CIENCIA INTERDISCIPLINARIA INTERNACIONAL

ISSN: 3121-2948

Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

DOI: https://doi.org/10.70577/cieninter.v4i4.158

Fitorremediación de suelos mineros con especies vegetales nativas de la región andina: una revisión sistemática

Phytoremediation of mining soils with native plant species of the andean region: a systematic review

Víctor Hugo Rodríguez Masabanda[1]

Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE

vicvic2244@gmail.com

https://orcid.org/0009-0002-3719-3961

Cómo citar	Fecha de recepción: 2026-10-09
Rodríguez Masabanda, V. H. (2026). Fitorremediación de suelos mineros con especies vegetales nativas de la región andina: una revisión sistemática. *Ciencia Interdisciplinaria Internacional*,*4*(4),151–169. https://doi.org/10.70577/cieninter.v4i4.158	Fecha de aceptación: 2026-10-23 Fecha de publicación: 2026-11-06

CIENCIA INTERDISCIPLINARIA INTERNACIONAL
ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

RESUMEN

Los pasivos ambientales mineros de la región andina concentran metales y metaloides en suelos donde crecen especies nativas, pero la evidencia sobre su potencial de fitorremediación está dispersa. El objetivo de esta revisión fue sintetizar la evidencia sobre el potencial de fitorremediación de especies vegetales nativas de la región andina en suelos contaminados por actividad minera, a partir de la acumulación y traslocación de Pb, Cd, Hg, As, Cu y Zn. Se realizó una revisión sistemática reportada según PRISMA 2020, con búsqueda en Scopus de artículos publicados en español o inglés desde 2010. Se incluyeron experimentos y muestreos de campo realizados en los siete países andinos con especies verificadas como nativas en Plants of the World Online. El riesgo de sesgo se evaluó con el CEE Critical Appraisal Tool en los experimentos y con una lista adaptada en los muestreos, y la síntesis fue narrativa y estructurada según SWiM. Se incluyeron 12 estudios (14 reportes) de Perú, Ecuador, Argentina y Chile: nueve muestreos de campo y tres experimentos. El Pb mostró índices de bioconcentración menores que 1 en la mayoría de los estudios, mientras que el Cd y el Zn presentaron índices mayores que 1 en cinco de siete y cinco de ocho muestreos, respectivamente. *Erato polymnioides* mostró potencial para Cd, Zn y Hg en dos muestreos independientes. En los experimentos, la traslocación elevada no siempre se acompañó de bioconcentración; *Werneria nubigena* mostró potencial de fitoextracción de Cd, Cu y Zn, y *Lupinus ballianus* retuvo Cd en la raíz con un BCF de 5,97. La identificación taxonómica y la información analítica fueron las principales fuentes de riesgo de sesgo. La evidencia indica potencial de acumulación, sobre todo para Cd y Zn, sin eficacia demostrada, por lo que se requieren ensayos de campo de mayor duración y un reporte estandarizado de los índices.

Palabras clave: Fitorremediación, especies nativas, metales pesados, relaves mineros, Andes, revisión sistemática.

ABSTRACT

Mining environmental liabilities in the Andean region concentrate metals and metalloids in soils colonized by native species, yet evidence on their phytoremediation potential remains scattered. This review aimed to synthesize the evidence on the phytoremediation potential of native Andean plant species in mining-contaminated soils, based on the accumulation and translocation of Pb, Cd, Hg, As, Cu, and Zn. A systematic review reported according to PRISMA 2020 was conducted, searching Scopus for articles published in Spanish or English since 2010. Experiments and field surveys conducted in the seven Andean countries with species verified as native in Plants of the World Online were included. Risk of bias was assessed with the CEE Critical Appraisal Tool for experiments and an adapted checklist for field surveys, and a structured narrative synthesis following SWiM was performed. Twelve studies (14 reports) from Peru, Ecuador, Argentina, and Chile were included: nine field surveys and three experiments. Pb showed bioconcentration factors below 1 in most studies, whereas Cd and Zn showed indices above 1 in five of seven and five of eight surveys, respectively. *Erato polymnioides* showed potential for Cd, Zn, and Hg in two independent surveys. In the experiments, high translocation was not always accompanied by bioconcentration; *Werneria nubigena* showed phytoextraction potential for Cd, Cu, and Zn, and *Lupinus ballianus* retained Cd in roots with a BCF of 5.97. Taxonomic identification and analytical reporting were the main sources of risk of bias. The evidence indicates accumulation potential, mainly for Cd and Zn, without demonstrated efficacy; longer field trials and standardized reporting of the indices are needed.

Keywords: Phytoremediation, native species, heavy metals, mine tailings, Andes, systematic review.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

INTRODUCCIÓN

La minería metálica ha sido un eje económico de los países andinos y, a la vez, una fuente persistente de contaminación del suelo. Los relaves, los desmontes y las instalaciones abandonadas liberan metales y metaloides que no se degradan y que pueden transferirse al agua, a los cultivos y a la fauna. En Perú, Cruzado-Tafur et al. (2021) reportan cerca de 8448 pasivos ambientales mineros inventariados en 2019, concentrados en regiones altoandinas como Áncash, Cajamarca, Junín, Pasco y Puno, y consideran insuficientes los esfuerzos para remediarlos. Frente a las técnicas convencionales, la fitorremediación se presenta como una alternativa de bajo costo aplicable in situ. En ese marco, las especies nativas despiertan un interés particular, porque están adaptadas al clima local y, al crecer de forma espontánea sobre residuos contaminados, ya han mostrado tolerancia al exceso de metales.

El potencial de una planta para remediar un suelo depende del órgano donde acumula el elemento. En la fitoextracción, la planta absorbe el metal y lo traslada a la parte aérea, que luego puede cosecharse; en la fitoestabilización, lo retiene en la raíz y la rizósfera, lo que reduce su movilidad sin retirarlo del sitio. Ambos procesos suelen cuantificarse con el factor de bioconcentración (BCF), que relaciona la concentración en la planta con la del suelo, y con el factor de traslocación (TF), que compara la parte aérea con la raíz (Huang et al., 2025). Sin embargo, esos índices no son propiedades fijas de una especie. La misma síntesis global identificó concentraciones en el suelo, como 214,8 mg/kg para el cadmio, a partir de las cuales el BCF cae por debajo de 1 por efecto de la toxicidad. En el caso del plomo, D'Asaro y Landi (2026) observaron que la acumulación suele ser mayor en la raíz que en la parte aérea, lo que confirma una traslocación limitada.

Buena parte de la evidencia disponible procede de condiciones experimentales alejadas de los residuos mineros andinos. En su revisión sistemática sobre plomo, D'Asaro y Landi (2026) encontraron que el 76,36 % de los 55 estudios incluidos se realizó en Asia, en ensayos de maceta con suelos contaminados artificialmente, y concluyeron que la concentración total del metal no basta para predecir la eficiencia de la remediación. De manera coincidente, Huang et al. (2025) mostraron que el BCF y el TF tienden a ser mayores en suelos con contaminación histórica que en suelos contaminados recientemente, y que la capacidad de acumulación aumenta con la duración de la exposición. Con todo, ninguna de esas síntesis se centró en especies nativas ni en suelos de altura, donde la fuerte acidez de algunos residuos, con valores de pH inferiores a 4 en pasivos de Cajamarca (Cruzado-Tafur et al., 2021), condiciona la disponibilidad de los elementos. La transferibilidad de sus hallazgos a los pasivos andinos permanece, por tanto, poco examinada.

En la región andina se han publicado estudios primarios que evalúan especies nativas sobre residuos mineros, con resultados que dependen en buena medida del contexto. En el distrito de Hualgayoc, Cruzado-Tafur et al. (2021) analizaron 21 especies nativas y ninguna resultó apta para remediar Pb, Cu, As o Ag, aunque varias mostraron potencial para Cd y Zn; los autores observaron, además, que una especie presente también en una mina cercana de suelos básicos se comportó de forma distinta. En un ensayo de invernadero con relave minero, Jara-Peña et al. (2014) encontraron que *Fuertesimalva echinata* acumuló las mayores concentraciones de plomo y zinc en la raíz, un patrón que asociaron con la fitoestabilización. Martínez-Manchego et al. (2021),

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

por su parte, identificaron a *Cortaderia jubata*, *Baccharis* sp., *Stipa ichu* y *Juncus* sp. como las especies más abundantes en un depósito de relaves de Arequipa. La diversidad de especies, diseños y condiciones edáficas dificulta extraer conclusiones sin una síntesis ordenada.

Las síntesis previas sobre el tema ofrecen un panorama parcial. Bech et al. (2017) dedicaron un capítulo de libro a la acumulación de elementos peligrosos en suelos y plantas nativas de áreas mineras de Sudamérica, mientras que Múnera-Porras et al. (2025) revisaron de forma sistemática las plantas empleadas para descontaminar suelos colombianos, con siete artículos incluidos y distintos contaminantes, entre ellos hidrocarburos. No se identificó, en cambio, una revisión sistemática publicada en revista arbitrada que cubra los siete países andinos, verifique la condición nativa de cada especie, se limite a suelos con contaminación minera real y sintetice por separado experimentos y muestreos de campo con evaluación del riesgo de sesgo. En consecuencia, el objetivo de esta revisión fue sintetizar la evidencia sobre el potencial de fitorremediación de especies vegetales nativas de la región andina en suelos contaminados por actividad minera, a partir de la acumulación y traslocación de metales pesados reportadas en estudios experimentales y de muestreo en campo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Protocolo y registro

Esta revisión sistemática se reportó de acuerdo con la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021). El protocolo se elaboró siguiendo PRISMA-P (Shamseer et al., 2015) antes de ejecutar la búsqueda definitiva y se presenta como material suplementario; la revisión no se registró en una plataforma pública. Los cambios respecto al protocolo se documentaron con su fecha y su motivo, y se describen en las declaraciones finales.

Pregunta y criterios de elegibilidad

La pregunta se estructuró con el formato PICOS: ¿qué potencial de fitorremediación, expresado en la acumulación y traslocación de metales pesados, presentan las especies vegetales nativas de la región andina (I/E) en suelos contaminados por actividad minera (P), según estudios experimentales y de muestreo en campo (S)? No se exigió un comparador (C). Los resultados (O) fueron el BCF, el TF y la concentración de cada elemento en raíz y parte aérea.

El término “metal pesado” carece de una definición química autorizada (Duffus, 2002), por lo que se trabajó con una lista cerrada de seis elementos asociados a la minería andina: Pb, Cd, Hg, As, Cu y Zn. El arsénico se incluyó como metaloide. La Tabla 1 resume los criterios de inclusión y exclusión.

Tabla 1

Criterios de elegibilidad

Componente	Se incluyó	Se excluyó
Lugar	Sitios en la cordillera de los Andes (valles interandinos, páramo, puna y altiplano) de Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina	Minería de tierras bajas amazónicas o costeras
Suelo	Suelos o residuos con contaminación real de origen minero: relaves, pasivos, escombreras o suelos afectados por minería	Suelos contaminados artificialmente; contaminación industrial, urbana o por aguas residuales; agua, sedimentos o hidroponía

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Componente	Se incluyó	Se excluyó
Especies	Especies registradas como nativas del país del estudio	Especies exóticas o introducidas, aunque estén naturalizadas
Enmiendas	Al menos un tratamiento sin enmiendas ni inoculación microbiana	Estudios en los que todos los tratamientos llevan enmienda o inóculo
Resultados	Concentración de al menos uno de los seis elementos en tejido vegetal y en suelo, o BCF o TF reportados	Estudios que solo reportan la concentración en la planta
Diseño	Experimentos en maceta, invernadero o campo, y muestreos de plantas que crecen espontáneamente	Revisiones, capítulos de libro, actas, resúmenes de congreso y tesis
Idioma y periodo	Español e inglés, de 2010 a la fecha de la búsqueda	Otros idiomas y publicaciones anteriores a 2010

La condición nativa de cada especie se verificó con su distribución nativa en Plants of the World Online (POWO, 2026) y, cuando la especie no figuraba allí, con el catálogo nacional de flora del país. Las especies identificadas solo hasta género se incluyeron cuando el género era nativo del país y los autores las describían como nativas, y se examinaron en el análisis de sensibilidad. En los estudios que combinaban especies nativas y exóticas se extrajeron únicamente los datos de las nativas; en los que medían otros elementos, solo los de los seis seleccionados. De los estudios con varios tratamientos se extrajo el tratamiento sin enmienda ni inóculo. Se incluyeron los suelos afectados por fundiciones o plantas de beneficio ubicadas en la cordillera, por formar parte de la cadena minera; en Chile, se excluyeron por ubicación los relaves de la Cordillera de la Costa y del valle central.

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

Se buscó en Scopus el 30 de septiembre de 2026. El protocolo contemplaba también SciELO y la revisión de las listas de referencias de los estudios incluidos, pero la cadena prevista para SciELO no devolvió registros y ninguna de las dos búsquedas complementarias se ejecutó. El periodo se fijó desde 2010, para cubrir los últimos quince años de investigación andina. La búsqueda se documentó según PRISMA-S (Rethlefsen et al., 2021).

La ecuación combinó tres conceptos: fitorremediación e índices de acumulación, los seis elementos y la geografía andina. La condición nativa y el origen minero se aplicaron en el cribado, porque muchos resúmenes no los mencionan de forma explícita. Una primera versión no recuperó un estudio de calibración que cumplía los criterios (Cruzado-Tafur et al., 2021), porque el bloque de elementos no incluía términos genéricos ni símbolos químicos. La ecuación se corrigió en consecuencia, y la versión definitiva, reproducida a continuación, sí lo recuperó.

```
TITLE-ABS-KEY ( phytoremediat* OR phytoextract* OR phytostabili* OR phytomanag* OR
phytotechnolog* OR hyperaccumulat* OR metallophyt* OR "bioconcentration factor*" OR
"bioaccumulation factor*" OR "translocation factor*" OR "accumulator plant*" OR "accumulator
species" )
AND TITLE-ABS-KEY ( metal* OR metalloid* OR "trace element*" OR "potentially toxic element*" OR
lead OR cadmium OR mercury OR arsenic OR copper OR zinc OR Pb OR Cd OR Zn OR Cu OR Hg )
AND TITLE-ABS-KEY ( andes OR andean OR altiplano OR puna OR paramo OR venezuela* OR colombia*
OR ecuador* OR peru OR peruvian OR bolivia* OR chile* OR argentin* )
AND PUBYEAR > 2009 AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" )
OR LIMIT-TO ( LANGUAGE , "Spanish" ) )
```

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Selección de estudios

Los registros se importaron a una hoja de cálculo y los duplicados se eliminaron por DOI y título normalizado. Un revisor cribó todos los registros por título y resumen, y un segundo revisor verificó una muestra aleatoria del 20 %. El primer revisor evaluó los textos completos y el segundo verificó todas las exclusiones, que se registraron con su razón. Los desacuerdos se resolvieron por consenso y, cuando persistieron, el registro pasó a la etapa siguiente. Un asistente de inteligencia artificial (Claude, Anthropic) propuso las decisiones de cribado con la razón de cada exclusión; las decisiones finales las tomaron los revisores. Los textos completos se buscaron en acceso abierto y mediante acceso institucional, y los que no pudieron obtenerse se reportaron como no recuperados. Cuando varios artículos reportaban la misma investigación, se agruparon como un solo estudio con varios reportes, a partir de los autores, el sitio de muestreo y el año.

Extracción de datos

El asistente de inteligencia artificial propuso la extracción inicial en un formulario estandarizado, que un revisor revisó y el segundo verificó en su totalidad. No se contactó a los autores para obtener datos faltantes. Se registraron la identificación del estudio; el contexto (país, región, altitud, tipo de residuo y estado de la mina); las propiedades del suelo (pH, materia orgánica, concentración inicial de cada elemento y fracción usada para el BCF); la especie (nombre validado, familia, forma de vida y responsable de la identificación); el diseño (tipo, duración, réplicas y control); el método analítico (técnica, material de referencia certificado, lavado de raíces y base de expresión), y los resultados por especie, elemento y órgano. Los datos no reportados se registraron como tales y no se imputaron. Los datos leídos desde gráficos se obtuvieron con WebPlotDigitizer y se identificaron como tales.

Evaluación del riesgo de sesgo

Los experimentos se evaluaron con el CEE Critical Appraisal Tool, versión 0.3 (Konno et al., 2021), un prototipo de siete criterios desarrollado para estudios ambientales con pregunta comparativa. En los experimentos sin grupo de comparación, los criterios que dependían de ese grupo se registraron como no aplicables. Los muestreos de campo se evaluaron con una lista de verificación elaborada para esta revisión y no validada previamente, con siete criterios: diseño de muestreo, emparejamiento entre suelo y planta, caracterización del suelo, lavado de raíces, control de calidad analítico, identificación taxonómica y reporte completo de elementos y órganos. Cada criterio se juzgó como riesgo bajo, alto o poco claro, sin sumar puntajes globales. El asistente de inteligencia artificial propuso cada juicio con la cita textual que lo sustentaba; un revisor lo revisó y el segundo lo verificó.

Medidas de síntesis y preparación de datos

La métrica común fueron el BCF y el TF, definidos así, con C como concentración del elemento en mg/kg de peso seco:

$$\mathrm{BCF}_{\mathrm{raíz}} = C_{\mathrm{raíz}} / C_{\mathrm{suelo}}$$

$$\mathrm{BCF}_{\mathrm{aérea}} = C_{\mathrm{aérea}} / C_{\mathrm{suelo}}$$

$$\mathrm{TF} = C_{\mathrm{aérea}} / C_{\mathrm{raíz}}$$

Siguiendo el criterio aplicado en la literatura andina (Cruzado-Tafur et al., 2021), se consideró potencial de fitoextracción cuando el BCF y el TF fueron mayores que 1, y potencial de fitoestabilización cuando el BCF fue mayor que 1 y el TF menor que 1. Cuando un estudio reportó concentraciones sin

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

índices, estos se calcularon con las fórmulas anteriores. Las unidades se convirtieron a mg/kg de peso seco, y las concentraciones en peso fresco sin dato de humedad se excluyeron de la síntesis de índices. Los índices calculados con fracciones distintas del suelo (total o disponible) no se combinaron en la misma síntesis. Cuando un estudio incluía varios niveles de residuo, se extrajeron todos con la medición final, y la síntesis principal usó el nivel con mayor proporción de residuo.

Métodos de síntesis

No se realizó metaanálisis, porque las especies, los suelos y los diseños diferían entre estudios y los índices se publican con frecuencia sin medidas de dispersión. En su lugar, se realizó una síntesis narrativa estructurada según la guía SWiM (Campbell et al., 2020). Los estudios se agruparon primero por diseño (experimentos y muestreos) y, dentro de cada grupo, por elemento. Como los estudios informaron los índices en formatos heterogéneos, en lugar de medianas y rangos se sintetizó la clasificación del mecanismo reportada para cada especie y elemento, y se contó cuántos estudios reportaron al menos una especie con índices mayores que 1 para cada elemento. Los resultados se presentaron en tablas. La variabilidad se describió según el pH del suelo, el tipo de residuo y la altitud. Como análisis de sensibilidad, la clasificación de las especies se repitió excluyendo los estudios con alto riesgo de sesgo y las especies identificadas solo hasta género. Los estudios en suelos afectados por fundiciones o plantas de beneficio se analizaron, además, como subgrupo.

Sesgo de notificación y certeza de la evidencia

Para estimar el sesgo por resultados no reportados se compararon, en cada estudio, los elementos y órganos que los métodos declaraban haber analizado con los que se informaban en los resultados. La certeza de la evidencia no se evaluó con GRADE, porque ese enfoque se desarrolló para intervenciones en salud y no cuenta con una adaptación validada para índices de acumulación en plantas; la decisión se retoma en la discusión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

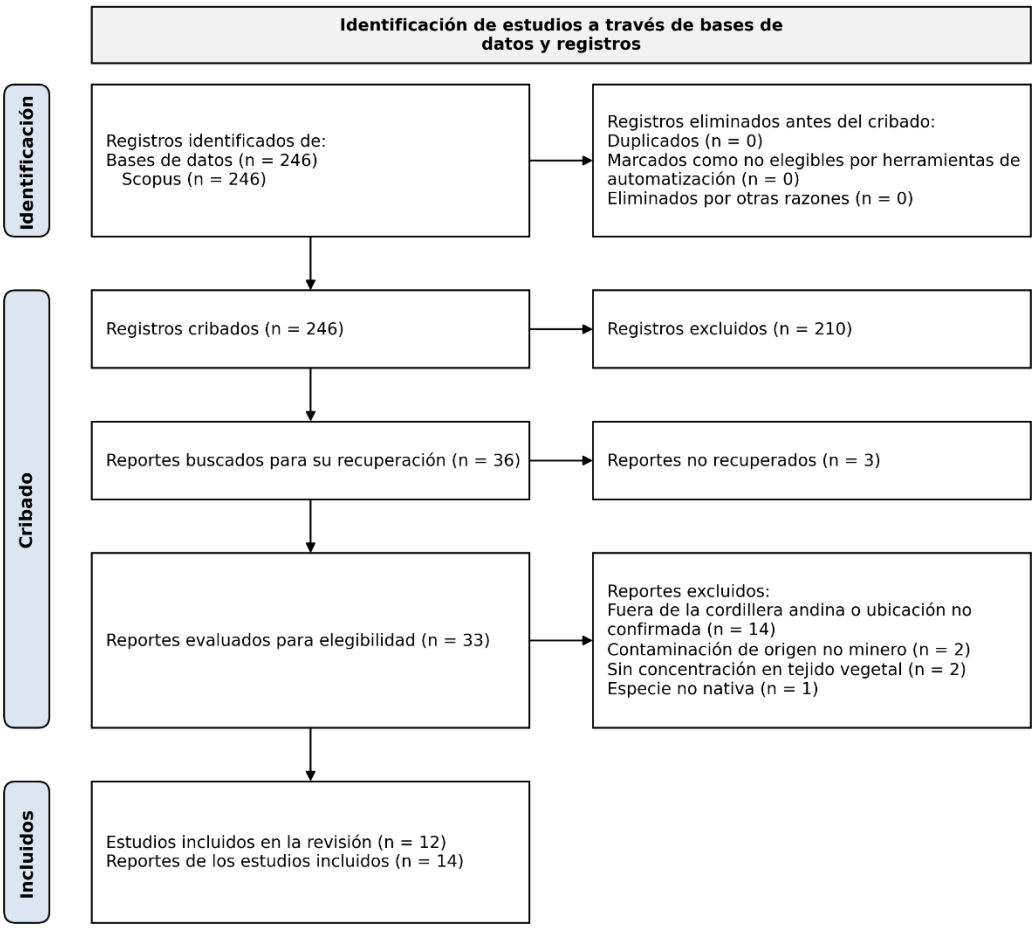
Selección de estudios

La búsqueda en Scopus identificó 246 registros, sin duplicados. En el cribado por título y resumen se excluyeron 210; las causas más frecuentes fueron una matriz no edáfica, como agua, sedimentos o hidroponía (n = 64), una ubicación fuera de la cordillera (n = 41), una contaminación de origen no minero (n = 32) y especies no nativas (n = 30). De los 36 reportes buscados, 3 no pudieron recuperarse. Se evaluaron 33 textos completos y se excluyeron 19: 14 por ubicación fuera de la cordillera o no confirmada en ella, 2 por contaminación de origen no minero, 2 por no reportar concentraciones en tejido vegetal y 1 por tratarse de especies no nativas. Se incluyeron 12 estudios descritos en 14 reportes, porque dos investigaciones se publicaron en dos artículos cada una: Bech et al. (2012a, 2012b) y Chamba et al. (2016, 2017) (Figura 1).

CIENCIA INTERDISCIPLINARIA INTERNACIONAL
ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020 de la selección de estudios



Nota. *Elaboración propia a partir del modelo de Page et al. (2021). Los 14 reportes incluidos corresponden a 12 estudios, porque Bech et al. (2012a, 2012b) y Chamba et al. (2016, 2017) publicaron cada uno su investigación en dos artículos.*

Características de los estudios

Los 12 estudios se publicaron entre 2012 y 2026 y se realizaron en Perú (n = 8), Ecuador (n = 2), Argentina (n = 1) y Chile (n = 1). Nueve fueron muestreos de plantas que crecían de forma espontánea o cultivada sobre suelos contaminados, y tres fueron experimentos: dos en invernadero con residuos mineros y uno de campo sobre un relave de cobre. En conjunto evaluaron más de 40 taxones nativos, además de pastos naturales sin identificación taxonómica. Las fuentes de contaminación fueron pasivos y relaves de minas polimetálicas, de cobre y de oro, minería histórica asociada al riego y emisiones de un complejo metalúrgico (Tabla 2).

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Tabla 2

Características de los estudios incluidos

Estudio	Diseño	País y sitio	Fuente de contaminación	Especies nativas	Elementos
Bech et al. (2012a, 2012b)	Muestreo	Perú, Cajamarca: mina polimetálica Carolina, Hualgayoc	Residuos de mina de Ag, Pb y Cu	*Plantago orbignyana*; *Lepidium bipinnatifidum*; *Baccharis latifolia*; *Bidens triplinervia*; *Senecio* sp.	As, Pb, Zn
Castro-Bedriñana et al. (2021)	Muestreo	Perú, Junín: pastizales cercanos a La Oroya	Complejo metalúrgico (subgrupo de fundición)	Pastos naturales sin identificar	Pb
Ccopi et al. (2026)	Muestreo	Perú, Junín: valle del Mantaro	Minería histórica y riego con agua del río Mantaro	*Solanum tuberosum*; *Chenopodium quinoa*	Cd, Pb, As, Cu, Zn, Hg
Chamba et al. (2016, 2017)	Muestreo	Ecuador, sur: zona aurífera artesanal	Minería aurífera artesanal	*Erato polymnioides*; *Miconia zamorensis*; *Axonopus compressus*	Pb, Zn, Cu, Cd, Hg
Chamba-Eras et al. (2022)	Muestreo	Ecuador, Zamora Chinchipe: distrito Chinapintza	Minería aurífera artesanal activa	*Erato polymnioides*; *Miconia* sp.	Cd, Pb, Zn, Hg
Chang Kee et al. (2018)	Experimento en invernadero (5 meses)	Perú, Áncash	Suelos de áreas con relaves	*Werneria nubigena*; *Calamagrostis recta* y otras nativas	Cd, Cu, Pb, Zn
Cruzado-Tafur et al. (2021)	Muestreo	Perú, Cajamarca: dos pasivos de Hualgayoc	Pasivos ambientales mineros	21 especies nativas	As, Cd, Cu, Pb, Zn
Heredia et al. (2022)	Muestreo	Argentina, San Juan: La Planta	Residuos de mina aurífera abandonada	*Larrea cuneifolia*; *Bulnesia retama*; *Plectrocarpa tetracantha*; *Prosopis flexuosa*	Zn, As, Cu, Cd
Jara-Peña et al. (2014)	Experimento en invernadero (12 meses)	Perú, Lima: Lachaqui, Canta (3668 m)	Relave polimetálico (30 a 100 %)	*Fuertesimalva echinata*; *Lupinus ballianus*; *Solanum nitidum*	Pb, Zn, Cd
Lam et al. (2017)	Experimento de campo (11 meses)	Chile, Antofagasta: relave de cobre a 3200 m	Relave de cobre posoperativo	*Prosopis tamarugo*; *Schinus molle*	Cu, Pb, Zn, Cd
Orellana Mendoza et al. (2021a)	Muestreo	Perú, Junín: meseta de Bombón	Actividad minera y metalúrgica	*Lepidium meyenii*	As, Cd, Pb, Zn
Orellana Mendoza et al. (2021b)	Muestreo	Perú, Huancavelica: pastizales a 3780 m	Minas abandonadas	Pastos naturales sin identificar	Cd, Pb, Zn

Riesgo de sesgo

En los experimentos, los juicios quedaron como poco claros en la mayoría de los criterios, porque los artículos describen poco la asignación de las unidades experimentales y el control de las condiciones (Tabla 3). En los muestreos, el criterio con más juicios de riesgo alto fue la identificación taxonómica, por la presencia de pastos sin identificar y de taxones determinados solo hasta género; el lavado de raíces y el control de calidad analítico quedaron como poco claros en la mayoría de los estudios (Tabla 4).

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Tabla 3

Riesgo de sesgo de los experimentos (CEE Critical Appraisal Tool)

Estudio	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Chang Kee et al. (2018)	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro
Jara-Peña et al. (2014)	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro
Lam et al. (2017)	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Bajo	Poco claro

Nota. *C1 a C7 corresponden a los siete criterios del instrumento (Konno et al., 2021).*

Tabla 4

Riesgo de sesgo de los muestreos de campo (lista adaptada)

Estudio	Diseño de muestreo	Emparejamiento	Suelo	Lavado de raíces	Control analítico	Taxonomía	Reporte completo
Bech et al. (2012a, 2012b)	Poco claro	Bajo	Bajo	Bajo	Poco claro	Alto	Bajo
Castro-Bedriñana et al. (2021)	Bajo	Bajo	Bajo	Poco claro	Poco claro	Alto	Bajo
Ccopi et al. (2026)	Bajo	Bajo	Poco claro	No aplica	Poco claro	Bajo	Bajo
Chamba et al. (2016, 2017)	Bajo	Bajo	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Bajo	Bajo
Chamba-Eras et al. (2022)	Bajo	Bajo	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Alto	Bajo
Cruzado-Tafur et al. (2021)	Bajo	Bajo	Bajo	Poco claro	Poco claro	Alto	Bajo
Heredia et al. (2022)	Bajo	Bajo	Poco claro	Poco claro	Poco claro	Bajo	Bajo
Orellana Mendoza et al. (2021a)	Poco claro	Bajo	Poco claro	No aplica	Poco claro	Bajo	Poco claro
Orellana Mendoza et al. (2021b)	Poco claro	Bajo	Poco claro	No aplica	Poco claro	Alto	Bajo

Síntesis de los experimentos

Los tres experimentos usaron residuos mineros reales y permitieron obtener índices para siete especies nativas (Tabla 5). En el relave de cobre de Antofagasta, sin enmiendas, *Prosopis tamarugo* y *Schinus molle* tuvieron BCF radiculares menores que 1 para Cu, Pb, Zn y Cd, aunque ambas mostraron TF mayores que 1 para varios de esos elementos (Lam et al., 2017). Esa combinación indica que la traslocación elevada, por sí sola, no equivale a potencial de fitoextracción cuando la absorción desde el sustrato es baja.

En invernadero, con relave polimetálico puro, las tres especies nativas evaluadas por Jara-Peña et al. (2014) acumularon los metales sobre todo en la raíz. Con las concentraciones del relave (2846 mg/kg de Pb, 3780 mg/kg de Zn y 48,1 mg/kg de Cd), los BCF radiculares calculados fueron menores que 1 para Pb y Zn en todas ellas, mientras que *Lupinus ballianus* alcanzó un BCF de 5,97 para Cd, un patrón de fitoestabilización. En suelos mineros de Áncash, *Werneria nubigena* mostró BAF de 1,92 para Cd, 1,20 para Cu y 3,50 para Zn, con TF mayores que 1 para los tres elementos, lo que corresponde a potencial de fitoextracción; *Calamagrostis recta*, en cambio, concentró Cd y Cu en la raíz (Chang Kee et al., 2018).

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Tabla 5

Índices de acumulación en los experimentos (BCF o BAF; TF)

Especie	Estudio	Cu	Pb	Zn	Cd	Lectura
Prosopis tamarugo	Lam et al. (2017), sin enmienda	0,08; 0,24	0,06; 0,86	0,09; 1,44	0,33; 1,13	Sin potencial (BCF < 1)
Schinus molle	Lam et al. (2017), sin enmienda	0,02; 2,78	0,05; 1,36	0,17; 1,22	0,42; n. d.	Sin potencial (BCF < 1)
Fuertesimalva echinata	Jara-Peña et al. (2014), 100 % de relave		0,71; < 1 (b)	0,27; < 1 (b)	0,23; < 1 (b)	Retención en raíz; BCF < 1
Lupinus ballianus	Jara-Peña et al. (2014), 100 % de relave		0,35; < 1 (b)	n. r.	5,97; < 1 (b)	Fitoestabilización de Cd
Solanum nitidum	Jara-Peña et al. (2014), 100 % de relave		0,20; < 1 (b)	0,11; < 1 (b)	0,18; < 1 (b)	Retención en raíz; BCF < 1
Werneria nubigena	Chang Kee et al. (2018)	1,20; 1,70 (a)	TF 1,17	3,50; 1,43 (a)	1,92; 2,36 (a)	Fitoextracción de Cd, Cu y Zn
Calamagrostis recta	Chang Kee et al. (2018)	BCF 1,80			BCF 1,09	Acumulación en raíz

Nota. *n. d.: no detectado; n. r.: no reportado para ese tratamiento. (a) BAF y TF reportados por los autores. (b) BCF calculado con la concentración en raíz y la concentración total del relave; TF menor que 1 según los autores, que informaron la mayor acumulación en la raíz. Las celdas vacías indican elementos no analizados o no extraídos.*

Síntesis de los muestreos de campo

Los muestreos informaron los índices en formatos heterogéneos, por lo que la síntesis se basó en la clasificación del mecanismo que cada estudio reportó para cada especie y elemento (Tabla 6). Al menos una especie mostró índices mayores que 1 en cinco de los siete muestreos que analizaron Cd, en cinco de los ocho que analizaron Zn, en tres de los cuatro que analizaron Cu, en dos de los tres que analizaron Hg y en uno de los cuatro que analizaron As. Para el Pb, la mayoría de los muestreos reportó BCF menores que 1.

Tabla 6

Mecanismo reportado por especie y elemento en los muestreos de campo

Especie	Estudio	Pb	Cd	Zn	Cu	As	Hg
Pastos naturales	Castro-Bedriñana et al. (2021)	BCF raíz 0,73; TF 0,13					
Pastos naturales	Orellana Mendoza et al. (2021b)	BAF 0,10	BAF 0,64	BAF 0,57			
Lepidium meyenii	Orellana Mendoza et al. (2021a)	BCF < 1	BCF < 1	BCF < 1		BCF < 1	
Plantago orbignyana; *Lepidium bipinnatifidum*; *Baccharis latifolia*	Bech et al. (2012a)	TF elevado (b)		TF elevado (b)		(b)	

CIENCIA INTERDISCIPLINARIA INTERNACIONAL
ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Especie	Estudio	Pb	Cd	Zn	Cu	As	Hg
Bidens triplinervia	Bech et al. (2012b)	Retención en raíz (TF y SAF < 1)		Retención en raíz (TF y SAF < 1)			
Senecio sp.	Bech et al. (2012b)	TF > 1; SAF < 1		TF > 1; SAF < 1			
Erato polymnioides	Chamba et al. (2016, 2017)	HA (c)	HA (c)	HA (c)	HA (c)		HA (c)
Erato polymnioides	Chamba-Eras et al. (2022)	SP	FE	FE			FE
Miconia sp.	Chamba-Eras et al. (2022)	SP	FS	FS			FE
Gaultheria glomerata; *Pernettya prostrata*; *Festuca* sp.	Cruzado-Tafur et al. (2021)	SP	FS (d)	FS (d)	SP	SP	
Otras once especies, como *Hypericum laricifolium* y *Nicotiana thyrsiflora*	Cruzado-Tafur et al. (2021)	SP	Apta (e)	Apta (e)	SP	SP	
Cuatro especies leñosas del Monte	Heredia et al. (2022)		BAF y TF > 1 (a)	BAF y TF > 1 (a)	BAF y TF > 1	BAF y TF > 1 (a)	
S. tuberosum; *C. quinoa*	Ccopi et al. (2026)	SP	BAF foliar > 1	BAF foliar > 1	BAF foliar > 1	SP	SP

Nota. *FE: fitoextracción; FS: fitoestabilización; HA: hiperacumuladora; SP: sin potencial; SAF: factor de acumulación en parte aérea. Las celdas vacías indican elementos no analizados. (a) Índices de los autores; no pudo verificarse el suelo de referencia usado en el cálculo. (b) El BCF no se reportó en la información extraída. (c) Clasificación de los autores a partir de un índice de acumulación, el BCF y el TF. (d) G. glomerata y Festuca sp. para Cd; G. glomerata y P. prostrata para Zn. (e) Apta para fitorremediación según los autores, sin especificar el mecanismo.*

El Pb mostró el patrón más homogéneo de baja bioconcentración. En los pastizales de La Oroya, su concentración media disminuyó del suelo a la raíz y de esta a la parte aérea (212,36; 154,65 y 19,71 mg/kg), con un BCF radicular de 0,73 y un TF de 0,13 (Castro-Bedriñana et al., 2021). En Hualgayoc, ninguna de 21 especies resultó apta para remediar Pb (Cruzado-Tafur et al., 2021), y *Bidens triplinervia* retuvo hasta 5180 mg/kg de Pb en la raíz (Bech et al., 2012b). Las excepciones fueron especies con traslocación muy elevada, como *Lepidium bipinnatifidum*, con un TF de 143 para Pb (Bech et al., 2012a), y *Erato polymnioides*, que sus autores clasificaron como hiperacumuladora (Chamba et al., 2016).

El Cd y el Zn concentraron la mayor parte de los resultados favorables. *Erato polymnioides* mostró potencial de fitoextracción de ambos elementos en dos muestreos independientes del sur de Ecuador (Chamba et al., 2016; Chamba-Eras et al., 2022). En Hualgayoc, *Gaultheria glomerata* y *Pernettya prostrata* se clasificaron como fitoestabilizadoras, y otras once especies como aptas para Cd, Zn o ambos (Cruzado-Tafur et al., 2021). La papa y la quinua mostraron BAF foliares mayores que 1 en el valle del Mantaro (Ccopi et al., 2026), mientras que la maca y los pastos de Huancavelica mantuvieron índices menores que 1 (Orellana Mendoza et al., 2021a, 2021b).

Para el Cu, tres de los cuatro muestreos que lo analizaron reportaron índices favorables en alguna especie (Chamba et al., 2016; Heredia et al., 2022; Ccopi et al., 2026). El Hg mostró potencial en los dos muestreos del sur de Ecuador (Chamba et al., 2017; Chamba-Eras et al., 2022), y el As solo en las especies de San Juan.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Los índices de San Juan requieren una lectura cautelosa. Los BAF mayores que 1 coexistieron con concentraciones máximas en el suelo muy superiores a las de la planta, de 6516 frente a 371 mg/kg de As y de 7123 frente a 1331 mg/kg de Zn. Los autores informaron concentraciones menores en el suelo rizosférico, pero no pudo verificarse con qué suelo se calcularon los índices, por lo que esos valores no se tomaron como evidencia concluyente (Heredia et al., 2022).

Análisis de sensibilidad

Al excluir los pastos sin identificar, los taxones determinados solo hasta género y los índices de San Juan, el potencial para Cd y Zn se sostuvo en *Erato polymnioides*, *Gaultheria glomerata*, *Pernettya prostrata*, la papa y la quinua, y el patrón de baja bioconcentración del Pb no cambió. El potencial para As desapareció. El subgrupo de fundición, formado por un único estudio, mostró la misma baja transferencia de Pb que el resto.

Sesgo de notificación

La comparación entre los elementos que los métodos declaraban haber analizado y los que se informaron en los resultados no mostró omisiones en los estudios cuyo texto completo se revisó en detalle (Jara-Peña et al., 2014; Lam et al., 2017; Orellana Mendoza et al., 2021b). En los demás, la información disponible no permitió completar esa comparación, por lo que el sesgo de notificación no pudo descartarse.

Interpretación de los hallazgos

La evidencia sobre especies nativas en suelos mineros andinos procede sobre todo de muestreos de campo en Perú, con solo tres experimentos. Dentro de ese marco, el hallazgo más homogéneo fue la baja bioconcentración de Pb, que se repitió en pastos, cultivos, arbustos y árboles de sitios muy distintos. El patrón coincide con la traslocación limitada del plomo que D'Asaro y Landi (2026) describieron a escala global. Las pocas especies con traslocación muy alta de Pb, como *Lepidium bipinnatifidum* (Bech et al., 2012a), crecían en suelos con concentraciones extremas, donde incluso una fracción pequeña del metal disponible produce contenidos foliares elevados. En conjunto, los resultados sugieren que, en los pasivos andinos dominados por plomo, la fitoestabilización es una expectativa más realista que la fitoextracción.

El Cd y el Zn mostraron, en cambio, un comportamiento dependiente de la especie. La candidata con evidencia más consistente fue *Erato polymnioides*, que acumuló ambos elementos en la parte aérea en dos muestreos independientes del sur de Ecuador (Chamba et al., 2016; Chamba-Eras et al., 2022), mientras que en el mismo distrito *Miconia* sp. los retuvo en la raíz. En Hualgayoc, las ericáceas *Gaultheria glomerata* y *Pernettya prostrata* se comportaron como fitoestabilizadoras (Cruzado-Tafur et al., 2021). Esa variabilidad es coherente con la síntesis global de Huang et al. (2025), que vinculó la eficiencia de acumulación con el tipo de planta, el pH y la concentración del suelo, y desaconseja extender el potencial de una especie a otras de su entorno.

Los experimentos aportan una advertencia metodológica. En el relave de Antofagasta, *Schinus molle* y *Prosopis tamarugo* mostraron TF mayores que 1 para varios metales, pero BCF radiculares muy por debajo de 1 (Lam et al., 2017). Un TF alto sin bioconcentración indica que la planta mueve hacia la parte aérea una fracción pequeña de lo que hay en el sustrato, de modo que clasificar especies como fitoextractoras a partir del TF aislado sobrestima su potencial. Esa lectura refuerza la necesidad de reportar ambos índices, como recomiendan D'Asaro y Landi

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

(2026). Los experimentos muestran, además, que la respuesta varía entre especies expuestas al mismo sustrato: en el relave de Canta, *Lupinus ballianus* concentró Cd en la raíz muy por encima del relave, mientras que las demás especies nativas mantuvieron BCF menores que 1 (Jara-Peña et al., 2014).

Los resultados en cultivos y pastos requieren una lectura distinta. El BAF foliar mayor que 1 de la papa y la quinua para Cd y Zn en el valle del Mantaro (Ccopi et al., 2026) apunta a un riesgo de transferencia de metales a la cadena alimentaria antes que a un uso remediador, y lo mismo vale para los pastos que consumen las alpacas en Huancavelica, aunque sus índices fueran menores que 1 (Orellana Mendoza et al., 2021b). En suelos agrícolas y de pastoreo influidos por la minería, el potencial de acumulación funciona, ante todo, como indicador de exposición.

Por último, ningún estudio evaluó la reducción de la contaminación del suelo a lo largo del tiempo, de modo que los resultados describen potencial, sin demostrar eficacia. La mayoría de los muestreos se realizó en suelos con contaminación histórica, condición en la que Huang et al. (2025) observaron índices más altos que en suelos contaminados recientemente. En consecuencia, los valores sintetizados podrían sobrestimar el desempeño de esas especies en la revegetación de relaves frescos.

Limitaciones de la evidencia

Varias limitaciones son propias de la literatura sobre el tema. El valor del BCF depende de la fracción del suelo con que se calcula: Cruzado-Tafur et al. (2021) lo estimaron con la concentración total y con la fracción potencialmente disponible, y obtuvieron lecturas distintas para una misma especie. De manera coincidente, D'Asaro y Landi (2026) advierten que la concentración total del metal no basta para predecir la eficiencia de la remediación. En los estudios incluidos, esas limitaciones se hicieron visibles: solo tres fueron experimentales, con duraciones de 5 a 12 meses, dos no identificaron las especies de pastos, varios determinaron taxones solo hasta género, algunos clasificaron el mecanismo con criterios distintos del BCF y del TF, y la fracción de suelo usada para los índices no siempre quedó clara. Además, la evidencia se concentra en Perú, con ocho de los doce estudios, y no incluyó ninguno de Colombia, Venezuela ni Bolivia. La ausencia de una evaluación formal de la certeza obliga, por último, a leer las conclusiones con cautela.

Limitaciones del proceso de revisión

El cribado y la extracción los realizó un revisor, con verificación parcial de un segundo en el cribado por título y resumen y verificación completa de las exclusiones y de los datos extraídos. Ese esquema reduce, aunque no elimina, el riesgo de omitir estudios elegibles o de cometer errores de extracción. La evaluación del riesgo de sesgo se apoyó en el CEE Critical Appraisal Tool (Konno et al., 2021), cuya versión 0.3 es todavía un prototipo en fase de prueba, y en una lista adaptada para los muestreos que no se validó antes de su uso. Tampoco se aplicó un sistema formal para graduar la certeza de la evidencia, por falta de un enfoque validado para índices de acumulación en plantas. Por último, la revisión no se registró en una plataforma pública, lo que impide verificar de forma externa que los métodos se definieron antes de la búsqueda.

El alcance de la búsqueda también impone límites. La búsqueda se limitó a Scopus y no se revisaron las listas de referencias de los estudios incluidos, lo que pudo omitir evidencia regional publicada en revistas no indexadas en esa base. El periodo desde 2010 dejó fuera estudios andinos anteriores. La primera versión

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

de la ecuación no recuperó un estudio de calibración y debió corregirse; aun así, pudo omitir estudios que no emplean términos de fitorremediación en el título, el resumen o las palabras clave. La exclusión de tesis deja fuera evidencia regional que no llega a publicarse en revistas y puede favorecer los estudios con resultados más llamativos. La restricción a la cordillera excluyó la minería amazónica y costera de los mismos países, cuyos suelos y especies difieren de los altoandinos. Por su parte, la verificación en Plants of the World Online (POWO, 2026) pudo excluir especies que la literatura local considera nativas y que la base registra como introducidas. El asistente de inteligencia artificial agilizó el cribado, la extracción y la evaluación del riesgo de sesgo, aunque la fiabilidad de sus propuestas depende de la verificación humana, que en el cribado por título y resumen fue parcial. Tampoco se contactó a los autores para recuperar datos faltantes. Por último, no se obtuvo el texto completo de tres reportes potencialmente elegibles, y dos estudios chilenos se excluyeron porque no pudo confirmarse que estuvieran en la cordillera; su incorporación podría modificar la síntesis.

Implicaciones

Para la investigación, la heterogeneidad de los reportes sugiere adoptar un estándar mínimo: indicar el tejido con que se calcula el BCF, la fracción del suelo empleada, la base de peso seco y las medidas de dispersión. En la misma línea, D'Asaro y Landi (2026) recomiendan integrar el factor de traslocación, los índices de bioacumulación y los indicadores de salud de la planta al valorar la remediación. Asimismo, la relación entre el tiempo de exposición y la capacidad de acumulación descrita por Huang et al. (2025) respalda la necesidad de ensayos de campo de mayor duración sobre residuos reales, en lugar de ensayos cortos con suelos enriquecidos.

Para la práctica, los resultados permiten orientar, con cautela, la selección de especies para ensayos piloto en planes de cierre de minas. *Erato polymnioides* aparece como la candidata con evidencia más consistente para suelos con Cd, Zn y Hg (Chamba et al., 2016; Chamba-Eras et al., 2022), y *Werneria nubigena* merece ensayos de campo por su potencial de fitoextracción de Cd, Cu y Zn en invernadero (Chang Kee et al., 2018). En pasivos dominados por Pb conviene priorizar especies que lo retengan en la raíz, como *Bidens triplinervia* o *Fuertesimalva echinata*, y para la estabilización de Cd, *Lupinus ballianus* (Jara-Peña et al., 2014). En el plano de la política pública, la acumulación observada en papa y quinua respalda el monitoreo de cultivos en zonas agrícolas cercanas a operaciones mineras (Ccopi et al., 2026).

CONCLUSIONES

La evidencia publicada desde 2010 sobre el potencial de fitorremediación de especies nativas en suelos mineros andinos procede sobre todo de muestreos de campo en Perú y cuenta con pocos experimentos. En ese conjunto, el Pb mostró en la mayoría de los estudios índices de bioconcentración menores que 1, mientras que el Cd y el Zn presentaron el potencial de acumulación más frecuente, con diferencias marcadas entre especies. *Erato polymnioides* destacó como la candidata con evidencia más consistente para la fitoextracción de Cd, Zn y Hg, y *Werneria nubigena* mostró potencial de fitoextracción de Cd, Cu y Zn en invernadero.

Estos hallazgos describen potencial y deben confirmarse con ensayos de campo de mayor duración, sobre residuos reales y con un reporte estandarizado que combine el BCF y el TF. Mientras tanto, la acumulación observada en cultivos andinos sobre

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

suelos influidos por la minería merece atención desde la seguridad alimentaria.

DECLARACIONES

Registro y protocolo. La revisión no se registró en una plataforma pública. El protocolo se presenta como material suplementario. Respecto a él hubo cuatro cambios. Primero, tras comprobar que el periodo inicial (desde 2021) reunía muy pocos estudios, el periodo se amplió a 2010, y la ecuación se corrigió porque no había recuperado el estudio de calibración. Segundo, se retiró la restricción de acceso abierto. Tercero, no se ejecutaron la búsqueda en SciELO ni la revisión de listas de referencias. Cuarto, la síntesis se basó en la clasificación del mecanismo reportada por cada estudio, en lugar de medianas y rangos, porque los índices se informaron en formatos heterogéneos.

Financiamiento. Esta revisión no recibió financiamiento.

Conflictos de interés. Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Disponibilidad de datos y materiales. Como material suplementario se presentan el protocolo, la ecuación de búsqueda con su fecha y conteo, las exportaciones de registros, el formulario de extracción y los datos extraídos, la lista de estudios excluidos con sus razones, las tablas de riesgo de sesgo, la hoja de cálculo usada para calcular el BCF y el TF, y el registro de cambios respecto al protocolo.

Uso de inteligencia artificial. En la preparación de este manuscrito se utilizó un asistente de inteligencia artificial (Claude, Anthropic) para apoyar la redacción y la organización del texto. Los autores revisaron el contenido y asumen la responsabilidad por él. El asistente se utilizó también para proponer las decisiones de cribado, la extracción de datos y los juicios de riesgo de sesgo, como se describe en la metodología.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bech, J., Duran, P., Roca, N., Poma, W., Sánchez, I., Barceló, J., Boluda, R., Roca-Pérez, L. y Poschenrieder, C. (2012a). Shoot accumulation of several trace elements in native plant species from contaminated soils in the Peruvian Andes. *Journal of Geochemical Exploration*, *113*, 106–111. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.04.007

Bech, J., Duran, P., Roca, N., Poma, W., Sánchez, I., Roca-Pérez, L., Boluda, R., Barceló, J. y Poschenrieder, C. (2012b). Accumulation of Pb and Zn in *Bidens triplinervia* and *Senecio* sp. spontaneous species from mine spoils in Peru and their potential use in phytoremediation. *Journal of Geochemical Exploration*, *123*, 109–113. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.06.021

Bech, J., Roca, N. y Tume, P. (2017). Hazardous element accumulation in soils and native plants in areas affected by mining activities in South America. En J. Bech, C. Bini y M. A. Pashkevich (Eds.), *Assessment, restoration and reclamation of mining influenced soils* (pp. 419–461). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809588-1.00016-5

Campbell, M., McKenzie, J. E., Sowden, A., Katikireddi, S. V., Brennan, S. E., Ellis, S., Hartmann-Boyce, J., Ryan, R., Shepperd, S., Thomas, J., Welch, V. y Thomson, H. (2020). Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: Reporting

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

guideline. *BMJ*, *368*, l6890. https://doi.org/10.1136/bmj.l6890

Castro-Bedriñana, J., Chirinos-Peinado, D., Garcia-Olarte, E. y Quispe-Ramos, R. (2021). Lead transfer in the soil-root-plant system in a highly contaminated Andean area. *PeerJ*, *9*, e10624. https://doi.org/10.7717/peerj.10624

Ccopi, D., Requena-Rojas, E., Ortega, K., Solórzano-Acosta, R., Révolo-Acevedo, R. y Pizarro, S. (2026). Bioaccumulation of heavy metals in high Andean crops of the Peruvian Andes: Comparative evaluation between irrigated and dry systems. *Journal of Agriculture and Food Research*, *25*, 102575. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102575

Chamba, I., Gazquez, M. J., Selvaraj, T., Calva, J., Toledo, J. J. y Armijos, C. (2016). Selection of a suitable plant for phytoremediation in mining artisanal zones. *International Journal of Phytoremediation*, *18*(9), 853–860. https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1156638

Chamba, I., Rosado, D., Kalinhoff, C., Thangaswamy, S., Sánchez-Rodríguez, A. y Gazquez, M. J. (2017). *Erato polymnioides*: A novel Hg hyperaccumulator plant in Ecuadorian rainforest acid soils with potential of microbe-associated phytoremediation. *Chemosphere*, *188*, 633–641. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.160

Chamba-Eras, I., Griffith, D. M., Kalinhoff, C., Ramírez, J. y Gázquez, M. J. (2022). Native hyperaccumulator plants with differential phytoremediation potential in an artisanal gold mine of the Ecuadorian Amazon. *Plants*, *11*(9), 1186. https://doi.org/10.3390/plants11091186

Chang Kee, J., Gonzales, M. J., Ponce, O., Ramírez, L., León, V., Torres, A., Corpus, M. y Loayza-Muro, R. (2018). Accumulation of heavy metals in native Andean plants: Potential tools for soil phytoremediation in Ancash (Peru). *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(34), 33957–33966. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3325-z

Cruzado-Tafur, E., Bierla, K., Torró, L. y Szpunar, J. (2021). Accumulation of As, Ag, Cd, Cu, Pb, and Zn by native plants growing in soils contaminated by mining environmental liabilities in the Peruvian Andes. *Plants*, *10*(2), 241. https://doi.org/10.3390/plants10020241

D'Asaro, L. y Landi, M. (2026). Assisted phytoremediation of lead-contaminated soils: A systematic review of plant uptake, translocation, and physiological responses. *Plant and Soil*. https://doi.org/10.1007/s11104-026-09072-8

Duffus, J. H. (2002). "Heavy metals": A meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, *74*(5), 793–807. https://doi.org/10.1351/pac200274050793

Heredia, B., Tapia, R., Young, B. J., Hasuoka, P., Pacheco, P. y Roqueiro, G. (2022). Phytoextraction of Cu, Cd, Zn and As in four shrubs and trees growing on soil contaminated with mining waste.

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

Chemosphere, *308*, 136146. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136146

Huang, W., Zhang, C., Zhu, B., Liu, X., Xiao, H., Liu, S. y Shao, H. (2025). Systematic evaluation of plant metals/metalloids accumulation efficiency: A global synthesis of bioaccumulation and translocation factors. *Frontiers in Plant Science*, *16*, 1602951. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1602951

Jara-Peña, E., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M. y Cano, N. (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*, *21*(2), 145–154. https://doi.org/10.15381/rpb.v21i2.9817

Konno, K., Livoreil, B. y Pullin, A. S. (2021). *Collaboration for Environmental Evidence Critical Appraisal Tool version 0.3 (prototype)*. Collaboration for Environmental Evidence. https://environmentalevidence.org/cee-critical-appraisal-tool/

Lam, E. J., Cánovas, M., Gálvez, M. E., Montofré, Í. L., Keith, B. F. y Faz, Á. (2017). Evaluation of the phytoremediation potential of native plants growing on a copper mine tailing in northern Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, *182*, 210–217. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.015

Martínez-Manchego, L., Sarmiento-Sarmiento, G. y Bocardo-Delgado, E. (2021). Especies vegetales nativas con potencial para la fitorremediación de suelos alto andinos contaminados por residuos de actividad minera. *Bioagro*, *33*(3), 161–170. https://doi.org/10.51372/bioagro333.2

Múnera-Porras, L. M., Sarmiento-Gamero, M. F. y Orozco-Martínez, M. V. (2025). Plantas utilizadas en la descontaminación de suelos en Colombia: Una revisión sistemática. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. https://doi.org/10.17533/udea.redin.20250364

Orellana Mendoza, E., Cuadrado, W., Yallico, L., Zárate, R., Quispe-Melgar, H. R., Limaymanta, C. H., Sarapura, V. y Bao-Cóndor, D. (2021a). Heavy metals in soils and edible tissues of *Lepidium meyenii* (maca) and health risk assessment in areas influenced by mining activity in the Central region of Peru. *Toxicology Reports*, *8*, 1461–1470. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.07.016

Orellana Mendoza, E., Pérez Saenz, L., Custodio, M., Bulege, W., Yallico, L. y Cuadrado, W. (2021b). Cadmium, lead and zinc in the soil-plant-alpaca system and potential health risk assessment associated with the intake of alpaca meat in Huancavelica, Peru. *Journal of Ecological Engineering*, *22*(3), 40–52. https://doi.org/10.12911/22998993/132175

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E.,

ISSN: 3121-2948
Periodicidad: Trimestral, Volumen: 4, Número: 4, Año: 2026 páginas 151-169

McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

POWO. (2026). *Plants of the World Online*. Royal Botanic Gardens, Kew. https://powo.science.kew.org/

Rethlefsen, M. L., Kirtley, S., Waffenschmidt, S., Ayala, A. P., Moher, D., Page, M. J., Koffel, J. B. y PRISMA-S Group. (2021). PRISMA-S: An extension to the PRISMA statement for reporting literature searches in systematic reviews. *Systematic Reviews*, *10*, 39. https://doi.org/10.1186/s13643-020-01542-z

Shamseer, L., Moher, D., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., Stewart, L. A. y PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015: Elaboration and explanation. *BMJ*, *350*, g7647. https://doi.org/10.1136/bmj.g7647