



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Reducción de Cromo (VI) a Cromo (III) en Suelos Contaminados
Mediante la Aplicación de Materiales Reductores: Revisión
Sistemática**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL**

AUTORES:

Mamani Laura, Merica (ORCID: 0000-0003-0715-4582)

Mendoza Justo, Jordy (ORCID: 0000-0002-4239-4031)

ASESOR:

Mg. Ugarte Alván, Carlos Alfredo (ORCID: 0000-0001-6017-1192)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

Dedico con todo mi corazón esta tesis a mi madre Marleni Laura Hanco, ella fue y es el pilar fundamental en mi vida. Gracias a su valentía y tenacidad logro formar en mí buenos sentimientos, hábitos y valores los cuales me han ayudado a seguir cumpliendo mis propósitos personales y profesionales, siempre de la mano de Dios quien fue mi guía y mi fortaleza para seguir adelante.

Gracias por confiar, creer en mí y en mis expectativas; por eso te doy mi trabajo en ofrenda por tu valentía y amor invaluable madre mía, te amo.

Merica

Dedico a Dios, a mi padre, Rodin Mendoza Trujillo, por sus grandes enseñanzas de vida.

A mi madre, Gladis Justina Justo Ordoñez, que desde el cielo me ilumina para seguir adelante con todos mis proyectos.

A mis hermanos, Freddy y en especial a Percy Mendoza Justo, ya que siempre está presente para apoyarme incondicionalmente en todos mis proyectos para llegar a esta instancia de mis estudios, por todo lo que me enseñó, motivó, aconsejó en cada momento de mi vida.

También la dedico a mi hijo Jordy Leissam, quien me impulsa y motiva cada día para nunca rendirme.

A toda mi familia, profesores, amistades, por sus buenos consejos y apoyo que me brindaron, dedico este proyecto a todos ustedes mis seres queridos que siempre aguardo en mi memoria y alma.

Jordy

Agradecimiento

Gracias a Dios por darnos salud, sabiduría y fortaleza permitiéndonos llegar a esta instancia de nuestro desarrollo profesional.

A la universidad Cesar Vallejo por abrirnos las puertas y brindado los conocimientos científicos para obtener el grado de título de Ingenieros Ambientales.

Y para finalizar agradecer a las personas que forman parte de este gran logro.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

CARÁTULA	ii
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE GRÁFICOS	v
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	15
3.1. Tipo y diseño de investigación	15
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización	15
3.3. Escenario de estudio.....	17
3.4. Participantes	17
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	17
3.6. Procedimiento	17
3.7. Rigor científico	19
3.8. Método de análisis de información	19
3.9. Aspectos éticos	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
V. CONCLUSIONES	32
VI. RECOMENDACIONES.....	33
REFERENCIAS.....	34
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla N°1. Cromo total en diversas fuentes naturales</i>	4
<i>Tabla N° 2. Matriz de Categorización Apriorística</i>	16
<i>Tabla N°3. Materiales más usados como reductores</i>	21
<i>Tabla N°4. Mecanismos de remediación</i>	25
<i>Tabla N°5. Materiales más usados como reductores</i>	27

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Comportamiento biogeoquímico del Cr en el sistema suelo-planta</i>	6
<i>Figura 2. Esquema que muestra el mecanismo de reducción del Cr(VI) a cromo (III)</i>	7
<i>Figura 3. Tipos de tratamientos reductores de Cr (VI) en Cr (II)</i>	8
<i>Figura 4. Mecanismos de oxidación de Cr(III) por MnOx: (a) oxidación disuelta; (b) oxidación adsorbida; (c) oxidación catalizada</i>	9

ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico N° 1: Procedimiento de selección de artículos</i>	18
--	----

RESUMEN

De acuerdo a la importancia de evaluar los aspectos más relevantes de la aplicación de materiales reductores en la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados, se realizó el estudio sistemático donde se aplicó como metodología de estudio un tipo de investigación aplicada, realizando mediante el uso de la técnica de análisis documental la búsqueda y recolección de datos recopilando 77 estudios de los cuales pasaron por un proceso de selección y exclusión quedando únicamente 25 artículos usados para el estudio; de los cuales se tiene lo siguiente:

Los materiales más usados como reductores son los reductores con Fe, seguido de las enmiendas orgánicas y los compuestos a base de S; ello debido a que los reductores con hierro son los más empleados por su fuerte capacidad reductora, su alta actividad de reacción y su excelente rendimiento de adsorción. Los mecanismos de remediación son 3, la reducción abiótica del Cr(VI) a Cr(III) al proporcionar una fuente de electrones donantes, la reducción biótica de los microorganismos estimulada por el sustrato de carbono y, por último, la disminución del valor del potencial redox del suelo que induce la reducción del Cr(VI). La eficiencia de aplicación presenta una eficiencia de reducción mayor al 90% en su mayoría; y los materiales reductores con materia orgánica, aunque presentan resultados prometedores requieren de un mayor tiempo de empleo y la reducción por aplicación de materiales con S o Fe presentan mayores porcentajes de reducción del Cr (VI) en 90% y en un menor tiempo.

Palabras clave: REDUCCIÓN, CROMO, SUELOS, CONTAMINADOS, MEDIANTE, APLICACIÓN, DE, MATERIALES, REDUCTORES.

ABSTRACT

In accordance with the importance of evaluating the most relevant aspects of the application of reducing materials in the reduction of chromium (VI) to chromium (III) in contaminated soils, a systematic study was carried out in which an applied research methodology was applied, using the documentary analysis technique to search for and collect data, compiling 77 studies, which underwent a selection and exclusion process, leaving only 25 articles used for the study, of which the following was obtained:

The materials most used as reductants are Fe reductants, followed by organic amendments and S-based compounds; this is due to the fact that iron reductants are the most used because of their strong reducing capacity, high reaction activity and excellent adsorption performance. The remediation mechanisms are 3, the abiotic reduction of Cr(VI) to Cr(III) by providing a source of donor electrons, the biotic reduction of microorganisms stimulated by the carbon substrate and finally the decrease of the soil redox potential value that induces the reduction of Cr(VI). The application efficiency presents a reduction efficiency greater than 90% in the majority; and the reducing materials with organic matter, although they present promising results, require a longer time of use and the reduction by application of materials with S or Fe present higher percentages of Cr(VI) reduction in 90% and in a shorter time.

Keywords: Reduction, Chromium, contaminated, soils, through, application, reducing, materials.

I. INTRODUCCIÓN

Las técnicas mineras y los métodos de eliminación de desechos han mejorado significativamente en términos de contaminación ambiental, y esto se nota principalmente en los países desarrollados, donde varias actividades antropogénicas históricas han dejado un legado de sitios fuertemente contaminados con metales (Zhang Jishi et al., 2017, p.1).

Pero las industrias y prácticas agrícolas para poder lograr llegar a cubrir las necesidades de la población que viene en constante crecimiento y con ello la contaminación del medio ambiente con iones metálicos tóxicos como Cr (VI), Cu 2+, Cd 2+, Pb 2+ y Zn 2+ (Hernández Macedo M. et al., 2020, p.4).

Junto con el cadmio, el plomo, el mercurio y otros metales pesados, el cromo es un contaminante ambiental importante, concentrado principalmente en áreas de intensa presión antropogénica (Reale L. et al., 2016, p.1). Siendo entre los contaminantes peligrosos por metales pesados (loid) en el suelo agrícola, el agua y el aire, el cromo hexavalente [Cr (VI)] es el carcinógeno más virulento (Azeez Nazeer A. et al., 2021, p.1).

El Cr existe en el medio ambiente en dos formas estables: el cromo (III) y el cromo (VI) procedentes de procesos naturales y de actividades humanas (Su Huijie et al., 2016, p.2). La fitotoxicidad tanto del Cr III como del Cr VI se ha estudiado en muchas plantas superiores e inferiores (Dávalos A. et al., 2019, p.3). El Cr VI es más fitotóxico que el Cr III y retrasa el crecimiento, reduce el número de palizadas y de parénquima esponjoso de las hojas, y aumenta el número de vacuolas y material denso de electrones a lo largo de las paredes del xilema y el floema (Zhou Jiangmin et al., 2019, p.1).

La fitotoxicidad del Cr también puede inhibir la germinación de las semillas, degradar el estado de los pigmentos, alterar el equilibrio de los nutrientes, modificar la actividad de las enzimas antioxidantes e inducir el estrés oxidativo en plantas (Apler Anna et al., 2019, p.1).

Además de estos efectos, el Cr también puede alterar la ultraestructura del cloroplasto y de la membrana en las plantas, más detalladamente, el Cr inhibe la fotosíntesis (Xia Shaopan et al., 2020, p.2). El cromo a tener posibilidades de ser absorbido por las

plantas posteriormente pasa por los animales y la población humana de la misma zona, lo que genera enfermedades cancerígenas según la OMS (Herrera Yari C. et al., 2021, p.2).

Se informó que alrededor del 11% de los sitios contaminados de la Lista Nacional de Prioridades están contaminados por Cr en los Estados Unidos, y el 14% de los sitios contaminados en Japón están contaminados por cromo hexavalente (Zia Shaopan et al et al., 2020, p.1).

En China, se ha convertido en uno de los contaminantes más comúnmente detectados en los suelos, representando el 5% del total de terrenos contaminados prácticas inadecuadas de almacenamiento y eliminación (Fu Rongbing et al., 2017, p.2).

Las leyes medioambientales de todo el mundo son cada vez más estrictas y la tendencia al desarrollo sostenible hace que se investiguen alternativas de almacenamiento seguras y estables para las toneladas de residuos no tratados en forma de escorias y lodos que contienen altas concentraciones de cromo hexavalente, Cr₆₊ para disminuir su impacto ambiental (Ambi A. et al., 2020, p.2).

A pesar de los enormes esfuerzos para frenar la contaminación del suelo y del subsuelo, se ha confirmado que el confinamiento no resuelve definitivamente el potencial riesgo de su liberación durante el transporte o por lixiviación que representa este tipo de residuos (Ballesteros S. et al., 2017, p.1).

Por tal motivo se da la necesidad de buscar técnicas actuales de remediación del suelo; pero por lo general estas son costosas y, a menudo, no respetan el medio ambiente (Peng Hao et al., 2018, p.2). Ante ello, La reducción química de Cr(VI) a Cr(III) mediante materiales reductores es la tecnología más utilizada para la remediación de suelos contaminados con Cr(VI) debido a su alta eficiencia, adaptabilidad y bajo coste.

Entre los materiales que pueden reducir eficazmente el Cr(VI) a Cr(III) para la remediación de suelos contaminados con Cr(VI), se encuentran los reductores ferrosos, los compuestos a base de azufre y las enmiendas orgánicas (Zhu Fang et al., 2016, p.1).

En vista de la problemática notoria en gran parte del mundo se plantea el siguiente interrogante como problema general:

¿Cuáles son los aspectos más relevantes de la aplicación de materiales reductores en la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados?, así mismo se decidió plantear los siguientes problemas específicos:

PE1: ¿Cuáles son los materiales más usados como reductores para la aplicación de la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados?

PE2: ¿Cuáles son los mecanismos de remediación de materiales reductores en suelos contaminados con cromo (VI)?

PE1: ¿Cuál es la eficiencia de aplicación de los materiales reductores más usados para la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados?

De la misma manera se generó el siguiente objetivo general:

Evaluar los aspectos más relevantes de la aplicación de materiales reductores en la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados, y como objetivos específicos:

OE1: Clasificar los materiales más usados como reductores para la aplicación de la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados

OE2: Determinar los mecanismos de remediación de materiales reductores en suelos contaminados con cromo (VI)

OE3: Identificar la eficiencia de aplicación de los materiales reductores más usados para la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados

Este estudio de investigación se justifica teóricamente, debido a la recolección exhaustiva que se pretende realizar, compilando estudios recientes a nivel mundial de donde se enfoca en evaluar los aspectos más relevantes de la aplicación de materiales reductores en la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados, con la finalidad de servir como un aporte literario académico para nuevos y futuros investigadores que se interesen por investigar nuevas técnicas viables y con alta eficiencia para reducir la contaminación del cromo hexavalente del suelo.

II. MARCO TEÓRICO

El cromo es una materia prima esencial que sirve en la industria química, refractaria, metalúrgica, curtido de cueros, cromado, pigmentos y medios magnéticos, entre otros; pero desgraciadamente, durante la fabricación de residuos se produce inevitablemente el cromo (Veselká Veronika et al., 2016, p.1).

El Cr(VI) geogénico suele derivarse de la meteorización de minerales de cromato, pero es poco común debido a la rareza de minerales de cromato (Jones Athena S. et al., 2019, p.3). Al igual que el Cr(VI) el Cr(III) en el medio ambiente también procede de fuentes antropogénicas y geogénicas antropogénicas y geogénicas, y su oxidación ha llamado la atención como la tercera fuente de Cr(VI) (Yang Yonglin et al., 2020, p.2).

En cuanto a las fuentes antropogénicas, el Cr(III) entra en el medio ambiente de dos maneras: a través de la emisión directa junto con el Cr(VI) antropogénico (Xia Xian et al., 2021, p.1) y como producto del tratamiento de solidificación/estabilización de los contaminantes de Cr(VI) (Coetzee Johan J. et al., 2020, p.2). Como se muestra en la tabla 1, de acuerdo a la Agency for Toxic Substance and Disease Registry (ATSDR) (2015) citado por Coetzee Johan J. et al., (2020, p.4):

Tabla N°1. Cromo total en diversas fuentes naturales

Fuente	Unidades	Media	Rango de concentración de Cr
<i>Rocas</i>	mg/kg	100	20–2000
<i>Suelo</i>	mg/kg	200 (en todo el mundo)	5.4–710 (Suelo escocés)
<i>Aguas subterráneas</i>	µg/L	0.2	0.02–6
<i>Agua de lluvia (US)</i>	nM		4.6
<i>Agua de mar (cuenca argentina)</i>	nM		5.8–6.6
<i>Agua dulce</i>	µg/L		1–10
<i>Carbón (EE.UU.)</i>	ppm 1	15	NA–250
<i>Petróleo crudo (Austria)</i>	ppm 1	N.A	30–70
<i>Aire (US)</i>	ng/m ³	>300	-

Fuente: Coetzee J. et al., (2018)

El cromo existe en varios estados de oxidación (-II a +VI), pero solo las formas hexavalentes (Cr(VI)) y trivalente (Cr(III)) son termodinámicamente estables en los sistemas naturales (Jafarian A. y Jafarian S., 2017, p.2).

La oxidación de Cr(III) a Cr(VI) se produce de forma natural en suelos con alto contenido de óxidos de manganeso (Mn(IV)) (Shahid Muhammad et al., 2017, p.1). Las especies de cromo (VI) (por ejemplo, HCrO_4^- , CrO_4^{2-} y $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) no son retenidas de forma apreciable por los suelos debido a las fuerzas de repulsión de los minerales de arcilla cargados negativamente (Zhang Haibo et al., 2019, p.2).

Es así, que el cromo existe principalmente en varios estados de valencia, que varían de 0 a VI, pero el cromito trivalente (Cr (III)) y el cromato hexavalente (Cr (VI)) son estados más estables y predominantes en el entorno natural (shahid Muhammad et al., 2016, p.4).

El Cr (III) se presenta principalmente como cationes, mientras que el Cr (VI) suele aparecer como oxianiones, como los iones hidrocromato (HCrO_4^-), dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) y cromato (CrO_4^{2-}) (Rafiq Marina et al., 2017, p.2). Los estados de transición: Cr (II), Cr (IV), Cr (V) suelen ser productos inestables durante los procesos de oxidación y reducción de Cr (III) y Cr (VI) (Ashraf Anam et al., 2017, p.2).

Las formas predominantes de Cr pueden sufrir una secuencia de conversiones, pasando de una forma a otra por efecto de numerosos procesos físico-químicos (Sahoo Shraban K. y Hota G., 2020, p.2).

En la actualidad, la especiación del Cr se considera un tema de marcada importancia debido a las altas variaciones en el comportamiento biogeoquímico de sus diferentes especies químicas (Ding Weixuan et al., 2016, p.1). El cromo se considera un excelente ejemplo entre los elementos cuyas diferentes formas químicas exhiben efectos contrarios (Varadharajan Charuleka et al., 2017, p.9).

En comparación con el Cr (III), el Cr (VI) es altamente móvil en el suelo, extremadamente tóxico (10 a 100 veces) para los organismos vivos con potencial mutagénico, carcinogénico y teratogénico, por lo que el Cr (VI) presenta un peligro potencial para la salud (Fan Xianfang et al., 2019, p.4).

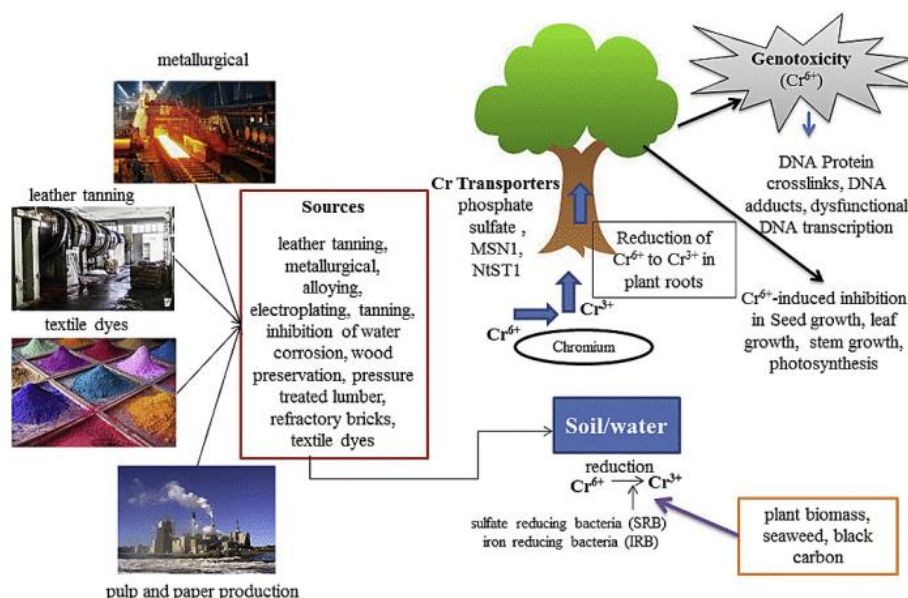
Los riesgos ambientales, toxicológicos y sanitarios asociados al Cr(VI) están estrechamente relacionados con su especiación y comportamiento en el medio ambiente (Nazarona Tatiana et al., 2020, p.2).

La contaminación por cromo (Cr) en el suelo se refiere a la acumulación de Cr debido a actividades antropogénicas, que afecta en gran medida a las principales funciones

químicas y microbianas del suelo y, posteriormente, repercute en la calidad de las aguas subterráneas (Hsu Liang C. et al., 2016, p.2).

Es así, que la contaminación del suelo por cromo se da por su vertimiento y almacenamiento de manera abierta (Alidokht Leila et al., 2021, p.1). (Ver Figura 1).

Figura N°1. Comportamiento biogeoquímico del Cr en el sistema suelo-planta



Fuente: Zhuang Maoqiang et al., (2017)

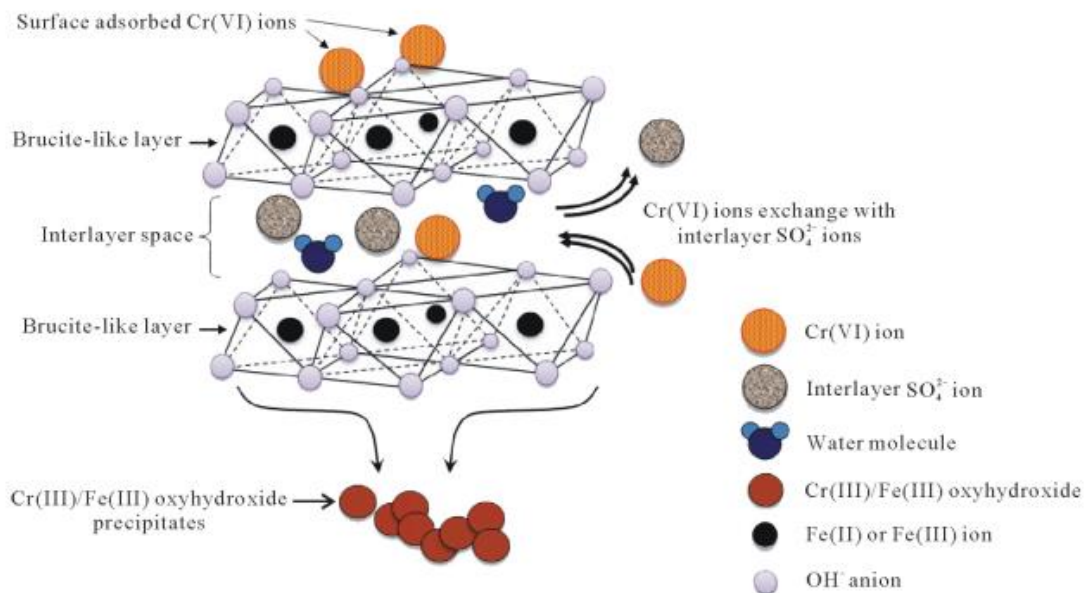
El suelo contaminado con cromo (CCS) es difícil de eliminar debido a la alta toxicidad y movilidad del Cr (VI); como se muestra en la figura 1, el cromo debido a la generación de fuentes como curtido de pieles, metalurgia, aleación, galvanoplastia, curtido, inhibición de la corrosión del agua entre otros, presenta toxicidad en el suelo y agua generando la inhibición inducida en el crecimiento de las semillas, el crecimiento de las hojas, el crecimiento del tallo y la fotosíntesis.

Intrínsecamente, el Cr(VI) es altamente tóxico, cancerígeno y móvil en los suelos; en el entorno del suelo, el Cr(VI) puede reducirse a Cr(III), que participa en reacciones con la materia orgánica, el ion ferroso (Fe(II)) y el ion bisulfuro (HS-) (Deng Ning et al., 2021, p.2).

Ellos se absorben débilmente en las superficies de los óxidos metálicos de los suelos en condiciones ácidas o se reducen a Cr(III) por la materia orgánica (MO) del suelo y minerales portadores de Fe(II) (Aldmour Suha et al., 2019, p.2). En cambio, el Cr(III) no es tóxico y es prácticamente inmóvil debido a su fuerte adsorción en las partículas

del suelo y la tendencia a precipitar como $\text{Cr}(\text{OH})_3$ o co-precipitar como la solución sólida $\text{Cr}(\text{III})/\text{Fe}(\text{III})/\text{OH}$ en la presencia de $\text{Fe}(\text{III})$ (Liu Xiaolei et al., 2018, p.3). Como se muestra en la figura 2.

Figura N°2. Esquema que muestra el mecanismo de reducción del $\text{Cr}(\text{VI})$ a cromo (III)



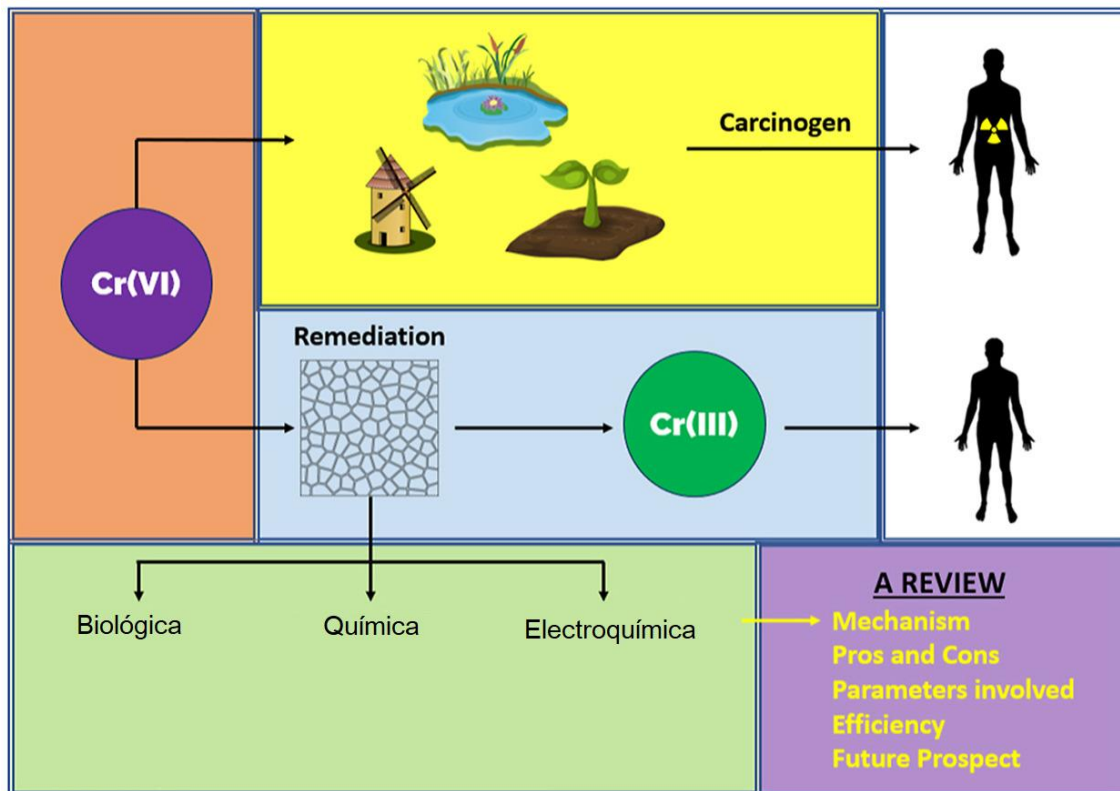
Fuente: Alidokht L. et al., (2021)

De acuerdo a la figura 2, se muestra esquemáticamente el mecanismo de eliminación de $\text{Cr}(\text{VI})$, donde la adsorción de iones $\text{Cr}(\text{VI})$ (como CrO_2^-) en las superficies externas del GRSO_4 se produce simultáneamente con su intercambio con los aniones de sulfato intercalados. Entonces, el $\text{Cr}(\text{VI})$ se reduce rápidamente a $\text{Cr}(\text{III})$ por el $\text{Fe}(\text{II})$; debido a ello es que cambia los precipitados de color marrón rojizo de oxihidróxidos de $\text{Cr}(\text{III})/\text{Fe}(\text{III})$.

Por lo tanto, la reducción química de $\text{Cr}(\text{VI})$ a $\text{Cr}(\text{III})$ es una técnica aceptable y eficaz para reducir la concentración de $\text{Cr}(\text{VI})$ y disminuir los efectos tóxicos y su estabilización en lugares contaminados (Wang Tao et al., 2019, p.1).

Ante lo expuesto, la reducción del cromo hexavalente a cromo trivalente se puede dar de 3 formas; mediante la aplicación biológica, química o electroquímica; ante ello, la reducción biológica emplea diversos tipos de microorganismos que presenten capacidad de descontaminación del $\text{Cr}(\text{VI})$ (Tan Hang et al., 2020, p.2). (Ver figura3).

Figura N°3. Tipos de tratamientos reductores de Cr (VI) en Cr (II)



Fuente: Azeez Nazeer A. et al., (2021)

La reducción biológica del Cr hexavalente ha atraído cada vez más atención debido a su eficiencia, rentabilidad, reutilización de la biomasa y el respeto al medio ambiente (Zeng Chujing et al., 2019, p.2). Entre los métodos de la biorremediación de la contaminación por Cr incluye la biorreducción, la biosorción biorreducción, biosorción y bioacumulación, etc. (Fernández Pablo Pablo M. et al., 2018, p.1).

La biorreducción tiene las ventajas de ser rentable y respetuosa con el medio ambiente, sin embargo, tarda mucho tiempo en tener un efecto deseable y no es adecuada para lugares con alta concentración de cromo hexavalente (Xia Shaopan et al., 2019, p.3).

Mientras que, la reducción electroquímica se refiere a la tecnología de aplicar un gradiente de bajo voltaje eléctrico directo o una corriente directa baja a través de un par de electrodos insertados en el suelo contaminado para migrar el anión Cr(VI) hacia el ánodo y reducirlo eventualmente (Yuan et al., 2017).

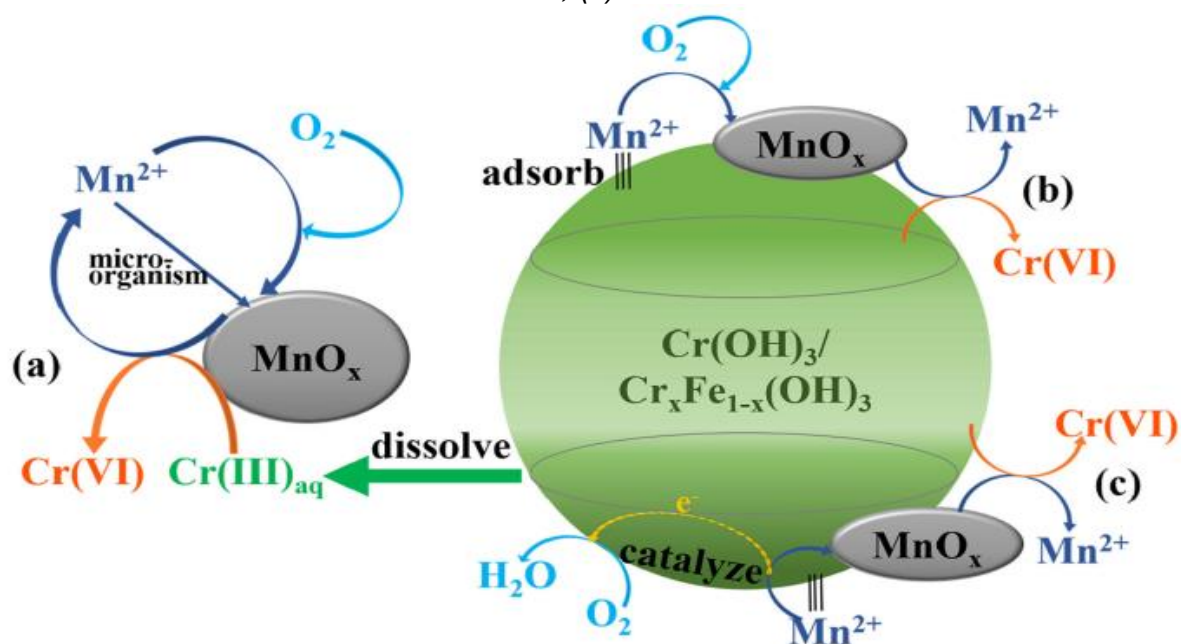
Este proceso está ganando recientemente la atención de la investigación como una tecnología de remediación de suelos in situ que puede que puede aplicarse a suelos

de baja permeabilidad contaminados con varios contaminantes, incluyendo Cr(VI) (Dong Hongyu et al., 2019, p.2).

En el proceso electroquímico destinado a la recuperación de Cr como Cr(III) de los suelos contaminados con Cr(VI), los papeles respectivos del proceso electrocinético y el correspondiente comportamiento ideal del Cr(VI) en el sistema podrían describirse como sigue la fracción disuelta de Cr(VI), que está presente principalmente como aniones cromato (CrO_4^{2-}) o hidrocromato (HCrO_4^-) y es transportada hacia el ánodo por migración iónica (Yuan Lizhu et al., 2016, p.3). El reductor del equipo usado en el proceso electroquímico instalada junto al ánodo reduce el Cr(VI) en menos tóxico y menos soluble en cromo trivalente (Cr(III)) (Villen Guzman M. et al., 2016, p.2).

Aunque la remediación por reducción química no remueve o extrae el elemento Cr del suelo, puede disminuir drásticamente la concentración y movilidad / biodisponibilidad / accesibilidad del Cr(VI) en el suelo mediante la incorporación de una sustancia reductora exógena en el suelo contaminado (Liu Lianwen et al., 2018, p.2). En comparación con ellos, la reducción química es el enfoque más utilizado debido a su alta eficiencia, adaptabilidad y bajo coste (Yuan Lizhu et al., 2017, p.2). (Ver figura 4).

Figura N°4. Mecanismos de oxidación de Cr(III) por MnOx: (a) oxidación disuelta; (b) oxidación adsorbida; (c) oxidación catalizada



Fuente: Qian Ao et al., (2020)

Como se muestra en la figura 4, hay dos tipos de reacción química; en el cual el primer tipo es la reacción entre el Cr(III) disuelto y el MnOx sólido en las superficies de MnOx), que se denomina oxidación disuelta.

El segundo tipo es la reacción entre sólidos de Cr(III) (como Cr (OH)₃ y Cr_xFe_{1-x}(OH)₃) y el MnOx adsorbido en las superficies de Cr(III), que se denomina oxidación adsorbida (Chen Xilu et al., 2020, p.3).

El proceso completo del tipo 1 comprende, la disolución de los sólidos que contienen Cr(III); la adsorción del Cr(III) disuelto en las superficies del MnOx o en su interior; la oxidación del Cr(III) adsorbido a Cr(VI) y por último la liberación del Cr(VI) disuelto a la fase acuosa (Mahringer Daniel et al., 2020, p.4).

Mientras que el proceso completo del tipo 2 comprende, la adsorción de Mn(II) disuelto en las superficies de Cr (OH)₃ o Cr_xFe_{1-x}(OH)₃; la oxidación del Mn(II) adsorbido por el oxígeno disuelto para formar MnOx y por último la oxidación de Cr(OH)₃ o Cr_xFe_{1-x}(OH)₃ por MnOx (Qian Ao et al., 2019, p.2).

Se muestran los antecedentes nacionales e internacionales a continuación:

Tan Hang et al., (2020), En su estudio “Biorreducción y biosorción de Cr (VI) por un nuevo *Bacillus* sp. Cepa CRB-B1”, presenta como objetivo investigar el mecanismo de eliminación de nueva bacteria reductora de cromo eficiente (*Bacillus* sp.). Dando presentando como metodología experimental un amplio rango de velocidad de agitación (125–200 rpm), temperatura (33–41 ° C), pH (6–9). Obteniendo como resultados que la suspensión libre de células tuvo una tasa de eliminación de Cr (VI) del 68,5%, que fue significativamente más alta que la de los extractos libres de células y los restos celulares, lo que indica que la reducción de Cr (VI) se produce principalmente de forma extracelular y posiblemente mediada por la reductasa extracelular. En conclusión, *Bacillus* sp. era una bacteria reductora de Cr (VI) altamente eficiente, que tiene potencial en la remediación del agua y el suelo que contienen Cr (VI).

Lacalle Rafael G. et al., (2020), en su estudio “Efectos de la aplicación de una enmienda orgánica y partículas de hierro de valencia cero a nanoescala en la remediación del Cr (VI) del suelo”, donde la metodología presentada muestra como el suelo se (i) enmendó con dos dosis de un residuo orgánico sólido municipal y (ii)

se contaminó artificialmente con 300 mg de Cr (VI) kg⁻¹ DW de suelo. Después de un período de envejecimiento, un tratamiento de nanorremediación con partículas de hierro de valencia cero a nanoescala (1 g nZVI kg⁻¹ Se aplicó suelo DW). Donde el resultado de la presencia de la enmienda orgánica provocó (i) una disminución del potencial redox, (ii) la inmovilización de Cr (VI) a través de su reducción a Cr (III), (iii) una estimulación de las comunidades microbianas del suelo y (iv) una mejora de la salud del suelo, en comparación con el suelo sin modificaciones.

Song Zilin et al., (2019), presenta como estudio “Uso de residuos sólidos de biogás de la digestión anaeróbica como enmienda eficaz para remediar suelos contaminados con Cr (VI)”, donde el objetivo es investigar el uso potencial de residuos sólidos de biogás (BSR) de la digestión anaeróbica como una enmienda efectiva para disminuir la biodisponibilidad de Cr en suelos contaminados con Cr (VI) utilizando experimentos en macetas. Obteniendo como resultado, que el suelo contaminado con Cr (VI) provocó una reducción en la concentración de Cr (VI) del suelo (16.6-52.1%) y la proporción de Cr intercambiable (15.2-52.4%), disminuyendo así el Cr disponible para la absorción por las plantas. Concluyendo que los tratamientos con BSR dieron como resultado una reducción en el contenido de Cr de las raíces y la biomasa aérea de las plantas de pakchoi.

Chen Huixia et al., (2018), en su investigación “Remediación de suelos contaminados con Cr (VI) con co-compostaje de tres residuos sólidos de biomasa diferentes”, se centró en el co-compostaje de suelo contaminado con Cr (VI) con tres residuos sólidos de biomasa diferentes para inmovilizar Cr (VI). Presentando como metodología que, se realizó una extracción química secuencial del suelo para determinar las fracciones de Cr que cambiaban con el tiempo durante el proceso de compostaje. Se aplicó espectroscopía de fluorescencia para estudiar las características de composición y evolución de la materia orgánica de los lodos municipales y el co-compostaje contaminado con Cr (VI). Dando como resultados que el suelo contaminado con Cr (VI) se puede co-compostar con éxito y esta práctica da como resultado cambios significativos en la disponibilidad de Cr. Concluyendo que el co-compostaje proporciona un método para remediar el suelo contaminado con Cr (VI) a través de la disminución de la biodisponibilidad de Cr y la unión entre las fracciones disponibles de Cr y sustancias similares a las húmicas.

Mandal Sanchita et al., (2017), en su estudio “Mejora de la reducción de cromatos en suelos mediante biocarbón modificado en la superficie”, donde la metodología experimental consistió en realizar experimentos de incubación para examinar la reducción de Cr (VI) en diferentes suelos (Suelo 1: pH 7,5 y Suelo 2: pH 5,5) con tres abonos de aves (PM), vaca (CM) y oveja (SM), tres abonos respectivos. biocarbón derivado (PM biochar (PM-BC), CM biochar (CM-BC) y SM biochar (SM-BC)) y dos biochars modificados (PM-BC modificado (PM-BC-M) y SM-BC modificado (SM -BC-M)) y el biocarbón modificado se sintetizó mediante la incorporación de quitosano y hierro de valencia cero (ZVI) durante la pirolisis. Donde el resultado muestra que, la mayor reducción de Cr (VI) se observó con la aplicación de PM-BC (5%; p / p) (hasta 88,12 mg kg⁻¹; 45% de reducción) en el suelo 2 (pH 5,5). Los biocarros modificados mejoraron la reducción de Cr (VI) en un 55% (SM-BC-M) en comparación con el estiércol (29%, SM) y los biocarros derivados del estiércol (reducción del 40%, SM-BC).

Bashir Muhammad A. et al., (2020), en su investigación “Aplicación combinada de biocarbón y crecimiento regulado por azufre, respuestas fisiológicas, antioxidantes y capacidad de eliminación de Cr del maíz (*Zea mays L.*) en suelos contaminados de tenerías”, buscó evaluar el efecto del biocarbón y el azufre elemental (ES) sobre el crecimiento, fisiología, homeostasis redox y dinámica del Cr del maíz en suelos contaminados de tenerías. Donde el biocarbón se produjo mediante pirólisis de bagazo de caña de azúcar a 350 ° C y se aplicó a una tasa del 3% (p / p) junto con diferentes tasas de ES (3 y 6 g kg⁻¹ de suelo). Donde los resultados revelaron que la toxicidad por Cr en suelos contaminados por tenerías afectó negativamente el crecimiento de las plantas, fisiológico y atributos bioquímicos. Concluyendo que, de manera similar, la aplicación combinada de biocarbón y ES disminuyó las concentraciones de Cr en el suelo y redujo la absorción de la concentración de Cr (VI) y Cr (III) en las raíces y brotes de las plantas en el suelo S en comparación con el suelo K.

Rafique Muhammad Imran et al., (2020), desarrolló en su artículo “Inmovilización in situ de Cr y su disponibilidad para las plantas de maíz en suelos contaminados con desechos de tenerías: efectos de la materia prima de biocarbón y la temperatura de pirolisis”, donde el estudio tuvo como objetivo investigar el potencial del uso de BC para la inmovilización de Cr y reducir su disponibilidad para las plantas de maíz en suelos contaminados con desechos de tenerías. En el método, el se llevó a cabo un

experimento en macetas de invernadero con suelo contaminado con desechos de curtiduría no modificada y suelo modificado con los BC obtenidos (JLBC-300, JLBC-700, MBC-300 y MBC-700) a una tasa de aplicación de 50 g kg⁻¹ y se cultivó con maíz (*Zea mays L.*). Es así que, los resultados muestran que los BC producidos a 700 ° C mostraron la mayor disminución en las concentraciones de Cr soluble en el suelo y redujeron sus concentraciones acumuladas en los lixiviados del suelo en aproximadamente un 93% y 59,0% para MBC-700 y JLBC-700 en comparación con el suelo de control, respectivamente. Concluyendo a partir de los hallazgos que la aplicación de BC pirolizados a 700 ° C (especialmente para MBC-700) podría usarse como una enmienda para reducir la movilidad del Cr en suelos contaminados.

Liu Shibin et al., (2020), realizó el estudio “Efectos comparables del estiércol y su biocarbón sobre la reducción de la biodisponibilidad del Cr del suelo y el estrechamiento de la extensión de la rizosfera de las actividades enzimáticas”, donde se propuso como objetivo la aplicación de estiércol y biocarbón para remediar el suelo contaminado con Cr. Dando como resultado, que el pH del suelo disminuyó durante 45 días, induciendo un aumento de Cr soluble en ácido. La disminución concomitante de las actividades de la β -glucosidasa y la N-acetil-glucosaminidasa explicó el estrechamiento de la extensión de la rizosfera de las actividades enzimáticas en un 13-44%, lo que indica que el aumento de la biodisponibilidad de Cr disminuye las actividades microbianas. Concluyendo que el pH presenta gran importancia en la biodisponibilidad del Cr.

Zhou Zichen et al., (2019, p.2), en su estudio de investigación “Eliminación de elementos formadores de oxianión de suelos contaminados mediante sorción combinada en hierro Zero-Valent (ZVI) y separación magnética: arsénico y cromo como estudios de caso”, Dando como resultado, que > 73% de la concentración inicial de As total y > El 92% del Cr se transfirió de suelos contaminados a partículas de ZVI, que luego se recuperaron mediante separación magnética con una eficiencia de recuperación de ZVI del 99%. El pH del suelo tuvo un papel importante en el control de la sorción de As y Cr en las partículas de ZVI. Las tasas de aplicación de ZVI (2,5% y 5%) afectaron la eliminación de Cr, pero no de As. Concluyendo que, además de reducir la contaminación por metales en el suelo y eliminar potencialmente la fitotoxicidad, esta combinación de sorción de metales en ZVI y recuperación por separación magnética también podría ayudar a pasar de la definición actual de

remediación a un nuevo paradigma, que se centraría en la recuperación de recursos metálicos.

Guan Xiaohong et al., (2019), en su investigación “Inmovilización mejorada de cromo (VI) en suelo utilizando hierro sulfurado de valencia cero”, se realizó pruebas por lotes para evaluar la influencia de la sulfuración en la remediación del Cr (VI) en el suelo por el hierro de valencia cero (ZVI). Obteniendo como resultado, que el análisis XPS mostró que la reducción era el principal mecanismo de remediación de Cr (VI) por ZVI, y los experimentos de extracción alcalina demostraron además que la concentración de Cr (VI) en el suelo podía reducirse de 153,6 mg / kg a 23,4 y 131,6 mg / kg por S-ZVI y ZVI, respectivamente. Concluyendo que, estos hallazgos destacaron el potencial de S-ZVI como una enmienda prometedora para inmovilizar Cr (VI) en el suelo y el potencial de separación magnética como una opción alternativa para prevenir la movilización de Cr secuestrado.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipos de investigación

El tipo de investigación aplicada, siendo descrito por Veland Siri., (2018, p.14) como aquella que busca dar solución a problemas específicos que acarrear a la sociedad, aplicando directamente los conocimientos adquiridos. Es así que en el presente estudio lo que se busca es estudiar las diversas literaturas científicas para adquirir conocimientos en la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados mediante la aplicación de materiales reductores.

La investigación usara un estudio cualitativo; de acuerdo con Salgado A. (2007, p.71), se busca entender y comprender un hecho en específico. Siendo esta investigación de estudio cualitativo, ya que, ningún hecho se dará como hecho, de lo contrario, se estudiará y se analizará los sucesos descritos por los autores.

El diseño es narrativo de tópico, ya que, el investigador se basa en el autor y las personas de su entorno, el cual todos participan en el desarrollo de la investigación (Blanco M., 2011, p.136). Esto debido a que la presente investigación se va tomar en cuenta los métodos experimentales generados por diferentes autores de las investigaciones que apliquen la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados mediante la aplicación de materiales reductores.

3.2. Categoría, Subcategoría y matriz de categorización apriorística

El presente estudio es planteado de acuerdo a los objetivos y problemas específicos en categorías y sub categorías; las cuales son detallados a continuación en la tabla N°2.

Tabla N° 2. Matriz de Categorización Apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Criterio 1	Criterio 1
Clasificar los materiales más usados como reductores de cromo (VI) a cromo (III)	¿Cuáles son los materiales más usados como reductores de cromo (VI) a cromo (III) ?	Materiales más usados como reductores (Zhu Fang et al., 2016, p.1).	-Residuos sólidos -Compost -Biochar	De acuerdo al tipos de material más usado	De acuerdo al material que presenta mejores resultado
Determinar los mecanismos de remediación de materiales reductores en suelos contaminados con cromo (VI)	¿Cuál es el mecanismo de remediación de materiales reductores en suelos contaminados con cromo (VI)?	Mecanismo de remediación de materiales reductores (Fernández Pablo Pablo M. et al., 2018, p.1).	-Por reducción abiótica del Cr(VI) a Cr(III) -Por reducción biótica -Por disminución del valor del potencial redox (Ma Shui et al., 2018, p.19)	De acuerdo al material empleado	De acuerdo al tipo de proceso
Identificar la eficiencia de aplicación de los materiales reductores más usados para la reducción de cromo (VI) a cromo (III)	¿Cuál es la eficiencia de aplicación de los materiales reductores más usados para la reducción de cromo (VI) a cromo (III)?	Eficiencia de aplicación de materiales reductores (Zhu Fang et al., 2016, p.1).	-Eficiencia alta -Eficiencia media -Eficiencia baja (Dong hongyu et al., 2019, p.5).	De acuerdo al porcentaje de remoción	De acuerdo al material reductor empleado

Elaboración propia

3.3. Escenario de estudio

El escenario de estudio es considerado los lugares donde se realizó los hechos o acontecimientos experimentales, siendo estos los laboratorios, universidades donde se realizaron las prácticas de reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados mediante la aplicación de materiales reductores; estos escenarios son mencionados en las diversas literaturas científicas añadidas al estudio.

3.4. Participantes

Los participantes tomados para este estudio son los portales web, bibliotecas electrónicas, que nos permite extraer y generar la indagación de diversos artículos científicos que nos servirá para solucionar los problemas planteados; siendo únicamente de interés los estudios enfocados en la reducción de cromo.

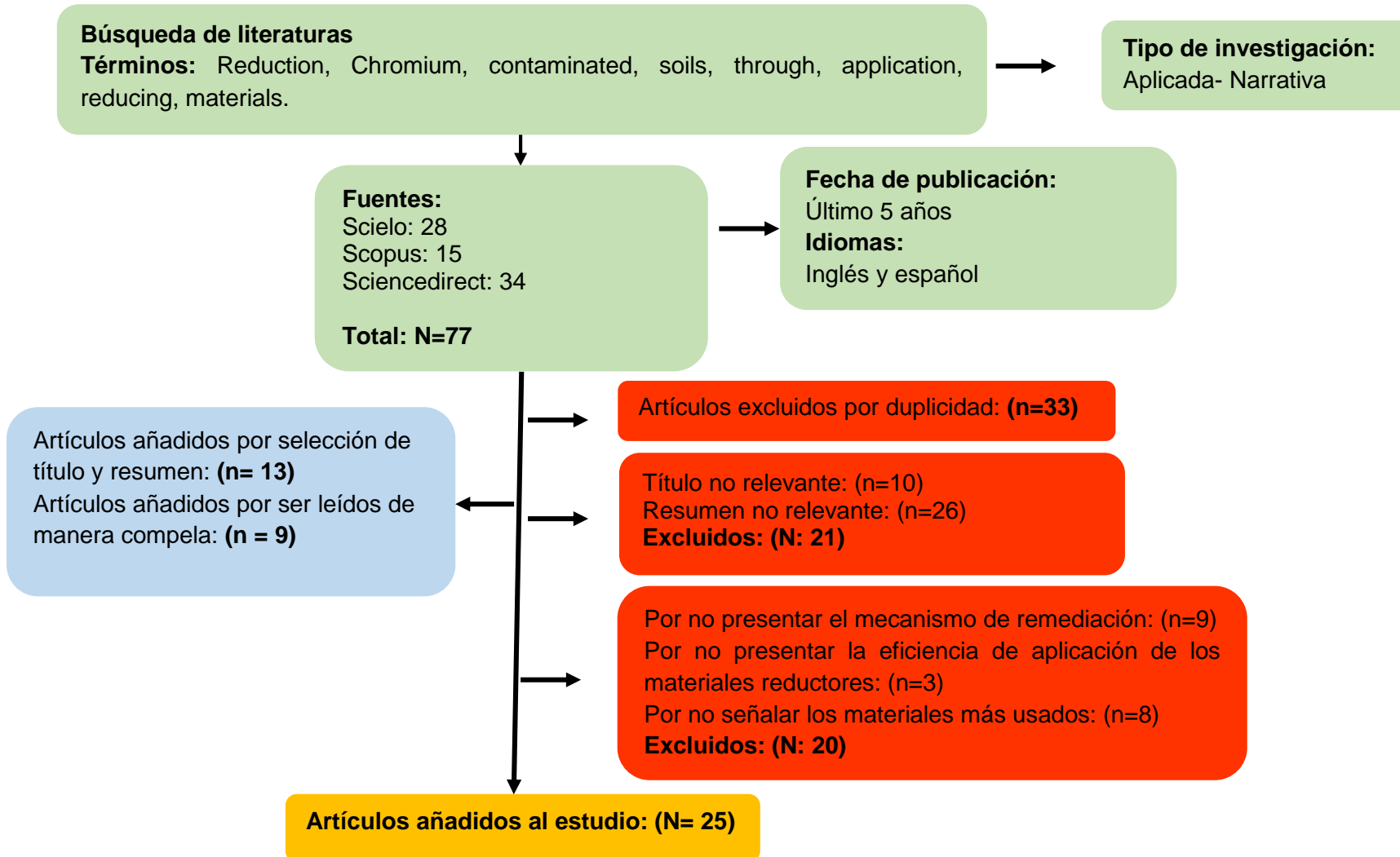
Entre los participantes usados se encuentran el Scielo, Scopus, Sciencedirect.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En el presente estudio e investigación se usará como técnica al análisis documental, y como instrumento de recolección de datos la ficha de análisis de contenido propuesta en el Anexo N°1. Esta técnica permite tener acceso a los documentos usados en el estudio y generar una búsqueda más rápida de ellos; para lo cual no se altera ninguna información y se plasma datos esenciales y más relevantes que permitan mediante la síntesis del contenido plasmarlas para los lectores. Esto es acoplado con la ficha de análisis; siendo este un documento en el cual se detallarán los datos: datos de autor, investigación, objetivos metodología, resultados, conclusiones.

3.6 Procedimientos

Gráfico N° 1: Procedimiento de selección de artículos



3.7. Rigor científico

El criterio de credibilidad es aquel que busca corroborar que los resultados presentados por el autor son parecidos o iguales a los presentados por otros autores; esto se obtiene con diversos argumentos que demuestran que la información brindada es correcta. Este criterio cumple con la calidad de las fuentes extraídas de cada uno de los investigadores.

La confirmabilidad, es el criterio por el cual el autor puede seguir la pista o ruta que dejó otro; para esto es necesario tener la documentación y registros completos de las decisiones e ideas que tuvo el investigador. Este criterio se consiguió detallando claramente la investigación, donde se detalla el tipo de metodología aplicada, así como los pasos seguidos para poder obtener los resultados encontrados.

La transferibilidad, es el poder expandir o llevar una investigación de un estudio a otros contextos; para esto se debe controlar y el tipo de muestreo, ya que de esto dependerá si se pueden comprar o no los resultados en otros contextos. Este criterio se cumple disponiendo de toda la información para que futuros investigadores puedan aplicar en nuevos estudios.

El criterio de consistencia o dependencia busca la estabilidad de la información entregado por el autor, y es un criterio de controversia debido a que la información que se extrae es de diferentes fuentes y difieren en la veracidad por lo cual se busca la mayor información posible. Este criterio se cumple mediante la aplicación y estudios experimentales donde se aplican contextos reales y únicos, con estos poder respaldar o avalar la información proporcionada, para así dar mayor veracidad a lo que se desea mostrar.

3.8. Método de análisis de información

El método de análisis es de triangulación, ya que, este hace que se pueda comparar, evaluar y/o pruebas múltiples.

Es así mediante la triangulación se aplicó la matriz apriorística la cual permite generar las categorías y las sub categorías.

Las categorías son:

- Materiales más usados como reductores
- Mecanismos de remediación
- Eficiencia de aplicación de materiales

3.9. Aspectos éticos

El presente estudio cumplió con la correcta redacción y referenciado mediante lo indicado en el manual de Referencias estilo ISO 690 y 690-2; así como los señalado por la Universidad Cesar Vallejo en la Resolución rectoral N° 0089-2019; así también se pasó por el programa turnitin, confirmando la veracidad y autenticidad de los datos brindados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Clasificación de los materiales más usados como reductores para la aplicación de la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados

Tabla N°3: Materiales más usados como reductores

Agentes reductores	Clasificación de los agentes reductores	Principales resultados	Referencia
Un residuo sólido municipal residuos orgánicos	MATERIALES ORGÁNICOS (7)	La concentración de Cr(VI) disminuyó de $65,9 \pm 2,5$, $96,3 \pm 6,0$ a $15,3 \pm 3,6$, $21,1 \pm 3,1$ mg kg ⁻¹ , respectivamente	Lacalle Rafael G. et al., 2020
Residuos sólidos de biogás		Provocó una reducción del 52,1% en la concentración de Cr(VI) del suelo	Song Zilin et al., 2019
Compost de lodos municipales lodos, estiércol de vaca y estiércol de pollo		La concentración de Cr(VI) después de 50 días de compostaje disminuyó a 62,25, 129,80 y 146,48 mg kg ⁻¹ , respectivamente	Chen Huixia et al., 2018
Biocarbón		La aplicación de biocarbón aumentó la reducción de Cr(VI) hasta 74,81 mg kg ⁻¹ en el suelo 1 (pH = 7,5) y 88,12 mg kg ⁻¹ en el suelo 2 (pH = 5,5)	Mandal Sanchita et al., 2017
Biocarbón y elemento S		Mostraron la máxima disminución de Cr(VI) ($2,0 \mu\text{g g}^{-1}$) en el suelo (S)	Bashir Muhammad A. et al., 2020
Biochar		Se presentó una disminución significativa del contenido de Cr soluble en los lixiviados y del contenido de Cr en las plantas	Rafique Muhammad I. et al., 2020
Estiércol y biocarbón		El estiércol y el biocarbón frenaron la tasa de aumento del	Liu Shibin et al., 2020

		Cr soluble en ácido en un 47% y un 55%, respectivamente	
Hierro Zero-Valent (nZVI)		La concentración de Cr disminuyó a 6,65 mg kg ⁻¹	Zhou Zichen et al., 2020
Hierro de valencia cero intetizado mediante molienda de bolas con azufre elemental (S-ZVI^{bm})		Secuestrar completamente el Cr(VI) soluble en agua en 3 horas	Guan Xiaohong et al., 2019
Carboximetilcelulosa compuesto con biocarbón (CMC-nZVI/BC)		La lixiviación de Cr(VI) y Cr total puede reducirse en un 100% y un 95,8% simultáneamente	Zhang R. et al., 2018
Carboximetilcelulosa con hierro nano-cero-valente anano escala y ácido húmico (CMC-nZVI-HA)		El Cr extraíble por HOAc disminuyó aproximadamente un 74,48%.	Hou Siyu et al., 2019
hierro de valencia cero a nanoescala soportado por biocarbón nZVI@BC	REDUCTORES CON HIERRO (FE) (12)	La eficiencia de inmovilización del Cr(VI) fue del 100%.	Sui Huijie et al., 2016
Valencia cero a nanoescala soportado por biocarbón de paja de maíz (nZVI)		La eficacia de la inmovilización fue significativamente inhibida en suelos alcalinos (pH 8,6-9,0), mientras que alcanzó más del 99% con un pH ajustado de 4,0 a 8,0	Wang Haixia et al., 2019
Biocarbón derivado de la cáscara de arroz con hierro de valencia cero a nanoescala (nZVI)		Una eliminación completa del Cr(VI) del suelo lixiviado en 120 minutos	Liu Xingyu et al., 2020
Hierro de valencia cero a nanoescala (nZVI) soportado sobre residuo de vinagre (nZVI@VR)		La eficiencia de inmovilización del Cr(VI) y del Cr total fue del 98,68% y del 92,09%, respectivamente	Pei Guangpeng et al., 2020
Ácido oxálico activado roca fosfórica y FeSO₄ o		Redujo rápidamente el Zn y el Cr(VI) extraíbles por TCLP por debajo de los	Zhao Ling et al., 2017

hierro de valencia cero (ZVI)		límites de la norma, con una disminución del 50% y 94%, respectivamente.
Sulfuro de Sodio (Na₂S)		La concentración de lixiviación de Cr(VI) disminuyó a 0,84 mg L Yuan Wenyi et al., 2018
Nanovalentes de hierro / Ni (nZVI/Ni)		La tasa de reducción del Cr(VI) podía alcanzar el 99,84% Zhu Fang et al., 2017
Nanovalentes de hierro / Ni (nZVI/Ni)		La tasa de eliminación podría alcanzar el 99,36% He Siying et al., 2018
Polisulfuro de calcio (CPS)		La concentración de lixiviación de Cr(VI) disminuyó a 0,51 mg L-1 Yuan Wenyi et al., 2019
FeSO₄ Na₂HSO₃ Na₂S Na₂S₂O₃		Estos cuatro productos químicos pueden reducir el Cr ⁶⁺ del suelo a menos de 5 mg kg ⁻¹ con una tasa de eliminación de más del 99%. Lu Xiaohui et al., 2019
Nanopartículas sintéticas de sulfuro de hierro (FeS NP) estabilizadas con carboximetilcelulosa (CMC) / (CMC-nFeS)	REDUCCIÓN CON AZUFRE (S) (6)	El Cr(VI) lixiviado por TCLP disminuyó hasta un nivel aceptable de 46,8-80,7 µg L ⁻¹ después del tratamiento. Wang Ta et al., 2019
Sulfuro ferroso a nanoescala estabilizado con carboximetilcelulosa de sodio (CMC-nFeS)		La capacidad reductora de CMC-nFeS fue 54,68-198,74 mg Cr(VI) g ⁻¹ FeS Li Xin et al., 2020
pirita de hierro amorfa (FeS₂)		La concentración de Cr(VI) disminuyó a 61,0, 19,8 y 2,38 mg kg ⁻¹ respectivamente Li Yunyi et al., 2020
Sulfuro de hierro (FeS) a microescala estabilizadas con carboximetilcelulosa (CMC) / (CMC-mFeS)		Alrededor del 98% del Cr(VI) en el suelo se redujo en 3 días y la concentración de Cr(VI) disminuyó a 16 mg kg ⁻¹ Li yujie et al., 2017

Elaboración propia

De acuerdo a la revisión sistemática de 25 artículos científicos para identificar y clasificar los agentes reductores más empleados de Cr (VI) a Cr (III), nos demuestra que la adición de los reductores con Fe (12) son los más empleado; seguido de las enmiendas orgánicas (7) y los compuestos a base de S (6), siendo los materiales que más se usan entre los 25 estudios encontrados a nivel mundial, para inmovilizar y reducir la contaminación del suelo por Cr (VI) a Cr (III).

Lo que es corroborado por: Zhou Zichen et al., 2020, Guan Xiaohong et al., 2019, Zhang R. et al., 2018, Hou Siyu et al., 2019, Sui Huijie et al., 2016, Wang Haixia et al., 2019, Liu Xingyu et al., 2020, Pei Guangpeng et al., 2020, Zhao Ling et al., 2017, Yuan Wenyi et al., 2018, Zhu Fang et al., 2017, He Siying et al., 2018.

Los reductores con hierro son los más empleados debido a su fuerte capacidad reductora, su alta actividad de reacción y su excelente rendimiento de adsorción, el hierro de valor cero (ZVI) ha sido considerado como un material extremadamente prometedor para remediar los suelos contaminados con Cr(VI) (Rabbani M. et al., 2016, p.2).

El azufre se utiliza tradicionalmente para suministrar nutrientes que estimulen el crecimiento de las plantas en los suelos agrícolas y es altamente redox activo y tiene el potencial de fijar el suelo contaminado con Cr(VI) reduciendo el Cr(VI) a Cr(III) (Yuan Wenyi et al., 2019). Siendo ello respaldado por Wang Ta et al., (2019), quien empleo en azufre como nanopartículas sintéticas de sulfuro de hierro (FeS NP) estabilizadas con carboximetilcelulosa (CMC) / (CMC-nFeS), presentando reducción del Cr(VI) lixiviado por TCLP hasta un nivel aceptable de 46,8- 80,7 µg/L después del tratamiento.

Pero, los resultados son rechazados por Rafique Muhammad I. et al., (2020), quien afirma que las enmiendas orgánicas en suelos contaminados con Cr(VI) pueden promover la reducción del Cr(VI) y al ser respetuosas con el medio ambiente, poco costosas e incluso poder obtenerse a partir de residuos orgánicos.

Ello es corroborado por Song et al., (2019), quien en su artículo de investigación emplea el uso potencial de residuos sólidos de biogás (BSR) de la digestión anaeróbica como una enmienda efectiva para disminuir la biodisponibilidad de Cr en suelos contaminados con Cr (VI) utilizando experimentos en macetas.

Por su parte Chen Huixia et al., (2018), afirma que debido al alto contenido de materia orgánica (MO) y de carbono orgánico total (COT), varios elementos nutritivos (por ejemplo, N, P, K), así como diversos microorganismos en los materiales orgánicos y todos ello pueden afectar al efecto de inmovilización del suelo contaminado con Cr(VI), es que, son considerados como más apropiados para su uso en la reducción de Cr (VI).

Por ejemplo, Lacalle Rafael G. et al., (2020) en la tabla 3, utilizó como material de agente reductor residuo orgánico sólido municipal; donde la enmienda orgánica causó una reducción significativa de las concentraciones de Cr(VI) en el suelo contaminado con Cr, que se disminuyó por debajo de 25 mg/kg.

Además, la aplicación de enmiendas orgánicas también es buena para la salud del suelo, como el aumento de la biomasa microbiana del suelo, la actividad y la diversidad funcional, así como los niveles de nutrientes del suelo (Aldmour S. et al., 2019, p.3).

4.2. Determinación de los mecanismos de remediación de materiales reductores en suelos contaminados con cromo (VI)

Tabla N°4: Mecanismos de remediación

Mecanismos	Reducción abiótica	Reducción biótica	Disminución del valor
Descripción	En cuanto a la reducción abiótica, el Cr(VI) puede ser reducido directamente por materias orgánicas, en las que los grupos funcionales ricos en electrones (por ejemplo, grupos fenólicos, hidroxilos, carboxilos y aldehídos) desempeñan un papel importante en la reducción del Cr(VI) y la subsiguiente adsorción de Cr (Aldmour et al., 2019, p.2)	Este tipo de mecanismo es la reducción biótica de los microorganismos estimulada por el sustrato de carbono (Yuan Lizhu et al., 2016, p.3).	La disminución del valor del potencial redox del suelo es el tipo de mecanismo que induce la reducción del Cr(VI); ello se puede dar mediante la adición de enmiendas orgánicas bioestabilizadas y la incorporación de sustancias húmicas al suelo, favoreciendo la reducción de Cr

			(VI) (Hou et al., 2019, p.4)
Fuentes	Lacalle Rafael G. et al., 2020, Song Zilin et al., 2019, Chen Huixia et al., 2018, Liu Shibin et al., 2020, Pei Guangpeng et al., 2020, Wang Ta et al., 2019, Li Xin et al., 2020, Li yujie et al., 2017, Hou Siyu et al., 2019	Mandal Sanchita et al., 2017, Zhang R. et al., Bashir Muhammad A. et al., 2020, 2018, Rafique Muhammad I. et al., 2020, Hou Siyu et al., 2019, Sui Huijie et al., 2016, Wang Haixia et al., 2019, Liu Xingyu et al., 2020, Zhang R. et al., 2018	Zhou Zichen et al., 2020, Guan Xiaohong et al., 2019, Zhao Ling et al., 2017, Yuan Wenyi et al., 2018, Yuan Wenyi et al., 2019, Lu Xiaohui et al., 2019, Li Yunyi et al., 2020, Zhu Fang et al., 2017 y He Siying et al., 2018

Elaboración propia

Por otro lado, se determinó que son tres los mecanismos de remediación de materiales reductores en suelos contaminados con cromo (VI), siendo estos la reducción abiótica del Cr(VI) a Cr(III) al proporcionar una fuente de electrones donantes, la reducción biótica de los microorganismos estimulada por el sustrato de carbono y, por último, la disminución del valor del potencial redox del suelo que induce la reducción del Cr(VI), como se observa en la tabla 4.

Ello es corroborado por He X., Zhong P. y Qiu X., (2018, p.3) quien afirma que las especies de Fe(II) adsorbidas en las superficies de la goethita generadas a través de la reducción de los óxidos de hierro por el S(-II) podían acelerar la transformación de los electrones al Cr(VI) adsorbido, y el potencial redox del Fe(II) adsorbido era menor que el de las especies comunes de Fe(II), lo que facilitaba la reducción del Cr(VI) por el CPS

Es así también, confirmado por Liu Shibin et al., (2020), quien en su estudio afirma que la reducción del potencial redox causada por la enmienda orgánica bioestabilizada y la incorporación de sustancias húmicas al suelo favorecieron la reducción del Cr(VI) a Cr(III).

Pero también, Song Zilin et al., (2019), afirma que el uso de residuos sólidos de biogás, la fracción sólida después de la digestión anaeróbica, compuesta por grandes

cantidades de materia orgánica, se ha utilizado para remediar el suelo contaminado con Cr(VI).

4.3. Identificación de la eficiencia de aplicación de los materiales reductores más usados para la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados

Tabla N°5: Materiales más usados como reductores

Agentes reductores	Concentración inicial de Cr (VI) total:	Dosis de agente reductor	de	Reducción de Cr (VI)	Referencia
Un residuo orgánico municipal sólido	300 mg/kg	10, (w/w)	20%	La concentración de Cr(VI) disminuyó de 65,9 ± 2,5, 96,3 ± 6,0 a 15,3 ± 3,6, 21,1 ± 3,1 mg/kg , respectivamente	Lacalle Rafael G. et al., 2020
Residuos sólidos de biogás	300 mg/kg	150 g/kg		52,1%	Song Zilin et al., 2019
Compost de lodos municipales lodos, estiércol de vaca y estiércol de pollo	2629 mg/kg	150 g/kg		Después de 50 días de compostaje disminuyó a 62,25, 129,80 y 146,48 mg/kg , respectivamente	Chen Huixia et al., 2018
Biocarbón	100 mg/kg	5%(w/w)		74,81 mg/kg en el suelo 1 (pH = 7,5) y 88,12 mg/kg en el suelo 2 (pH = 5,5)	Mandal Sanchita et al., 2017
Biocarbón y elemento en suelo con S	Cr(VI) total: 12,45 ± 1,02 mg/kg (suelo K)	BC:3% ES: 6 g/kg		2,0 µg/g	Bashir Muhammad A. et al., 2020
	Cr(VI) total: 18,62 ± 1,29 mg/kg (suelo S)				

Biochar	918 ± 83.84 mg kg ⁻¹	50 g/kg	Se presentó una disminución significativa del contenido de Cr soluble en los lixiviados y del contenido de Cr en las plantas	Rafique Muhammad I. et al., 2020
Estiércol y biocarbón	150 ± 36.12 mg/kg	8.97 g/kg 7.0 g/kg	47% y un 55%	Liu Shibin et al., 2020
Hierro Zero-Valent (nZVI)	85.76 mg/kg	2.5% (w/w)	6,65 mg/kg	Zhou Zichen et al., 2020
Hierro de valencia cero intetizado mediante molienda de bolas con azufre elemental (S-ZVI^{bm})	17.5 mg/L	5% (w/w)	Secuestrar completamente el Cr(VI) soluble en agua en 3 horas	Guan Xiaohong et al., 2019
Carboximetilcelulosa compuesto con biocarbón (CMC-nZVI/BC)	800 mg/kg	5 mg/g	100% y un 95,8% simultáneamente	Zhang R. et al., 2018
Carboximetilcelulosa con hierro nanocero-valente anano escala y ácido húmico (CMC-nZVI-HA)	110 ± 0.18 mg/kg	30 mg/g	74,48%	Hou Siyu et al., 2019
Hierro de valencia cero a nanoescala soportado por biocarbón nZVI@BC	Cr. total 800 mg kg ⁻¹ Cr(VI) total: 320 mg/kg	8 mg/g	100%	Sui Huijie et al., 2016
Valencia cero a nanoescala soportado por biocarbón de paja de maíz (nZVI)	341 mg/kg	40 mg/g	99% con un pH ajustado de 4,0 a 8,0	Wang Haixia et al., 2019
Biocarbón derivado de la cáscara de arroz con hierro de valencia cero a nanoescala (nZVI)	Cr(VI) total: 795 mg/kg Cr(VI) lixiviado: 62,4 mg/L	8%–10%	100% en 120 minutos	Liu Xingyu et al., 2020
Hierro de valencia cero a nanoescala (nZVI) soportado	387.27 mg/kg	50 mg/g	Cr(VI)= 98,68% Cr total= 92,09%	Pei Guangpen et al., 2020

sobre residuo de vinagre (nZVI@VR)					
Ácido oxálico activado fosfórico y FeSO₄ o hierro de valencia cero (ZVI)	2175 mg/kg	5,0% (p/p)	50% y 94%		Zhao Ling et al., 2017
Sulfuro de Sodio (Na₂S)	Cr(VI) total: 13806,4 mg/kg Cr(VI) lixiviado: 663,98 mg/L	5%		Disminuyó 0,84 mg/L 98%	Yuan Wenyi et al., 2018
Polisulfuro de calcio (CPS)	115 mg/L	3%		Cr(VI) disminuyó a 0,51 mg/L 95%	Yuan Wenyi et al., 2019
FeSO₄ Na₂HSO₃ Na₂S Na₂S₂O₃	Cr: 2239.59 mg/kg Cr(VI): 1915.41 mg/kg	5% 5% 5%		Tasa de eliminación de más del 99%. Dejando a 5 mg/kg el contenido	Lu Xiaohui et al., 2019
Nanopartículas sintéticas de sulfuro de hierro (FeS NP) estabilizadas con carboximetilcelulosa (CMC) / (CMC-nFeS)	Cr(VI) total: 204,84 mg/kg Cr(VI) lixiviado por TCLP: 4,58 mg/L	104.0 mg/L		Disminuyó hasta un nivel aceptable de 46,8- 80,7 µg/L después del tratamiento.	Wang Ta et al., 2019
Sulfuro ferroso a nanoescala estabilizado con carboximetilcelulosa de sodio (CMC-nFeS)	56.01–502.21 mg/kg	0,1 g/L (relación suelo/solución solución de 1 g:1 mL)		La capacidad reductora de CMC-nFeS fue 54,68-198,74 mg/kg Cr(VI) FeS	Li Xin et al., 2020
pirita de hierro amorfa (FeS₂)	Cr:284,5 mg/kg Cr(VI):106,2 mg/kg	No indica		Disminuyó a 61,0, 19,8 y 2,38 mg/kg respectivamente	Li Yunyi et al., 2020
Sulfuro de hierro (FeS) a microescala estabilizadas con carboximetilcelulosa (CMC) / (CMC-mFeS)	Cr(VI): 1407 mg/kg Cr: 2089 mg/kg	Relación molar de FeS a Cr(VI):1,5:1		98% en 3 días, disminuyó a 16 mg/kg	Li yujie et al., 2017

Nanovalentes de hierro / Ni (nZVI/Ni)	de	120 mg/kg	1 mg/g	99,84%	Zhu Fang et al., 2017
Nanovalentes de hierro / Ni (nZVI/Ni)	de	118.55 mg/kg	50 mg/g	99,36%	He Siying et al., 2018

Elaboración propia

De acuerdo con los datos obtenidos en la tabla 5, se tiene que los materiales reductores de Cr (VI) a Cr (III) presentan una eficiencia de reducción mayor al 90% en su mayoría; siendo ello demostrado por los 25 investigadores estudiados.

Es así, que se demuestra que, en los materiales reductores con materia orgánica, aunque presentan resultados prometedores requieren de un mayor tiempo de empleo; siendo así demostrado por

Chen Huixia et al., (2018), quien requirió un tiempo de 50 días, con la aplicación del compostaje disminuyendo a 62,25, 129,80 y 146,48 mg/kg, respectivamente del Cr hexavalente, habiendo señalado que la concentración inicial del Cr en el suelo fue de 2629 mg/kg. Lo que es rechazado por Chen Huixia et al., (2018), quien afirma en su artículo científico, que los resultados demostraron que el suelo contaminado con Cr (VI) se puede co-compostar con éxito y esta práctica da como resultado cambios significativos en la disponibilidad de Cr; lo que lleva a proporcionar un método para remediar el suelo contaminado con Cr (VI) a través de la disminución de la biodisponibilidad de Cr y la unión entre las fracciones disponibles de Cr y sustancias similares a las húmicas.

Siendo la afirmación anterior también respaldada por Lacalle Rafael G. et al., (2020), señalando que, a diferencia de la presencia de la enmienda orgánica, la nanorremediación con nZVI no era una opción válida para suelos contaminados con Cr (VI) en condiciones experimentales.

Mientras que la reducción por aplicación de materiales con S o Fe presentan mayores porcentajes de reducción del Cr (VI) en los resultados mostrados en la tabla 5, mayores a 90% en su mayoría y en un menor tiempo; como lo demuestra Li yujie et al., (2017), quien aplicó Sulfuro de hierro (FeS) a microescala estabilizadas con carboximetilcelulosa (CMC) / (CMC-mFeS), y alrededor del 98% del Cr(VI) en el suelo se redujo en 3 días y la concentración de Cr(VI) disminuyó a 16 mg kg⁻¹.

Ello también es apoyado por Liu Xingyu et al., (2020), quien afirma que con biocarbón derivado de la cáscara de arroz con hierro de valencia cero a nanoescala (nZVI), se obtiene una eliminación completa del Cr(VI) al 100%, del suelo lixiviado del en 120 minutos.

Así también, Sui Huijie et al., (2016), presentó un porcentaje de reducción de Cr (VI) del 100% usando hierro de valencia cero a nanoescala soportado por biocarbón nZVI@BC. al igual que Zhang R. et al., (2018), con un 100% y un 95,8% simultáneamente usando Carboximetilcelulosa compuesto con biocarbón (CMC-nZVI/BC).

V. CONCLUSIONES

Se puede concluir que los aspectos más relevantes de la aplicación de materiales reductores usados para la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados se encuentran enfocados en el mecanismo de remediación que usan cada tipo de reductores y las eficiencias de eliminación; donde se detalla cada uno en los siguientes puntos:

1. Los materiales más usados como reductores para la aplicación de la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados son la adición de los reductores con Fe, seguido de las enmiendas orgánicas y los compuestos a base de S; siendo estos los materiales que más se usan entre los 25 estudios encontrados a nivel mundial. Ello debido a que los reductores con hierro son los más empleados debido a su fuerte capacidad reductora, su alta actividad de reacción y su excelente rendimiento de adsorción, el azufre por la estimulación que genera en el crecimiento de las plantas en los suelos agrícolas y es altamente redox activo y tiene el potencial de fijar el suelo contaminado con Cr(VI) reduciendo el Cr(VI) a Cr(III).
2. Los mecanismos de remediación de materiales reductores en suelos contaminados con cromo (VI) son 3, siendo estos la reducción abiótica del Cr(VI) a Cr(III) al proporcionar una fuente de electrones donantes, la reducción biótica de los microorganismos estimulada por el sustrato de carbono y, por último, la disminución del valor del potencial redox del suelo que induce la reducción del Cr(VI).
3. La eficiencia de aplicación de los materiales reductores más usados para la reducción de cromo (VI) a cromo (III) en suelos contaminados presentan una eficiencia de reducción mayor al 90% en su mayoría; y los materiales reductores con materia orgánica, aunque presentan resultados prometedores requieren de un mayor tiempo de empleo; siendo así demostrado por la diferencia de la reducción por aplicación de materiales con S o Fe quienes presentan mayores porcentajes de reducción del Cr (VI) mayores a 90% en su mayoría y en un menor tiempo.

VI. RECOMENDACIONES

En base a la revisión realizada se puede recomendar los siguientes puntos:

1. Desarrollar nuevos materiales reductores basados en las características del suelo contaminado con Cr(VI).
2. Es necesario aplicar materiales reductores de Cr que presenten un menor tiempo ya que los reductores con Fe y a base de S aunque presentan menor tiempo en comparación de los materiales orgánicos sigue siendo un tiempo largo; debido a ello se requiere de estrategia prometedora para acortar en gran medida el tiempo de recuperación.
3. Se recomienda también tomar en cuenta la estabilidad a largo plazo del Cr(III) reducido en el suelo restaurado debido a que este puede reoxidarse a Cr(VI) y migrar de nuevo con el cambio de las condiciones ambientales externas.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALDMOUR, Suha T., et al. Abiotic reduction of Cr (VI) by humic acids derived from peat and lignite: kinetics and removal mechanism. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no 5, p. 4717-4729. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3902-1>
2. ALIDOKHT, Leila, et al. Stabilization of chromium (VI) by hydroxysulfate green rust in chromium (VI)-contaminated soils. *Pedosphere*, 2021, vol. 31, no 4, p. 645-657. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60009-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60009-7)
3. AMBI, A. A., et al. Hexavalent chromium bioremediation using Hibiscus Sabdariffa calyces extract: Process parameters, kinetics and thermodynamics. *Scientific African*, 2020, vol. 10, p. e00642. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00642>
4. APLER, Anna, et al. Distribution and dispersal of metals in contaminated fibrous sediments of industrial origin. *Chemosphere*, 2019, vol. 215, p. 470-481. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.040>
5. ASHRAF, Anam, et al. Chromium (VI) sorption efficiency of acid-activated banana peel over organo-montmorillonite in aqueous solutions. *International journal of phytoremediation*, 2017, vol. 19, no 7, p. 605-613. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1256372>
6. AZEEZ, Nazeer Abdul, et al. Nano-remediation of toxic heavy metal contamination: Hexavalent chromium [Cr (VI)]. *Chemosphere*, 2021, vol. 266, p. 129204. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129204>
7. BALLESTEROS, S., et al. Vitrification of urban soil contamination by hexavalent chromium. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 174, p. 132-139. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.011>
8. BASHIR, Muhammad Asaad, et al. Combined application of biochar and sulfur regulated growth, physiological, antioxidant responses and Cr removal capacity of maize (*Zea mays* L.) in tannery polluted soils. *Journal of environmental management*, 2020, vol. 259, p. 110051. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110051>

9. CHEN, Huixia; DOU, Junfeng; XU, Hongbin. Remediation of Cr (VI)-contaminated soil with co-composting of three different biomass solid wastes. *Journal of soils and sediments*, 2018, vol. 18, no 3, p. 897-905. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1811-4>
10. CHEN, Xilu, et al. Application of nanoscale zero-valent iron in hexavalent chromium-contaminated soil: A review. *Nanotechnology Reviews*, 2020, vol. 9, no 1, p. 736-750. Disponible en: <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0059>
11. COETZEE, Johan J.; BANSAL, Neetu; CHIRWA, Evans MN. Chromium in environment, its toxic effect from chromite-mining and ferrochrome industries, and its possible bioremediation. *Exposure and health*, 2020, vol. 12, no 1, p. 51-62. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12403-018-0284-z>
12. DÁVALOS, Andrés Agustín Beltrán, et al. Potencial de *Zantedeschia aethiopica* L. para la rehabilitación de suelos contaminados con cromo hexavalente en zonas alto andinas de Ecuador. *Acta Agronómica*, 2019, vol. 68, no 2, p. 92-98. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/acag.v68n2.77859>
13. DENG, Ning, et al. Coprecipitation of Fe/Cr Hydroxides with Organics: Roles of Organic Properties in Composition and Stability of the Coprecipitates. *Environmental Science & Technology*, 2021, vol. 55, no 8, p. 4638-4647. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04712>
14. DING, Weixuan, et al. Role of an organic carbon-rich soil and Fe (III) reduction in reducing the toxicity and environmental mobility of chromium (VI) at a COPR disposal site. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 541, p. 1191-1199. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.150>
15. DONG, Hongyu, et al. Insights into the oxidation of organic cocontaminants during Cr (VI) reduction by sulfite: the overlooked significance of Cr (V). *Environmental science & technology*, 2019, vol. 54, no 2, p. 1157-1166. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03356>
16. FAN, Xianfang, et al. Peak chromium pollution in summer and winter caused by high mobility of chromium in sediment of a eutrophic lake: in situ evidence from high spatiotemporal sampling. *Environmental science & technology*, 2019,

- vol. 53, no 9, p. 4755-4764. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07060>
17. FERNÁNDEZ, Pablo M., et al. Bioremediation strategies for chromium removal: current research, scale-up approach and future perspectives. *Chemosphere*, 2018, vol. 208, p. 139-148. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.166>
18. FU, Rongbing, et al. Fast and highly efficient removal of chromium (VI) using humus-supported nanoscale zero-valent iron: influencing factors, kinetics and mechanism. *Separation and Purification Technology*, 2017, vol. 174, p. 362-371. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.058>
19. GUAN, Xiaohong, et al. Enhanced immobilization of chromium (VI) in soil using sulfidated zero-valent iron. *Chemosphere*, 2019, vol. 228, p. 370-376. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.132>
20. HE, Siying, et al. Box–Behnken design for the optimization of the removal of Cr (VI) in soil leachate using nZVI/Ni bimetallic particles. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2018, vol. 27, no 8, p. 658-673. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15320383.2018.1502744>
21. HE, Xin; ZHONG, Pei; QIU, Xinhong. Remediation of hexavalent chromium in contaminated soil by Fe (II)-Al layered double hydroxide. *Chemosphere*, 2018, vol. 210, p. 1157-1166. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.048>
22. HERRERA-YARI, Carlos, et al. Determination of the parameters for photocatalytic degradation from Chromium hexavalent to Chromium trivalent in a solar parabolic cylindrical concentrator in a simulated sample from tanning. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 21, p. 101299. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101299>
23. HERNÁNDEZ-MACEDO, Maria Lucila, et al. Environmental biotechnology: challenges and perspectives in applying combined technologies to enhance remediation and renewable energy generation. *Revista Peruana de Biología*, 2020, vol. 27, no 1, p. 43-48. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.15381/rpb.v27i1.17578>

24. HOU, Siyu, et al. Remediation performance and mechanism of hexavalent chromium in alkaline soil using multi-layer loaded nano-zero-valent iron. *Environmental pollution*, 2019, vol. 252, p. 553-561. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.083>
25. HSU, Liang-Ching; LIU, Yu-Ting; TZOU, Yu-Min. Comparison of the spectroscopic speciation and chemical fractionation of chromium in contaminated paddy soils. *Journal of hazardous materials*, 2015, vol. 296, p. 230-238. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.044>
26. JAFARIAN, ABDOLREZA; JAFARIAN, Susan. Geogenic and anthropogenic chromium contamination in groundwater in an ophiolitic area, northeastern Iran. *Univers J Geosci*, 2017, vol. 5, p. 183-190.
27. JONES, Athena S., et al. Arsenic, copper, and chromium from treated wood products in the US disposal sector. *Waste management*, 2019, vol. 87, p. 731-740. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.004>
28. LACALLE, Rafael G.; GARBISU, Carlos; BECERRIL, José M. Effects of the application of an organic amendment and nanoscale zero-valent iron particles on soil Cr (VI) remediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, no 25, p. 31726-31736. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09449-x>
29. LI, Xin, et al. Characteristics and long-term effects of stabilized nanoscale ferrous sulfide immobilized hexavalent chromium in soil. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 389, p. 122089. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122089>
30. LI, Yujie, et al. Remediation of hexavalent chromium spiked soil by using synthesized iron sulfide particles. *Chemosphere*, 2017, vol. 169, p. 131-138. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.060>
31. LI, Yunyi, et al. Remediation of hexavalent chromium in contaminated soil using amorphous iron pyrite: Effect on leachability, bioaccessibility, phytotoxicity and long-term stability. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 264, p. 114804. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114804>

32. LIU, Lianwen, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 633, p. 206-219. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
33. LIU, Shibin, et al. Comparable effects of manure and its biochar on reducing soil Cr bioavailability and narrowing the rhizosphere extent of enzyme activities. *Environment international*, 2020, vol. 134, p. 105277. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105277>
34. LIU, Xiaolei, et al. Effects of citrate on hexavalent chromium reduction by structural Fe (II) in nontronite. *Journal of hazardous materials*, 2018, vol. 343, p. 245-254. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.038>
35. LIU, Xingyu, et al. Pyrolytic production of zerovalent iron nanoparticles supported on rice husk-derived biochar: simple, in situ synthesis and use for remediation of Cr (VI)-polluted soils. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 708, p. 134479. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134479>
36. LU, Xiaohui, et al. Reduction and Stabilization remediation of Hexavalent Chromium (Cr⁶⁺)-contaminated soil. *Ekoloji*, 2019, vol. 28, no 107, p. 973-980.
37. MA, Shuai, et al. Hematite enhances the removal of Cr (VI) by *Bacillus subtilis* BSn5 from aquatic environment. *Chemosphere*, 2018, vol. 208, p. 579-585. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.037>
38. MAHRINGER, Daniel, et al. Pilot scale hexavalent chromium removal with reduction, coagulation, filtration and biological iron oxidation. *Separation and Purification Technology*, 2020, vol. 253, p. 117478. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117478>
39. MANDAL, Sanchita, et al. Enhancement of chromate reduction in soils by surface modified biochar. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 186, p. 277-284. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.05.034>
40. NAZAROVA, Tatiana, et al. In Situ Biostimulation of Cr (VI) Reduction in a Fast-Flowing Oxidic Aquifer. *ACS earth and space chemistry*, 2020, vol. 4, no 11, p.

2018-2030. Disponible en:
<https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00200>

41. PEI, Guangpeng, et al. Vinegar residue supported nanoscale zero-valent iron: Remediation of hexavalent chromium in soil. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 256, p. 113407. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113407>
42. PENG, Hao, et al. High-efficient recovery of chromium (VI) with lead sulfate. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2018, vol. 85, p. 149-154. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.028>
43. QIAN, Ao, et al. Cr (VI) Formation from Cr x Fe_{1-x} (OH)₃ Induced by Mn (II) Oxidation on the Surface of Cr x Fe_{1-x} (OH)₃. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2020, vol. 4, no 9, p. 1558-1564. Disponible en:
<https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00142>
44. QIAN, Ao, et al. Geochemical stability of dissolved Mn (III) in the presence of pyrophosphate as a model ligand: Complexation and disproportionation. *Environmental science & technology*, 2019, vol. 53, no 10, p. 5768-5777. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00498>
45. RABBANI, Mohammad Mahbub; AHMED, Imteaz; PARK, Soo-Jin. Application of nanotechnology to remediate contaminated soils. En *Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils*. Springer, Tokyo, 2016. p. 219-229. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-4-431-55759-3_10
46. RAFIQ, Marina, et al. Comparative effect of calcium and EDTA on arsenic uptake and physiological attributes of *Pisum sativum*. *International journal of phytoremediation*, 2017, vol. 19, no 7, p. 662-669. Disponible en:
<https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1278426>
47. RAFIQUE, Muhammad Imran, et al. In situ immobilization of Cr and its availability to maize plants in tannery waste-contaminated soil: effects of biochar feedstock and pyrolysis temperature. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, no 1, p. 330-339. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02399-z>

48. REALE, L., et al. Cyto-histological and morpho-physiological responses of common duckweed (*Lemna minor* L.) to chromium. *Chemosphere*, 2016, vol. 145, p. 98-105. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.11.047>
49. SAHOO, Shraban Ku; HOTA, G. Functionalization of graphene oxide with metal oxide nanomaterials: synthesis and applications for the removal of inorganic, toxic, environmental pollutants from water. En *Handbook of Functionalized Nanomaterials for Industrial Applications*. Elsevier, 2020. p. 299-326. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816787-8.00012-0>
50. SHAHID, Muhammad, et al. Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: a review. *Chemosphere*, 2017, vol. 178, p. 513-533. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.074>
51. SHAHID, Muhammad, et al. Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* Volume 241, 2016, p. 73-137. Disponible en: https://doi.org/10.1007/398_2016_8
52. SONG, Zilin, et al. Use of biogas solid residue from anaerobic digestion as an effective amendment to remediate Cr (VI)-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no 13, p. 13041-13053. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04786-y>
53. SU, Huijie, et al. Stabilisation of nanoscale zero-valent iron with biochar for enhanced transport and in-situ remediation of hexavalent chromium in soil. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 214, p. 94-100. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.072>
54. SU, Huijie, et al. Stabilisation of nanoscale zero-valent iron with biochar for enhanced transport and in-situ remediation of hexavalent chromium in soil. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 214, p. 94-100. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.072>


55. TAN, Hang, et al. Bioreduction and biosorption of Cr (VI) by a novel *Bacillus* sp. CRB-B1 strain. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 386, p. 121628. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121628>
56. VARADHARAJAN, Charuleka, et al. Reoxidation of chromium (III) products formed under different biogeochemical regimes. *Environmental science & technology*, 2017, vol. 51, no 9, p. 4918-4927. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b06044>
57. VESELSKÁ, Veronika, et al. Chromate adsorption on selected soil minerals: surface complexation modeling coupled with spectroscopic investigation. *Journal of hazardous materials*, 2016, vol. 318, p. 433-442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.07.002>
58. VILLEN-GUZMAN, Maria, et al. Scaling-up the acid-enhanced electrokinetic remediation of a real contaminated soil. *Electrochimica Acta*, 2015, vol. 181, p. 139-145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.02.067>
59. WANG, Haixia; ZHANG, Mingliang; LI, Hongyi. Synthesis of nanoscale zerovalent iron (nZVI) supported on biochar for chromium remediation from aqueous solution and soil. *International journal of environmental research and public health*, 2019, vol. 16, no 22, p. 4430. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph16224430>
60. WANG, Tao, et al. In-situ remediation of hexavalent chromium contaminated groundwater and saturated soil using stabilized iron sulfide nanoparticles. *Journal of environmental management*, 2019, vol. 231, p. 679-686. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.085>
61. XIA, Shaopan, et al. Characteristics and applications of biochar for remediating Cr (VI)-contaminated soils and wastewater. *Environmental geochemistry and health*, 2020, vol. 42, no 6, p. 1543-1567. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00445-w>
62. XIA, Shaopan, et al. Characteristics and applications of biochar for remediating Cr (VI)-contaminated soils and wastewater. *Environmental geochemistry and health*, 2020, vol. 42, no 6, p. 1543-1567. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00445-w>

63. XIA, Xian, et al. Microbial Cd (II) and Cr (VI) resistance mechanisms and application in bioremediation. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 401, p. 123685. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123685>
64. YANG, Yonglin, et al. Effect of incineration temperature on chromium speciation in real chromium-rich tannery sludge under air atmosphere. *Environmental research*, 2020, vol. 183, p. 109159. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109159>
65. YUAN, Wenyi, et al. Rapid Cr (VI) reduction and immobilization in contaminated soil by mechanochemical treatment with calcium polysulfide. *Chemosphere*, 2019, vol. 227, p. 657-661. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.108>
66. ZHENG, Chujing, et al. Application of biochars in the remediation of chromium contamination: Fabrication, mechanisms, and interfering species. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, vol. 407, p. 124376. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124376>
67. ZHOU, Zichen, et al. Removal of oxyanion forming elements from contaminated soils through combined sorption onto zero-valent iron (ZVI) and magnetic separation: Arsenic and chromium as case studies. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2020, vol. 29, no 2, p. 180-191. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1696279>
68. ZHUANG, Maoqiang, et al. Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in vegetables from mining area in Shandong, China. *Chemosphere*, 2017, vol. 168, p. 578-582. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.023>
69. YANG, Zhihui, et al. Reductive materials for remediation of hexavalent chromium contaminated soil—A review. *Science of The Total Environment*, 2021, p. 145654. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145654>
70. YUAN, Lizhu, et al. The influence of macroelements on energy consumption during periodic power electrokinetic remediation of heavy metals contaminated

- black soil. *Electrochimica Acta*, 2017, vol. 235, p. 604-612. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.142>
71. YUAN, Lizhu, et al. Development of novel assisting agents for the electrokinetic remediation of heavy metal-contaminated kaolin. *Electrochimica Acta*, 2016, vol. 218, p. 140-148. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.09.121>
72. YUAN, Wenyi, et al. Mechanochemical treatment of Cr (VI) contaminated soil using a sodium sulfide coupled solidification/stabilization process. *Chemosphere*, 2018, vol. 212, p. 540-547. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.121>
73. ZHANG, Haibo, et al. Chromium speciation in the size-fractions of a soil polluted by weathered chromate ore process residue using synchrotron X-ray analysis. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 2019, vol. 103, no 1, p. 3-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2399-0>
74. ZHANG, Jishi, et al. Removal behaviors and mechanisms of hexavalent chromium from aqueous solution by cephalosporin residue and derived chars. *Bioresource technology*, 2017, vol. 238, p. 484-491. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.081>
75. ZHANG, Runyuan; ZHANG, Nuanqin; FANG, Zhanqiang. In situ remediation of hexavalent chromium contaminated soil by CMC-stabilized nanoscale zero-valent iron composited with biochar. *Water Science and Technology*, 2018, vol. 77, no 6, p. 1622-1631. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wst.2018.039>
76. ZHAO, Ling, et al. Development of phosphate rock integrated with iron amendment for simultaneous immobilization of Zn and Cr (VI) in an electroplating contaminated soil. *Chemosphere*, 2017, vol. 182, p. 15-21. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.004>
77. ZHOU, Jiangmin, et al. Chemical pretreatment of rice straw biochar: effect on biochar properties and hexavalent chromium adsorption. *International Journal of Environmental Research*, 2019, vol. 13, no 1, p. 91-105. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0156-1>

78. ZHOU, Zichen, et al. Removal of oxyanion forming elements from contaminated soils through combined sorption onto zero-valent iron (ZVI) and magnetic separation: Arsenic and chromium as case studies. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2020, vol. 29, no 2, p. 180-191. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1696279>
79. ZHU, Fang, et al. Effect factors, kinetics and thermodynamics of remediation in the chromium contaminated soils by nanoscale zero valent Fe/Cu bimetallic particles. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 302, p. 663-669. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.05.072>
80. ZHU, Fang, et al. Effect of pH, temperature, humic acid and coexisting anions on reduction of Cr (VI) in the soil leachate by nZVI/Ni bimetal material. *Environmental pollution*, 2017, vol. 227, p. 444-450. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.04.074>

ANEXOS N° 1:

		FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO	
DATOS DEL AUTOR: NOMBRE(S)			
PAGINAS UTILIZADAS		AÑO DE PUBLICACION	LUGAR DE PUBLICACION
TIPO DE INVESTIGACION:			
CÓDIGO:			
PALABRAS CLAVES :		Reduction, Chromium, contaminated, soils, through, application, reducing, materials.	
MATERIALES MAS USADOS COMO REDUCTORES			
MECANISMO DE REMEDIACION			
EFICIENCIA DE APLICACIÓN DE MATERIALES REDUCTORES			
RESULTADOS :			
CONCLUSIONES:			

Elaboración propia



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

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

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, UGARTE ALVAN CARLOS ALFREDO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - LIMA ESTE, asesor de Tesis titulada: "REDUCCIÓN DE CROMO (VI) A CROMO (III) EN SUELOS CONTAMINADOS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MATERIALES REDUCTORES: REVISIÓN SISTEMÁTICA", cuyos autores son MAMANI LAURA MERICA, MENDOZA JUSTO JORDY, constato que la investigación cumple con el índice de similitud establecido, y 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, 27 de Abril del 2022

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
UGARTE ALVAN CARLOS ALFREDO DNI: 10473562 ORCID 0000-0001-6017-1192	Firmado digitalmente por: CUGARTEA el 27-04- 2022 10:43:47

Código documento Trilce: TRI - 0298134