

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

MAESTRÍA DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA

REVISIÓN DE TÉCNICAS DE FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS
CONTAMINADOS CON METALES PESADOS PROVENIENTES
DE LA ACTIVIDAD MINERA E INDUSTRIAL

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN
METALURGIA

PATRICIA ALEXANDRA JARAMILLO NAVARRO

patricia.jaramillo@epn.edu.ec

DIRECTORA: ING. ALICIA GUEVARA CAIQUETÁN, Ph.D

alicia.guevara@epn.edu.ec


Quito, Septiembre 2021

© Escuela Politécnica Nacional (2021)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Patricia Alexandra Jaramillo Navarro, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC -, cedo los derechos patrimoniales de este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional.



Patricia Alexandra Jaramillo Navarro

CI: 1720283710

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Patricia Alexandra Jaramillo Navarro, bajo mi supervisión.



Ing. Alicia Guevara Caiquetán, PhD.

DIRECTORA

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio del Proyecto Proyecto PII-DEMEX-02-2020 de la Escuela Politécnica nacional, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva en la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria.

DEDICATORIA

A mis padres Patricio y Anita, por su amor incondicional, comprensión, paciencia y ejemplo.

A mis hermanos: Iván, Vero, Angy, David y Andy por su apoyo y cariño.

A Alexander, porque en el transcurso del cumplimiento de esta etapa se convirtió en mi compañero de vida.

Sin ustedes y su apoyo jamás habría alcanzado esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A ese ser supremo, que sin importar la concepción que tengamos de él, nos brinda sosiego y esperanza de días mejores; porque al encomendarnos y confiar en él, las cargas son menos pesadas.

Gracias papi, mami y hermanos, ustedes son ese pilar que siempre me sostiene, ese impulso que me ayuda a seguir, mi familia es por ustedes que busco mejorar día con día. Soy muy afortunada de tenerlos, los amo mucho.

Gracias mi vido porque cuando sentí que los esfuerzos no eran suficientes y quise abandonarlo todo, usted creyó en mí y me animó a seguir, gracias porque me ayudó a superar obstáculos que aparecieron en el camino.

Gracias Inge Alicia por su guía, paciencia y confianza; gracias por ser un ejemplo de profesionalismo, entrega y lucha por el bienestar de quienes lo necesitan, ojalá todos los profesionales buscaran como usted poner su conocimiento para beneficio de los más vulnerables.

Inge Dianita, Inge Ely, Inge Ernesto, Inge Ximena, Inge Edy, gracias por su ayuda, enseñanzas y paciencia.

A mis compañeros maestrantes, Anita Belén, Edmundo y Luis, siempre agradeceré a la vida el haber compartido este camino (que no fue nada fácil) con personas como ustedes; no importa si con el tiempo y los caminos distintos dejamos de ser cercanos, siempre los recordaré con mucho cariño, todo fue mejor gracias a su compañía.

A la familia BAQ por comprender cuando necesité un poco más de tiempo e incluso cuando mi humor no era el mejor, su cariño y apoyo contribuyó a que esta meta fuera lograda. ¡Muchas gracias chicos!

1 *Artículo de Revisión/Review Paper*

2 **Título: Revisión de técnicas de fitorremediación de**
3 **suelos contaminados con metales pesados**
4 **provenientes de la actividad minera e industrial**

5
6 **Patricia Jaramillo Navarro**

7 **Escuela Politécnica Nacional, Maestría de Investigación en Metalurgia.**

8 **E-mail estudiante: patricia.jaramillo@epn.edu.ec**

9
10 **Resumen:** La contaminación de suelos por metales pesados (Fe, Cu, Pb, Hg, Cd, Zn, As, V, Mo, Cr,
11 Mn, Co y Ni) tiene efectos nocivos que pueden ser detectados a varios kilómetros de la fuente de
12 emisión, efectos que repercuten directamente en la salud del ecosistema, fauna, flora y salud
13 humana. por lo que, la implementación de remediación de suelos contaminados con metales pesados
14 es fundamental. Sin embargo, a pesar de que se han utilizado numerosas tecnologías convencionales
15 *in situ* para el propósito de tratamiento, gran parte de las técnicas se ven limitadas por factores como
16 alto costo, deterioro de las propiedades del suelo, alteraciones de la flora y fauna nativa, entre otras.
17 El presente artículo pretende brindar una herramienta de consulta mediante un compendio de
18 técnicas y metodologías de fitorremediación (fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización,
19 fitodegradación y rizofiltración), además del análisis comparativo de trabajos de investigación
20 realizados en los últimos años, tanto en países desarrollados como en países en vías de
21 desarrollo. Adicionalmente, se presenta información relevante acerca de modificación genética, uso
22 de lombrices, hongos, quelantes, entre otros, que junto a la fitorremediación podrán convertirse en
23 técnicas remediadoras por excelencia a futuro.

24 **Palabras clave:** contaminación, metales pesados, fitorremediación, técnicas futuras.

25
26 **Abstract:** Soil contamination by heavy metals (Fe, Cu, Pb, Hg, Cd, Zn, As, V, Mo, Cr, Mn, Co and
27 Ni) has harmful effects that can be detected several kilometers from the emission source, Effects that
28 have a direct impact on the ecosystem, fauna, flora and human health. Therefore, the implementation
29 of heavy metals soils contaminated remediation is essential. However, despite numerous
30 conventional technologies that have been used *in situ* for this purpose, many of this techniques are
31 limited by factors such as high cost, deterioration of soil properties, alterations of native flora and
32 fauna, among other. This article aims to provide a consultation tool through a compendium of
33 phytoremediation techniques and methodologies (phytoextraction, phytostabilization,
34 phytovolatilization, phytodegradation and rhizofiltration), also a comparative analysis of research
35 work carried out in recent years, both in developed countries and in developing countries.
36 Additionally, relevant information is presented about genetic modification, use of worms, fungi,
37 chelators, among others, which ones with phytoremediation may become remedial techniques par
38 excellence in the future.

39 **Keywords:** pollution, heavy metals, phytoremediation, futures techniques.

40 1. Introducción

41 La presencia de metales pesados debido a la extracción de minerales y su posterior
42 procesamiento para diferentes aplicaciones, así como la formación de lixiviados naturales por
43 efecto de la interacción agua-roca, han provocado la liberación de estos elementos al medio
44 ambiente. Esto se ha convertido en un grave problema a nivel mundial y se ha ido
45 agravando por el crecimiento de la industria y la alteración de los ciclos naturales [1].

46 Los metales pesados no son biodegradables y, por lo tanto, se acumulan en el ambiente y
47 posteriormente contaminan la cadena alimentaria. Esta contaminación representa un riesgo para
48 la salud humana y ambiental [2].

49
50 La extracción de metales produce anualmente millones de toneladas de residuos. Gran parte de
51 ellos posee pirita y otros sulfuros, cuya oxidación libera aguas ácidas y grandes cantidades de
52 metales pesados al ambiente, particularmente a los suelos [3].

53
54 Se considera metal pesado a los elementos metálicos que presentan una densidad por encima de
55 5 g cm^{-3} . Algunos de estos metales son esenciales para los organismos vivos, por ejemplo, el
56 hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn), cobalto (Co), entre otros. No obstante, se vuelven
57 perjudiciales para fauna y flora cuando su concentración es elevada. Por otra parte, metales
58 como el cadmio (Cd), mercurio (Hg), arsénico (As) o plomo (Pb), no cumplen ninguna función
59 biológica específica, sino que por el contrario, son altamente nocivos [4].

60
61 La contaminación de los suelos es provocada por la deposición atmosférica, es decir, que afecta
62 a los primeros centímetros de suelo. En este contexto, las principales fuentes de contaminación
63 de suelos lo constituyen las cenizas y escorias de procesos de combustión de carbón o petróleo,
64 así como la actividad agrícola (uso de pesticidas), acumulación de residuos industriales, urbanos
65 y mineros [4]. Si bien, los metales pesados existen naturalmente en los suelos, estos pueden
66 convertirse en contaminantes, al acumularse debido a actividades geológicas y principalmente
67 antropogénicas, por ejemplo un inadecuado sistema de eliminación de aparatos electrónicos y
68 eléctricos en desuso [5].

69
70 La contaminación de los suelos supone un riesgo sustancial para el ser humano debido al
71 contacto directo que puede suceder con la cadena alimentaria, ya que los metales pesados son
72 absorbidos por distintas especies alimenticias a través de las raíces hasta llegar a tallos, hojas e
73 incluso frutos. Por otro lado, la contaminación de las aguas subterráneas son parte de dicha
74 problemática, ya que al ser ingerida puede causar graves enfermedades, por ejemplo, la
75 exposición al cadmio (Cd) puede causar daño renal, mientras que la exposición al mercurio (Hg)
76 puede provocar daño pulmonar [6].

77
78 La presencia de metales pesados en organismos vivos es normal hasta cierta concentración, la
79 contaminación surge cuando se exceden dichos valores. [7]. En la tabla 1 se detallan ciertos
80 rangos normales de concentración de metales en plantas, animales e incluso en el agua de lluvia
81 que se encuentra constantemente en interacción con los suelos. Los valores que excedan los

rangos normales, se consideran como nocivos, dependiendo de los niveles permisibles estipulados en la normativa ambiental de cada país.

Tabla 1 Concentración natural de metales pesados

<i>Elemento</i>	<i>Plantas</i> <i>mg kg-1</i>	<i>Mamíferos</i> <i>mg kg-1</i>	<i>Peces</i> <i>mg kg-1</i>	<i>Lluvia</i> <i>µg l-1</i>
<i>Ag</i>	0.01-0.8	0.01-0.44	0.04-0.1	0.006
<i>Al</i>	90-530	0.7-28	20	2.1-105
<i>As</i>	0.2-7	<1.6	0.2-10	-
<i>Cd</i>	0.1-2.4	0.1-3.2	0.1-3	0.02-0.06
<i>Co</i>	<1	<1	0.02	0.17-0.95
<i>Cr</i>	0.03-10	0.01-33	0.03-2	-
<i>Cu</i>	5-15	1-26	0.7-1.5	0.01-15
<i>Fe</i>	70-700	3-380	1-15	0.4-84
<i>Hg</i>	<0.02	0.02-0.7	0.4	-
<i>Mn</i>	20-700	0.2-14	0.3-4.6	-
<i>Mo</i>	0.06-3	0.02-0.7	1	0.01-12
<i>Ni</i>	1-5	0.7-1.2	0.1-4	-
<i>Pb</i>	1-13	0.2-30	0.01-2	-
<i>Se</i>	0.03	0.4-9	0.2	0.01-0.77
<i>Sn</i>	0.02-2	0.01-2	-	<0.01
<i>Zn</i>	20-400	75-240	10	0.05-100

Fuente: [8]

El suelo es un recurso fundamental para la producción agrícola y por lo tanto para la producción de alimentos en el mundo. Considerando que, de acuerdo a las proyecciones realizadas por la Organización de Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, la población mundial en 30 años habrá pasado de 7.700 millones a 9.700 millones (en el 2050), la situación es realmente preocupante si se tiene en cuenta que apenas el 10,8% de la superficie de la tierra corresponde a suelos cultivables [9]. En este escenario, es importante no solo la preservación del suelo para la producción agrícola, destinado a la alimentación de una población que aumenta, sino también la recuperación de suelos degradados y contaminados por la actividad industrial de diversos tipos. Esto implica, por tanto, la necesidad de recuperar suelos con potencial agrícola que han sido afectados por la actividad industrial, mediante la aplicación de diversas técnicas y procesos.

Actualmente, existen diferentes tecnologías para la remediación de suelos contaminados con metales pesados, dichas tecnologías pueden ser clasificadas en tres grupos:

- 1) Tecnologías físicas, enfocadas a la reposición, aislamiento y vitrificación del suelo [10],
- 2) Tecnologías químicas, tales como solidificación, estabilización y lavado de suelos [11]

106 3) Tecnologías biológicas como bioabsorción y absorción mediante microorganismos y plantas,
107 conocidas como fitorremediación [12].

108

109 Las tecnologías físicas y químicas han sido evaluadas en diferentes investigaciones, cuyos
110 resultados demuestran su eficacia; sin embargo, estas técnicas han demostrado ser costosas y
111 difíciles de aplicar en grandes extensiones de terreno. Por estas razones, los métodos biológicos
112 toman especial importancia en la reparación de suelos contaminados con metales pesados [6].

113

114 Debido a la tendencia de diversos metales a acumularse en las plantas, la alternativa menos
115 invasiva parece ser la fitorremediación [13]. La fitorremediación se deriva de las palabras "fito"
116 (planta) y "remediación" (recuperación). Puede definirse como biorremediación, remediación
117 botánica o remediación verde, términos que permiten tener una idea general del concepto de
118 esta técnica [14]. El término "fitorremediación" apareció en la década de 1980, pero no fue hasta
119 la década de 1990 que se tuvieron las primeras publicaciones técnicas que intentaban tratar
120 suelos contaminados utilizando plantas [15].

121

122 La fitorremediación se basa en el uso de plantas y microorganismos del suelo para reducir las
123 concentraciones de los metales pesados o los efectos tóxicos de los contaminantes en el medio
124 ambiente. Es una tecnología relativamente reciente y se percibe como una tecnología rentable,
125 eficiente, novedosa, ecológica e impulsada por energía solar, con buena aceptación del público
126 [16]. La fitorremediación es un área de investigación actual activa. En la actualidad se están
127 utilizando distintas técnicas y equipos de análisis como para comprender mejor los mecanismos
128 de absorción, translocación y secuestro de metales, además de estudiar a mayor profundidad la
129 tolerancia que diferentes plantas presentan a contaminantes metálicos [17].

130

131 La fitorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar,
132 degradar, volatilizar o estabilizar diferentes tipos de contaminantes [16]. Se han identificado
133 diversas especies que pueden ser utilizadas con estos fines. Algunas de ellas, debido a su gran
134 capacidad para acumular metales pesados son denominadas hiperacumuladoras [16]. La
135 respuesta fisiológica de las plantas al ser expuestas a metales pesados, varía de acuerdo con la
136 especie, el metal y la concentración a la que la planta es expuesta. En función de la respuesta
137 fisiológica, existen tres tipos de plantas: a) excluyentes (acumulan metales en tallo y hojas, en
138 menor concentración que en los suelos); b) indicadoras (acumulan metales en el tejido aéreo en
139 relación lineal respecto a la concentración de metales en el suelo); y, c) acumuladoras
140 (concentración de metales en su parte aérea, es decir tallo y hojas, es mayor que los metales
141 presentes en el suelo) [18].

142

143 Por otra parte, el pH juega un papel importante en la movilidad de los metales pesados que se
144 encuentran en suelos contaminados, de su valor depende la técnica de fitorremediación
145 seleccionada. Si la biodisponibilidad (proporción y velocidad de absorción de un elemento o
146 sustancia) de los metales pesados disminuye existe el riesgo de ser absorbidos por plantas que

147 sirvan de alimento. En la tabla 2 se observan las asociaciones geoquímicas del suelo en base a
148 valores de pH y su incidencia en la movilidad de los metales.

149

150

Tabla 2 Movilidad de metales pesados en función del pH

151

<i>Asociaciones geoquímicas en suelos</i>	<i>Prácticamente inmóviles</i>	<i>Moderadamente móviles</i>	<i>Fácilmente móviles</i>
<i>Ácido (pH<5,5)</i>	Mo	Pb ²⁺ , Cr ³⁻⁶⁺ , Ni ²⁻³⁺ , V ⁵⁺ , As ³⁺ , Co ²⁻³⁺	Sr, Ba, Cu, Zn, Cd, Hg
<i>Neutro o débilmente ácido (pH 5,5-7,5)</i>	Pb	Sr, Ba, Cu, Cd, Cr ³⁻⁶⁺ , Co ²⁻³⁺ , Mo ⁴⁺	Zn, V ⁵⁺ , As ⁵⁺
<i>Alcalino o fuertemente alcalino (pH 7,5-9,5)</i>	Pb, Ba, Co	Zn, Ag, Sr, Cu, Cd	Mo ⁵⁺ , v ⁵⁺ , As ⁵⁺

152

153

Fuente [19]

154

155 Considerando el tiempo prolongado que le toma a una planta crecer debido a que su capacidad
156 reproductiva puede verse afectada al absorber metales tóxicos, se han realizado estudios sobre
157 fitorremediación en árboles de raíces profundas como el álamo y el sauce, ya que estos han
158 demostrado gran capacidad de absorción de agua en subsuelo, este procedimiento unido a otras
159 plantas, árboles y pastos pueden estimular la degradación microbiana de contaminantes
160 orgánicos en suelos [20].

161

162 La hiper acumulación de metales que poseen ciertas especies vegetales es generalmente de
163 carácter endémico, propio de suelos metalíferos; dichas especies varían en crecimiento desde
164 pequeñas hierbas anuales hasta arbustos perennes y árboles [21].

165

166 Los hiper acumuladores se han descubierto en todos los continentes, principalmente en
167 ambientes templados y tropicales. Así por ejemplo, en acumulación de Ni son líderes las especies
168 provenientes de Nueva Caledonia, Cuba, Asia, Brasil, sur de Europa y Asia Menor; mientras que
169 para acumulación Zn y Pb se han encontrado especies en el noroeste de Europa; Co y Cu
170 encuentran mayor facilidad de remoción en especies endémicas de África central del sur [22].

171

172 Un importante cuestionamiento surge a partir de la premisa de que un organismo vivo como
173 una planta, debe tener un límite en su capacidad para absorber contaminantes. Con base en ello
174 se han realizado algunos estudios genéticos de especies vegetales que contienen metales pesados
175 en sus tejidos y órganos [23]. Dichos estudios han proporcionado información acerca de los
176 mecanismos que podrían estar asociados a la adaptación de las plantas, creciendo en entornos
177 con altas concentraciones de metales en suelos y agua [23][17,24–26].

178

179 La ruta más común de absorción de sustancias químicas por las plantas, en un sistema acuoso,
180 es a través de la raíz. Los iones y compuestos orgánicos se mueven desde el agua y suelo, a las
181 raíces, y de ahí, a través de la planta [27]. En el tratamiento de suelos, es fundamental la
182 caracterización del sitio, es el primer paso para la estrategia de remediación. Consiste en la
183 recopilación y evaluación de datos sobre el tipo de contaminantes y su distribución en el sitio de
184 estudio. Los resultados de la caracterización constituyen la base para seleccionar el mejor
185 método de fitorremediación, para tratar el suelo contaminado [28].

186

187 El mecanismo de absorción en la fitorremediación (Figura 1) se inicia con la absorción de una
188 fracción de metal en la superficie de la raíz; posteriormente, el metal biodisponible se mueve a
189 través de la membrana celular hacia las células de la raíz. Una fracción del metal absorbido por
190 las raíces se inmoviliza en la vacuola. Sin embargo, el metal móvil intracelular atraviesa las
191 membranas celulares hacia el tejido vascular de la raíz, hasta que finalmente se traslada desde
192 la raíz a los tejidos aéreos presentes en tallos y hojas [21].

193

194

195

196

197

198

199

200

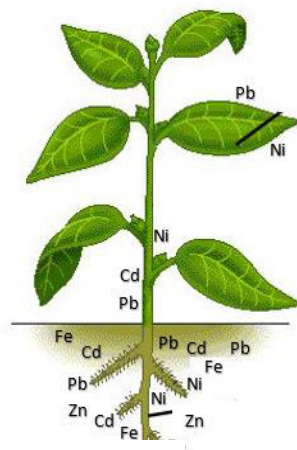
201

202

203

204

205



206

Figura 1 Absorción de metales pesados en plantas

207

Fuente: imagen bajo licencia CCBY-SA con adaptaciones propias

208

209

210

Desventajas relevantes de la fitorremediación

211

212

213

214

215

216

217

218

219

Diversos estudios han demostrado la efectividad de la fitorremediación en el tratamiento de agua y suelos contaminados con metales pesados, como un enfoque vegetal confiable y ecológico. No obstante, existen algunos aspectos negativos que deben ser considerados, con el fin de evitar posibles complicaciones en la salud humana, cuando se utilizan plantas asociadas a la cadena alimenticia [16,22,29].

En primera instancia, la fitorremediación es una tecnología natural, que necesita un intervalo de tiempo largo (en comparación con métodos químicos o físicos), que puede requerir varios años para la remediación de contaminantes tóxicos. En suelos con altos niveles de contaminación, el

220 uso de plantas hiperacumuladoras de metales, por sí solas, no serán suficiente, por las
221 cantidades bajas de biomasa producidas, a una tasa de crecimiento lenta [26].

222

223 Otro de los limitantes a la hora de implementar la fitorremediación *in situ*, son las variaciones
224 climáticas. Nevadas, lluvias excesivas o sequía, influirán directamente en el desarrollo de las
225 especies vegetales. Así mismo, algunas especies pueden resultar ineficaces debido a la presencia
226 de plagas y enfermedades relacionadas con las plantas [2]. Además, la introducción de especies
227 extrañas a la zona a tratar, puede alterar el equilibrio ecológico de fauna y flora endémicas de la
228 zona. Adicionalmente, los metales acumulados se pueden transferir a la cadena alimentaria, si
229 no se maneja adecuadamente la biomasa vegetal producto de tratamientos de descontaminación;
230 por lo que, en zonas agrícolas aledañas a sitios contaminados con metales pesados, es necesario
231 realizar análisis periódicos de presencia de metales en los alimentos cultivados [2].

232

233 En la Universidad de Chengdu en China [30], se realizó un trabajo de investigación en el que
234 se determinó que, el rastrojo de arroz posee una tasa de remoción de Cd de suelos contaminados
235 con este metal, entre 1,11 al 1,40 %, mayor que la del *Thlaspi caerulescens*, se trata de un
236 hiperacumulador normalmente utilizado para la remoción en suelos con Cd. Así mismo, las
237 concentraciones de Zn, Pb, Cr y Cu presentes en el rastrojo de arroz, aumentaron entre 51,11 a
238 97,50 %, lo que evidencia el peligro de plantar sembríos de arroz en suelos contaminados con
239 metales pesados [30].

240

241 En el presente trabajo de revisión, la información sobre las técnicas de fitorremediación para la
242 descontaminación de suelos que contengan metales pesados, debido a actividad minera e
243 industrial, se presentan en el siguiente orden:

244 a) Análisis descriptivo de la información referente a las distintas técnicas de fitorremediación,
245 tales como: fitoextracción, fitoestabilización, fitoinmovilización, fitovolatilización,
246 fitodegradación y rizofiltración, utilizadas en el tratamiento de suelos contaminados con
247 metales pesados, debido a actividad minera e industrial. Se presenta la información
248 relevante de cada técnica, con las ventajas y desventajas para su aplicación.

249 b) Análisis comparativo y sistemático de los datos existentes sobre casos específicos de
250 aplicación de cada técnica de fitorremediación, para la depuración de suelos contaminados
251 con metales pesados, con énfasis en los casos investigados en países desarrollados, cuya
252 actividad industrial es muy alta.

253 c) Análisis comparativo y sistemático de los datos existentes sobre casos específicos de
254 aplicación de cada técnica de fitorremediación, para la depuración de suelos contaminados
255 con metales pesados, en países en vía de desarrollo, donde el grado de industrialización es
256 menor y la realidad ambiental es otra.

257 d) Se definen perspectivas futuras de investigación sobre técnicas de fitorremediación para la
258 descontaminación de suelos que contengan metales pesados, relacionándola con la
259 normativa ambiental, referente al correcto uso de recursos naturales en la implementación
260 de procesos mineros e industriales, con especial énfasis en el contexto Latinoamericano.

261

262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282

SECCIÓN 1

Técnicas de fitorremediación utilizadas en el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados debido a actividad minera e industrial

Ciertas plantas tienen la capacidad para metabolizar o acumular compuestos orgánicos como el 1,1,1-tricloro-2,2-bis(4-clorofenil)-etano (DDT), tricloroetileno (TCE), 2,4-diclorofenol, PCB's, explosivos como el trinitrotolueno (TNT) o dinitrotolueno, PAH's y detergentes [16]. De acuerdo con Garbisu (2007) [31], los microorganismos que habitan en la rizósfera desempeñan un papel muy importante en la degradación de la materia orgánica ya que los metabolitos generados de esta degradación son absorbidos por las plantas junto con el nitrógeno, fósforo y otros minerales.

Los compuestos orgánicos son utilizados por los microorganismos como fuente de carbono, mientras que los compuestos alifáticos se degradan fácilmente por oxidaciones sucesivas [32]. Cuando se incluyen como sustituyentes alcanos de cadena larga, se forman estructuras ramificadas estéricamente inaccesibles a la degradación, al igual que los compuestos aromáticos o cíclicos se degradan a partir de la ruptura del anillo bencénico [32].

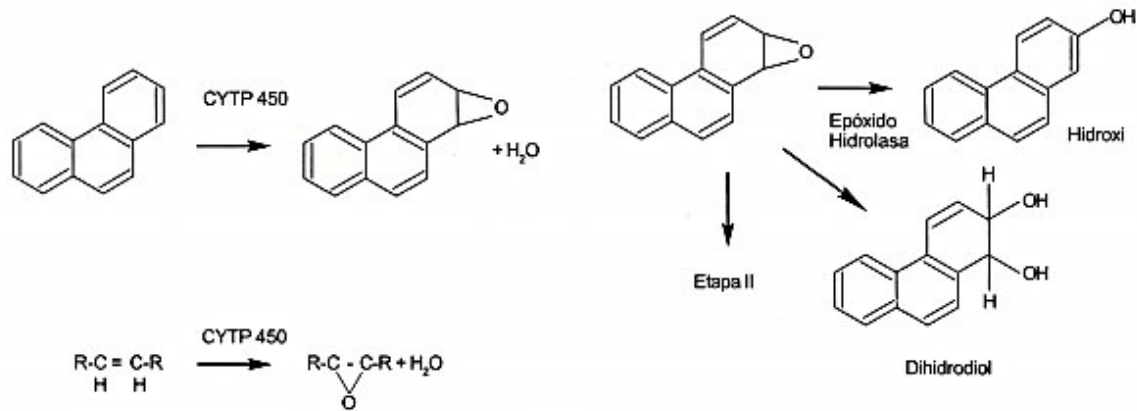
En la Figura 1 muestra las tres etapas que ocurren en la fitorremediación y las reacciones que ocurren en la fracción microsomal y en la citosólica [33].

(i) Microsómicas

Las reacciones se llevan a cabo en el retículo endoplásmico

Reacción: Epoxidación
 Enzimas: Citocromo P450 (CYTP450)
 Ejemplo: Alifáticos → Epóxidos
 Aromáticos → Epóxidos

Reacción: Epoxidación
 Enzimas: Hidrolasa
 Ejemplo: Epóxido → Dihidrodiol



(ii) Citosólicas

Las reacciones se llevan a cabo en el citosol

Reacción: Óxido - reducción
 Enzimas: Deshidrogenadas
 Ejemplo: Alcoholes → Aldehidos

Haldehidos → Ácidos



283
284

285

Figura 2 Ejemplos de transformaciones celulares en las plantas

286

Fuente: [33]

287

288

289

290

291

292

293

294

295

296

297

298

299

300

Etapa I. Se producen reacciones de oxidación, reducción e hidrólisis donde las moléculas orgánicas xenobióticas pierden parte de su estructura, formando metabolitos polares e hidrosolubles. La reacción principal que se genera es la hidroxilación catalizada por monooxigenasas [33].

Etapa II. Se denomina la etapa de la conjugación que actúa en los mecanismos de desintoxicación uniendo carbohidratos, péptidos, aminoácidos y proteínas a un contaminante. Comúnmente a estas enzimas se las conoce como las transferasas, la toxicidad del contaminante disminuye porque la fitoacumulación incrementa la hidrofiliocidad de los contaminantes, promoviendo su depósito en vacuolas, que pueden ser fácilmente sometidos a oxidaciones posteriores [33].

301 Las plantas absorben los metales pesados a través de la raíz. Una vez dentro del citoplasma la
 302 mayor parte del metal es almacenado en la vacuola vegetal para impedir que afecte el normal
 303 funcionamiento celular [13]. Los compuestos metálicos atraviesan la raíz hasta llegar al xilema
 304 (tejido vegetal), a través de este, viajan junto al agua, savia y otros compuestos hasta la zona
 305 foliar (hojas), luego se transportan a otras hojas o nuevamente a la raíz. Posteriormente, entran
 306 en contacto con la pared celular, se adhieren a ella y entra en la célula, hasta llegar a los organelos
 307 [34].

308

309 Posteriormente, ciertos metales como un compuesto menos tóxico. Para esto, la estructura
 310 celular utiliza moléculas ricas en cisteína como el glutatión (tripéptido), las fitoquelatinas
 311 (oligopéptidos) y las metalotioneínas (proteínas) [35]. En la figura 2. se presenta los mecanismos
 312 que utilizan las plantas para absorber metales pesados, usando el arsénico como ejemplo.

313

314

315

316

317

318

319

320

321

322

323

324

325

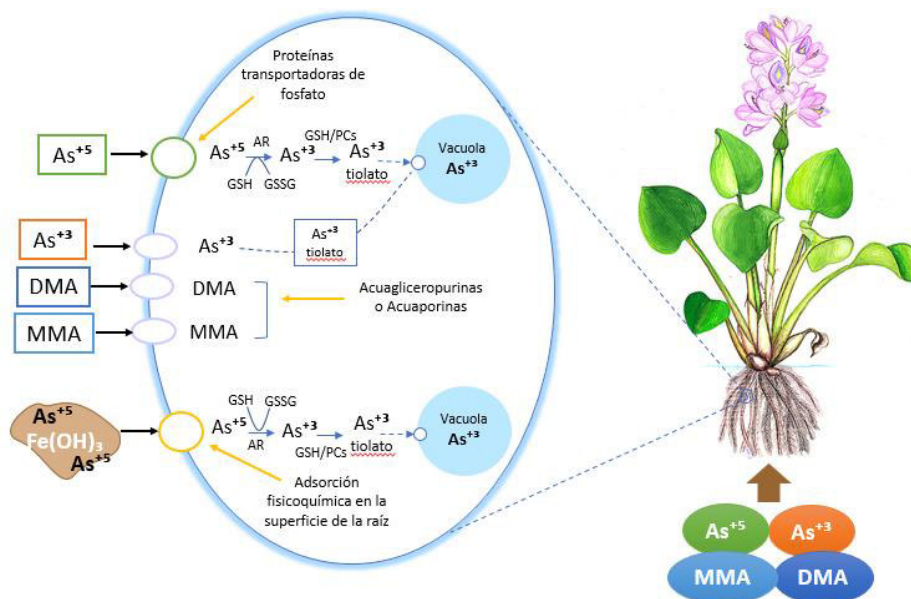
326

327

328

329

330



331

Figura 3 Mecanismo de absorción de metales pesados

332

332 La adsorción de los iones de arsénico como el arsenito (As^{+3}) y arseniato (As^{+5}) en plantas
 333 sucede en la superficie radicular externa (paredes celulares de la raíz). La rizodermis (capa
 334 externa que recubre a las raíces) posee cargas negativas en sus células, esto provoca la atracción
 335 de la raíz con los iones de arsénico que poseen carga positiva, se trata de un proceso bastante
 336 rápido [34]. Por otra parte, el ión fosfato compite naturalmente con el arseniato en el suelo,
 337 actuando como un inhibidor, por lo que el arseniato es absorbido aproximadamente 4 veces más
 338 que el arsenito [36].

339

340

341

La adición de compuestos de fosfato, es uno de los métodos de apoyo para la fitorremediación
 en diversas investigaciones realizadas para comprobar su efectividad [37]. Así por ejemplo, el

342 uso de fosfato diamónico (DAP) permite inmovilizar metales, reduciendo su biodisponibilidad
343 en la absorción de plantas [38]. El mecanismo de acción del fosfato frente a los metales pesados,
344 se inicia con la adsorción directa del metal por el anión fosfato y posterior precipitación de dicho
345 metal en forma de fosfato metálico. Algunos de los metales con mayor eficiencia para su remoción
346 mediante esta técnica son: Cd, Cu, Ni, Sr y Zn [39]. En casos en los que existe presencia de Pb y
347 Zn, al añadir fosfatos se logra la precipitación de estos metales como fosfatos, los cuales son muy
348 estables y de baja solubilidad en un amplio rango de pH [38].

349
350 La fitorremediación como método de tratamiento para suelos contaminados, utiliza diferentes
351 técnicas o estrategias como la absorción de metales pesados (fitoextracción), la acumulación y
352 translocación de dichos metales (fitoacumulación), la emisión a la atmósfera (fitovolatilización)
353 y su estabilización en la zona radicular (fitoestabilización) [40]. Además de técnicas como
354 fitoinmovilización, fitodegradación y rizofiltración [41].

355
356 Ali et al. (2013) proponen la siguiente clasificación para las técnicas de fitorremediación:

- 357
- 358 • Fitoextracción: acumulación de contaminantes en la biomasa cosechable, es decir en los
359 brotes y área foliar.
 - 360 • Fitoestabilización: Limitación de la movilidad y biodisponibilidad de contaminantes en
361 el suelo por las raíces de las plantas.
 - 362 • Fitovolatilización: Conversión de contaminantes en forma volátil y su posterior
363 liberación a la atmósfera
 - 364 • Fitodegradación: Degradación de xenobióticos (sustancia química no natural que
365 interactúa con un organismo) orgánicos por enzimas vegetales, dentro de los tejidos
366 vegetales
 - 367 • Rizodegradación: degradación de xenobióticos orgánicos en la rizosfera por
368 microorganismos rizosféricos (bacterias que contribuyen a la degradación y remoción
369 de contaminantes, por ejemplo, pseudomonas).
 - 370 • Fitodesalinización: Eliminación del exceso de sales de suelos salinos usando especies
371 halófitas (microorganismos, mayormente bacterias que viven en sustratos con alta
372 concentración de sales).

373
374 A continuación, en la Tabla 3 se resume el mecanismo de los distintos tipos de fitorremediación.
375

376
377
378
379
380
381
382

383

Tabla 3 Mecanismos de fitorremediación

<i>Tipo de fitorremediación</i>	<i>Mecanismo</i>	<i>Medio</i>
<i>Fitoextracción o Fitoacumulación</i>	Uso de plantas hiperacumuladoras de elementos tóxicos y nocivos, los cuales son absorbidos y retirados del suelo al concentrarlos en sus partes cosechables.	Suelos
<i>Fitoestabilización</i>	Las plantas producen exudados de sus raíces causando el precipitado de los metales, volviéndolos menos tóxicos. Mejorando las propiedades físicas y químicas del suelo	Suelos, aguas subterráneas, relaves mineros.
<i>Fitovolatilización</i>	Las plantas absorben los elementos contaminantes en especial el selenio, el mercurio y los hidrocarburos volátiles, los cuales los evaporan y los liberan hacia la atmósfera.	Suelos y aguas subterráneas
<i>Fitodegradación</i>	Los microorganismos mejoran la degradación de los contaminantes por medio de enzimas en la rizosfera de la planta.	Suelos, aguas subterráneas,
<i>Rizofiltración</i>	Las plantas absorben y adsorben los metales o minerales a través de sus raíces	Agua superficial, aguas bombeadas
<i>Fitodesalinización</i>	Las plantas halófitas tolerantes a medios salinos eliminan la salinidad de los suelos mejorando la rehabilitación de ecosistemas marginados	Suelos

384

385

386

1.1.1. Fitoextracción

387

388

389

390

391

392

La fitoextracción es la tecnología más usada en fitorremediación; se la conoce también como fitoacumulación o fitoabsorción. Involucra el uso de plantas que absorben los metales del suelo y son trasladados a los brotes de cosecha donde finalmente se acumulan. En la Figura 3. se muestra el mecanismo de fitoextracción, que inicia con la captación de los iones metálicos (producidos por reacciones de reducción) presentes en los suelos, a través de las raíces, los cuales son transportados por el xilema hasta llegar a las hojas de la planta [20].

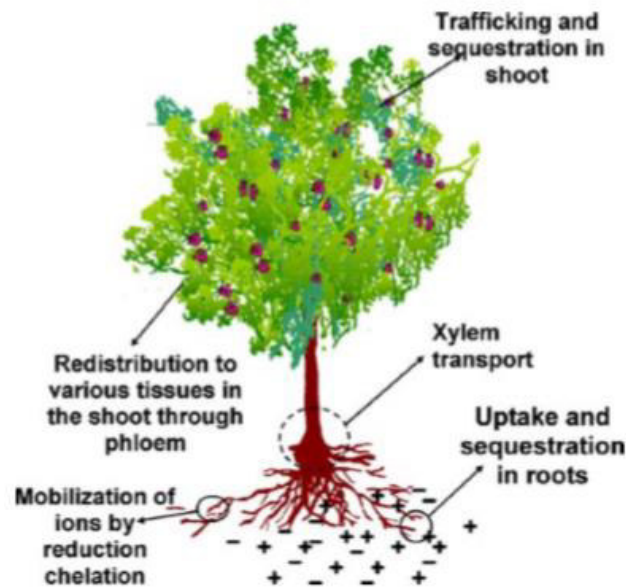


Figura 4 Mecanismo de fitoextracción

Fuente:[20]

La fitoextracción también se la suele llamar una tecnología de limpieza específica [42]. Existen plantas que tienen la capacidad de crecer en suelos metalíferos y acumular altos niveles de metales pesados en los órganos aéreos, más que otras plantas. Estas plantas, denominadas “hiperacumuladoras”, no presentan efectos nocivos por presencia de fitotoxinas [43]. Estas plantas forman la base de la fitoextracción, las cuáles deberían tener una capacidad de acumulación de metales superior al umbral de la concentración de “normal” metal, por ejemplo los brotes poseen alrededor de 1% de Mn y Zn; 0,1% de Ni, Co, Cr, Cu, Pb y Al; 0,01% de Cd y Se; 0,001% de Hg del total de brotes en su peso seco [44].

En el año 2000 se realiza un estudio que permitió redefinir como plantas hiperacumuladoras a aquellas que acumulaban >10 000 mg/kg de Mn o Zn, >1000 mg/kg de Co, Cu, Ni o Pb y >100 mg/kg de Cd [45].

La fitoextracción se agrupa en dos categorías. La primera, llamada fitoextracción continua, que implica el uso de plantas hiperacumuladoras; mientras que la segunda, se llama fitoextracción inducida por quelatos, la cual implica el uso de plantas de cultivo de alta biomasa y agentes quelantes [20].

La fitoextracción continua consiste en que las raíces de las plantas en crecimiento, absorben los elementos metálicos del suelo y los trasladan a los brotes aéreos donde estos se acumulan. Se aplica sembrando las plantas que almacenan o acumulan metales, en suelos contaminados con metales. Su cultivo se realiza utilizando prácticas agrícolas usuales. Aproximadamente 450 especies de angiospermas (plantas con semilla por ejemplo maíz, arroz, manzano, entre otros) pertenecientes a las familias *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Caryophyllaceae*, *Cyperaceae*, *Cunouniaceae*, *Fabaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lamiaceae*, *Poaceae*, *Violaceae* y *Euphobiaceae* [20], fueron identificadas como

420 hiperacumuladoras de metales pesados (As, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Tl y Zn); estas
421 representan el 0,2% de todas las especies de hiperacumuladoras conocidas [43].

422

423 En la actualidad los investigadores continúan buscando nuevas especies hiperacumuladores ya
424 que se piensa que muchas de estas permanecen en la naturaleza sin ser aún identificadas [20].
425 Para el caso del cadmio, se descubrió recientemente la capacidad hiperacumuladora de la especie
426 (*Youngia erythrocarpa*) que es un tipo de maleza que crecía en el campus de la Universidad de
427 Padua en Italia [43]. En el caso del níquel, este elemento es hiperacumulado fácilmente por la
428 mayoría de los taxones (población de organismos), alrededor del 75%, de los cuales el 25%
429 representa a los pertenecientes a la familia *Brassicaceae*, particularmente a *Thlaspi* y *Alyssum*
430 [20]. La fitoextracción inducida por quelatos, generalmente se utiliza, cuando los metales no se
431 encuentran en la forma disponible en el suelo, para la absorción adecuada de la planta. En estos
432 casos, se adiciona quelatos o también llamados agentes acidificantes, que facilitan la liberación
433 de los metales en el agua de poro del suelo, mejorando la capacidad de acumulación y la
434 velocidad de absorción de las plantas, que no se consideran como hiperacumuladoras [20].

435

436 El uso de ácidos del tipo aminopolicarboxílicos persistentes (APCA) biodegradable, el
437 disuccinato de etilendiamina (EDDS) y el ácido nitrilo triacético (NTA) constituyen una
438 alternativa al EDTA y ácidos orgánicos de bajo peso molecular (LMWOA) normalmente usados
439 en la fitoextracción, aunque reduciendo la capacidad hiperacumuladora de ciertas especies [46].

440

441 El método de fitoextracción inducida por quelatos, depende de factores como las fracciones
442 geoquímicas del metal en el suelo, es decir las concentraciones elementales de metales en los
443 suelos, para ello se utilizan técnicas de extracción secuencial atacando las muestras con
444 reactivos para liberar los metales en función de su afinidad por la matriz, lo que explica su
445 biodisponibilidad para ser absorbidos por especies que sirven de alimento por ejemplo., además
446 de la concentración de agentes quelantes a utilizar [47]. Sin embargo, algunos agentes quelantes
447 añadidos pueden ser tóxicos para las plantas y tener efectos negativos en el crecimiento
448 microbiano en los suelos durante el proceso de adición de quelatos [43]. El EDTA es un quelante
449 muy utilizado porque forma complejos fuertes con los metales [43]. Actualmente se busca
450 quelantes que sean biodegradables y más amigables con el medio ambiente.

451

452 Se reporta en la literatura, un experimento realizado con el fin de probar la hipótesis de que el
453 ácido húmico (HA) afecta a la especiación química y extractabilidad de metales como cadmio,
454 cobre y zinc, usando plantas de ajeno en un suelo cercano a una mina de Cu abandonada [48].
455 Los resultados obtenidos muestran que, para una fitorremediación eficaz de suelos
456 contaminados, es necesario usar una combinación de promotores del crecimiento de plantas y
457 agentes quelantes como el HA en el sitio donde se desea la estabilización química de los
458 contaminantes [48].

459

460 La siembra y cosecha de hiperacumuladores debe repetirse varias veces, dependiendo la
461 concentración de metales presentes en el suelo y la capacidad de absorber los metales y tolerarlos
462 de las plantas, para de esta manera disminuir la contaminación en el sitio escogido. En ciertos
463 estudios, el proceso de siembra y cosecha se lleva a cabo en periodos que varían entre 1 y 20 años
464 [49], considerando la siembra de nuevas plantas cuando sea necesario, repitiendo el proceso las
465 veces que sea necesario hasta que el suelo presente niveles de concentración de metales de
466 acuerdo con la norma de cada país.

467

468 Se considera un éxito para la fitoextracción, cuando se produce altos rendimientos de biomasa y
469 se acumulan altas cantidades de metales tóxicos en el tejido de los brotes de las plantas. En el
470 trabajo realizado por Ebbs et al. [50] por ejemplo, se reporta que *B. juncea* es más eficaz para
471 eliminar Zn y Cd del suelo que *Thlaspi caerulescens* (un hiperacumulador conocido de Zn), a pesar
472 que esta última especie acumuló 10 y 15 veces más concentración de Cd y Zn, respectivamente.
473 Se considera que *B. juncea* es más eficaz, ya que fue capaz de producir 10 veces más biomasa,
474 además de tener una alta tolerancia a los metales objetivo. [50].

475

476 La fitoextracción es una de las mejores técnicas para eliminar los contaminantes principalmente
477 del suelo, además de aislarlos, sin perjudicar a la estructura y fertilidad de las plantas. Con este
478 método la planta absorbe, concentra y precipita metales tóxicos. Se puede utilizar en suelos
479 donde las concentraciones de contaminantes son relativamente bajos [51].

480

481 Existen numerosas plantas con capacidad de acumular Cd, Zn, Ni, Cr, Pb y Cu, tales como
482 *Arabidopsis thaliana* (Hierba anual), *Cynodon dactylon* (hierba perenne conocida vulgarmente
483 como rapa Nui), *Bidens pilosa* (hierba anual con mayor presencia en Bolivia y Perú), *Helianthus*
484 *annuus* (arbusto conocido como incienso) [52] [53].

485

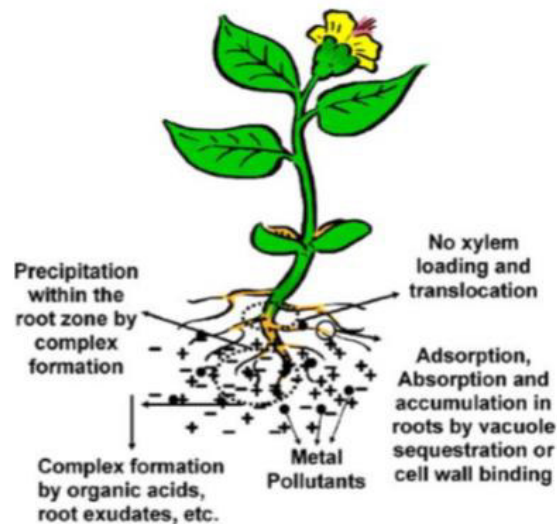
486

487 1.1.2. Fitoestabilización

488 Es conocida como inactivación o inmovilización *in situ* de metales pesados, reduciendo su
489 biodisponibilidad, además de evitar su transporte hacia otras áreas de suelo, lo que permite
490 mejorar las propiedades físicas y químicas del entorno [54].

491

492 La fitoestabilización utiliza plantas para eliminar la biodisponibilidad de metales tóxicos
493 existentes en el suelo, inmovilizándolos en ciertas plantas hiperacumuladoras. La
494 inmovilización se realiza por medio de procesos de absorción y acumulación en las raíces, a su
495 vez, por la precipitación en la zona externa de las raíces, sin que lleguen a ser transportados
496 hasta otras partes de las plantas a través del xilema como se muestra en la Figura 4 [20]. Esta
497 técnica reduce la movilidad de los contaminantes y evita la migración de los mismos hacia el
498 agua subterránea, permitiendo restablecer una cubierta vegetal en sitios donde falta vegetación
499 natural [20].



500
501

502

Figura 5 Mecanismo de fitoestabilización

503

Fuente: [20]

504

505 Para controlar la erosión del suelo, las plantas verdes como árboles frutales, arbustos de
506 legumbres, sauces, entre otros [55], son muy útiles, ya que sus raíces se sujetan al suelo formando
507 una especie de malla que protege la tierra evitando que se desprenda con facilidad.
508 Adicionalmente, las raíces absorben el exceso de agua lluvia, que al acumularse debilita el
509 terreno, ocasionando su desprendimiento [56],

510 En lugares donde la vegetación ha desaparecido por causa de altas concentraciones de metales,
511 se puede introducir especies de plantas tolerantes a diferentes metales por ejemplo el pasto, esto
512 con el fin de reducirla migración de contaminantes a través de escorrentías en suelos
513 erosionados, ya que, el agua arrastrará porciones de tierra y con ellas metales pesados [57].

514

515 En técnicas como la fitoestabilización es necesario utilizar plantas tolerantes a los contaminantes
516 hallados en los suelos a tratar, ya que la función de dichas plantas será mantenerlos en sus raíces
517 con el fin de restringir su movilidad. La cantidad de metales acumulados en las plantas, así como
518 la capacidad que dichos metales tienen para movilizarse a través de las partes de las plantas, se
519 miden mediante el factor de bioconcentración (BF), factor de acumulación (AF), el factor de
520 translocación (TF) o relación de brote: raíz (B:R) [58].

521

522 El factor de bioconcentración (BF) representa el cociente entre la concentración de metales en los
523 órganos aéreos de la planta y la del suelo, el factor de acumulación (AF) determina la
524 concentración total de elementos en la raíz de la planta en función de los contaminantes que
525 presenten las muestras de suelo o relaves de mina después del tratamiento de fitorremediación.
526 En el caso del factor de translocación (TF) mide la concentración total de elementos en el tejido

527 del brote o de la relación brote: raíz (B:R) que determina la concentración total de elementos en
528 el tejido de la raíz.

529

530 El factor de bioconcentración (BF) se calcula mediante la siguiente relación:

531

$$532 \quad BF = \frac{\text{Concentración de metales en la parte aérea}}{\text{Concentración de metales del Suelo}}$$

533

534 Si $BF > 1$, la planta es potencialmente hiperacumuladora

535 Si $BF < 1$, la planta es exclusora

536

537 El factor de acumulación (AF) se calcula mediante la siguiente relación:

538

$$539 \quad AF = \frac{\text{Concentración de metales en la raíz}}{\text{Concentración de metales del Suelo}}$$

540

541 Si $AF > 1$, la planta es potencialmente hiperacumuladora

542 Si $AF < 1$, la planta es exclusora.

543

544 El factor de traslocación (TF) se calcula mediante la siguiente relación:

545

$$546 \quad TF = \frac{\text{Concentración de metales en la parte aérea de la planta}}{\text{Concentración de metales en la raíz}}$$

547

548

549 Si $TF > 1$, la planta traslada eficazmente los metales pesados desde la raíz hacia la parte aérea de
550 la planta, es decir, hiperacumula metales en su parte aérea.

551 Si $TF < 1$, la planta no traslada eficazmente los metales pesados desde la raíz hacia la parte aérea
552 de la planta, es decir, estabiliza metales en su raíz.

553

554 En varios estudios][34,59–61]se determina que la planta *Agrostis castellana* con índices de
555 bioacumulación > 2 y con un factor de transferencia < 1 , es una planta adecuada para la
556 fitoestabilización de las minas abandonadas que contienen metales pesados como el Zn, Cu, Pb,
557 Cd, y As. Sin embargo, es importante evitar convertir zonas de fitorremediación en campos de
558 pastoreo o de reintroducción de especies salvajes hasta que se realicen al menos 3 procesos de
559 fitorremediación, esto con el fin de evitar que los metales sean ingeridos por animales que sirvan
560 de alimento al hombre, pues a través de estos se generaría contaminación por metales pesados
561 a través de la ingesta. En un estudio sobre fitorremediación se encontró que 36 plantas
562 pertenecientes a 17 especies en un sitio contaminado, presentaron un alto factor de
563 bioconcentración y un factor de translocación bajo es decir que son aptas para la

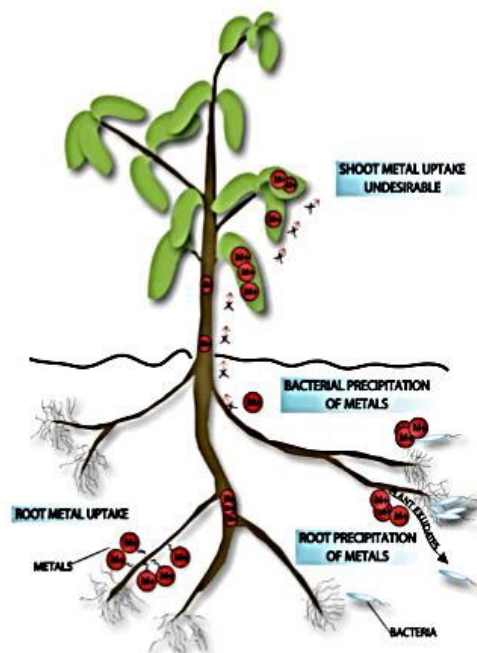
564 fitoestabilización, de las cuales se determina que la *Gentiana pennelliana* fue la más adecuada para
565 la fitoestabilización de sitios contaminados con Pb, Cu, y Zn [62].

566

567 La fitoestabilización asistida consiste en agregar suplementos naturales o sintéticos a los suelos,
568 con el fin de mejorar sus características tanto físicas como químicas [63], por otra parte, factores
569 como Por ejemplo, el cambio del pH uso de compost y nutrientes inciden en la reducción de la
570 biodisponibilidad de metales pesados en el suelo, así mismo, el uso de agentes acomplejantes
571 como el ácido cítrico y el EDTA. incrementa el crecimiento de las plantas, así como su potencial
572 de remediación. [64].

573

574 El incremento de bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPB) mejoran la
575 vegetación de las especies nativas[65]. En la Figura 5 se muestra los mecanismos de
576 fitoestabilización, que incluyen la precipitación de metales debido a la interacción de bacterias y
577 superficies radiculares; además, se muestra el transporte de los metales hacia otras partes de la
578 planta (a través del xilema) hasta llegar a acumularse en los tejidos de los brotes.



579

580 **Figura 6** Mecanismo de fitoestabilización incluido la precipitación de metales por bacterias

581

Fuente: [66].

582 Es necesario considerar la permanencia en el suelo los metales fitoestabilizados, en vista de que
583 pueden existir cambios en las condiciones de degradación de la materia orgánica, que posibiliten
584 la liberación parcial y gradual de lixiviados, provocando la dispersión de metales
585 fitoestabilizados a través de la erosión del suelo [66]. Por esta razón, es necesario realizar
586 monitoreo a largo plazo, para determinar la movilización de metales pesados, su toxicidad,
587 biodisponibilidad y el impacto ecológico que puedan provocar [66].

588

589 Existen distintas plantas como *Virola surinamensis* [67] y *Acanthus ilicifolius*, además de plantas
590 ornamentales como *Osmanthus fragrans*, *Cinnamomum camphora*, *Ligustrum vicaryi*, *Euonymus*
591 *japonicus* y *Loropetalum chinense*, que tienen la capacidad de fitoestabilizar cadmio (Cd) [68]. Por
592 otra parte, se ha reportado que la planta *Vossia cuspidata* es capaz de fitoestabilizar metales como
593 Cr, Zn, Pb y Cd [69].

594

595

596

1.1.3. Fitovolatilización

597

598

599

600

601

602

Consiste en la acumulación de especies de metales y/o metaloides en las células vegetales, que
serán convertidos en una forma volátil del metal. Normalmente el nuevo compuesto volátil es
menos nocivo y puede ser liberado a la atmósfera a través del xilema y estomas, evitando así
procesos de cosecha de plantas contaminadas que deberán ser tratadas posteriormente a través
de un gestor ambiental [70].

603

604

605

606

607

608

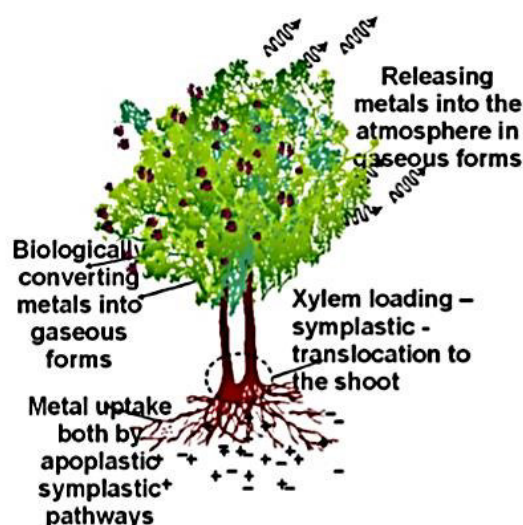
609

610

611

612

La fitovolatilización usa plantas que absorben metales del suelo, los convierten biológicamente
en una forma volátil y posteriormente los liberan a la atmósfera por volatilización. Se debe tomar
en cuenta que existen contaminantes en forma gaseosa, naturalmente en el ambiente, tales como
algunos compuestos orgánicos de As, Hg y Se. El mecanismo de fitovolatilización se muestra en
la Figura 6, donde se indica la absorción del metal a través de las raíces mediante apoplastos
(espacio extracelular periférico) junto con el agua y otros nutrientes de forma intracelular o
mediante procesos de ósmosis, para luego ser transportados por el xilema hasta las hojas donde,
mediante un proceso biológico los metales se transforman a un compuesto volátil, en algunos
casos, menos tóxico y de esta manera lo libera a la atmósfera en forma gaseosa [66].



613

614

Figura 7 Mecanismo de fitovolatilización.

615

Fuente: [20]

616

617

618

619

La fitovolatilización se utiliza para metales pesados y contaminantes orgánicos. Este método de
fitorremediación no elimina completamente el contaminante, solo lo transfiere del suelo hacia la
atmósfera desde donde el contaminante puede depositarse [20]. Por esta razón, esta tecnología es

620 muy controvertida a nivel ambiental, ya que se desconoce si los elementos volatilizados a la
621 atmósfera son seguros o dañinos. Investigaciones reportan que tanto especies no acumuladoras
622 como acumuladoras de Se, pueden volatilizar este elemento [71].

623

624 Algunas especies son muy eficaces para volatilizar algunos compuestos contaminantes como el
625 caso de la especie *B. juncea* que elimina hasta el 95% de Hg mediante este proceso [71]. Por otra
626 parte, algunas bacterias logran la absorción y evaporación de mercurio metálico, por lo que se
627 intenta desarrollar una planta transgénica mediante la transferencia de ADN_r bacteriano [72].
628 Los genes bacterianos que se usan son *merA* y *merB*. Al introducirlos en las plantas, estas serán
629 capaces de desintoxicar el mercurio orgánico. Estos genes son necesarios para que las plantas
630 desintoxiquen el mercurio orgánico convirtiéndole en mercurio elemental volátil y menos tóxico
631 [72].

632

633 La fitovolatilización a diferencia de otros métodos de fitorremediación, una vez que los
634 contaminantes se han eliminado por medio de la volatilización, pierde el control de su migración
635 hacia otras áreas [73]. Estudios determinan que los contaminantes están sujetos al proceso de
636 degradación natural y no contribuye significativamente a la reserva atmosférica. Sin embargo, se
637 debe evitar la fitovolatilización en sitios cercanos a centros poblacionales y lugares que
638 promuevan o provoquen la rápida deposición de compuestos volátiles. Se debe de considerar las
639 consecuencias al liberar metales a la atmósfera, antes de tomar este método como una
640 herramienta de fitorremediación. [20].

641

642 Trabajos de investigación experimental muestran que la fitovolatilización, además de ser
643 efectiva al momento de remover contaminantes orgánicos de suelos, demostró resultados
644 positivos en la remoción de metales pesados como mercurio (Hg) y selenio (Se) [74]. Además,
645 metales como el arsénico (As) presentan también altos porcentajes de remoción mediante este
646 proceso [75].

647

648 Existen algas marinas (*Osterococcus tauri*) y helechos (*Pteris vittata*) a través de los cuales es
649 posible volatilizar el arsénico (As), mientras que el selenio (Se) puede ser volatilizado por la
650 especie *Astragalus racemosus* [76].

651

652 Si bien esta técnica se puede utilizar para contaminantes orgánicos y algunos metales pesados
653 como Hg y Se, su uso está limitado por el hecho de que no elimina el contaminante por completo;
654 solo se transfiere de un compartimento ambiental (suelo) a otro (atmósfera), desde donde se
655 puede volver a depositar en el suelo o en el agua. La fitovolatilización es la más controvertida
656 de las tecnologías de fitorremediación [20].

657

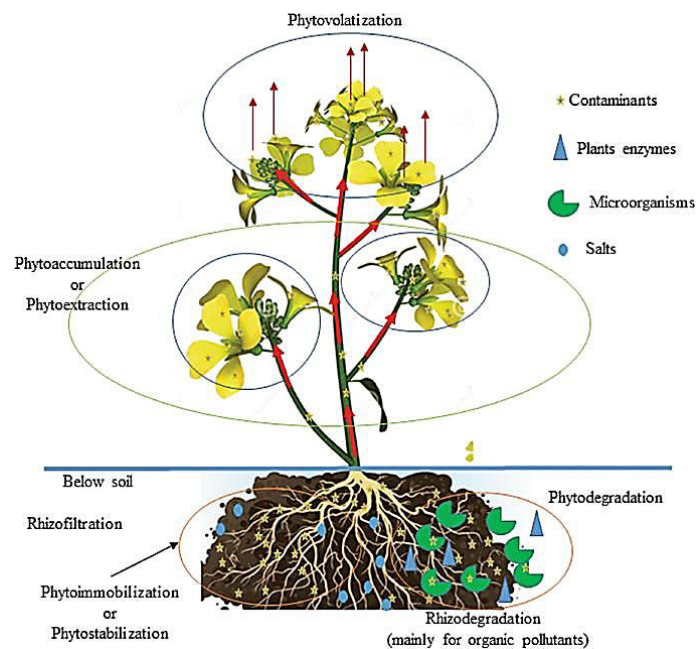
658 1.1.4. Fitodegradación/Fitotransformación

659 En este proceso los metales y/o metaloides son transformados en una forma menos tóxica
660 después de ser absorbidos; posteriormente sucede la descomposición y mineralización de los

661 iones metálicos dentro de la célula vegetal, gracias a procesos metabólicos o debido a la
 662 liberación de enzimas degradantes [41]. Un estudio demostró que la toxicidad del cromo (Cr) es
 663 reducida al transformar Cr (VI) en Cr (III) por una especie vegetal conocida como halófito [76,77].
 664

665 El mecanismo del proceso de fitodegradación (Figura 7) es principalmente el secuestro de
 666 contaminantes orgánicos del suelo, que implica la existencia de enzimas vegetales para dicha
 667 degradación. Estas enzimas según su tipo tienen diferente acción sobre los contaminantes como
 668 se indica en la Tabla 3. En el esquema mostrado, las plantas se encuentran en continua
 669 interacción con microorganismos, donde forman relaciones simbióticas. Este fenómeno de
 670 simbiosis se produce entre los hongos micorrízicos con casi todas las plantas terrestres [78].
 671

672 Se observa (Figura 8) como la acción de los microorganismos interactúan con los metales
 673 contaminantes en la parte externa de las raíces, los microorganismos mediante procesos
 674 enzimáticos logran la fitodegradación de los metales, convirtiendo un porcentaje de estos en
 675 sales, normalmente menos nocivas, mientras que otros porcentajes de metales se acumularán en
 676 diferentes órganos de las plantas, e incluso una porción de estos podrían volatilizarse al llegar a
 677 las hojas [78].
 678
 679
 680



681
 682
 683 **Figura 8** Mecanismos de fitorremediación incluido fitodegradación

684 Fuente: [78]
 685
 686
 687

688

689 La degradación del metal ocurre en tres etapas:

690

691 **I) Transformación:** Ocurren reacciones de oxidación, reducción e hidrólisis de tal forma
692 que la estructura original se modifica volviéndose más soluble en agua [79].693 **II) Conjugación:** Las moléculas tóxicas modificadas se unen a proteínas, péptidos,
694 aminoácidos o carbohidratos. Esto logra disminuir la toxicidad y aumenta su
695 hidrofobicidad, incrementando la movilidad de los contaminantes [79].696 **III) Compartimentalización:** Las moléculas incrementan su polaridad y se almacenan en
697 las vacuolas [79].

698

699

Tabla 4 Enzimas vegetales y su acción sobre el contaminante.

<i>Enzima</i>	<i>Acción</i>
<i>Deshalogenasa</i>	Secuestro de compuestos clorados
<i>Peroxidasa</i>	Secuestro de compuestos fenólicos
<i>Nitroreductasa</i>	Secuestro de explosivos y otros compuestos de nitrato
<i>Nitrilasa</i>	Secuestro de compuestos aromáticos de cianatos
<i>Fosfatasa</i>	Transformación de pesticidas organofosforados

700

Fuente: [78]

701

702 Este método de fitorremediación también puede incluir la degradación microbiana asistida por
703 plantas. Varios microorganismos bacterianos y fúngicos transforman metales tóxicos a sus
704 estados menos tóxicos. La cepa de *Pseudomonas maltophilia*, aislada del suelo en un sitio de
705 desechos tóxicos, catalizan la transformación y precipitación de varios cationes y oxianiones de
706 metales tóxicos [77]. La especie de *Aspergillus niger*, produce ácido cítrico y oxálico, que
707 transforman los compuestos metálicos inorgánicos insolubles de ZnO, Zn₃(PO₄)₂ y Co₃(PO₄)₂ en
708 sus respectivos oxalatos metálicos insolubles orgánicos [80].

709

710

1.1.5. Fitoacumulación711 Los metales son absorbidos junto con agua y nutrientes, por las raíces; luego son movilizados al
712 interior de la planta, para finalmente acumularse en las partes aéreas de la planta (ramas, brotes
713 y hojas) [40].

714

715 El proceso de intercambio iónico de fitoacumulación puede ser de dos tipos: acumulación pasiva
716 o activa. En la acumulación pasiva, la biosorción de metales se realiza a través de células muertas
717 o inactivas por la interacción entre metales y grupos funcionales (hidroxilo, carboxilo, fosfato,
718 tiol, sulfato, amida, amino y carbonilo) que se encuentran en la superficie de la célula. Mientras

719 que, la absorción activa es realizada por células vivas, que absorben los metales pesados del
720 suelo a través de diferentes mecanismos, el metal se une con metalotioneínas (bacterias y
721 hongos) y fitoquelatinas (hongos) [81].

722

723 1.1.6. Rizofiltración

724 En esta técnica de fitorremediación, la absorción y adsorción de contaminantes metálicos y
725 orgánicos presentes en agua y suelo, se da a través de las raíces de las plantas [82].

726

727 La rizofiltración, se usa para descontaminar agua superficial, subterránea o efluentes líquidos
728 contaminados con metales pesados, toxinas orgánicas, entre otros elementos [16]. Las plantas que
729 se utilizan con este fin se cultivan en invernaderos, con las raíces sumergidas en agua, en lugar de
730 tierra. Cuando el sistema radicular de la planta está bien desarrollado, sus raíces se colocan en
731 contacto con el agua o efluente a tratar. A medida que las raíces se van saturando en agua y
732 contaminantes, se van cortando y eliminando [7]

733

734 La rizofiltración es un tratamiento secundario de depuración, eficiente, de bajo costo, no requiere
735 personal especializado para su manejo y genera menor cantidad de residuos en comparación con
736 otros métodos [16]. Este método se basa en el uso de plantas como biofiltros para eliminar y
737 restaurar los ambientes contaminados, por lo que tiene gran aceptación por parte de la comunidad
738 y por las autoridades de control, gracias a su estética y poco impacto en el ambiente [83]. Para el
739 manejo y eliminación de las plantas acumuladoras de arsénico se han desarrollado procesos tales
740 como la carbonización e incineración de las plantas, hidrólisis y fermentación, briquetaje y diseño
741 de un biodigestor para producción de biogás [24].

742

743 Una aplicación del método de rizofiltración, es la implementación de humedales artificiales, que
744 son sistemas de fitorremediación de una amplia gama de aguas. Estos sistemas eliminan los
745 contaminantes utilizando procesos como la degradación microbiana, sedimentación, absorción
746 por acción de la planta, volatilización y reacciones químicas [16]. Por otra parte, son sistemas
747 adecuados para ser implementados en plantas de tratamiento de aguas porque tienen la capacidad
748 de reemplazar a un tratamiento secundario, mostrando resultados consistentes con un consumo
749 de energía mínimo, visualmente estéticos y no necesitan mantenimiento continuo [16].

750

751 Un caso de éxito en cuanto a rizofiltración en humedales, es el caso de las piscinas de relaves
752 procedentes de procesos mineros en la zona de Ponce Enríquez en Ecuador, usando la especie
753 *Coriandrum Sativum* para la remoción de plomo. Si bien la depuración de Pb no alcanza el 100%,
754 la técnica es eficiente para alcanzar los límites permitidos según la normativa ecuatoriana
755 (TULSMA) [84]

756

757 La rizofiltración es una técnica rentable, es ambientalmente amigable, es impulsada por energía
758 solar y muy eficaz para el secuestro de los productos químicos. Su eficiencia para la eliminación
759 de contaminantes depende del pH, temperatura, tiempo de retención hidráulica y de la
760 disponibilidad de nutrientes de las plantas en los sitios contaminados [83].

761
762 El método de rizofiltración alude el enfoque de utilizar raíces de plantas desarrolladas
763 hidropónicamente para la remediación del agua degradada por medio de la asimilación y la
764 precipitación de los contaminantes que se canalizan a través del agua. Varias especies de plantas
765 como *Eichhornia crassipes*, *Phragmites australis*, *Pistia stratiotes*, *Arundo donax*, *Salvinia molesta*, *Trapa*
766 *natans*, *Lemna minor*, *Helianthus annuus*, *Phaseolus vulgaris* y otras plantas fueron estudiadas para
767 evaluar su eficiencia a eliminación de contaminantes [85].

768
769 Por otra parte, con el fin de mejorar la eficiencia de este proceso es necesario tomar en cuenta
770 ciertos factores aparte de los ya mencionados. Se debe, por ejemplo, controlar la existencia de otras
771 especies de plantas y microorganismos. Las plantas conocidas como macrófitas utilizadas para
772 rizofiltración tienen un mecanismo de secreción de exudados radiculares tipo fenólicos y ácidos
773 orgánicos, que son transportados y acumulan los metales en las vacuolas celulares y los
774 transforman de metales pesados tóxicos a metales menos tóxicos. Existen mecanismos que apoyan
775 y aceleran el proceso, como es la producción de los compuestos antioxidantes fitoquelatinas (OC),
776 metalotioninas, etc. [85].

777
778 Las fitoquelatinas son péptidos ricos en ácido glutámico y cisteína (y-glutamilcisteína) presentes
779 en ciertas plantas, por ejemplo la alfalfa, se producen en grandes proporciones cuando se exponen
780 a ciertos metales como Cd, Cu, Zn y Hg [86]. Los complejos formados por fitoquelatina y metal se
781 almacenan principalmente a la vacuola, no obstante, existe una porción del metal que podría ser
782 secretado al xilema, lo que significa que será transportado a los brotes [87].

783 Las fitoquelatinas se asocian generalmente con la desintoxicación de metales no esenciales. Es
784 decir, estos compuestos regulan las concentraciones de metal libre en la célula [88].

785 Atributos del método de fitorremediación usando plantas incluyen una tolerancia alta a metales,
786 remoción de fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, elementos radioactivos, fluoruros, bacteria y
787 ciertos virus. Es por ello que esta tecnología es usada por muchas de las industrias como lecheras,
788 industrias de pulpa de papel, textiles, azucareras, curtidoras, destilerías, aceitera, galvanizado y
789 metalúrgicas [89].

790
791 Las plantas consumen metales esenciales, abundantes suplementos, por muchos motivos, como
792 para presentar mejor resistencia a las estaciones climáticas, protección contra elementos patógenos
793 y amenazas de depredadores. La rizofiltración es apropiada para tratamiento de aguas
794 subterráneas, superficiales, diferentes tipos de efluentes, agua de lavado de cables eléctricos,
795 aguas pluviales, filtraciones de aguas ácidas de relaves mineros, tratamiento de aguas de drenaje
796 provenientes de granjas y otros efluentes. Finalmente, una de las ventajas de usar plantas acuáticas
797 para la rizofiltración es por ser considerada como una tecnología sustentable, aplicable a
798 ambientes con concentraciones de contaminantes de bajas a moderadas, técnica de bajo costo, no
799 requiere personal especializado para su manejo, ni consumo de energía, no produce
800 contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares para desecho y tiene una

801 alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable [89]. Sin
802 embargo, las plantas que han absorbido metales pesados son generalmente incineradas, proceso
803 que si no es realizado correctamente puede generar emisiones toxicas al ambiente, de este hecho
804 parte la imperiosa necesidad de buscar alternativas al destino final que se le dé a las plantas luego
805 del proceso de fitorremediación.

806

807

808 **1.1.7. Fitodesalinización**

809

810 La fitodesalinación se refiere al uso de plantas halófitas (plantas cuyas raíces están en contacto con
811 ambientes salinos), para la eliminación de dichas sales de suelos afectados, a fin de permitir el
812 crecimiento normal de otras plantas.

813

814 En general esta tecnología no es usada para la remediación de biomásas con contaminantes
815 orgánicos persistentes o PTE. Este método es usado para eliminar franjas de suelos afectados por
816 la sal, lo cual es posible usando diferentes especies halófitas como *Artemisia argyi*, *Limonium*
817 *bicolor*, *Melilotus suaveolens* y *Salsola collina* [20].

818

819 El agua salada constituye un 96,5% del agua de todo el planeta. Cada kilogramo contiene 35 g de
820 sales y la mayoría de plantas no pueden crecer en este tipo de solución. Sin embargo, el 0,2% de
821 las especies pueden hacerlo. A estas especies se las llaman extremófilas o halófitas. Estas plantas
822 son usadas para la revegetación de la tierra, como forraje para el ganado y para desarrollar cultivos
823 tolerantes a la sal [90].

824

825 Las plantas halófitas tienen gran capacidad de tolerar altas concentraciones de iones de Na y Cl.
826 Regulan el transporte desde su membrana, sintetizan solutos compatibles y hacen frente a especies
827 reactivas de oxígeno [20]. Son capaces de recuperar suelos con contenido salino excesivo que
828 cubren alrededor del 6% de toda la tierra. Cabe anotar que la salinidad es el principal factor
829 ambiental que limita la productividad y el crecimiento de las plantas, además de otros factores
830 como los metales pesados [20].

831

832 Muchas halófitas se reproducen en áreas que muchas veces no son 100 % salinas como en el caso
833 de los manglares [20]. También se las encuentra en agua estancada, como la especie *Suculenta* de
834 tallo, que es también tolerante a la sal, que característica que le otorga la forma ovalada a sus hojas,
835 esta planta crece en lagos efímeros salados [16]. Otro ejemplar es la *Tecticornia medusae*, mucho
836 más tolerante a la sal que la anterior, pero mucho más propensa a afecciones por inundaciones
837 [73]. Así mismo, a pesar de que la especie *T. medusae* tiene concentraciones de oxígeno dentro de
838 sus tejidos, al sumergirse en la oscuridad aumenta las concentraciones de oxígeno dentro de sus
839 tejidos debido a procesos de fotosíntesis subacuática, en ambos casos las especies y sus brotes
840 contienen altas cantidades de sodio y cloro por lo que se produce una hinchazón y por lo tanto no

841 se rompe, ya que el factor de hinchazón es un indicador para la permeabilidad en las especies
842 tolerantes a la salinidad del medio [90].

843

844 Existen varias ventajas al rehabilitar los suelos salinos [91]:

- 845 • Ayuda a la estabilidad del suelo al crear macroporos, porque mejora la propiedad hidráulica del
- 846 suelo y la proliferación de raíces.
- 847 • Después de la rehabilitación del suelo puede incrementarse la disponibilidad de los nutrientes.
- 848 • Mejora la profundidad y uniformidad del suelo.
- 849 • Desde el punto de vista ambiental ayuda a la mejora de suelos degradados y marginales.
- 850 • Esta técnica de fitorremediación es una solución eficaz y rentable en grandes extensiones de
- 851 terreno con contaminantes inmóviles [91].

852 La fitodesalinización mediante el uso de halófitos desempeña un papel muy importante y cada
853 vez toma mayor relevancia como un modelo para el estudio de la tolerancia a la sal de las plantas.
854 Esta técnica como recurso genético puede contribuir a mejorar la tolerancia al cloruro de sodio en
855 cultivos para la revegetación de tierras salinas [90].

856

858

859

860 SECCIÓN 2:

861

862 **2.1. Análisis comparativo de datos de aplicación de técnicas de fitorremediación, para la**

863 **depuración de suelos contaminados con metales pesados, en países desarrollados.**

864

865 Diversas definiciones buscan dar pautas para la clasificación de países considerados
866 “desarrollados”, no obstante, la convergencia de dichas definiciones establece características
867 comunes. Un país desarrollado permite un alto nivel de calidad de vida para su población,
868 además de un amplio grado de desarrollo industrial, socioeconómico y alto ingreso per cápita
869 [92].

870

871 Los países que debido a su economía y desarrollo han sido denominados “desarrollados” son:
872 Austria, Bélgica, Dinamarca, Finlandia, Francia, Alemania, Grecia, Irlanda, Italia, Luxemburgo,
873 Países Bajos, Portugal, España, Suecia, Reino Unido, Bulgaria, Croacia, Chipre, República Checa,
874 Estonia, Hungría, Letonia, Lituania, Malta, Polonia, Rumania, Eslovaquia, Eslovenia, Islandia,
875 Noruega, Suiza, Australia, Canadá, Japón, Nueva Zelanda y Estados Unidos [93]. En la tabla 5 se
876 observa un resumen de las especies vegetales cuya capacidad para remover metales pesados de
877 suelos ha sido estudiada en universidades de estos países.

878

879

880

Tabla 5 Técnicas de fitorremediación para suelos contaminados con metales pesados en países desarrollados

País	Tipo de suelo	Concentración metales pesados	pH	Adecuaciones/ Pretratamiento	Especie	Resultados	Fuente
España	Suelo de mina	Cd (2.88 – 54.47 mg/kg)	NA	NA	<i>Biscutella auriculata</i> L	Raíces: (1.184 mg/Kg) Hojas: (0.174 mg/kg)	[94]
España	Tecnosoil: abono orgánico (40%), arena (36%), residuos de minería de piedra caliza (20%) y bentonita (4%)	Cu (125; 1525 y 3050 mg/kg)	8	Irrigación con CuSO ₄	<i>Myracrodruon Urundeuva</i> y <i>Cedrela fissilis</i>	Inmovilización de Cu entre 60 y 80%	[95]
Turquía	Mezcla de suelo contaminado y no contaminado mediante rastreo GPS	Cd (483.70 mg/kg); Pb (25755.60 mg/kg) y Zn (13412.20 mg/kg)	8	NA	Canola (<i>Brassica napus</i>) Soja (<i>Glycine max</i>)	Remoción con soja Cd 238; Pb 554; Zn 2380 (mg/kg) Remoción con canola Cd 1134; Pb 36,82; Zn 6169 (mg/kg)	[96]
Rumanía	Vertedero minero de Cu	Cu (234,66 mg kg-1), Zn (260,01 mg kg-1)	6,2 a 6,8	NA	<i>Silphium perfoliatum</i> L.	Cu (~28 mg/kg) Zn (~29,4 mg/kg) Cr (~38,8 mg/kg) Pb (~13 mg/kg)	[97]

						, Cr (299,08 mg kg-1) y Pb (175,18 mg kg-1)			
<i>China</i>	Suelo de arrozales contaminados con Cd	Cd	NA	Bacterias <i>Enterobacter sp.</i> y <i>Comamonas sp.</i>	<i>Brassica rapa L</i>			Disminución de Cd en 71.3% (suelos baja contaminación), 62.8% (suelos contaminación media) y 38.6% (suelos contaminación alta)	[98]
<i>China</i>	Suelo de estanque de relaves	Mn (10,2 g/kg)	5,65	Fertilización con fósforo (P)	<i>P. pubescens</i>			Aumenta concentración de Mn en 50% en hojas	[99]
<i>China</i>	NA	Cd (1,83 mg/kg)	8,57	Fertilizantes a base de CO (NH ₂) ₂ ; KH ₂ PO ₄ y K ₂ SO ₄	<i>Triticum aestivum L.</i>) y <i>Solanum nigrum L.</i>			La acumulación de Cd aumentó en 12.87% y 0.98%	[100]
<i>China</i>	Lodo compostado con arroz. cáscara, paja y lima	Cu (48.8 mg/ kg) Pb (225 mg/kg) Zn (1397 mg/kg) Cd (8.75 mg/kg) Ni (148.2 mg/kg)	7,98	Enmiendas con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), ácido indol-3-acético (IAA) y líquido microbiano (BL)	<i>Bryophyllum laetivirens</i>			En el suelo se reporta : Cu (25,3 mg/ kg) Pb (109 mg/kg) Zn (635 mg/kg) Cd (4,3 mg/kg) Ni (89,5 mg/kg)	[101]
<i>China</i>	Suelo común	Cd (23,54 mg/kg) Zn (448,1 mg/kg)	8,03	Se usó cloruro de zinc dihidrato (ZnCl ₂ 2H ₂ O) y cloruro de cadmio dihidrato (CdCl ₂ 2H ₂ O)	<i>Ricinus communis</i>			Mayor absorción por raíces Cd (175,3 mg /kg) y Zn (386,8 mg/kg)	[102]

<i>China</i>	Suelo de mina de Cu	Cu (2221 mg/kg)	7,2	Enriquecido con P	Yute (<i>Corchorus capsularis</i>) Corchorus capsularis (HongTieGuXuan y GuBaChangJia)	Raíces: 230 mg/kg Tallos: 385 mg/kg	[103]
<i>China</i>	Suelo agrícola	Cd	NA	Gusanos de seda	<i>Morus</i> (Morera)	El cadmio se acumula en: Raíces: 54,4 % Hojas: 10 %	[104]
<i>China</i>	Suelo contaminado con V de cultivo cercano a fundición de carbón de piedra	V (156 mg/kg), Cr (122 mg/kg) y Cd (1,5 mg/kg)	7,49	Dos cepas bacterianas endofíticas, <i>Serratia marcescens</i> PRE01 y <i>Arthrobacter ginsengisoli</i> PRE05	<i>Brassica juncea</i>	Incremento en absorción total de metales entre 24,2% y 32,0%	[105]
<i>China</i>	Suelo contaminado con metals pesados en Fuyang	Cu 197 mg/kg, Zn 1550 mg/kg, Pb 342 mg/kg Cd 2.2 mg/k	NA	Grasa animal como fuente de carbono para la producción de ramnolípidos por <i>Pseudomonas aeruginosa</i> D1.	Raigrás	Se logra la fitorremediación de alrededor del 100% de Cu y Pb, 80% Cd y 30% Zn	[106]
<i>China</i>	Tierra de cultivo contaminada	Zn 589,56 mg/kg Cd 1,46 mg/kg	6,75	NA	<i>Chrysanthemum indicum</i> L.	Reducción en el suelo de Cd de 78.1% y Zn de 28.4%	[107]

		Cd 10.5 y 3.0 (mg/ kg)					
España	Suelo de 2 minas	Cu 16.5 y 35.1 (mg/kg)	7,1 y 7,7	Microorganismos	<i>P. aeruginosa</i> en raigrás (<i>Lolium multiflorum Lam.</i>)	La capacidad de absorción aumentó en 35,9 % para Cu, 55,6% de Pb y 283,5% para Cd	[108]
Georgia	Suelo de jardin	Pb 2.3 y 2.7 (g/kg) Soluciones de nitrato y carbonato de Pb	7,66	NA	<i>Tithonia rotundifolia</i> (girasol rojo)	Absorción hasta 33% de Pb	[109]
España	Suelo de mina abandonada de Cu	Cu (16,022 mg/kg)	6. ,08–7,16	NA	Musgo <i>Ptychostomum capillare</i>	12 veces más Cu concentrado en el suelo con bajo contenido de cobre	[110]
Italia	Suelo común	Dos concentraciones para cada metal: Ni (500-750); Cd (15-22.5); Cu (600-900); V (250-375); As (50-75); Pb (1000-1500); Zn (1500-2250); Hg (5-7.5) mg/kg	2-12	Microorganismos: <i>Trichoderma harzianum</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> y <i>Wickerhamomyces anomalus</i>	<i>T. harzianum</i>	Ni (38%); Cd (50%); Cu (36%); Pb (27%); Hg (60%); V (39%); Zn (23%)	[111]

<i>China</i>	Relave de mina	Pb; Zn y Cd	6-7	NA	Pino silvestre (<i>P. sylvestris</i>)	Pb (0,3%); Zn (9,3%) y Cd (4,35%) residuales en suelo	[112]
--------------	----------------	-------------	-----	----	---	--	-------

884

885 De acuerdo con el resumen realizado en la Tabla 5, se observa que el país que lidera los trabajos
886 de investigación sobre fitorremediación es China. Por otro lado, en una publicación realizada en
887 2020 por Zhou [62] en base a literatura y patentes relacionadas con la restauración ecológica,
888 establece que fue Estados Unidos el país pionero en estudios sobre la restauración ecológica de
889 humedales, mientras que China inició en este campo en el año 2000, 10 años más tarde que otros
890 países desarrollados. La fitorremediación ha sido muy estudiada en China desde el 2004 [113].

891

892 Tomando como fuente de referencias la base de datos SCOPUS, desde el 2015 solo en China se
893 han publicado 7 571 trabajos de investigación relacionados con fitorremediación de metales
894 pesados, lo que correspondería al 31% de un total de 24 344 trabajos relacionados con este tema
895 en el mundo. Por otra parte, en Estados Unidos se han publicado 1 808 investigaciones en el mismo
896 periodo de tiempo, lo que equivale al 7,4%.

897

898 Las referencias bibliográficas resumidas en la Tabla 5 evidencian también el uso de técnicas
899 auxiliares a la fitorremediación. Se menciona, el uso de enmiendas como quelantes, soluciones
900 orgánicas enriquecidas con nutrientes para fortalecer a las plantas de prueba e incrementar su
901 tolerancia a los metales pesados, así como el uso de microorganismos y hongos que colaboren en
902 la descomposición de los metales presentes en el suelo, mejorando su biodisponibilidad al
903 momento de ser tratados con las distintas especies vegetales.

904

905 Un factor que contribuye a la movilidad de los metales pesados en los suelos es el pH [78]. En la
906 Tabla 5 se observa que este valor predomina en rangos de 5 a 8, pues a pH ácido la movilidad de
907 los metales es mayor y con esto incrementa la posibilidad de ser absorbidos por las plantas. Este
908 fenómeno es contraproducente en zonas agrícolas, donde se atendería a la seguridad alimentaria,
909 al ingerir alimentos que contengan metales pesados. De aquí que la mayoría de investigaciones
910 buscan lograr pH alcalino, con el fin de estabilizar a los metales en las raíces de las plantas
911 hiperacumuladoras de metales pesados [78].

912

913 Las enmiendas del suelo en la absorción de metales para la fitoextracción, principalmente usan
914 ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), nitrato de amonio, ácido cítrico, compost y
915 nanopartículas de dióxido de titanio (TNP) [114]. Con enmiendas se logra incrementos
916 significativos de adsorción de metales de hasta 270 % en Cd y 71 % en Pb, de acuerdo con un
917 trabajo realizado en España [114].

918

919 En China se realizó un estudio que evalúa la influencia del uso de agentes quelantes, con el fin de
920 mejorar la fitoextracción de metales pesados, a través de la formación de complejos metálicos
921 solubles. Los resultados mostraron que los quelatos tuvieron un mejor desempeño de activación
922 en suelos contaminados con Pb y Cd, cuya eficiencia es mayor al 63 % usando apenas un 3% de
923 agente quelante [115].

924

925

926

927

928

929

930

931

932

933

934

935

936

937

938

939

940

941

942

943

944

945

946

947

948

949

950

951

952

953

954

955

SECCIÓN 3:

956

957

958

959

960

961

962

963

964

965

966

La eficiencia de la fitorremediación depende de factores como la resistencia a los contaminantes de la especie vegetal a usarse, el grado de concentración de metales pesados en el suelo, así como las enmiendas que puedan usarse como apoyo en la fitorremediación [16]. Se observa que los porcentajes reportados son relativamente altos (superiores al 60%), considerando que se trata de la técnica de menor impacto ecológico [16,116]. Adicionalmente, los costos de esta técnica (aproximadamente 4 dólares por m²) son menores a los gastos en que se incurre en técnicas químicas, físicoquímicas, electrocinéticas, etc (entre 50 y 600 dólares por m³) [117].

Algunos estudios realizados en países europeos como España [118], han usado satisfactoriamente micro-nano fanerófito (*Nerium oleander L.*), en zonas altamente ácidas y con altas concentraciones de metales pesados, logrando la absorción de metales como Fe, Cu, Zn, Mn, Mg y Ca [118].

Por otra parte, existen suelos comerciales preparados con diferentes materiales sintéticos (quelantes) y naturales (compostaje), usados como complementos en tratamientos de suelo y agua [119]. Tal es el caso del Tecnosol, un suelo “tratante” usado junto a especies arbóreas (*Myracrodruon urundeuva* y *Cedrela fissilis* conocido como cedro rosa) para la remoción de cobre (Cu) de suelos contaminados en regiones españolas [95].

De acuerdo con la información recopilada a lo largo del presente review, se piensa que los países desarrollados mantienen en su mayoría estándares de calidad altos, así como normativa ambiental que busca dar soluciones efectivas a problemas de contaminación. Por otro lado, estos países cuentan con mayor cantidad de fondos destinados a procesos medioambientales de remediación (debido a leyes más rígidas con respecto al cierre de minas por ejemplo); mientras que, países en vías de desarrollo deben priorizar problemas como pobreza, desempleo y hambre, antes de atender asuntos de igual relevancia como la descontaminación de suelos, además de un deficiente seguimiento por parte de las autoridades ambientales a la gestión de cierre de minas a las empresas mineras..

3.1. Análisis comparativo de datos de aplicación de técnicas de fitorremediación, para la depuración de suelos contaminados con metales pesados, en países en vías de desarrollo.

Los países en “vías de desarrollo” son aquellos que poseen un nivel bajo de calidad de vida, en relación con otros países, además de que dependen, en muchos casos, de un sector económico particular. Tienen poco desarrollo industrial, bajo ingreso per cápita y tienen problemas socioeconómicos severos [92].

Un estudio realizado en 2010 [93] clasifica como países en “vías de desarrollo” a las regiones de África, países de Asia y países de América Latina y El Caribe. Siendo los países mayormente conocidos en esta categoría: Argelia, Egipto, Marruecos, Sudán, Túnez, Angola, Mozambique,

967 Nueva Guinea, Filipinas, República de Corea, Singapur, Taiwán, Vietnam, Cuba, República
968 Dominicana, Haití, México, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Bangladesh, India,
969 Irán, Pakistán, Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, Perú, Uruguay,
970 Venezuela, entre otros [93].

Tabla 6 Técnicas de fitorremediación para suelos contaminados con metales pesados en países en vías de desarrollo.

País	Tipo de suelo	Concentración de metales pesados	pH	Adecuaciones /pretratamientos	Especie	Resultados	Fuente
Chile	Relave de mina	Fe, Cu, Mn	NA	NA	<i>Sarcocornia neei</i>	94,5% Cu 27% Fe 100% Mn	[120]
Perú	Botadero de basura	As, Cd, Cu	NA	NA	Geranio (<i>Pelargonium zonale</i>)	74%; 79%; 55%	[121]
Argentina	Suelo común	Pb	NA	Nitrato de plomo	Cebolla verde y orégano	Hasta 90%	[122]
India	Lodos de industria de papel	Fe	8,5		<i>Eclipta alba (L)</i> y <i>Alternanthera filoxeroide (L)</i>	50%	[123]
India	Lodos de industria de papel	Fe (98,30 mg/L), Zn (51 mg/L), Cu (3,21 mg/L), Cd (9,11 mg/L), Mn (18,27 mg/L), Ni (5,21 mg/L), Hg (0,014 mg/L); As (0,97 mg/L)	8,1	Enzimas antioxidantes	<i>Chenopodium album L.</i> , <i>Ricinus communis</i> , <i>Ranunculus sceleratus</i> y <i>Rumex dentatus</i>	Fe (24,21 mg/L), Zn (18,01 mg/L), Cu (1,02 mg/L), Cd (4,31 mg/L), Mn (10,22 mg/L), Ni (2,1 mg/L), Hg (0,001 mg/L); As (0,37 mg/L)	[124]
Pakistán	Común	Enriquecido con PbSO ₄ en concentraciones de 500, 750, 1000 y 1500 mg/kg	NA	Quelante di-iso-propanol-amine (DIPA)	<i>Pelargonium hortorum</i>	Absorbe 2,5 veces más Pb	[125]

Pakistán	Común	5 mM Pb y Hg	NA	Con y sin enmienda de ácido cítrico	<i>Typha latifolia L</i>	Aumento en concentración y acumulación Raíces: entre 22 y 35% de Pb; entre 72 y 40% de Hg Tallos: entre 25 y 26% de Pb; entre 85 y 60% de Hg Hojas: entre 22 y 15% de Pb; entre 100 y 58% de Hg	[126]
Pakistán	Suelo de zona industrial	Pb > 1500 mg/kg	NA	Asiatencia con microorganismos: hongo endofítico (<i>Trametes hirsuta</i>)	<i>Chenopodium album L</i>	50% mayor absorción de Pb (1500 mg/kg)	[127]
India	Suelo de común	Cloruro de Cd aplicado a 0, 5, 10, 20, 40 y 80 (mg/kg)	7,83	Agentes quelantes como ácido etilendiamina tetraacético (EDTA)	<i>Brassica. juncea L., Brassica campestris L. y Brassica. napus L.</i>	Mayor acumulación de Cd (344,82 mg kg/1) con B, campestris	[128]
Puerto Rico	Suelo contaminado de una Ciénaga	5 mg/kg Cd; 200 mg/kg Pb; 8 mg/kg As.	6-8	Hierro nano cerovalente (nZVI)	<i>A. germinans</i> (Manglar negro)	Remoción de alrededor del 95% As; 50% Cd y 60% Pb.	[129]

República Dominicana	Suelo común	Concentraciones preparadas de 300; 600; 900 y 1500 (mg/kg) de Pb	5,7	NA	<i>Chrysanthemum indicum L.</i> (Crisantemos)	Bioacumulación de hasta 2091,22 mg/kg	[130]
Colombia	Tierra Bona (Sustrato orgánico comercial) con dos preparaciones comerciales para formar las micorrizas	0,73 mg/kg Hg	6,07	Hongos micorrízicos arbusculares	<i>Lolium perenne</i>	Absorción de 0,55 mg /kg Hg	[131]
Perú	Suelo agrícola	Pb 206,24 – 1174,4 (mg/kg); Cd 6,76 – 8,26 (mg/kg)	7,3-7,85	Enmienda de compost y vermicompost	Girasol	Concentración en hojas: Pb 28,38 mg/kg y tallos 9,16 mg/kg; mientras que Cd 4 mg/kg en raíces y 5 mg/kg en hojas	[132]
Ecuador	Suelo minero	Hg 0,19 - 4,8 mg/kg	4,2	Hongos micorrízicos arbusculares	<i>Axonopus compressus, Erato polymnioides y Miconia zamorensis</i>	Hg en raíces 3,56 mg/kg y en hojas 1,48 mg/kg	[133]
Ecuador	Suelo minero	Pb 283,31- 0,05 mg/kg; Zn 213,86-0.005 mg/kg; Cu	NA	Hongos micorrízicos arbusculares	<i>Miconia zamorensis, Axonopus compressus y Erato polymnioides.</i>	Para Pb en raíces 1078, hojas 164, tallo 147 (mg/kg). Zn en	[134]

324,75- 0.010 mg/kg; Cd

228,80-0,002 mg/kg

raíces 789, hojas

650, tallo 323

(mg/kg). Cd en

raíces 70, hojas 10,

tallo 2 (mg/kg). Cu

en raíces 123, hojas

44, tallo 40 (mg/kg)

974

975

976

977

978

979

Del análisis de la información publicada en la base SCOPUS con respecto a fitorremediación de metales pesados en los países en vías de desarrollo, desde 2015 lidera la India con 3 384 publicaciones, seguido de Pakistán con 1 472; ambos países contribuyen con el 20% de investigaciones relacionadas con este tema.

980

981

982

983

984

985

986

987

988

989

En este grupo de países, de acuerdo con la Tabla 6, se observa la predominancia del uso de microorganismos y hongos como técnica auxiliar a la fitorremediación. Esta tendencia puede deberse a los menores costos que implica usar microorganismos, comparado con el uso de quelantes y otras soluciones químicas como EDTA. Debe notarse en la Tabla 6, que los valores de pH en los suelos no son resaltados en las investigaciones en este grupo de países, debido a un concepto generalizado, sobre todo en Latino América, de la riqueza de sus suelos, bondades que suceden en suelos alcalinos [3]. Esto explicaría también, que los porcentajes de remoción de metales pesados en suelos contaminados, alcancen incluso valores cercanos al 100% para algunos metales, debido a tenerse suelos con gran cantidad de nutrientes [133].

990

991

992

993

994

995

En este grupo de países (Tabla 6) se observa, el uso de plantas ornamentales como los girasoles como especie bioacumuladora de metales pesados, lo que brinda una pauta para futuras investigaciones, pensadas en el uso de plantas ornamentales que podrían ser comercializadas, una vez cumplan con su función fitorremediadora, sin causar preocupación porque no ingresan a la cadena alimentaria [132].

996

997

998

999

1000

Así mismo, de acuerdo con la base de datos de SCOPUS, en el caso de Latino América, tomando como dato las publicaciones en temas de fitorremediación desde el año 2000, se han realizado 1 752 investigaciones. De estas, Brasil lidera el grupo con 897 publicaciones. En el caso puntual del Ecuador se han publicado 49 documentos, en su mayoría durante los años 2019 y 2020.

1001

1002

1003

1004

1005

1006

1007

1008

1009

1010

1011

En Brasil se reporta una investigación en un invernadero, para evaluar el efecto del suelo contaminado por desechos provenientes de la industria del zinc. Se evalúan los niveles de metales pesados y el estado nutricional de raíces y brotes de sauces jóvenes, usando plántulas de un año, en suelos de entre 0,15 y 30% (v / v) de suelo contaminado, mezclado con suelo libre de contaminantes, para ello se prepararon muestras con 18 600 mg/kg de Zn, 140 mg/kg de Cd, 450 mg/kg de Cu y 410 mg/kg de Pb. Los resultados evidenciaron altos niveles de metales en hojas (Zn entre 362 a 878 mg/kg y Cd entre 19 a 35 mg/kg), además de fitotoxicidad por Zn y Cd (como alimento de animales). Por otro lado, los niveles de nutrientes (P, K, Ca, Mg y N) no se vieron afectados por el suelo contaminado, mostrando una baja influencia de los metales pesados, en su estado nutricional [135].

1012

1013

1014

Así mismo, otro estudio realizado en 2010 en Brasil [104] utiliza fitorremediación mediante kenaf (*Hybiscus canabinnus*), mostaza (*Brassica juncea*), nabo (*Raphanus sativus*) y amaranto (*Amaranthus crenatus*), cultivando dichas especies en suelos contaminados con zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso

1015 (Mn), plomo (Pb) y boro (B). En dicho estudio se logran resultados prometedores en plantas de
1016 kenaf con mayor nivel de tolerancia a las condiciones probadas. Sin embargo, el amaranto sería la
1017 especie utilizada para remediar el suelo, ya que presenta los índices más altos para la
1018 descontaminación de Zn y Mn, además de que se logra la eliminación de B [136].

1019
1020 El camino en las investigaciones y aplicación de métodos de fitorremediación de metales pesados
1021 en países en vías de desarrollo es aún extenso, no obstante, existe un buen número de bases que
1022 permitirán seguir avanzando a la remediación ambiental eficiente y de relativamente bajo costo.

1023
1024 Ecuador también continúa realizando investigación en el tema, con el fin de mejorar las
1025 condiciones de los terrenos mineros, tanto aquellos que están en operación actualmente, así como
1026 aquellos que han culminado su proceso extractivo. Así, por ejemplo, se realizó un trabajo basado
1027 en fitoextracción para la remoción de arsénico contenido en relaves mineros, logrando porcentajes
1028 de remoción de 35% usando la especie *Scirpus californicus* (Totora) [34]. Por otra parte, se han
1029 realizado trabajos experimentales con el uso de EDTA como cotratamiento para mejorar la
1030 capacidad de absorción de plomo de las especies *Medicago sativa* y *Taraxacum officinale* [137].

1031

1032 SECCIÓN 4:

1033 4.1. Perspectivas futuras de investigación sobre técnicas de fitorremediación para la 1034 descontaminación de suelos que contengan metales pesados

1035

1036 Si bien las técnicas de fitorremediación utilizadas actualmente, han logrado la remoción (hasta el
1037 100% para Hg y Cu por ejemplo) de importantes porcentajes de metales pesados en suelos
1038 contaminados (Resumen en tablas 5 y 6), dichas técnicas poseen desventajas. El tiempo de
1039 tratamiento requerido, es prolongado en función del nivel de contaminantes que contenga un
1040 suelo [113]. Además, la fitorremediación como única técnica de tratamiento descontaminante, no
1041 es suficientemente válida para zonas con elevadas concentraciones de metales pesados [138], por
1042 lo que, es necesario aunar técnicas o pretratamientos con microorganismos o compuestos que,
1043 en algunos casos contribuyan a una mayor degradación de metales pesados [138], o fortalecer a la
1044 especie vegetal con el fin de que esta no disminuya dramáticamente su capacidad para remover
1045 los contaminantes [114].

1046

1047 En los últimos años, diversos estudios demuestran la eficiencia de la nanotecnología junto a la
1048 fitorremediación como técnica de tratamiento para suelos contaminados con metales pesados [26].
1049 Materiales como nano-TiO₂, nano-Fe₃O₄, nano-Ni, nanoSnO₂, nano-Ag, nano-Zn, nano-ZVI,
1050 pueden ser aplicados como coadyuvantes en la eliminación de metales tóxicos como Pb, Cd, Zn,
1051 Cu y Cr del suelo [139][140].

1052

1053 Así mismo, la aplicación conjunta de nano partículas de hierro metálico (nZVI) y biocarbón (BC)
1054 se ha utilizado en investigaciones de remediación de suelos contaminados con Cd [138]. En este
1055 estudio, las semillas de plantas fueron expuestas a diferentes concentraciones de nZVI y BC. Las

1056 nanopartículas fueron preparadas mediante reducción con borohidruro (BH_4^+). Esta técnica
1057 mejoró la germinación de las plantas, su contenido de clorofila, así como la capacidad
1058 inmovilizadora de cadmio y su absorción a través de raíces [138]. El uso combinado de nZVI y BC
1059 constituyen una técnica prometedora de la fitorremediación de metales pesados en suelos a
1060 futuro.

1061
1062 Por otra parte, existen técnicas de fitorremediación asistidas por hongos, tal es el caso de los
1063 endófitos, que actúan como huésped de plantas “remediadoras” de suelos contaminados, la
1064 interacción de los endófitos permite mejorar la productividad general de los organismos
1065 hospedantes, mejorando su crecimiento y resistencia [141].

1066
1067 Distintas especies de plantas son eficientes en la extracción y acumulación de metales nocivos. No
1068 obstante, se trata de procesos lentos y que producen poca cantidad de biomasa [25]. Por este
1069 motivo, la ingeniería genética puede ser una alternativa para desarrollar plantas transgénicas que
1070 posean alta producción de biomasa, mayor capacidad de acumulación de metales, mayor
1071 tolerancia a la toxicidad de los metales, además de lograr una mejor adaptación a diversas
1072 condiciones climáticas [25].

1073
1074 Los tratamientos post operaciones mineras o industriales, no son las únicas alternativas para
1075 subsanar los suelos contaminados. Existen técnicas prometedoras como la Fito minería (uso de
1076 plantas en relaveras y/o piscinas de efluentes) que permitirían recuperar metales es minas de baja
1077 ley, además de propiciar relaves y efluentes con menores concentraciones de metales
1078 contaminantes [142].

1079
1080 Generalmente los desechos provenientes de minas de Zn y Pb poseen escasa vegetación y son
1081 propensos a la erosión debido a los niveles fitotóxicos de metales pesados residuales, la baja
1082 cantidad de nutrientes y la estructura física deficiente [15]. En relaveras de algunas zonas de
1083 Polonia, crecen naturalmente especies como *Dianthus carthusianorum* y *Biscutella laevigata*, a las que
1084 se añadió fertilizante NPK o lodo de alcantarillado municipal, complementado con K_2O ,
1085 disminuyendolas concentraciones de las formas solubles de Zn, Pb y Cd [143].

1086
1087 En los últimos años se han dado avances en cuanto a modificaciones genéticas en plantas [144],
1088 lo que se puede constituir en una herramienta de mejora para la fitorremediación. Por ejemplo,
1089 existen reportes usando plantas transgénicas que tuvieron éxito en la fitoextracción de metales
1090 como Cd, Pb y Cu; además de metaloides como arsénico (As) y selenio (Se) [144]. Por otra parte,
1091 la modificación de genes con el fin de generar resistencia a metales pesados, para luego ser
1092 introducidos a escala celular en ciertas especies fitorremediadoras, ha sido documentado [145].
1093 Tal es el caso de las plantas transgénicas, modificadas con proteínas organomercurial liasa
1094 (*MerB*) y mercurio reductasa (*MerA*), que permite la reducción de Hg (II) a Hg (0) [145].

1095
1096 En cuanto al uso de bacterias para inmovilizar metales en la parte externa de las células, es
1097 importante conocer que este proceso es posible debido a que las superficies bacterianas pueden

1098 unirse a iones metálicos, debido a la presencia de grupos ionizables (carboxilato o fosfato) en
1099 bacterias gram negativas y ácidos teicoicos de bacterias gram positivas, además en las paredes
1100 celulares externas existen estructuras que también pueden interactuar con iones metálicos [146].
1101 Este proceso es capaz de transformar metales a sus formas insolubles e incluso químicamente
1102 inertes [147].

1103
1104 Entre las alternativas actuales de poco desarrollo, se encuentra la remediación de suelos
1105 contaminados con metales pesados, mediante el uso de plantas ornamentales. En investigaciones
1106 recientes se ha logrado, eliminar los contaminantes, mejorar la estética del sitio, pero también
1107 pueden usarse y venderse como plantas en macetas, incluso como aceites esenciales, perfumes,
1108 en la producción de ambientadores (siempre que no se usen compuesto de metales pesados
1109 volátiles) , en la producción de seda [148].

1110
1111 En investigaciones recientes, se está trabajando en el “cultivo de raíces pilosas” (*hairy root culture*
1112 (HRC)), una biotecnología que combina el cultivo de tejidos *in vitro* con material de ADN, con
1113 el fin de mejorar genéticamente a las plantas. Esta tecnología se ha utilizado desde las últimas
1114 tres décadas, principalmente en la modificación de plantas medicinales y aromáticas. Por lo que
1115 existen perspectivas alentadoras sobre su uso en técnicas de tratamiento, como la
1116 fitorremediación [149].

1117
1118 Estudios realizados por [150], muestran como cultivos de *Helianthus annuus*, *Brassica juncea* y
1119 *Cichorium intybus* modificados con HRC son eficientes para el tratamiento de pesticidas como
1120 diclorodifeniltricloroetano (DDT), 2,4-diclorofenol (2,4-DPC) y otros residuos industriales en el
1121 suelo?. Por otra parte, estudios usando *Alyssum*, especie bioacumuladora, proporcionan
1122 información valiosa sobre la acumulación de iones de metales pesados en la rizosfera y su
1123 posterior manejo [151,152]. Así mismo, los cultivos de HRC podrían utilizarse en fitominería
1124 para obtener producto enriquecido con metales [153].

1125
1126 En suelos con alta concentración de contaminantes, juega un papel importante la estabilización
1127 de nutrientes necesarios para la supervivencia de la especie vegetal fitorremediadora [16]. Así
1128 por ejemplo, en suelos contaminados con Cd y de bajo pH, la conversión de nitrógeno del suelo
1129 se inhibe, lo que repercute en el suministro de nitrógeno a las plantas [154]. Por esta razón, otra
1130 de las técnicas de “apoyo” para la fitorremediación, es el uso de lombrices con el fin de mejorar
1131 las propiedades del suelo y regular varios procesos biogeoquímicos (movimiento de producción
1132 y descomposición de N, O₂, S, P, entre otros). . Con este tipo de apoyo, que aumentó
1133 significativamente el pH del suelo, se consiguió que disminuya la movilidad de los metales
1134 pesados en los suelos [155].

1135
1136 La implementación de materiales de biocarbón (BC) a base de productos de desecho, como el
1137 trigo y el arroz, en combinación con plantas hiperacumuladoras, podrían mejorar la capacidad
1138 de las plantas para inmovilizar y retener contaminantes metálicos como Pb y Zn en escombros

1139 de minas, con resultados mayores al 93% de Pb sorbido retenido y más del 75% de Zn sorbido
1140 [17].

1141 **Agradecimientos:** La autora agradece a la Escuela Politécnica Nacional por el apoyo recibido
1142 a través del Proyecto PII-DEMEX-02-2020 y a los profesores del Departamento de Metalurgia
1143 Extractiva por todo el valioso apoyo en la revisión de este documento.

1144

1145 Referencias

1146

- 1147 [1] A.F. D, Los efectos ambientales del beneficio de minerales metálicos *, (n.d.) 24–28.
- 1148 [2] P. García F, P.M. J, A.S. OA, N.T. González, Phytoremediation of soils contaminated with
1149 heavy metals, *Biodivers. Int. J.* 2 (2018) 362–376. <https://doi.org/10.15406/bij.2018.02.00088>.
- 1150 [3] E. Galán Huertos, A. Romero Baena, Contaminación de Suelos por Metales Pesados, *Macla.*
1151 10 (2008) 48–60.
- 1152 [4] B. Ortiz, J. Sanz, M. Dorado, S. Villar, Técnicas de recuperación de suelos contaminados, ...
1153 Univ. Alcalá. Dir. Gen. (2007) 109.
1154 <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:T?cnicas+de+reucperaci?n+de+suelos+contaminados#0%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:T?cnicas+de+recuperaci?n+de+suelos+contaminados#0>.
- 1155
- 1156
- 1157 [5] W. Chen, H. Li, Cost-Effectiveness Analysis for Soil Heavy Metal Contamination Treatments,
1158 *Water. Air. Soil Pollut.* 229 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3784-3>.
- 1159 [6] N. Sarwar, M. Imran, M.R. Shaheen, W. Ishaque, M.A. Kamran, A. Matloob, A. Rehim, S.
1160 Hussain, Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals:
1161 Modifications and future perspectives, *Chemosphere.* 171 (2017) 710–721.
1162 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>.
- 1163 [7] C. García, J. Moreno, M. Hernández, A. Polo, Metales pesados y sus implicaciones en la
1164 calidad del suelo, *Cienc. y Medio Ambient. CCMA-CSIC.* (2002) 125–138.
1165 <http://hdl.handle.net/10261/111812>.
- 1166 [8] J. Mas, A; Azcue, Metales en sistemas biológicos, 1993.
- 1167 [9] B. Mundial, Tierras cultivables, (2021).
1168 <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.ARBL.ZS> (accessed April 5, 2021).
- 1169 [10] K.A. Alaboudi, B. Ahmed, G. Brodie, Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by
1170 using sunflower (*Helianthus annuus*) plant, *Ann. Agric. Sci.* 63 (2018) 123–127.
1171 <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2018.05.007>.
- 1172 [11] S. Ucaroglu, I. Talinli, Recovery and safer disposal of phosphate coating sludge by
1173 solidification/stabilization, *J. Environ. Manage.* 105 (2012) 131–137.
1174 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.029>.
- 1175 [12] F. Douay, C. Pruvot, H. Roussel, H. Ciesielski, H. Fourier, N. Proix, C. Waterlot,
1176 Contamination of urban soils in an area of Northern France polluted by dust emissions of two
1177 smelters, *Water. Air. Soil Pollut.* 188 (2008) 247–260. [https://doi.org/10.1007/s11270-007-9541-](https://doi.org/10.1007/s11270-007-9541-7)
1178 7.
- 1179 [13] L.H.R. JOSÉ MARTÍN ROSAS CASTOR*, JORGE LUIS GUZMÁN MAR*, MA. ARACELI

- 1180 HERNÁNDEZ RAMÍREZ*, Evaluación de la transferencia y especiación de arsénico en
1181 cultivos de maíz (*Zea mays*), Cienc. UANL. (2015) 33–39.
- 1182 [14] S. Adiloğlu, *Advances in Bioremediation and Phytoremediation*, in: Intech, 2018: p. 13.
1183 [https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-](https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics)
1184 [biometrics](https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics).
- 1185 [15] C. Rupp-Dahlem, J.-F. Soussana, C. Sanchez, J.-L. Morel, Chapitre 8 : Phytoremédiation des
1186 sols contaminés : des plantes pour guérir les sols, in: *La Chim. La Nat.*, EDP Sciences, 2021:
1187 pp. 157–184. <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-0859-5-011>.
- 1188 [16] A.E. Delgadillo-López, C.A. González-Ramírez, F. Prieto-García, J.R. Villagómez-Ibarra, O.
1189 Acevedo-Sandova, *Phytoremediation: An alternative to eliminate pollution*, *Trop. Subtrop.*
1190 *Agroecosystems*. 14 (2011) 597–612.
- 1191 [17] H. Ali, E. Khan, M.A. Sajad, *Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications*,
1192 *Chemosphere*. 91 (2013) 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>.
- 1193 [18] S.A. Covarrubias, J.J. Peña Cabriales, *Contaminación ambiental por metales pesados en*
1194 *México: Problemática y estrategias de fitorremediación*, *Rev. Int. Contam. Ambient.* 33 (2017)
1195 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>.
- 1196 [19] M. Felipó, *Contaminación del Suelo e impacto ambiental*, in: Valencia, 1993.
- 1197 [20] P.K. Padmavathiamma, L.Y. Li, *Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in*
1198 *plants*, *Water. Air. Soil Pollut.* 184 (2007) 105–126. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9401-5>.
- 1199 [21] M.M. Lasat, *The Use of Plants for the Removal of Toxic Metals from Contaminated Soil*, *Am.*
1200 *Assoc. Adv. Sci. Environ. Sci. Eng. Fellow.* 18 (1997) 359–362.
1201 <https://doi.org/10.1080/09593331808616549>.
- 1202 [22] O. Marrero, Jeannette; Sánchez, Isis; Pérez, Fitorremediación, una tecnología que involucra a
1203 plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental, *ICIDCA Sobre Los Deriv. La Caña*
1204 *Azúcar*. 46 (2012) 52–61.
- 1205 [23] A.R. Memon, P. Schröder, *Implications of metal accumulation mechanisms to*
1206 *phytoremediation*, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 16 (2009) 162–175. [https://doi.org/10.1007/s11356-](https://doi.org/10.1007/s11356-008-0079-z)
1207 [008-0079-z](https://doi.org/10.1007/s11356-008-0079-z).
- 1208 [24] M.A. Rahman, H. Hasegawa, *Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes*,
1209 *Chemosphere*. 83 (2011) 633–646. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.045>.
- 1210 [25] S.S. Kumar, A. Kadier, S.K. Malyan, A. Ahmad, N.R. Bishnoi, *Phytoremediation and*
1211 *rhizoremediation: Uptake, mobilization and sequestration of heavy metals by plants*, *Plant-*
1212 *Microbe Interact. Agro-Ecological Perspect.* 2 (2017) 367–394. [https://doi.org/10.1007/978-981-](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_15)
1213 [10-6593-4_15](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_15).
- 1214 [26] D. Shikha, P.K. Singh, *In situ phytoremediation of heavy metal-contaminated soil and*
1215 *groundwater: a green inventive approach*, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (2021) 4104–4124.
1216 <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11600-7>.
- 1217 [27] E.L. Arthur, P.J. Rice, P.J. Rice, T.A. Anderson, *Phytoremediation — An Overview*
1218 *Phytoremediation — An Overview*, (2005). <https://doi.org/10.1080/07352680590952496.Rights>.
- 1219 [28] S. Demcak, M. Balintova, *Overview of chosen techniques and methods for soils remediation*,
1220 *Res. Gate*. (2016).
- 1221 [29] J.M. Garzón, J. Pablo, R. Miranda, C.H. Gómez, *Aporte de la biorremediación para solucionar*

- 1222 problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible Introducción Materiales
1223 y métodos Resultados, Univ. y Salud. 19 (2017) 309. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>.
- 1224 [30] W. Luo, N. Zhang, Z. Li, Z. Xu, D. Wang, G. Liao, G. Pang, G. Xu, Y. Wang, X. Huang, D.
1225 Chen, C. Zeng, Z. Du, Increase of Cd adsorption capacity of rice stubble from being alive
1226 until death in a modified rice-fish system, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 208 (2021) 111441.
1227 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111441>.
- 1228 [31] C. Garbisu, J.M. Becerril, L. Epelde, I. Alkorta, Bioindicadores de la calidad del suelo :
1229 herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador,
1230 *Ecosistemas.* 16 (2007) 44–49.
- 1231 [32] M. Viñas, A. Solanas, Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos :
1232 caracterización microbiológica , química y ecotoxicológica hidrocarburos : caracterización
1233 microbiológica , química y ecotoxicológica, Univ. Barcelona. (2005) 352.
1234 <http://www.tdx.cesca.es/TDX-0920105-085623/>.
- 1235 [33] S. LÓPEZ-MARTÍNEZ¹, M.E. GALLEGOS-MARTÍNEZ², L.J.P. FLORES³, y M.G. ROJAS⁴,
1236 MECANISMOS DE FITORREMEDIAÇÃO DE SUELOS CONTAMINADOS CON
1237 MOLÉCULAS ORGÁNICAS XENOBIÓTICAS, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25 (2018) 26351–
1238 26360. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2495-z>.
- 1239 [34] E.G.J.R.B.A.R. COLLAGUAZO, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito, Tesis. (2016) 1–
1240 63. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- 1241 [35] J. Barceló, C. Poschenrieder, Hyperaccumulation of trace elements: from uptake and tolerance
1242 mechanisms to litter decomposition; selenium as an example, *Plant Soil.* 341 (2011) 31–35.
1243 <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0469-0>.
- 1244 [36] P.R. López Pino, Determinación de la capacidad de sorción de arsénico de plantas
1245 representativas de la flora de Mayoc, (2011).
- 1246 [37] D.C. Adriano, W.W. Wenzel, J. Vangronsveld, N.S. Bolan, Role of assisted natural remediation
1247 in environmental cleanup, *Geoderma.* 122 (2004) 121–142.
1248 <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.003>.
- 1249 [38] N. Bolan, A. Kunhikrishnan, R. Thangarajan, J. Kumpiene, J. Park, T. Makino, M.B. Kirkham,
1250 K. Scheckel, Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils - To mobilize or to
1251 immobilize?, *J. Hazard. Mater.* 266 (2014) 141–166.
1252 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.018>.
- 1253 [39] J.C. Seaman, J.S. Arey, P.M. Bertsch, Immobilization of Nickel and Other Metals in
1254 Contaminated Sediments by Hydroxyapatite Addition, *J. Environ. Qual.* 30 (2001) 460–469.
1255 <https://doi.org/10.2134/jeq2001.302460x>.
- 1256 [40] S. Saraswat, J.P.N. Rai, Phytoextraction potential of six plant species grown in multimetal
1257 contaminated soil, *Chem. Ecol.* 25 (2009) 1–11. <https://doi.org/10.1080/02757540802657185>.
- 1258 [41] V. Shah, A. Daverey, Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy
1259 metal contaminated soil, *Environ. Technol. Innov.* 18 (2020) 100774.
1260 <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>.
- 1261 [42] J. Suman, O. Uhlik, J. Viktorova, T. Macek, Phytoextraction of Heavy Metals : A Promising
1262 Tool for Clean-Up of Polluted Environment ?, 9 (2018) 1–15.
1263 <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01476>.

- 1264 [43] N. Rascio, F. Navari-Izzo, Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do
1265 it? And what makes them so interesting?, *Plant Sci.* 180 (2011) 169–181.
1266 <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>.
- 1267 [44] a J.M. Baker, R.R. Brooks, Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements
1268 - a review of their distribution, ecology and phytochemistry, *Biorecovery.* 1 (1989) 81–126.
1269 [http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Terrestrial+higher+plants+](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Terrestrial+higher+plants+which+hyperaccumulate+metallic+elements#5)
1270 [which+hyperaccumulate+metallic+elements#5](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Terrestrial+higher+plants+which+hyperaccumulate+metallic+elements#5).
- 1271 [45] A.J.M. Baker, S.P. McGrath, R.D. Reeves, J.A.C. Smith, Metal Hyperaccumulator Plants: A
1272 Review of the Ecology and Physiology of a Biological Resource for Phytoremediation of
1273 Metal-Polluted Soils, *Phytoremediation Contam. Soil Water.* (2000) 85–107.
1274 <https://doi.org/10.1201/9780367803148-5>.
- 1275 [46] M.W.H. Evangelou, M. Ebel, A. Schaeffer, Chelate assisted phytoextraction of heavy metals
1276 from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents, *Chemosphere.* 68 (2007)
1277 989–1003. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.01.062>.
- 1278 [47] D. Bernard, Distribución de Elementos Pesados en las Fracciones Geoquímicas de un Suelo
1279 Agrícola Afectado por los Lixiviados Ácidos de Filón Norte (Minas de Tharsis , Huelva), 10
1280 (2008) 111–114.
- 1281 [48] H.M. Ro, H.J. Choi, S.I. Yun, J.S. Park, Organic amendment-driven removal and speciation of
1282 metals using wormwood in two contrasting soils near an abandoned copper mine, *Hortic.*
1283 *Environ. Biotechnol.* 59 (2018) 775–786. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0073-4>.
- 1284 [49] E. Lombi, F.J. Zhao, S.J. Dunham, S.P. McGrath, Phytoremediation of Heavy Metal-
1285 Contaminated Soils: Natural Hyperaccumulation versus Chemically Enhanced
1286 Phytoextraction, *J. Environ. Qual.* 30 (2001) 1919–1926. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.1919>.
- 1287 [50] Ebbs et al_1997.pdf, (n.d.).
- 1288 [51] M. Ghosh, S.. Singh, t ^06~J, *Appl. Ecol. Environ. Res.* 3 (2005) 153–179.
- 1289 [52] P. Gupta, V. Kumar, Value added phytoremediation of metal stressed soils using phosphate
1290 solubilizing microbial consortium, *World J. Microbiol. Biotechnol.* 33 (2017).
1291 <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2176-3>.
- 1292 [53] R. Rodriguez, C. Marticorena, D. Alarcón, C. Baeza, L. Cavieres, V.L. Finot, N. Fuentes, A.
1293 Kiessling, M. Mihoc, A. Pauchard, E. Ruiz, P. Sanchez, A. Marticorena, Catálogo de las plantas
1294 vasculares de Chile, *Gayana. Botánica.* 75 (2018) 1–430. [https://doi.org/10.4067/s0717-](https://doi.org/10.4067/s0717-66432018000100001)
1295 [66432018000100001](https://doi.org/10.4067/s0717-66432018000100001).
- 1296 [54] A. Mahar, P. Wang, A. Ali, M.K. Awasthi, A.H. Lahori, Q. Wang, R. Li, Z. Zhang, Challenges
1297 and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review,
1298 *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 126 (2016) 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>.
- 1299 [55] Cómo controlar la erosión del suelo - Tearfund Learn, (n.d.). [https://learn.tearfund.org/es-](https://learn.tearfund.org/es-es/resources/footsteps/footsteps-11-20/footsteps-15/how-to-control-soil-erosion)
1300 [es-es/resources/footsteps/footsteps-11-20/footsteps-15/how-to-control-soil-erosion](https://learn.tearfund.org/es-es/resources/footsteps/footsteps-11-20/footsteps-15/how-to-control-soil-erosion) (accessed
1301 May 15, 2021).
- 1302 [56] O.A. Valdés R., Como controlan la erosión las raíces de las plantas, *La Cienc. y El Hombre.* 23
1303 (2010).
- 1304 [57] G.M. Tordoff, A.J.M. Baker, A.J. Willis, Current approaches to the revegetation and
1305 reclamation of metalliferous mine wastes, *Chemosphere.* 41 (2000) 219–228.

- 1306 [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00414-2](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00414-2).
- 1307 [58] M.O. Mendez, R.M. Maier, Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid
1308 environments - An emerging remediation technology, *Environ. Health Perspect.* 116 (2008)
1309 278–283. <https://doi.org/10.1289/ehp.10608>.
- 1310 [59] J. Pastor, A.J. Hernández, Contenidos de metales pesados en gramíneas de ecosistemas
1311 desarrollados sobre antiguas minas abandonadas de Madrid y Castilla-La Mancha., (2009).
- 1312 [60] O. Barrantes, E. Ciencias, C. Universitario, Multifuncionalidad de pastos con, (2009) 43–51.
- 1313 [61] A. De Haro, Seguimiento y fitoremediación de los suelos afectados por el vertido de las minas
1314 de Aznalcóllar., Programa Investig. Del Corredor Verde Del Guadiamar, 1999-2002. (2000)
1315 111-116.
- 1316 [62] J. Yoon, X. Cao, Q. Zhou, L.Q. Ma, Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing
1317 on a contaminated Florida site, *Sci. Total Environ.* 368 (2006) 456–464.
1318 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.01.016>.
- 1319 [63] C. Riffo, Transferencia de metales pesados Cu , Pb, Zn, Ni, Co y Cr desde un suelo de la
1320 comuna de Talcahuano a las plantas *Salicornia* y *Lolium Perenne*.(Tesis para licenciatura),
1321 (2016) 137. [http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1020/Carol_Riffo](http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1020/Carol_Riffo_Estay.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
1322 [Estay.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1020/Carol_Riffo_Estay.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- 1323 [64] J. Kumpiene, G. Guerri, L. Landi, G. Pietramellara, P. Nannipieri, G. Renella, Microbial
1324 biomass, respiration and enzyme activities after in situ aided phytostabilization of a Pb- and
1325 Cu-contaminated soil, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 72 (2009) 115–119.
1326 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.07.002>.
- 1327 [65] A. Moreno Reséndez, V. García Mendoza, J.L. Reyes Carrillo, J. Vásquez Arroyo, P. Cano Ríos,
1328 Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la
1329 agricultura sustentable, *Rev. Colomb. Biotecnol.* 20 (2018) 68–83.
1330 <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707>.
- 1331 [66] P.K. Padmavathiamma, L.Y. Li, Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in
1332 plants, *Water. Air. Soil Pollut.* 184 (2007) 105–126. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9401-5>.
- 1333 [67] P. Andráš, J.X. Matos, I. Turisová, M.J. Batista, R. Kanianska, S. Kharbish, The interaction of
1334 heavy metals and metalloids in the soil–plant system in the São Domingos mining area
1335 (Iberian Pyrite Belt, Portugal), *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25 (2018) 20615–20630.
1336 <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2205-x>.
- 1337 [68] J.T. Puthur, B. Division, P.O. Campus, Accepted manuscript, (n.d.) 1–30.
- 1338 [69] T.M. Galal, F.A. Gharib, S.M. Ghazi, K.H. Mansour, Phytostabilization of heavy metals by the
1339 emergent macrophyte *Vossia cuspidata* (Roxb.) Griff.: A phytoremediation approach, *Int. J.*
1340 *Phytoremediation.* 19 (2017) 992–999. <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1303816>.
- 1341 [70] Z. -Q. Lin, R.S. Schemenauer, V. Cervinka, A. Zayed, A. Lee, N. Terry, Selenium Volatilization
1342 from a Soil–Plant System for the Remediation of Contaminated Water and Soil in the San
1343 Joaquin Valley, *J. Environ. Qual.* 29 (2000) 1048–1056.
1344 <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900040003x>.
- 1345 [71] M.N.V. Prasad, H.M. De Oliveira Freitas, Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity
1346 prospecting forphytoremediation technology, *Electron. J. Biotechnol.* 6 (2003) 110–146.
1347 <https://doi.org/10.2225/vol6-issue3-fulltext-6>.

- 1348 [72] F.N. Moreno, C.W.N. Anderson, R.B. Stewart, B.H. Robinson, Phytoremediation of mercury-
1349 contaminated water: Volatilisation and plant-accumulation aspects, *Environ. Exp. Bot.* 62
1350 (2008) 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.07.007>.
- 1351 [73] H. A. Azaizeh S. Gowthaman N. Terry, Microbial Selenium Volatilization in Rhizosphere and
1352 Bulk Soils from a Constructed Wetland, (1997).
1353 <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600030011x>.
- 1354 [74] S. Ashraf, Q. Ali, Z.A. Zahir, S. Ashraf, H.N. Asghar, Phytoremediation: Environmentally
1355 sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 174
1356 (2019) 714–727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>.
- 1357 [75] S. Khalid, M. Shahid, N.K. Niazi, B. Murtaza, I. Bibi, C. Dumat, A comparison of technologies
1358 for remediation of heavy metal contaminated soils, *J. Geochemical Explor.* 182 (2017) 247–268.
1359 <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>.
- 1360 [76] S. Sikdar, M. Kundu, A Review on Detection and Abatement of Heavy Metals, *ChemBioEng*
1361 *Rev.* 5 (2018) 18–29. <https://doi.org/10.1002/cben.201700005>.
- 1362 [77] B. Duarte, V. Silva, I. Caçador, Hexavalent chromium reduction, uptake and oxidative
1363 biomarkers in *Halimione portulacoides*, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 83 (2012) 1–7.
1364 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.04.026>.
- 1365 [78] B. Edouard Ifon, A. Crépin Finagnon Togbé, L. Arsène Sewedo Tometin, F. Suanon, A.
1366 Yessoufou, Metal-Contaminated Soil Remediation: Phytoremediation, Chemical Leaching
1367 and Electrochemical Remediation, *Met. Soil - Contam. Remediat.* (2019) 1–20.
1368 <https://doi.org/10.5772/intechopen.81223>.
- 1369 [79] B.C.M. y P.P.M.* Muñoz Castellanos LN , Nevárez Moorillón GV, FITORREMEDIACIÓN
1370 COMO UNA ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE SUELOS CONTAMINADOS,
1371 (2010) 1–9.
- 1372 [80] T.G. Reichenauer, J.J. Germida, Phytoremediation of organic contaminants in soil and
1373 groundwater, *ChemSusChem.* 1 (2008) 708–717. <https://doi.org/10.1002/cssc.200800125>.
- 1374 [81] H.R. Gabr, A.A.F.A. Gab-Alla, Effect of transplanted on heavy metal concentrations in
1375 commercial clams of Lake Timsah, Suez Canal, Egypt, *Oceanologia.* 50 (2008) 83–93.
- 1376 [82] M. Peer, Baxter, Richards, Freeman, Phytoremediation and hyperaccumulator plants Wendy,
1377 *Current.* 20 (2005). <https://doi.org/10.1007/4735>.
- 1378 [83] E.C. Alicia Guevara*, Ernesto de la Torre, Ana Villegas, USO DE LA RIZOFILTRACIÓN
1379 PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES LIQUIDOS DE CIANURACION QUE
1380 CONTIENEN CROMO, COBRE Y CADMIO, 1 (2009) 871–878.
- 1381 [84] V.A.A. HIDALGO, RIZOFILTRACIÓN DE PLOMO DEL AGUA DE LA PISCINA DE
1382 RELAVES DE LA MINERA ORENAS S.A. DEL CANTÓN CAMILO PONCE
1383 ENRÍQUEZAZUAY, UTILIZANDO *Coriandrum Sativum* (CULANTRO) EN HUMEDALES
1384 ARTIFICIALES (2014)., *Ekp.* 13 (2015).
- 1385 [85] J. Tiwari, Ankit, Sweta, S. Kumar, J. Korstad, K. Bauddh, Eco-restoration of Polluted Aquatic
1386 Ecosystems Through Rhizofiltration, Elsevier Inc., 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813912-7.00005-3>.
- 1388 [86] S. Ramírez, A.A. Porta, N.O. Caffini, Fitoquelatinas y péptidos relacionados, *Acta Farm.*
1389 *Bonaer.* 18, no. 1 (1999). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/7023> (accessed May 17, 2021).

- 1390 [87] A.J. Saathoff, G. Sarath, E.K. Chow, B.S. Dien, C.M. Tobias, Downregulation of cinnamyl-
1391 alcohol dehydrogenase in switchgrass by RNA silencing results in enhanced glucose release
1392 after cellulase treatment, *PLoS One*. 6 (2011). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016416>.
- 1393 [88] K. Hirata, N. Tsuji, K. Miyamoto, Biosynthetic regulation of phytochelatins, heavy metal-
1394 binding peptides, *J. Biosci. Bioeng.* 100 (2005) 593–599. <https://doi.org/10.1263/jbb.100.593>.
- 1395 [89] R. Aurelio, N. López, Y. Meas Vong, R. Ortega Borges, E.J. Olguín, E Fitorremediación:
1396 fundamentos y aplicaciones, n.d.
- 1397 [90] T.J. Flowers, T.D. Colmer, Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes, *Ann. Bot.* 115 (2015)
1398 327–331. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu267>.
- 1399 [91] M. Lastiri, evaluación y selección de una planta forrajera con potencial para fitorremediar
1400 suelos salinos, n.d.
- 1401 [92] E. Arrieta, Países desarrollados y países subdesarrollados, (n.d.).
- 1402 [93] B.J. Silver, Country Classifications, Forces of Labor. (2014) 204–204.
1403 <https://doi.org/10.1017/cbo9780511615702.009>.
- 1404 [94] J.D. Peco, J.A. Campos, M.C. Romero-Puertas, A. Olmedilla, P. Higuera, L.M. Sandalio,
1405 Characterization of mechanisms involved in tolerance and accumulation of Cd in *Biscutella*
1406 *auriculata* L., *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 201 (2020) 110784.
1407 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110784>.
- 1408 [95] V. Asensio, F.G. Flórido, F. Ruiz, F. Perlatti, X.L. Otero, D.P. Oliveira, T.O. Ferreira, The
1409 potential of a Technosol and tropical native trees for reclamation of copper-polluted soils,
1410 *Chemosphere*. 220 (2019) 892–899. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.190>.
- 1411 [96] A.D. Delil, N. Köleli, H. Dağhan, G. Bahçeci, Recovery of heavy metals from canola (*Brassica*
1412 *napus*) and soybean (*Glycine max*) biomasses using electrochemical process, *Environ.*
1413 *Technol. Innov.* 17 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100559>.
- 1414 [97] L. Radu Sumalan, C. Muntean, A. Kostov, D. Kržanović, L. Noemi Jucsor, I. Sorin Ciulca, M.
1415 Renata Sumalan, M. Gheju, M. Cernicova-Buca, The cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) – a
1416 viable solution for bioremediating soils polluted with heavy metals, *Not. Bot. Horti Agrobot.*
1417 *Cluj-Napoca*. 48 (2020) 2095–2113. <https://doi.org/10.15835/48412160>.
- 1418 [98] X. Wang, K. Hu, Q. Xu, L. Lu, S. Liao, G. Wang, Immobilization of Cd Using Mixed
1419 *Enterobacter* and *Comamonas* Bacterial Reagents in Pot Experiments with *Brassica rapa* L.,
1420 *Environ. Sci. Technol.* 54 (2020) 15731–15741. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03114>.
- 1421 [99] F. Yu, C. Li, C. Dai, K. Liu, Y. Li, Chemosphere Phosphate : Coupling the functions of
1422 fertilization and passivation in phytoremediation of manganese-contaminated soil by
1423 *Polygonum pubescens blume*, 260 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127651>.
- 1424 [100] L. Wang, R. Zou, Y.C. Li, Z. Tong, M. You, W. Huo, K. Chi, H. Fan, Effect of Wheat-*Solanum*
1425 *nigrum* L. intercropping on Cd accumulation by plants and soil bacterial community under
1426 Cd contaminated soil, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 206 (2020) 111383.
1427 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111383>.
- 1428 [101] F. Li, F. Yang, Y. Chen, H. Jin, Y. Leng, J. Wang, Chemical reagent-assisted phytoextraction of
1429 heavy metals by *Bryophyllum laetivirens* from garden soil made of sludge, *Chemosphere*. 253
1430 (2020) 126574. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126574>.
- 1431 [102] C. He, Y. Zhao, F. Wang, K. Oh, Z. Zhao, C. Wu, X. Zhang, X. Chen, X. Liu, Phytoremediation

- 1432 of soil heavy metals (Cd and Zn) by castor seedlings: Tolerance, accumulation and subcellular
1433 distribution, *Chemosphere*. 252 (2020) 126471.
1434 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126471>.
- 1435 [103] M.H. Saleem, S. Ali, M. Rehman, M.S. Rana, M. Rizwan, M. Kamran, M. Imran, M. Riaz, M.H.
1436 Soliman, A. Elkelish, L. Liu, Influence of phosphorus on copper phytoextraction via
1437 modulating cellular organelles in two jute (*Corchorus capsularis* L.) varieties grown in a
1438 copper mining soil of Hubei Province, China, *Chemosphere*. 248 (2020) 126032.
1439 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126032>.
- 1440 [104] Y. Jiang, S. Jiang, X. Yan, Z. Qin, C. Jia, Z. Li, J. Zhang, R. Huang, The mobility of cadmium
1441 and lead in the soil-mulberry-silkworm system, *Chemosphere*. 242 (2020) 125179.
1442 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125179>.
- 1443 [105] L. Wang, H. Lin, Y. Dong, B. Li, Y. He, Effects of endophytes inoculation on rhizosphere and
1444 endosphere microecology of Indian mustard (*Brassica juncea*) grown in vanadium-
1445 contaminated soil and its enhancement on phytoremediation, *Chemosphere*. 240 (2020)
1446 124891. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124891>.
- 1447 [106] L. Jia, J. Zhou, J. Cao, Z. Wu, W. Liu, C. Yang, Foam fractionation for promoting rhamnolipids
1448 production by *Pseudomonas aeruginosa* D1 using animal fat hydrolysate as carbon source
1449 and its application in intensifying phytoremediation, *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*
1450 158 (2020) 108177. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108177>.
- 1451 [107] F. Luo, X.F. Hu, K. Oh, L.J. Yan, X.Z. Lu, W.J. Zhang, T. Yonekura, S. Yonemochi, Y. Isobe,
1452 Using profitable chrysanthemums for phytoremediation of Cd- and Zn-contaminated soils in
1453 the suburb of Shanghai, *J. Soils Sediments*. 20 (2020) 4011–4022.
1454 <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02735-8>.
- 1455 [108] E.C.-A. A, G.S. B, J.P.-F. C, M.P.J.A. D, A.M. B, G. GAsco, *Chemosphere Remediation of*
1456 *mining soils by combining Brassica napus growth and amendment with chars from manure*
1457 *waste*, 261 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127798>.
- 1458 [109] S. Mutiti, M. Corley, M. Tembo, Mobilization and Translocation of Subsurface Lead by
1459 *Tithonia rotundifolia*, *Water. Air. Soil Pollut.* 231 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04748-y>.
- 1460
- 1461 [110] N.J. Elvira, N.G. Medina, M. Leo, V. Cala, B. Estébanez, Copper Content and Resistance
1462 Mechanisms in the Terrestrial Moss *Ptychostomum capillare*: A Case Study in an Abandoned
1463 Copper Mine in Central Spain, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 79 (2020) 49–59.
1464 <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00739-6>.
- 1465 [111] A. Cristaldi, G. Oliveri Conti, S.L. Cosentino, G. Mauromicale, C. Copat, A. Grasso, P.
1466 Zuccarello, M. Fiore, C. Restuccia, M. Ferrante, Phytoremediation potential of *Arundo donax*
1467 (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals, *Environ. Res.* 185 (2020).
1468 <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109427>.
- 1469 [112] B. Liu, S. Wang, J. Wang, X. Zhang, Z. Shen, L. Shi, Y. Chen, The great potential for
1470 phytoremediation of abandoned tailings pond using ectomycorrhizal *Pinus sylvestris*, *Sci.*
1471 *Total Environ.* 719 (2020) 137475. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137475>.
- 1472 [113] D. Zhou, J. Yu, B. Guan, Y. Li, M. Yu, F. Qu, C. Zhan, Z. Lv, H. Wu, Q. Wang, J. Yang, A
1473 Comparison of the Development of Wetland Restoration Techniques in China and Other

- 1474 Nations, Wetlands. 40 (2020) 2755–2764. <https://doi.org/10.1007/s13157-020-01305-5>.
- 1475 [114] I. Gul, M. Manzoor, I. Hashmi, M.F. Bhatti, J. Kallerhoff, M. Arshad, Plant uptake and leaching
1476 potential upon application of amendments in soils spiked with heavy metals (Cd and Pb), J.
1477 Environ. Manage. 249 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109408>.
- 1478 [115] L. Liu, D. Luo, G. Yao, X. Huang, L. Wei, Y. Liu, Q. Wu, X. Mai, G. Liu, T. Xiao, Comparative
1479 activation process of Pb, Cd and Tl using chelating agents from contaminated red soils, Int. J.
1480 Environ. Res. Public Health. 17 (2020) 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijerph17020497>.
- 1481 [116] E. López, J., Contreras, Estudio De Factibilidad Del Uso De La Fitorremediación Como
1482 Alternativa Para La Remoción De Metales Pesados En El Suelo Usado Como Botadero a Cielo
1483 Abierto En Utopía-Yopal, 10–1) 2017(1. ثبثبثب
1484 http://www.pusdatin.kemkes.go.id/resources/download/pusdatin/profil-kesehatan-indonesia/Data-dan-Informasi_Profil-Kesehatan-Indonesia-2017.pdf%0Ahttp://www.journal.unair.ac.id/filerPDF/KESLING-1-2-08.pdf%0Ahttp://repository.uinjkt.ac.id/dspace/bitstream/1.
- 1488 [117] Instituto Nacional de Ecología, (2007).
1489 <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/tecnolog.html> (accessed May 17, 2021).
- 1490 [118] A. Franco, L. Rufo, J. Zuluaga, V. De La Fuente, Metal uptake and distribution in cultured
1491 seedlings of Nerium oleander L. (Apocynaceae) from the Río Tinto (Huelva, Spain), Biol. Trace
1492 Elem. Res. 155 (2013) 82–92. <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9761-1>.
- 1493 [119] I.V. Rico, Los Tecnosoles Como Alternativa Para La Gestión De Problemas De Degradación
1494 Ambiental., (2018) 20.
- 1495 [120] B. Sepúlveda, M. Tapia, P. Tapia, F. Milla, O. Pavez, HEAVY METALS BIOABSORPTION
1496 AND SOIL STABILIZATION BY *Sarcocornia neei* FROM EXPERIMENTAL SOILS
1497 CONTAINING MINE TAILINGS Bioabsorción de metales pesados y estabilización de suelo
1498 por *Sarcocornia neei* desde suelos experimentales conteniendo relaves mineros, Rev. Int.
1499 Contam. Ambie. 36 (2020) 567–575. <https://doi.org/10.20937/RICA.53027>.
- 1500 [121] A. Obeso-Obando, R. Vejarano, Geranium cultivation: Potential use for arsenic (As), cadmium
1501 (Cd) and copper (Cu) removal from contaminated soils, in: Proc. LACCEI Int. Multi-
1502 Conference Eng. Educ. Technol., Latin American and Caribbean Consortium of Engineering
1503 Institutions, 2020. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.144>.
- 1504 [122] M.A.R. Medrano, J.E. Lacava, I. Curotto, L. Fuks, R.M. Gargarello, Lead accumulation in
1505 spices: Potential for phytoremediation of urban contaminated soils in Argentina, Rev.
1506 Conhecimento Online. 3 (2019) 27–37. <https://doi.org/10.25112/rco.v3i0.1850>.
- 1507 [123] P. Sharma, S. Tripathi, R. Chandra, Highly efficient phytoremediation potential of metal and
1508 metalloids from the pulp paper industry waste employing *Eclipta alba* (L) and *Alternanthera*
1509 *philoxeroide* (L): Biosorption and pollution reduction, Bioresour. Technol. 319 (2021) 124147.
1510 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124147>.
- 1511 [124] P. Sharma, S. Tripathi, R. Chandra, Phytoremediation potential of heavy metal accumulator
1512 plants for waste management in the pulp and paper industry, Heliyon. 6 (2020) e04559.
1513 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04559>.
- 1514 [125] M. Arshad, N. Naqvi, I. Gul, K. Yaqoob, M. Bilal, J. Kallerhoff, Lead phytoextraction by
1515 *Pelargonium hortorum*: Comparative assessment of EDTA and DIPA for Pb mobility and

- 1516 toxicity, *Sci. Total Environ.* 748 (2020) 141496. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141496>.
- 1517 [126] W. Amir, M. Farid, H.K. Ishaq, S. Farid, M. Zubair, H.F. Alharby, A.A. Bamagoos, M. Rizwan,
1518 N. Raza, K.R. Hakeem, S. Ali, Accumulation potential and tolerance response of *Typha*
1519 *latifolia* L. under citric acid assisted phytoextraction of lead and mercury, *Chemosphere.* 257
1520 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127247>.
- 1521 [127] A. Malik, T.A. Butt, S.T.A. Naqvi, S. Yousaf, M.K. Qureshi, M.I. Zafar, G. Farooq, I. Nawaz,
1522 M. Iqbal, Lead tolerant endophyte *Trametes hirsuta* improved the growth and lead
1523 accumulation in the vegetative parts of *Triticum aestivum* L., *Heliyon.* 6 (2020) e04188.
1524 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04188>.
- 1525 [128] S.S. Dhaliwal, P.K. Taneja, J. Singh, S.S. Bhatti, R. Singh, Cadmium Accumulation Potential of
1526 Brassica Species Grown in Metal Spiked Loamy Sand Soil, *Soil Sediment Contam.* 29 (2020)
1527 638–649. <https://doi.org/10.1080/15320383.2020.1758031>.
- 1528 [129] K.T. Soto Hidalgo, P.J. Carrión-Huertas, R.T. Kinch, L.E. Betancourt, C.R. Cabrera,
1529 Phytoremediation by *Avicennia Germinans* (black mangrove) and Nano Zero Valent
1530 Iron for Heavy Metal Uptake from Ciénaga Las Cucharillas Wetland Soils, *Environ.*
1531 *Nanotechnology, Monit. Manag.* 14 (2020) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100363>.
- 1532 [130] A. Ramírez, G. García, O. Werner, R.M. Ros, In vitro lead tolerance and accumulation in three
1533 *Chrysanthemum* cultivars for phytoremediation purposes with ornamental plants, *Int. J.*
1534 *Phytoremediation.* 22 (2020) 1110–1121. <https://doi.org/10.1080/15226514.2020.1731730>.
- 1535 [131] A.M. Leudo, Y. Cruz, C. Montoya-Ruiz, M. Del, P. Delgado, J.F. Saldarriaga, Mercury
1536 Phytoremediation with *Lolium perenne*-Mycorrhizae in Contaminated Soils, (n.d.).
1537 <https://doi.org/10.3390/su12093795>.
- 1538 [132]; Gilberto Gamarra Sánchez¹; Yveth Munive Yachachi²; Fernando Puertas Ramos¹; Lorgio
1539 Valdiviezo Gonzales³; Rita Cabello Torres Rubén Munive Cerrón¹, Absorción de plomo y
1540 cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma
1541 de compost y vermicompost, (2020). <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.02.04>.
- 1542 [133] I. Chamba, D. Rosado, C. Kalinhoff, S. Thangaswamy, A. Sánchez-Rodríguez, M.J. Gazquez,
1543 *Erato polymnioides* – A novel Hg hyperaccumulator plant in ecuadorian rainforest acid soils
1544 with potential of microbe-associated phytoremediation, *Chemosphere.* 188 (2017) 633–641.
1545 <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.160>.
- 1546 [134] I. Chamba, M.J. Gazquez, T. Selvaraj, J. Calva, J.J. Toledo, C. Armijos, Selection of a suitable
1547 plant for phytoremediation in mining artisanal zones, *Int. J. Phytoremediation.* 18 (2016) 853–
1548 860. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1156638>.
- 1549 [135] M.P. Gomes, T.C.L.L. De Sá E Melo Marques, G.H. Silva, A.M. Soares, Utilization of Willow
1550 (*Salix humboldtiana* Willd) as a species for phytoremediation of zinc industry waste |
1551 Utilização do Salgueiro (*Salix humboldtiana* Willd) como espécie fitoremediadora em rejeitos
1552 da indústria de Zinco, *Sci. For. Sci.* (2011) 117–123.
1553 <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr89/cap12.pdf>.
- 1554 [136] G.C.G. dos Santos, A.A. Rodella, C.A. de Abreu, A.R. Coscione, Vegetable species for
1555 phytoextraction of boron, copper, lead, manganese and zinc from contaminated soil, *Sci.*
1556 *Agric.* 67 (2010) 713–719. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162010000600014>.
- 1557 [137] H. Gonzales, Recuperación de Suelos Contaminados con Metales Utilizando Especies

- 1558 Vegetales-Fitoremediación, (2014). <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/8616>.
- 1559 [138] A.D. Zand, A.M. Tabrizi, A.V. Heir, Incorporation of biochar and nanomaterials to assist
1560 remediation of heavy metals in soil using plant species, *Environ. Technol. Innov.* 20 (2020)
1561 101134. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101134>.
- 1562 [139] K.K. Yadav, J.K. Singh, N. Gupta, V. Kumar, A review of nanobioremediation technologies
1563 for environmental cleanup: A novel biological approach, *J. Mater. Environ. Sci.* 8 (2017) 740–
1564 757.
- 1565 [140] R. Zhang, N. Zhang, Z. Fang, In situ remediation of hexavalent chromium contaminated soil
1566 by CMC-stabilized nanoscale zero-valent iron composited with biochar, *Water Sci. Technol.*
1567 77 (2018) 1622–1631. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.039>.
- 1568 [141] S. Nandy, T. Das, C.K. Tudu, D.K. Pandey, A. Dey, P. Ray, Fungal endophytes: Futuristic tool
1569 in recent research area of phytoremediation, *South African J. Bot.* 134 (2020) 285–295.
1570 <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.02.015>.
- 1571 [142] C. Li, X. Ji, X. Luo, Visualizing hotspots and future trends in phytomining research through
1572 scientometrics, *Sustain.* 12 (2020). <https://doi.org/10.3390/su12114593>.
- 1573 [143] K. Ciarkowska, E. Hanus-Fajerska, F. Gambús, E. Muszyńska, T. Czech, Phytostabilization of
1574 Zn-Pb ore flotation tailings with *Dianthus carthusianorum* and *Biscutella laevigata* after
1575 amending with mineral fertilizers or sewage sludge, *J. Environ. Manage.* 189 (2017) 75–83.
1576 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.028>.
- 1577 [144] P. Kotrba, J. Najmanova, T. Macek, T. Ruml, M. Mackova, Genetically modified plants in
1578 phytoremediation of heavy metal and metalloid soil and sediment pollution, *Biotechnol. Adv.*
1579 27 (2009) 799–810. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.06.003>.
- 1580 [145] M.E. Beltrán-Pineda, A.M. Gómez-Rodríguez, Biorremediación de metales pesados cadmio
1581 (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una
1582 revisión, *Rev. Fac. Ciencias Básicas.* 12 (2016) 172–197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>.
- 1583 [146] M. Eleonora, B. Pineda, B.M. Ciencias Biológicas, Metales pesados (Cd, Cr y Hg): su impacto
1584 en el ambiente y posibles estrategias biotecnológicas para su remediación Heavy metals (Cd,
1585 Cr and Hg): impact on environment and possible biotechnological strategies for remediation
1586 ALIDA MARCELA GÓMEZ RODRIGUEZ, (2015) 82–113.
- 1587 [147] M.L. Merroun, J. Raff, A. Rossberg, C. Hennig, T. Reich, S. Selenska-Pobell, Complexation of
1588 uranium by cells and S-layer sheets of *Bacillus sphaericus* JG-A12, *Appl. Environ. Microbiol.*
1589 71 (2005) 5532–5543. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.9.5532-5543.2005>.
- 1590 [148] A.H.A. Khan, A. Kiyani, C.R. Mirza, T.A. Butt, R. Barros, B. Ali, M. Iqbal, S. Yousaf,
1591 Ornamental plants for the phytoremediation of heavy metals: Present knowledge and future
1592 perspectives, *Environ. Res.* 195 (2021) 110780. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110780>.
- 1593 [149] S. Gantait, E. Mukherjee, Hairy root culture technology: applications, constraints and
1594 prospect, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 105 (2021) 35–53. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-11017-9>.
- 1595
- 1596 [150] E. Agostini, M.S. Coniglio, S.R. Milrad, H.A. Tigier, A.M. Giulietti, Phytoremediation of 2,4-
1597 dichlorophenol by *Brassica napus* hairy root cultures, *Agricell Rep.* 40 (2003) 42.
1598 <https://doi.org/10.1042/ba20020079>.
- 1599 [151] S. Eapen, K.N. Suseelan, S. Tivarekar, S.A. Kotwal, R. Mitra, Potential for rhizofiltration of

- 1600 uranium using hairy root cultures of *Brassica juncea* and *Chenopodium amaranticolor*,
1601 *Environ. Res.* 91 (2003) 127–133. [https://doi.org/10.1016/S0013-9351\(02\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0013-9351(02)00018-X).
- 1602 [152] T. V. Nedelkoska, P.M. Doran, Hyperaccumulation of nickel by hairy roots of *Alyssum*
1603 species: Comparison with whole regenerated plants, *Biotechnol. Prog.* 17 (2001) 752–759.
1604 <https://doi.org/10.1021/bp0100629>.
- 1605 [153] R. Boominathan, N.M. Saha-Chaudhury, V. Sahajwalla, P.M. Doran, Production of Nickel Bio-
1606 Ore from Hyperaccumulator Plant Biomass: Applications in Phytomining, *Biotechnol. Bioeng.*
1607 86 (2004) 243–250. <https://doi.org/10.1002/bit.10795>.
- 1608 [154] C. Perdomo, P. Titular, Área de suelos y aguas cátedra de fertilidad, (n.d.).
- 1609 [155] H.J. Xu, H. Chen, X.L. Wang, Y.L. Zhang, J.J. Wang, N. Li, Y.T. Li, Earthworms stimulate
1610 nitrogen transformation in an acidic soil under different Cd contamination, *Ecotoxicol.*
1611 *Environ. Saf.* 165 (2018) 564–572. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.042>.
- 1612
- 1613