

FITORREMEDIACIÓN

UNA ALTERNATIVA PARA TRATAR LA
CONTAMINACIÓN AMBIENTAL



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA



FITORREMEDIACIÓN. UNA ALTERNATIVA PARA TRATAR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Autores:

Yeidy Montano, Pedro M. Tapia, Anthony Fow y Beatriz Fuentealba

Editado por:

© Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM)
Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM)

Sede central: Av. Centenario 2656 Independencia, Huaraz, Áncash, Perú
Correo electrónico: diem@inaigem.gob.pe

Fotografías de portada e interiores: Archivo DIEM-INAIGEM

Corrección de estilo: Yessica Herrada Solano y Mirtha Camacho

Diseño, diagramación y desarrollo de ilustraciones: Ana Mercedes Periche Acosta

Por favor citar la publicación de la siguiente manera:

Montano, Y., Tapia, P. M., Fow, A. y Fuentealba, B. (2022). Fitorremediación. Una alternativa para tratar la contaminación ambiental (*Folleto*). Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña – Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (DIEM-INAIGEM). (Web publicación online)

PRESENTACIÓN

El Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) es el ente rector en investigación científica en glaciares y ecosistemas de montaña, y busca promover la gestión sostenible de estos ecosistemas para favorecer a las poblaciones que viven en o se benefician de ellos. En el cumplimiento de estas funciones el equipo de la Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña (DIEM) tiene el agrado de presentar esta serie de folletos informativos, que busca dar a conocer importantes temáticas y problemáticas del ámbito de las montañas de nuestro país, para el público en general.

En esta ocasión presentamos el folleto titulado **“Fitorremediación: Una alternativa para tratar la contaminación ambiental”** que presenta las definiciones de fitorremediación y biorremediación, y una explicación sobre los metales pesados desde su origen hasta los efectos perjudiciales sobre la salud humana. Asimismo, se brindan conceptos centrales para entender la fitorremediación como los factores de concentración y los principales mecanismos de fitorremediación, y finalmente se comparte un listado de especies vegetales altoandinas con potencial remediador basados en estudios previos y algunas técnicas de mejoramiento haciendo uso de organismos vivos (bacterias y hongos) y el biochar.

Esperamos con esto contribuir a dar a conocer una técnica compleja, basada en elementos de la naturaleza, que permite atender una problemática importante y actual como es la contaminación del suelo y agua con metales pesados. Consideramos que ese es el primer paso para avanzar en la identificación de nuevas especies andinas que permitan ampliar las estrategias de biorremediación, y dar así una razón más para valorar y conservar la gran biodiversidad que se desarrolla en las montañas peruanas.

Dra. Beatriz Fuentealba D.

Dirección de Investigación en Ecosistemas de Montaña - DIEM

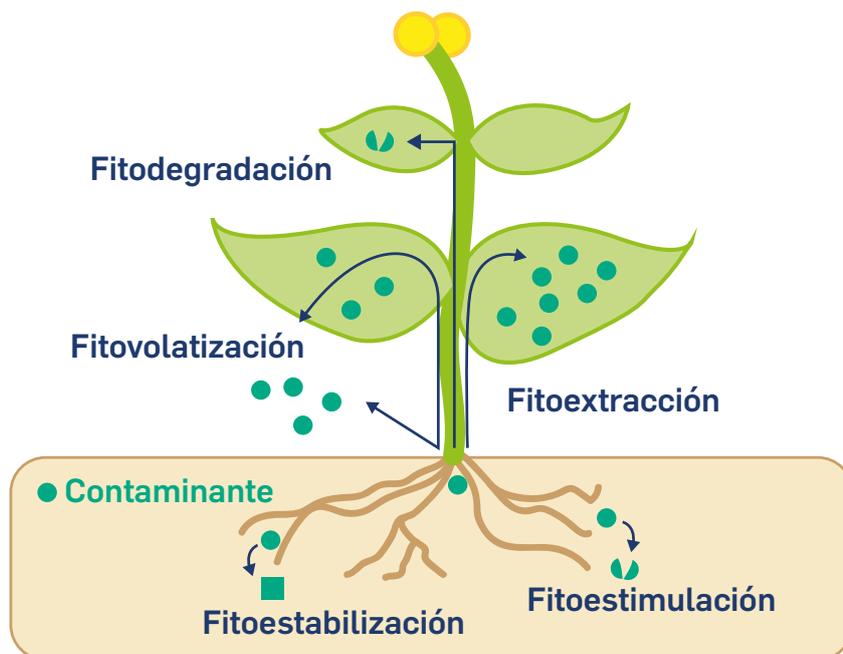
Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña - INAIGEM

1. ¿QUÉ ES LA FITORREMEDIACIÓN?

El término fitorremediación hace referencia a uno de los recursos de biorremediación más utilizados que se basa en el uso de plantas y aplica técnicas que combina las disciplinas de microbiología, química del suelo y fisiología de plantas^{1,2}. La fitorremediación representa una tecnología alternativa rentable, viable y sustentable para la restauración de ambientes y efluentes contaminados que ha ganado mucha atención y aceptación en los últimos años por su enfoque ecológico³.

Para la fitocorrección, las plantas emplean diferentes mecanismos según el tipo de contaminante. Por ejemplo, si encontramos contaminantes elementales como los metales pesados, se eliminan en su mayoría por extracción, transformación y secuestro; en cambio los contaminantes orgánicos, como los hidrocarburos, se eliminan principalmente por degradación, estabilización y volatilización^{4,5}. En la figura 1, se aprecia la representación esquemática de los distintos mecanismos de fitocorrección, y en la tabla 3 se dan más detalles de estos mecanismos.

► **Figura 1:** Representación de los distintos mecanismos de fitocorrección (Pilon-Smits, 2005, p.19).



2. ¿QUÉ ES LA BIORREMEDIACIÓN?

La biorremediación es una estrategia para la eliminación de contaminantes en el ambiente que utiliza diversos organismos vivos, como los microorganismos y las plantas que asimilan, destruyen y/o transforman los contaminantes peligrosos⁷. La biorremediación se presenta como una de las opciones más viables para corregir o reestablecer las condiciones naturales de suelos y aguas contaminadas considerados un riesgo para el hombre y los ecosistemas^{8,9}.

3. ¿QUÉ SON LOS METALES PESADOS?

Los metales pesados son aquellos elementos químicos cuyo peso atómico se encuentra comprendido entre 63.55 (peso atómico del Cu) y 200.59 (peso atómico del Hg)⁸. Además, tienen como propiedades físicas una alta conductividad eléctrica, gran maleabilidad, ductilidad y flexibilidad, poseen un brillo metálico característico, entre otros. Dependiendo de la concentración en la que se encuentren, la presencia de metales pesados puede ser beneficiosa, molesta o tóxica⁷.

Generalmente se usa el término “metales pesados” con un significado negativo, sin embargo, algunos metales pesados pueden ser considerados como macro y microelementos, es decir, elementos necesarios para el desarrollo de procesos biológicos en animales, plantas y humanos¹⁰. En ese sentido encontramos algunos metales pesados más conocidos y que son necesarios en pequeñas concentraciones como el arsénico, bromo, cobalto, cromo, cobre, molibdeno, manganeso, níquel, selenio, y zinc; sin embargo, estos elementos al superar ciertas concentraciones pasan de ser microelementos a compuestos tóxicos^{11,12}.

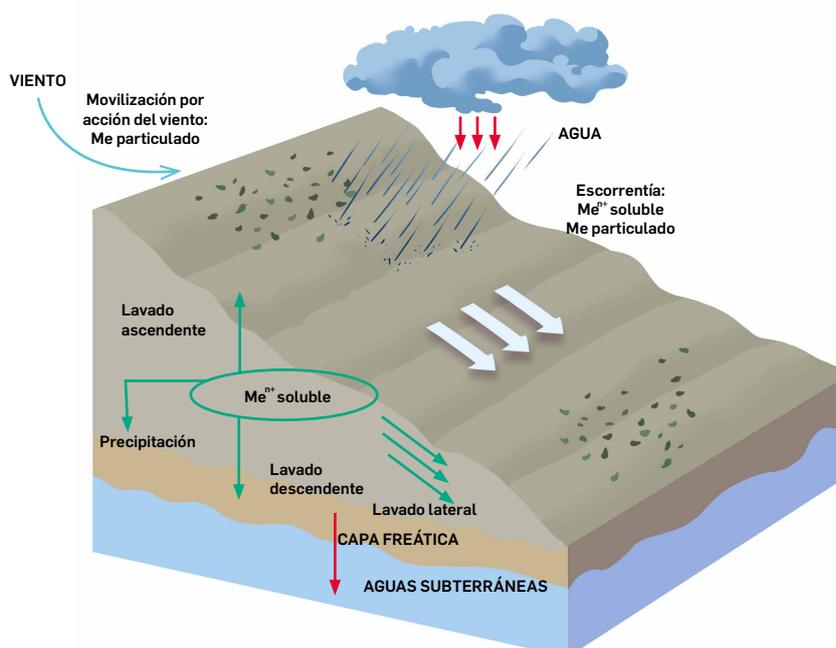
Existen dos formas en las que los metales se pueden encontrar en el ambiente:

Origen natural, debido a la meteorización de las rocas que genera material particulado del metal, el cual, mediante escorrentía, filtración y fuerza del viento, pueden llegar a depositarse en los cuerpos de agua y el suelo.

Origen antropogénico, es decir que requiere de las actividades humanas, en este caso relacionadas con el procesamiento industrial de minerales y metales, el uso de metales y sus compuestos, la lixiviación de metales de los vertederos de basura y desechos sólidos, entre otros.

En ambas situaciones de origen, según sean las concentraciones de metales pesados encontrados en el ambiente, se procede a hablar de contaminación. La siguiente imagen muestra la presencia de los metales en el ambiente¹³.

►Figura 2. Movilización natural de los metales en el ambiente (Solano Marín, 2008, p.148).



3.1. Efectos de los metales pesados en las personas

Los metales pesados presentes en aguas y suelos pueden ingresar a nuestro organismo generando afecciones, a corto y a largo plazo. Estas afecciones pueden variar según el tiempo de exposición y la concentración. Por otro lado, los metales pesados no afectan en igual magnitud a todos los órganos con los que tienen contacto^{14,15}.

La ruta de ingreso de los metales pesados se puede dar por la ingestión de partículas, por contacto dérmico o por inhalación de partículas de suelo. La ingestión de partículas se puede dar también cuando se consumen agua o alimentos contaminados con metales pesados, afectando indirectamente la salud del hombre^{16,17}. Los metales pueden acumularse en tejidos del cuerpo como los huesos, la grasa, o la sangre, y pueden bloquear la absorción de nutrientes esenciales, o cambiar la forma química de compuestos vitales, dejándolos inútiles, generando importantes impactos a la salud, dependiendo del órgano afectado y del metal involucrado¹⁴.

► **Tabla 1. Principales efectos de los metales pesados en la salud humana**

Metal	Sistemas y órganos afectados	Efectos en la salud
Arsénico	Sistema nervioso, sistema respiratorio, piel	Perforación del tabique nasal, cáncer pulmonar, neuropatía periférica, dermatomas, cáncer de piel, irritación de las mucosas, conjuntivitis, bronquitis, disnea, vómito, diarreas, edema facial, calambres, daño neuronal, reacciones cardiovasculares.
Cadmio	Riñones, pulmones	Proteinuria, glucosuria, osteomalacia, aminociaduria, neumonitis, edema pulmonar, vómitos, diarrea y dolor abdominal, enfisema
Cromo	Sistema respiratorio, pulmones	Úlcera, perforación del tabique nasal y cáncer pulmonar
Manganeso	Sistema nervioso	Neuropatías centrales y periféricas
Plomo	Sistema nervioso, sistema hematopoyético, riñones, tejido óseo	Encefalopatía, neuropatía periférica, trastornos nerviosos centrales, anemia, ataxia, malestar general, confusión, dolor de cabeza, irritabilidad, difusión motriz, convulsiones, cambios de personalidad, debilidad en las extremidades y parétesis, insuficiencia renal, cólico, dolores musculares, calambres
Níquel	Pulmones, piel	Cáncer bronquial, alergias, rinitis, sinusitis y enfermedades respiratorias
Estaño	Sistema nervioso y sistema respiratorio	Desorden en el sistema nervioso central, disminución de la vista, neumoconiosis
Mercurio	Sistema nervioso y riñones	Proteinuria, glucosuria, osteomalacia, aminociaduria, enfisema, tumores cerebrales, pérdida de apetito y peso, alteraciones psíquicas, convulsiones, irritaciones cutáneas, anemia, hipertensión, insuficiencia renal

Fuente: Adaptado de Mahurpawar (2015) y Rodríguez Senen (2012)

A consecuencia de estos problemas generados por los metales pesados tanto para el medio ambiente como para la salud de la población, se busca estrategias mediante el uso de seres vivos para restaurar ambientes contaminados, para la cual se pueden emplear diversos organismos, los más usados son los microorganismos (bacterias, algas y hongos) y las plantas.

4. CAPACIDAD FITORREMEIADORA: DEFINICIONES ÚTILES

4.1. Factores de concentración

Se utilizan diferentes “factores de concentración” para medir la capacidad que tienen las plantas para remover metales del área contaminada, que son los índices calculados a partir de información experimental de concentración de metales en diferentes áreas de la planta y el suelo.

Entre estos factores destaca el **factor de bioconcentración (BCF)** que se refiere a la relación entre la concentración de un metal que hay en la planta y su concentración en el suelo y se utiliza como una medida de la eficiencia de acumulación de metales^{16,17}. Estos factores de bioconcentración se diferencian según la estructura de la planta que concentra el metal, donde encontramos:

Factor de bioconcentración radicular (BCF_{raíz})

Es la relación entre la concentración de un metal en la raíz de la planta respecto a la concentración del mismo metal en el suelo.

Factor de bioconcentración en la parte aérea (BCF_{aérea})

Es la relación entre la concentración de un metal en la parte aérea de la planta (tallos y hojas) respecto a la concentración del mismo metal en el suelo.

Los valores menores a 1 indican que la especie es *exclusora*. Esto indica que la planta, a pesar de desarrollarse en un suelo en el que se presenta el metal evaluado, evita su absorción y acumulación en los tejidos.

Los valores mayores a 1 indican que las especies son potencialmente *acumuladoras*, es decir, que la planta está almacenando y acumulando el metal evaluado en sus tejidos. Además, cuando este valor es mayor a 10 se identifica a la planta como *hiperacumuladora*¹⁸.

El factor de traslocación, se calcula como la relación entre la concentración de metales en la parte aérea de la planta respecto a la concentración de metales en la raíz de la planta. Permite identificar plantas que movilizan eficazmente el metal desde su raíz hacia la parte aérea (cuando el valor es mayor a 1)¹⁴, tienen un sistema eficiente de transporte de metales y, probablemente, almacenan metales en las vacuolas de las hojas y en el apoplasto.



Parte aérea y radicular de la Werneria nubigena con su muestra de suelo, después de los análisis químicos se determina los factores de bioconcentración y traslocación.



► **Tabla 2. Valores y fórmulas para los factores de bioconcentración en una planta**

Factor	Valores			Fórmula
	<1	>1; <10	>10	
BCF _{raíz}	Exclusora	Acumuladora	Potencialmente hiperacumuladora	$\frac{[metal]_{raíz}}{[metal]_{suelo}}$
BCF _{aérea}	Exclusora	Acumuladora	Potencialmente hiperacumuladora	$\frac{[metal]_{aérea}}{[metal]_{suelo}}$

Fuente: Adaptado de (Dueñas Salas 2015; Medina Marcos y Montano Chávez 2014; Riffo Estay 2016)

4.2. Mecanismos de fitorremediación

Existen diferentes mecanismos en las plantas que permiten diferenciar las técnicas de fitorremediación⁶: En la siguiente tabla se aprecian estas técnicas, frente a los procesos involucrados y el tipo de contaminación que se trata.

► **Tabla 3. Técnicas de fitorremediación**

Técnicas de fitorremediación	Proceso involucrado	Contaminación tratada
Fitoextracción	Las plantas concentran los contaminantes en las partes aéreas sin desarrollar síntomas de toxicidad	Suelos y aguas contaminadas con metales.
Rizofiltración	Se utiliza las plantas para eliminar del medio hídrico contaminantes a través de la raíz. Cuando el sistema radicular está bien desarrollado, las plantas se introducen en el agua contaminada con metales, en donde las raíces los absorben y acumulan. A medida que las raíces se van saturando, las plantas se cosechan y se disponen para su uso final.	Aguas contaminadas con metales pesados, isótopos radioactivos y compuestos fenólicos.
Fitoestabilización	Se trata del uso de plantas que son capaces de secuestrar o inmovilizar contaminantes inorgánicos (como metales) u orgánicos (como aceites y dioxinas), en su raíz y/o en su zona de influencia, por precipitación en la zona de la rizosfera. Los contaminantes son absorbidos por las raíces de las plantas, donde son acumulados en formas inocuas.	Aguas subterráneas, suelo, lagunas contaminadas por desechos mineros.
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican los contaminantes o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Aguas residuales y suelos.
Fitodegradación	Es el proceso mediante el cual las plantas toman el contaminante y lo metabolizan transformándolo en un material sin riesgos para el medio natural.	Aguas subterráneas dentro de la rizósfera y el suelo.
Fitoestimulación	Las raíces de las plantas y su microflora asociada transforman el contaminante en la zona radicular.	Aguas residuales y suelos contaminados con hidrocarburos o metales.

Fuente: Adaptado de Arias Martínez et al., 2010; Medina Marcos & Montano Chávez, 2014; Mendoza, Salazar, & Bravo, 2016.

4.3. Principales plantas altoandinas con potencial fitorremediador

A continuación, se presenta una lista de plantas altoandinas con potencial de fitorremediación en ambientes contaminados por metales pesados, luego de revisar diferentes estudios realizados en la Cordillera Blanca, Ancash.

► **Tabla 4. Lista de especies vegetales altoandinas con potencial de fitorremediación**

N°	Especie	Familia	Área de estudio	Metales analizados
1	<i>Achyrocline alata</i>	Asteraceae	Mesapata Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
2	<i>Calamagrostis recta</i>	Poaceae	Quebrada Yanayacu, Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
3	<i>Calamagrostis brevifolia*</i>	Poaceae	Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Pb, Zn
4	<i>Calamagrostis glacialis</i>	Poaceae	Nevado Pastoruri, Microcuenca Quillcayhuanca	Al, Fe, Mn, Ni, Cd, Cu, Pb, Zn
5	<i>Calamagrostis ligulata</i>	Poaceae	Humedal de Mesapata y Huancapetí, Microcuenca Quillcayhuanca	Al, As, Cd, Cu, Pb, Zn, Fe
6	<i>Juncus imbricatus*</i>	Juncaceae		
7	<i>Festuca glyceriantha</i>	Poaceae	Huancapetí, Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
8	<i>Huperzia crassa*</i>	Lycopodiaceae	Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Pb, Zn
9	<i>Medicago polymorpha*</i>	Fabaceae		
10	<i>Festuca dolichophylla</i>	Poaceae		
11	<i>Juncus bufonius</i>	Juncaceae	Humedal de Mesapata, Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Pb, Zn, Fe
12	<i>Medicago lupulina</i>	Fabaceae	Planta Polimetálica Mesapata, Collahuasi Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
13	<i>Penicetum clandestinum</i>	Poaceae	Planta Polimetálica Mesapata, Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
14	<i>Scirpus olneyi*</i>	Cyperaceae	Humedal de Mesapata	Cd, Cu, Pb, Zn, Fe
15	<i>Werneria nubigena*</i>	Asteraceae	Quebrada Yanayacu Microcuenca Quillcayhuanca	Cd, Cu, Pb, Zn

* Plantas altoandinas con poca investigación

Fuente: Elaboración propia en base a la información de Chang Kee et al., 2018; León Menacho, 2017; Loayza Muro, 2018; Corpus Quiroz, 2018; Luna Solano, 2018; Miguel, Edell, Yupanqui, & Palomino, 2013; Palomino Cadenas, 2007; Torres Saavedra, 2018; Palomino Cadenas, 2007.



Fase experimental de la investigación en fitorremediación, donde se observa el riego a las especies *Werneria nubigena* y *Paranefelius ovatus*, desarrollándose en suelos contaminados por DAR, a distintas dosificaciones de biochar.

4.4. Técnicas de mejoramiento para la fitorremediación

Según recientes investigaciones, en las técnicas de mejoramiento de la capacidad fitorremediadora de las plantas que no son hiperacumuladoras, se utilizaron bacterias y hongos para mejorar la capacidad fitorremediadora de *Miscanthus sinensis* (pasto silvestre) y *Heliantus annus* (girasol) en suelos contaminados por níquel y aluminio, con resultados alentadores^{19,20}.

Por otro lado, se demuestra que la aplicación del biochar* aumentó la capacidad fitorremediadora de plantas en suelos contaminados por metales²¹, mientras que otras investigaciones tienen un nivel más avanzado de tecnología analizando cómo influye el uso de nanopartículas de óxido de hierro (FeO), dióxido de titanio (TiO₂) y nanopartículas de hierro cero valente (nZVI), en la fitorremediación de plantas acuáticas²².

*Biochar: carbón vegetal generado a través de la pirólisis, usado como enmienda para el suelo

5. LOS APORTES DESDE EL INAIGEM

La Dirección de Investigación en Ecosistema de Montaña (DIEM) apoyó el desarrollo de la tesis titulada “Evaluación de la capacidad fitorremediadora de tres especies vegetales altoandinas asistidas con biochar en suelos contaminados por drenaje ácido de roca en la microcuenca Quillcayhuanca, Ancash”²³, teniendo por objetivo la identificación de plantas altoandinas con la capacidad de adaptarse y desarrollarse en ambientes con altas concentraciones de metales. El área de estudio fue un ambiente degradado por drenaje ácido de roca (DAR) en la Quebrada Cayesh, Microcuenca Quillcayhuanca, Huaraz.

Esta investigación evaluó la capacidad fitorremediadora de tres especies vegetales altoandinas en suelos contaminados por DAR, a distintas dosificaciones de biochar, con el fin de poder determinar el tipo de fitorremediación que utiliza cada planta investigada y demostrar la influencia del biochar en la capacidad fitorremediadora de cada una de ellas.

Actualmente se está desarrollando otra tesis titulada “Potencial de *Distichia muscoides* en la biorremediación de un bofedal impactado con drenaje ácido de roca en Áncash”, que debe finalizar en el 2023. Con estos y otros trabajos se espera avanzar con la identificación de los mecanismos de fitorremediación empleados por las diferentes especies de plantas, ante diferentes metales, para mejorar las recomendaciones y dar mantenimiento a los sistemas de biorremediación establecidos.

En los siguientes años se espera incorporar trabajos con bacterias, cianobacterias y otros organismos biorremediadores que permitan mejorar la eficiencia de estos sistemas, basados principalmente en la bioprospección de la biodiversidad andina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Paz-Ferreiro, J., Lu, H., Fu, S., Méndez, A., & Gascó, G. (2014).** Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth*, 5(1), 65–75. <https://doi.org/10.5194/se-5-65-2014>
2. **León Menacho, V. A. (2017).** *Capacidad fitorremediadora de especies altoandinas para suelos contaminados por metales pesados procedentes de la compañía minera Lincuna S.A.C., en condiciones de invernadero, 2015-2016.* Universidad Nacional Santiago Antúnez De Mayolo, 2017, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1900>
3. **Shah, V., & Daverey, A. (2020).** Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology and Innovation*, 18, 100774. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>
4. **Chibueze, C., Chioma, A., & Chikere, B. (2016).** Bioremediation techniques – classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s11274-016-2137-x>
5. **Dan, T. V. (2001).** *Phytoremediation of metal contaminated soils: Metal tolerance and metal accumulation in Pelargonium sp. (Tesis de doctorado).* Universidad de Guelph, 2001, Otawwa. <https://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/handle/10214/20541?show=full>
6. **Pilon-Smits, E. (2005).** Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 56, 15-39. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>
7. **Luna Solano, E. Y. (2018).** *Biorremediación utilizando Distichia muscoides y Calamagrostis glacialis del drenaje ácido de roca proveniente del nevado de Pastoruri – 2015.* Universidad Nacional Santiago Antúnez De Mayolo, 2018, Huaraz. http://repositorio.unasam.edu.pe/bitstream/handle/UNASAM/2226/T033_42590052_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
8. **Riaz, M., Roohi, M., Arif, M. S., Hussain, Q., Yasmeen, T., Shahzad, T., Muhammad, H.F., Arif, M. & Khalid, M. (2017).** Corn-cob-derived biochar decelerates mineralization of native and added organic matter (AOM) in organic matter depleted alkaline soil. *Geoderma*, 294 (February), 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.02.002>
9. **Huamán De La Cruz, G. D. (2018).** *Evaluación de las potencialidades de los microorganismos asociados a plantas altoandinas para procesos de biorremediación, Punta Olímpica - Parque Nacional Huascarán – 2016.* Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2449?show=full>
10. **Vega Picon, E. O. (2018).** *“Capacidad de fitoacumulación de Zinc (Zn) y Plomo (Pb) utilizando las especies de chocho silvestre (Lupinus tomentosus) y llantén (Plantago mayor) del relave de la planta concentradora de minerales “Santa Rosa de Jangas”, 2017 (Tesis de titulación).* Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2445>
11. **Benigno Vega, R. E. (2018).** *Evaluación de fitoextracción por Chenopodium ambrosioides y Trifolium repens de zinc y plomo del relave de la planta concentradora de minerales “Santa Rosa de Jangas”, 2017.* Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2446>

12. **Dueñas Salas, J. (2015).** *Evaluación de la capacidad fitorremediadora de *Inga edulis* mart., en una área degradada por minería aurífera en el distrito Inambari, provincia Tambopata, región de Madre de Dios.* Universidad Nacional Amazónica de Madre De Dios, 2015, Puerto Maldonado. <http://hdl.handle.net/20.500.14070/117>
13. **Kumar Gautam, P., Kumar Gautam, R., Chattopaghyaya, M. C., & Pandey, J. D. (2016).** Heavy metals in the environment: Fate, transport, toxicity and remediation technologies. En *Heavy Metals in the Environment* (Deepak Pat). Allahabad, India: Nava Science. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
14. **Nava Ruíz, C., & Méndez Armenta, M. (2011).** Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién*, 16(3), 140–147. <https://www.medigraphic.com/pdfs/arcneu/ane-2011/ane113f.pdf>
15. **Díaz-Fierros Vigueira, F. (2013).** Riesgos sanitarios de la contaminación de suelos. *An. Real Acad. Farm.*, 79, 388–411.
16. **Soriano Figueroa, R. (2018).** *Evaluación de la eficiencia en neutralización y remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb y Zn) del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de cía minera Huancapeti - 2016.* Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2828>
17. **Torres Saavedra, A. M. (2018).** *Factor de bioconcentración y traslocación de especies altoandinas para suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora de Mesapata, en condiciones de invernadero, 2015 - 2016.* Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2110>
18. **Riffo Estay, C. A. (2016).** *Transferencia de metales pesados Cu, Pb, Zn, Ni, Co y Cr desde un suelo de la comuna de Talcahuano a las plantas *Salicornia* y *Lolium Perenne*.* Universidad Católica de la Santísima Concepción, 2016, Concepción. <http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/1020>
19. **Ma, Y., Rajkumar, M., Oliveira, R. S., Zhang, C., & Freitas, H. (2019).** Potential of plant beneficial bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of metal-contaminated saline soils. *Journal of Hazardous Materials*, 379(June), 120813. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120813>
20. **Toshikatsu, H., Yamaji, K., Ogawa, K., Masuya, H., Sekine, Y., & Kozai, N. (2019).** Root-endophytic *Chaetomium cupreum* chemically enhances aluminium tolerance in *Miscanthus sinensis* via increasing the aluminium detoxicants, chlorogenic acid and oosporein. *PLoS One*, 14(2), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212644>
21. **Sun, W., Sha, Z., & Chunming, S. (2018).** Impact of Biochar on the Bioremediation and Phytoremediation of Heavy Metal(loid)s in Soil. En *Advances in Bioremediation and Phytoremediation* (InTech, pp. 149–168). <https://doi.org/10.5772/intechopen.70349>
22. **Ebrahimbabaie, P., Meeinkuirt, W., & Pichtel, J. (2020).** Phytoremediation of engineered nanoparticles using aquatic plants: Mechanisms and practical feasibility. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 93: 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.034>

- 23. Fow Esteves, A. (2020).** Evaluación de la capacidad fitorremediadora de tres especies vegetales altoandinas asistidas con biochar en suelos contaminados por drenaje ácido de roca en la microcuenca Quillcayhuanca, Ancash. (*Tesis de titulación*). Universidad Nacional del Callao, Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/5812>

OTRAS REFERENCIAS

- 1. Arias Martínez, S. A., Betancur Toro, F. M., Gómez Rojas, G., Salazar Giraldo, J. P., & Hernández Ángel, M. L. (2010).** Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, 74, 12–22. <https://doi.org/10.23850/22565035.5>
- 2. Avelino Carhuaricra, C. G. (2013).** *Eficacia de la fitoextracción para la remediación de suelos contaminados en villa de Pasco*. Universidad Nacional del Callao, 2013, Callao
- 3. Chávez Rodríguez, L. (2014).** *Fitorremediación con especies nativas en suelos contaminados por plomo (Tesis de titulación)*. Universidad Nacional Agraria La Molina, 2014, Lima. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/2435/T01-C517-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- 4. Corpus Quiroz, M. Y. (2018).** *Eficiencia de especies altoandinas como plantas fitorremediadoras de suelos contaminados con metales pesados provenientes de la planta concentradora de minerales Santa Rosa de Jangas, en condiciones de invernadero, 2015-2016*. Universidad Nacional Santiago Antúnez De Mayolo, 2018, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/3339>
- 5. Loayza Muro, R. (2018).** *Servicio para el diseño de humedales artificiales con fines de investigación para la biorremediación de aguas contaminadas con Drenaje Ácido de Rocas (DAR)*. Lima.
- 6. Medina Marcos, K. D., & Montano-Chávez, Y. N. (2014).** *Determinación del factor de bioconcentración y traslocación de metales pesados en el Juncus arcticus Willd. y Cortaderia rudiusscula Stapf, de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero Alianza - Áncash 2013*. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2014, Huaraz. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/1775?show=full>
- 7. Miguel, B., Edell, A., Yupanqui, E., & Palomino, E. (2013).** A phytoremediation approach using *Calamagrostis ligulata* and *Juncus imbricatus* in Andean wetlands of Peru. *Environ Monit Assess*, 323–334. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2552-x>

Sede central:

Av. Centenario 2656 - Sector Palmira, Independencia
Huaraz, Áncash
www.gob.pe/inaigem



INAIGEM

INSTITUTO NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y
ECOSISTEMAS DE MONTAÑA