- Baragaño, D., Alonso, J., Gallego, J. R., Lobo, M. C., & Gil-Díaz, M. (2020b). Zero valent iron and goethite nanoparticles as new promising remediation techniques for As-polluted soils. *Chemosphere*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124624>
- Boente, C., Sierra, C., Martínez-Blanco, D., Menéndez-Aguado, J. M., & Gallego, J. R. (2018). Nanoscale zero-valent iron-assisted soil washing for the removal of potentially toxic elements. *Journal of Hazardous Materials*, 350, 55–65. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2018.02.016>
- Boland, A., Cherry, M. G., & Dickson, R. (2017). *Doing a Systematic Review: A Student's Guide* (2nd ed.). SAGE Publications Ltd.
- Borja-Borja, J. M., Heredia-Moyano, S. F., & Sáez-Paguay, M. Á. (2020). Los nanomateriales y sus aplicaciones en la remediación ambiental. In *Polo del Conocimiento* (Vol. 5, Issue 07). <https://doi.org/10.23857/pc.v5i7.1517>
- Boverhof, D. R., Bramante, C. M., Butala, J. H., Clancy, S. F., Lafranconi, W. M., West, J., & Gordon, S. C. (2015). Comparative assessment of nanomaterial definitions and safety evaluation considerations. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 137–150. <https://doi.org/10.1016/J.YRTPH.2015.06.001>
- Cao, P., Qiu, K., Zou, X., Lian, M., Liu, P., Niu, L., Yu, L., Li, X., & Zhang, Z. (2020). Mercapto propyltrimethoxysilane- and ferrous sulfate-modified nano-silica for immobilization of lead and cadmium as well as arsenic in heavy metal-contaminated soil. *Environmental Pollution*, 266, 115152. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115152>

- Chen, Q. Y., Tyrer, M., Hills, C. D., Yang, X. M., & Carey, P. (2009). Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review. *Waste Management*, 29(1), 390–403. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2008.01.019>
- Dermont, G., Bergeron, M., Mercier, G., & Richer-Lafèche, M. (2008). Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications. *Journal of Hazardous Materials*, 152(1), 1–31. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2007.10.043>
- Domènech, X., & Peral, J. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres*. Reverté.
- Fajardo, C., Costa, G., Nande, M., Martín, C., Martín, M., & Sánchez-Fortún, S. (2019). Heavy metals immobilization capability of two iron-based nanoparticles (nZVI and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): Soil and freshwater bioassays to assess ecotoxicological impact. *Science of The Total Environment*, 656, 421–432. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.11.323>
- Fajardo, C., Sánchez-Fortún, S., Costa, G., Nande, M., Botías, P., García-Cantalejo, J., Mengs, G., & Martín, M. (2020). Evaluation of nanoremediation strategy in a Pb, Zn and Cd contaminated soil. *Science of the Total Environment*, 706, 136041. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136041>
- Fan, J., Chen, X., Xu, Z., Xu, X., Zhao, L., Qiu, H., & Cao, X. (2020). One-pot synthesis of nZVI-embedded biochar for remediation of two mining arsenic-contaminated soils: Arsenic immobilization associated with iron transformation. *Journal of Hazardous Materials*, 398(May), 122901. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122901>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). Polluting Our Soils Is Polluting Our Future. <https://www.fao.org/fao-stories/article/en/c/1126974/>
- Galán Huertos, E., & Romero Baena, A. (2008). Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla*, 10, 48–60.
- Galdames, A., Mendoza, A., Orueta, M., de Soto García, I. S., Sánchez, M., Virto, I., & Vilas, J. L. (2017). Development of new remediation technologies for contaminated soils based on the application of zero-valent iron nanoparticles and bioremediation with compost. *Resource-Efficient Technologies*, 3(2), 166–176. <https://doi.org/10.1016/J.REFFIT.2017.03.008>
- Gil-Díaz, M., Alonso, J., Rodríguez-Valdés, E., Gallego, J. R., & Lobo, M. C. (2017). Comparing different commercial zero valent iron nanoparticles to immobilize As and Hg in brownfield soil. *Science of the Total Environment*, 584–585, 1324–1332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.011>
- Gil-Díaz, M., Alonso, J., Rodríguez-Valdés, E., Pinilla, P., & Lobo, M. C. (2014). Reducing the mobility of arsenic in brownfield soil using stabilised zero-valent iron nanoparticles. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 49(12), 1361–1369. <https://doi.org/10.1080/10934529.2014.928248>

- Gil-Díaz, M., Diez-Pascual, S., González, A., Alonso, J., Rodríguez-Valdés, E., Gallego, J. R., & Lobo, M. C. (2016). A nanoremediation strategy for the recovery of an As-polluted soil. *Chemosphere*, *149*, 137–145. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2016.01.106>
- Gil-Díaz, M., Rodríguez-Valdés, E., Alonso, J., Baragaño, D., Gallego, J. R., & Lobo, M. C. (2019). Nanoremediation and long-term monitoring of brownfield soil highly polluted with As and Hg. *Science of the Total Environment*, *675*, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.183>
- Gómez-Sagasti, M. T., Epelde, L., Anza, M., Urra, J., Alkorta, I., & Garbisu, C. (2019). The impact of nanoscale zero-valent iron particles on soil microbial communities is soil dependent. *Journal of Hazardous Materials*, *364*, 591–599. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2018.10.034>
- Gutiérrez Wing, C. E. (2006). Las NANOPARTÍCULAS: pequeñas estructuras con gran potencial. *El ININ Hoy: Contacto Nuclear*, 24–29.
- Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M., Bojórquez, I., García, N., & García, D. (2006). *El suelo: Fundamentos sobre su formación, los cambios globales y su manejo*. Universidad Autónoma de Nayarit.
- Higgins, J. P. T., & Green, S. (2011). Manual Cochrane de revisiones sistemáticas de intervenciones, versión 5.1.0. In *Cochrane Database of Systematic Reviews*.
- Huedo-Medina, T. B., & Johnson, B. T. (2010). *Modelos estadísticos en meta-análisis*. Netbiblo.
- Hughes, D. L., Afsar, A., Laventine, D. M., Shaw, E. J., Harwood, L. M., & Hodson, M. E. (2018). Metal removal from soil leachates using DTPA-functionalised maghemite nanoparticles, a potential soil washing technology. *Chemosphere*, *209*, 480–488. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.121>
- Jeevanandam, J., Barhoum, A., Chan, Y. S., Dufresne, A., & Danquah, M. K. (2018). Review on nanoparticles and nanostructured materials: History, sources, toxicity and regulations. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, *9*(1), 1050–1074. <https://doi.org/10.3762/bjnano.9.98>
- Jiang, L., Liu, X., Yin, H., Liang, Y., Liu, H., Miao, B., Peng, Q., Meng, D., Wang, S., Yang, J., & Guo, Z. (2020). The utilization of biomineralization technique based on microbial induced phosphate precipitation in remediation of potentially toxic ions contaminated soil: A mini review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *191*, 110009. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2019.110009>
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, *182*, 247–268. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>
- Komárek, M., Vaněk, A., & Ettler, V. (2013). Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides – A review. *Environmental Pollution*, *172*, 9–22. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2012.07.045>

- Landa-Ramírez, E., & Arredondo-Pantaleón, A. de J. (2014). Herramienta pico para la formulación y búsqueda de preguntas clínicamente relevantes en la psicooncología basada en la evidencia. *Psicooncología*, *11*(2–3), 259–270. <https://doi.org/10.5209/rev>
- Li, C., Sanchez, G. M., Wu, Z., Cheng, J., Zhang, S., Wang, Q., Li, F., Sun, G., & Meentemeyer, R. K. (2020). Spatiotemporal patterns and drivers of soil contamination with heavy metals during an intensive urbanization period (1989–2018) in southern China. *Environmental Pollution*, *260*, 114075. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2020.114075>
- Li, Z., Wang, L., Wu, J., Xu, Y., Wang, F., Tang, X., Xu, J., Ok, Y. S., Meng, J., & Liu, X. (2020). Zeolite-supported nanoscale zero-valent iron for immobilization of cadmium, lead, and arsenic in farmland soils: Encapsulation mechanisms and indigenous microbial responses. *Environmental Pollution*, *260*, 114098. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114098>
- Liang, Q., & Zhao, D. (2014). Immobilization of arsenate in a sandy loam soil using starch-stabilized magnetite nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, *271*, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.055>
- Littell, J. H., Corcoran, J., & Pillai, V. (2008). *Systematic Reviews and Meta-Analysis*. Oxford University Press.
- Liu, J., Jiang, J., Meng, Y., Aihemaiti, A., Xu, Y., Xiang, H., Gao, Y., & Chen, X. (2020). Preparation, environmental application and prospect of biochar-supported metal nanoparticles: A review. *Journal of Hazardous Materials*, *388*, 122026. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122026>
- Liu, L., Li, W., Song, W., & Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of The Total Environment*, *633*, 206–219. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.03.161>
- Liu, S., Gao, H., Cheng, R., Wang, Y., Ma, X., Peng, C., & Xie, Z. (2020). Study on influencing factors and mechanism of removal of Cr(VI) from soil suspended liquid by bentonite-supported nanoscale zero-valent iron. *Scientific Reports*, *8831*. <https://doi.org/10.1038/S41598-020-65814-3/FIGURES/8>
- Ma, C., Liu, F. Y., Wei, M. B., Zhao, J. H., & Zhang, H. Z. (2020). Synthesis of novel core-shell magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@C nanoparticles with carboxyl function for use as an immobilisation agent to remediate lead-contaminated soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, *29*(3), 2273–2283. <https://doi.org/10.15244/pjoes/111232>
- Mansouri, T., Golchin, A., & Neyestani, M. R. (2017). The effects of hematite nanoparticles on phytoavailability of arsenic and corn growth in contaminated soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *14*, 1525–1534. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1267-5>
- Mar Gil-Díaz, M., Pérez-Sanz, A., Ángeles Vicente, M., & Carmen Lobo, M. (2014). Immobilisation of Pb and Zn in soils using stabilised zero-valent iron nanoparticles: Effects on soil properties. *Clean - Soil, Air, Water*, *42*(12), 1776–

1784. <https://doi.org/10.1002/clen.201300730>

- Marrugo, D. G., León-Méndez, D., Silva, J. P., Granados-Conde, C., & León-Méndez, G. (2020). Metal fumes: Exposure to heavy metals, their relationship with oxidative stress and their effect on health1. *Produccion y Limpia*, 14(2), 8–20. <https://doi.org/10.22507/PML.V14N2A1>
- Michálková, Z., Komárek, M., Šillerová, H., Della Puppa, L., Joussein, E., Bordas, F., Vaněk, A., Vaněk, O., & Ettler, V. (2014). Evaluating the potential of three Fe- and Mn-(nano)oxides for the stabilization of Cd, Cu and Pb in contaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 146, 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.08.004>
- Montoya, E. A. R., Hernández, L. E. M., Escareño, M. P. L., & Balagurusamy, N. (2015). Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana*, 33(2), 103–118. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57339210001>
- Moreno, B., Muñoz, M., Cuellar, J., Domancic, S., & Villanueva, J. (2018). Revisiones Sistemáticas: definición y nociones básicas. *Revista Clínica de Periodoncia, Implantología y Rehabilitación Oral*, 11(3), 184–186. <https://doi.org/10.4067/S0719-01072018000300184>
- Okuo, J., Emina, A., Omorogbe, S., & Anegebe, B. (2018). Synthesis, characterization and application of starch stabilized zerovalent iron nanoparticles in the remediation of Pb-acid battery soil. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 9(November 2017), 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2017.11.004>
- Piquette, A., Cannon, C., & Apblett, A. W. (2012). Remediation of arsenic and lead with nanocrystalline zinc sulfide. *Nanotechnology*, 23(29). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/29/294014>
- Poole, C. P., & Owens, F. J. (2007). *Introducción a la nanotecnología*. Reverté.
- Porta, J., López-Acevedo, M., & M. Poch, R. (2013). *Edafología: Uso y protección de suelos*. Mundi-Prensa.
- Reuer, M. K., Bower, N. W., Koball, J. H., Hinostroza, E., De la Torre Marcas, M. E., Surichaqui, J. A. H., & Echevarria, S. (2012). Lead, Arsenic, and Cadmium Contamination and Its Impact on Children's Health in La Oroya, Peru. *ISRN Public Health*, 2012, 1–12. <https://doi.org/10.5402/2012/231458>
- Robles Ardila, D. P., Rodríguez Pardo, N., & Pataquiva-Mateus, A. (2019). Síntesis de nanopartículas de magnetita a partir del extracto de cáscara de papaya para la degradación de colorantes azoicos en soluciones acuosas. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 431–442.
- Robles Pastor, B. F. (2019). Población y muestra. *Pueblo Continente*, 30(1), 245–246. <http://200.62.226.189/PuebloContinente/article/view/1269/1099>
- Rodríguez Moguel, E. A. (2005). *Metodología de la Investigación*. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Saravanan, A., Kumar, P. S., Karishma, S., Vo, D. V. N., Jeevanantham, S.,

- Yaashikaa, P. R., & George, C. S. (2021). A review on biosynthesis of metal nanoparticles and its environmental applications. *Chemosphere*, 264, 128580. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.128580>
- Seleiman, M. F., Alotaibi, M. A., Alhammad, B. A., Alharbi, B. M., Refay, Y., & Badawy, S. A. (2020). Effects of ZnO nanoparticles and biochar of rice straw and cow manure on characteristics of contaminated soil and sunflower productivity, oil quality, and heavy metals uptake. *Agronomy*, 10(6), 1–21. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060790>
- Shah, V., & Daverey, A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100774. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.100774>
- Shibley, H. J., Engates, K. E., & Guettner, A. M. (2011). Study of iron oxide nanoparticles in soil for remediation of arsenic. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(6), 2387–2397. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-9999-x>
- Singh, R., Misra, V., & Singh, R. P. (2011). Removal of Cr(VI) by Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) From Soil Contaminated with Tannery Wastes. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88, 210–214. <https://doi.org/10.1007/S00128-011-0425-6>
- Su, B., Lin, J., Owens, G., & Chen, Z. (2020). Impact of green synthesized iron oxide nanoparticles on the distribution and transformation of As species in contaminated soil. *Environmental Pollution*, 258, 113668. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113668>
- Sun, Y., Zheng, F., Wang, W., Zhang, S., & Wang, F. (2020). Remediation of Cr(VI)-Contaminated Soil by Nano-Zero-Valent Iron in Combination with Biochar or Humic Acid and the Consequences for Plant Performance. *Toxics*, 8(2), 26. <https://doi.org/10.3390/TOXICS8020026>
- Tan, H., Wang, C., Li, H., Peng, D., Zeng, C., & Xu, H. (2020). Remediation of hexavalent chromium contaminated soil by nano-FeS coated humic acid complex in combination with Cr-resistant microflora. *Chemosphere*, 242, 125251. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.125251>
- Toro Jaramillo, I. D., & Parra Ramírez, R. D. (2006). *Método y conocimiento: Metodología de la investigación*. Universidad EAFIT.
- Vasarevičius, S., Danila, V., & Januševičius, T. (2020). Immobilisation of Cadmium, Copper, Lead, and Nickel in Soil Using Nano Zerovalent Iron Particles: Ageing Effect on Heavy Metal Retention. *Water, Air, and Soil Pollution*, 231(10). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04864-9>
- Volke Sepúlveda, T., & Velasco Trejo, J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Instituto Nacional de Ecología.
- Wang, G., Zhang, S., Xu, X., Li, T., Li, Y., Deng, O., & Gong, G. (2014). Efficiency of nanoscale zero-valent iron on the enhanced low molecular weight organic acid removal Pb from contaminated soil. *Chemosphere*, 117(1), 617–624. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.081>

- Wang, L., Cho, D. W., Tsang, D. C. W., Cao, X., Hou, D., Shen, Z., Alessi, D. S., Ok, Y. S., & Poon, C. S. (2019). Green remediation of As and Pb contaminated soil using cement-free clay-based stabilization/solidification. *Environment International*, 126, 336–345. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.02.057>
- Xia, Z., Zhang, S., Cao, Y., Zhong, Q., Wang, G., Li, T., & Xu, X. (2019). Remediation of cadmium, lead and zinc in contaminated soil with CETSA and MA/AA. *Journal of Hazardous Materials*, 366, 177–183. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2018.11.109>
- Yang, J., Gao, X., Li, J., Zuo, R., Wang, J., Song, L., & Wang, G. (2020). The stabilization process in the remediation of vanadium-contaminated soil by attapulgite, zeolite and hydroxyapatite. *Ecological Engineering*, 156, 105975. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2020.105975>
- Zhang, M. Y., Wang, Y., Zhao, D. Y., & Pan, G. (2010). Immobilization of arsenic in soils by stabilized nanoscale zero-valent iron, iron sulfide (FeS), and magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) particles. *Chinese Science Bulletin*, 55(4), 365–372. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0703-4>
- Zhou, W. H., Liu, F., Yi, S., Chen, Y. Z., Geng, X., & Zheng, C. (2019). Simultaneous stabilization of Pb and improvement of soil strength using nZVI. *Science of the Total Environment*, 651, 877–884. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.146>

## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de operacionalización de variables

Revisión sistemática y meta-análisis sobre el uso de nanopartículas metálicas en la remediación de suelos contaminados con As y Pb						
Variables		Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicador	Escala de medición/unidades
Independiente	Uso de nanopartículas metálicas	Las nanopartículas son átomos agregados de entre 1 a 100 nm de tamaño que poseen una capsula de estabilización (Cañasca y Cama, 2017).	Se trabajó las nanopartículas metálicas, teniendo en cuenta las dosis de aplicación y características establecidas en los estudios seleccionados.	Dosis de aplicación	Volumen de solución de NP	mg/L
				Características de las nanopartículas metálicas	Tamaño	nm
					Tipo de NPs	Nominal
Dependiente	Remediación de suelos contaminados con As y Pb	La remediación puede realizarse in situ o ex situ encontrando una variedad de técnicas (Sepúlveda y Velazco, 2002). El arsénico puede traer como consecuencia altos niveles de biodisponibilidad (Rangel et al., 2015). El plomo tiene la capacidad de formar sales, óxidos y compuestos organolépticos (Peláez et al., 2016)	La remediación fue evaluada en función a las características del suelo y el porcentaje de remoción de cada metal obtenido en cada estudio.	Características del suelo	Conductividad eléctrica	dS/m
					pH	pH
					Humedad	%
					Temperatura	°C
				Porcentaje de remoción	Materia orgánica	%
					Concentración inicial	%
	Concentración final	%				











## VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

### I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: **Dr. BENITES ALFARO, ELMER GONZALES**
- 1.2. Cargo e institución donde labora: **Docente/UCV Campus Los Olivos**
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: **Ingeniero Químico**
- 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: **Formato de registro de datos de campo**  
**Ficha 1. Características de los estudios seleccionados en la revisión sistemática**  
**Ficha 2. Dosis de la aplicación de las nanopartículas metálicas**  
**Ficha 3. Características de las nanopartículas metálicas**  
**Ficha 4. Características del suelo**  
**Ficha 5. Porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas**
- 1.5. Autor(A) de Instrumento: **Geraldine Karito Guadalupe Sandoval y Sheyla Thalía Rojas Díaz**

### II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MÍNIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											x		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											x		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											x		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											x		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											x		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											x		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											x		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											x		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											x		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											x		

### III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD:

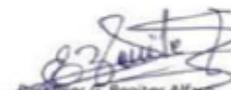
- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

<b>SI</b>
-

### IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

**90%**

Lima, 09 de noviembre de 2020

  
 Dr. Elmer G. Benites Alfaro,  
 CP: 72398  
 ORCID ID: 0000-0003-1504-2089  
 Scopus ID de autor: 57216176765  
 Web of Science Researcher ID: AAU 8644-2008

## VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

### I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: **Mg. PILLPA ALIAGA, FREDDY**
- 1.2. Cargo e institución donde labora: **Docente/UCV Campus Los Olivos**
- 1.3. Especialidad o línea de investigación: **Ingeniero Agrónomo**
- 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: **Formato de registro de datos de campo**  
**Ficha 1. Características de los estudios seleccionados en la revisión sistemática**  
**Ficha 2. Dosis de la aplicación de las nanopartículas metálicas**  
**Ficha 3. Características de las nanopartículas metálicas**  
**Ficha 4. Características del suelo**  
**Ficha 5. Porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas**
- 1.5. Autor(A) de Instrumento: **Geraldine Karito Guadalupe Sandoval y Sheyla Thalía Rojas Díaz**

### II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE						MÍNIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE			
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.												x	
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.												x	
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.												x	
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.												x	
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales												x	
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.												x	
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.												x	
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.												x	
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.												x	
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.												x	

### III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD:

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

<b>SI</b>
-

### IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

<b>90%</b>
------------

Lima, 09 de noviembre de 2020



Firmado digitalmente por  
**Freddy Pillpa Aliaga**  
 Nombre de reconocimiento (DN):  
 cn=Freddy Pillpa Aliaga,  
 o=Colegio de Ingenieros  
 del Perú, ou=CP 19689,  
 email=fpillpa@gmail.c  
 m, c=PE  
 Fecha: 2020.06.19  
 11:38:57 -05'00'

## VALIDACIÓN DE INSTRUMENTO

### I. DATOS GENERALES

- 1.1. Apellidos y Nombres: **Dr. CASTAÑEDA OLIVERA, CARLOS ALBERTO**  
 1.2. Cargo e institución donde labora: **Docente e Investigador/UCV Campus Los Olivos**  
 1.3. Especialidad o línea de investigación: **Tecnología Mineral y Ambiental**  
 1.4. Nombre del instrumento motivo de evaluación: **Formato de registro de datos de campo**  
**Ficha 1. Características de los estudios seleccionados en la revisión sistemática**  
**Ficha 2. Dosis de la aplicación de las nanopartículas metálicas**  
**Ficha 3. Características de las nanopartículas metálicas**  
**Ficha 4. Características del suelo**  
**Ficha 5. Porcentaje de remediación de las nanopartículas metálicas**  
 1.5. Autor(A) de Instrumento: **Geraldine Karito Guadalupe Sandoval y Sheyla Thalía Rojas Díaz**

### II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN

CRITERIOS	INDICADORES	INACEPTABLE					MÍNIMAMENTE ACEPTABLE			ACEPTABLE				
		40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
1. CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje comprensible.											x		
2. OBJETIVIDAD	Esta adecuado a las leyes y principios científicos.											x		
3. ACTUALIDAD	Esta adecuado a los objetivos y las necesidades reales de la investigación.											x		
4. ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica.											x		
5. SUFICIENCIA	Toma en cuenta los aspectos metodológicos esenciales											x		
6. INTENCIONALIDAD	Esta adecuado para valorar las variables de la Hipótesis.											x		
7. CONSISTENCIA	Se respalda en fundamentos técnicos y/o científicos.											x		
8. COHERENCIA	Existe coherencia entre los problemas objetivos, hipótesis, variables e indicadores.											x		
9. METODOLOGÍA	La estrategia responde una metodología y diseño aplicados para lograr probar las hipótesis.											x		
10. PERTINENCIA	El instrumento muestra la relación entre los componentes de la investigación y su adecuación al Método Científico.											x		

### III. OPINIÓN DE APLICABILIDAD:

- El instrumento cumple con los requisitos para su aplicación
- El instrumento no cumple con los requisitos para su aplicación

SI
-

### IV. PROMEDIO DE VALORACIÓN:

**90%**

Lima, 09 de noviembre de 2020

  
**Dr. Ing. Carlos Alberto Castañeda Olivera**  
 DOCENTE E INVESTIGADOR  
 CIP: 130267  
 RENACYT: P0078275



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

### **Declaratoria de Autenticidad del Asesor**

Yo, CASTAÑEDA OLIVERA CARLOS ALBERTO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA NORTE, asesor de Tesis titulada: "REVISIÓN SISTEMÁTICA Y META-ANÁLISIS SOBRE EL USO DE NANOPARTICULAS METÁLICAS EN LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON AS Y PB", cuyos autores son ROJAS DIAZ SHEYLA THALIA, GUADALUPE SANDOVAL GERALDINE KARITO, constato que la investigación tiene un índice de similitud de %, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

LIMA, 29 de Diciembre del 2020

<b>Apellidos y Nombres del Asesor:</b>	<b>Firma</b>
CASTAÑEDA OLIVERA CARLOS ALBERTO <b>DNI:</b> 42922258 <b>ORCID:</b> 0000-0002-8683-5054	Firmado electrónicamente por: CCASTANEDAOL el 29-12-2020 14:12:32

Código documento Trilce: TRI - 0103774