



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“USO DEL SISTEMA VETIVER (*Chrysopogon zizanioides*) PARA
LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR
METALES PESADOS PROVENIENTES DE LA ACTIVIDAD
MINERA”

Trabajo de Investigación para optar el grado académico de:
BACHILLER EN INGENIERA AMBIENTAL

Presentado por:

Yoselin Santa Leon Alarcon

Asesor:

Ph. D Julio Cesar Alegre Orihuela

Lima – Perú

2019

RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°101-2019-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 28 de junio de 2019

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **Uso del sistema vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*) para la remediación de suelos contaminados por metales pesados provenientes de la actividad Minera**, presentado por:

- **Yoselin Santa Leon Alarcon**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller en **Ingeniera Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **Uso del sistema vetiver (*Chrysopogon Zizanioides*) para la remediación de suelos contaminados por metales pesados provenientes de la actividad Minera** con N° de registro de la carrera: **008-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Ph.D Julio Cesar Alegre Orihuela** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico de Carrera
Ingeniería Ambiental

**USO DEL SISTEMA VETIVER (*Chrysopogon Zizanioides*) PARA LA
REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS
PROVENIENTES DE LA ACTIVIDAD MINERA**

**USE OF THE VETIVER SYSTEM (*Chrysopogon Zizanioides*) FOR THE
REMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED BY HEAVY METALS FROM
MINING ACTIVITY**

Yoselin Santa Leon Alarcon¹ y Ph.D Julio Cesar Alegre Orihuela¹

¹*Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Científica del Sur.*

RESUMEN

Mining activity contributes significantly to the contamination of water and soils, resources of great importance for the population's livelihood, which is why more care is required in case of any affectation is necessary its remediation, the current techniques of metal remediation heavy water and soil is highly expensive and often inefficient, has sought to immobilize, reduce and eliminate the toxicity of contaminants in soil and water using microorganisms and plants. Phytoremediation is a cleaning technology that makes use of the capacities that plants have to accumulate to metabolize, absorb and stabilize the different organic and inorganic compounds, which are found in soil and water body environments, many of them caused by mining activity , it is profitable and has aesthetic advantages and long applicability. The technology of vetiver grasses (*Chrysopogon zizanioides*) is an economical, simple and natural alternative to decontaminate components such as soil and groundwater and even the atmosphere with heavy metals.

Keywords: Phytoremediation, heavy metals, *Chrysopogon zizanioides*, soil, water.

ABSTRACT

Mining activity contributes significantly to the contamination of water and soils, resources of great importance for the population's livelihood, which is why more care is required in case of any affectation is necessary its remediation, the current techniques of metal remediation heavy water and soil is highly expensive and often inefficient, has sought to immobilize, reduce and eliminate the toxicity of contaminants in soil and water using microorganisms and plants. Phytoremediation is a cleaning technology that makes

use of the capacities that plants have to accumulate to metabolize, absorb and stabilize the different organic and inorganic compounds, which are found in soil and water body environments, many of them caused by mining activity, it is profitable and has aesthetic advantages and long applicability. The technology of vetiver grasses (*Chrysopogon zizanioides*) is an economical, simple and natural alternative to decontaminate components such as soil and groundwater and even the atmosphere with heavy metals.

Keywords: Phytoremediation, heavy metals, *Chrysopogon zizanioides*, soil, water.

INTRODUCCIÓN

La minería es de las actividades antropogénicas que genera gran cantidad de residuos, de todo el mineral extraído, escasamente el 2% corresponde al mineral económicamente atractivo, mientras el resto es descartado: 50% como estéril, 44% como relaves y 4% como escorias. Estos desechos poseen alto contenido de metales pesados, y en algunos casos son dispuestos en zonas aledañas a suelos cultivables y asentamientos humanos (Montenegro et al., 2009), representando riesgo de contaminación del suelo (López et al., 2003) porque podrían perder sus características físicas, químicas y biológicas y limitar el crecimiento de la vegetación (Puga et al., 2006). En el 2015 la FAO reportó que el 33% de los suelos a nivel mundial se hallaban de moderado a altamente degradado debido a la a las actividades antropogénicas que representan la mayor fuente de contaminación del suelos con metales como el cadmio, el arsénico, el plomo, el cobre y el zinc (Pennock & McKenzie, 2016; FAO, 2015).

Algunos países en Latinoamérica superan los límites máximos permisibles de la concentración de metales debido a la actividad minera, por ejemplo, Bolivia supera sus estándares en arsénico, cadmio, y plomo (Rico & Bruto, 2010). En el país de Chile la concentración del cobre (112,0 y 120,1 mg/kg) y otros metales como hierro, manganeso, zinc, cromo y cadmio se encuentran superando los límites máximos permisibles (Montenegro et al., 2009); Y en los suelos del Perú superan los estándares nacionales e internacionales en bario, cromo, aluminio, cadmio, hierro, mercurio (Alberto & Arañil, no date) y plomo (Chávez, 2014).

El problema de la contaminación de suelo requiere una especial atención debido a su utilidad para la producción de alimentos, por ello remediarlos y recuperarlos. La fitorremediación es una técnica de remediación especialmente efectiva para suelos

contaminados con metales pesados. El costo de la aplicación de este método es relativamente bajo en comparación a otros tipos de remediación, pues se puede ahorrar hasta un 57% (54,72 miles de soles por tonelada de suelo), frente a otros tratamientos convencionales (Movahed & Maeiyat, 2009). Plantas como el girasol (*Helianthus annuus*), tabaco (*Nicotiana tabacum*), carrizo (*Phragmites australis*), maíz (*Zea mays*) y el vetiver (*Vetiveria zizanioides*) son efectivos para la eliminación de plomo (Boonyapookana et al., 2005), zinc, cobre y arsénico (Diez, 2008; Shu et al., 2002; Chiu & Wong, 2006).

EL gras vetiver posee una alta capacidad de fitorremediación para metales pesados presentes en los suelos y agua, posee un alto umbral toxicológico para diversos metales, tales como el arsénico, níquel y cromo es nueve veces mayor (Truong, 1999; Ecosistemas, 2007; Chantachon et al., 2003).

El objetivo del trabajo fue identificar la bibliografía disponible sobre el uso del sistema Vetiver para la remediación de suelos contaminados con metales pesados, para informar y concientizar a la población y autoridades sobre el riesgo que representa el exceso de concentración de metales pesados en el suelo e impactos que generan sobre la agricultura y la salud humana. Además de fomentar el interés de las autoridades en materia de fiscalización y control de la presencia de metales pesados en el suelo provenientes principalmente de la actividad minera, que afectan los aspectos fisicoquímicos de los suelos y provocando impactos negativos sobre la agricultura.

MARCO TEÓRICO

Suelo contaminado

El suelo es la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa que se formó lentamente durante muchos años, lugar donde ocurren procesos geológicos, climatológicos y biológicos, además es considerado como recurso no renovable a corto y mediano plazo (Carmona, 2001). El incremento de compuestos tóxicos (pesticidas, metales, etc.), por fuentes antropogénicas tales como la minería, fundiciones, industrias, agricultura, tratamiento de aguas residuales, representan contaminación del recurso suelo, imponiendo una amenaza (Bharti et al., 2012) para la salud humana, la provisión de servicios ecosistémicos (Pennock & McKenzie, 2016; Arthur et al., 2005) y afectando las

propiedades del suelo, una vez que los contaminantes se encuentran en el suelo, estos se desplazan rápidamente dependiendo de muchos factores (Shayler, McBride & Harrison, 2009).

Se consideran elementos esenciales en concentraciones no tóxicas al hierro, manganeso, zinc, cobre, cobalto, molibdeno, elementos beneficiosos al níquel, cromo y elementos que no tienen ninguna función biológica como el cadmio, mercurio, plomo y arsénico (Bowen, 1979; Brady & Weil, 2002). Las actividades antropogénicas aportan en gran medida la contaminación del suelo con metales como cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, molibdeno y zinc que son 10 a 20 veces mayor a la cantidad que aporta la meteorización natural (Diez, 2008; Nriagu, 2010), causando efectos negativos ambientales destruyendo ecosistemas y dañando los suelos cultivables con elementos potencialmente tóxicos (Csuros, & Csuros, 2016). Comúnmente las concentraciones de plomo y mercurio se absorben rápidamente por las plantas, mientras que el zinc y el cadmio se absorben lentamente, estos metales son más biodisponibles (Alloway, 1997), por lo que son altamente peligrosos para los organismos superiores (Marthe, 2008).

Fuentes de contaminación

Industria Minera: Las operaciones mineras afectan significativamente los suelos creando vertederos que corresponden al 35% de contaminante del suelo en Europa (European Environment Agency, 2014), suprimiendo las posibilidades de hacer uso del suelo, además contamina las áreas adyacentes; ríos, lagos, tierras fértiles (Navarro et al., 2008). El contenido del metal debe ser mayor al porcentaje de “ley de corte”, mínimo contenido del metal para poder ser explotado, el material estéril se deposita en áreas adyacentes de la mina formando escombreras, mientras que en los minerales con los metales de interés pasan al proceso de trituración en donde se le adicionan químicos para la separación de los metales que después son lavados en balsas, efluentes que son dirigidos a depósitos, pantanos y en algunos casos directamente al mar (Andrei N. Tchernitchin 2006, Francisco, 2010). Los residuos mineros se erosionan fácilmente que pueden permanecer mucho tiempo aun después de que cese la actividad minera (Tiwary 2001, Pal & Olsvik, 2001)

Industria Química: Los riesgos y niveles de exposición a productos químicos individuales sobre el ambiente pueden ser debido al resultado de una exposición simultánea o secuencial a más de un producto químico (De Rosa et al., 2004). La

generación y el uso de los químicos contribuirán a la tercera parte del consumo químico a nivel mundial para el 2020 (UNEP Programme, 2015), de acuerdo con el servicio de tecnologías limpias, anualmente en promedio 10 millones de toneladas de productos químicos tóxicos son liberados al ambiente (cleantechsg., 2010), La gestión para estos residuos resulta importante y vital para una buena condición de la salud humana. La biorremediación de los desechos químicos es económicamente viable como opciones de tratamiento, las investigaciones donde se resalta el uso del gras vetiver resultando la eliminación completa de fenol. (Sudhir Singh et al., 2008). El vetiver tiene la capacidad de eliminar cianuro acumulándolo en las raíces (Saeb, Khadami, Khoramnejadian, & Abdollahi 2015).

Industria nuclear: Los compuestos reactivos generados a partir de las plantas de energía nuclear, fábrica de combustible nuclear, armas nucleares y desastres nucleares afectan de manera significativa al ambiente (Imanaka, Hayashi & Endo, 2015), muchas de estas instalaciones nucleares tendrán que ser desmanteladas (Kim et al., 2016) generando desechos los cuales poseen compuestos que terminan siendo parte del suelo y agua representando peligrosidad para los seres vivos cuando forma parte de la cadena alimenticia. La tasa de infiltración en el suelo debido a los residuos nucleares tiene un impacto directo a la napa freática del suelo, debido al sistema de cierre y disposición de desechos nucleares (International Atomic Energy Agency, 2001). Para la biorremediación de residuos nucleares el gras vetiver (Shaw & Bell, 1991) reduce entre 59 a 91% donde la mayor acumulación es llevada a cabo por las hojas más que en la raíz (Shraddha et al., 2008).

Industria de alimentos: La industria de alimentos es la necesidad primaria de toda población y su demanda está focalizada a la revolución industrial en todo el mundo, ello implica el uso intensivo de fertilizantes, pesticidas, herbicidas y fungicidas, provocando contaminación, esta visión continuara aumentado por lo que se está tomando en cuenta medidas para controlar la contaminación alimentaria (Aktar, Sengupta & Chowdhury, 2009; Pretty & Bharucha, 2014). La EPA (Environmental Protection Agency) de los Estados Unidos considera que el 15% de plomo es aportado por las conservas de alimentos que recibe el consumidor medio en aquel país (Rubio et al., 2004). La industria de alimentos procesados y la agricultura están relacionados por el uso de fertilizantes como la atrazina muy comúnmente detectado en agua y suelos (Lin et al., 2008; Fan &

Song, 2014). La habilidad del gras vetiver para tomar la atrazina es alta debido a sus características físicas (schwitzguébel, meyer & skidd, 2006; Marcacci et al., 2006).

Biorremediación

Es aquella tecnología que hace el uso del potencial metabólico de los seres vivos para la restauración de ambientes contaminados; suelos y agua (Buendía, 2012; Watanabe 2001) tales como; bacterias, hongos, levaduras, para modificar los contaminantes orgánicos en compuestos más sencillos evitando que sigan contaminando (Sánchez & Rodríguez, 2010). En el entorno natural albergan una amplia diversidad de microorganismos que degradan contaminantes que son importantes (Watanabe, 2001). Para la biorremediación denominación de hace referencia al uso intencionado de microorganismos (Montilla, 2010). La aplicación de esta tecnología puede llevarse a cabo “in Situ” en el área afectada por el contaminante, o “Ex Situ” en instalaciones fuera del área contaminada (Fallis, 2013).

Fitorremediación

Es la tecnología donde se aprovecha las capacidades de los vegetales para estabiliza, metabolizar, acumular, absorber y volatilizar los contaminantes que se encuentran en los cuerpos de agua los contaminantes pueden ser orgánico e inorgánico ejemplo, metales pesados (Delgadillo-lópez & González-Ramírez, 2011). Esta tecnología se puede usar de dos formas *in situ* o *ex situ*. El proceso de remediación se lleva a cabo en los órganos de las plantas y microorganismos ligados a ellas. (Miretzky, Saralegui & Cirelli, 2004; Kelley et al., 2000), la concentración del contaminante en el suelo dependerá de las dinámicas del sistema edáfico, la vegetación, el clima y la ubicación geográfica (Ma, Tan & Harris, 1997). La eficacia de la fitorremediación depende de la naturaleza del contaminante, su biodisponibilidad y las propiedades del suelo (Cunningham & Ow, 1996) y la fuente de contaminación (Maffei et al., 2012).

La fitorremediación es más eficiente cuando el contaminante se encuentra al alcance de la raíz de las plantas entre 1 a 2 m del suelo (Juwarkar & Jambhulkar, 2008; Ali, Khan & Sajad, 2013). La fitoestabilización y fitoextracción son dos técnicas que se disponen juntas in situ, los métodos de revegetación son más prácticos, económicos, beneficiosas y previene la erosión del suelo superficial (Baker et al., 1994); Truong, 1999). Por otro lado surge limitaciones debido a la toxicidad de los metales pesados y la baja cantidad de

nutrientes para el desarrollo de las plantas (Bradshaw, A. D, 1987; Pichtel & Salt 1998). La ventaja de la fitorremediación son los costos relativamente bajos, en la mayoría de los casos es la mitad a los precios de métodos alternativos llegando a ahorros hasta del 80% en comparación con métodos de remediación convencional (Movahed & Maeiyat, 2009).

La inversión para fitorremediación de los metales como el plomo en el suelo es un promedio de 57% de ahorro equivalente a 54,72 miles de soles en promedio por tonelada de suelo frente a la remediación convencional (tabla 1). Para la fitorremediación de los suelos contaminados se tiene un conjunto de especies vegetales y sus microorganismos asociados para la extracción, acumulación, inmovilización o transformación de los contaminantes presentes en el suelo (Barceló & Poschenrieder, 2003; Ghosh & Singh, 2005; Salt, Smith & Raskin, 1998).

Tabla 1. Costos de la fitorremediación y remediación convencional

Caso	Tratamiento con fitorremediación	Costo (miles de Pesos/miles de soles)	Tratamiento convencional	Costo (miles de Pesos/miles de soles)	Ahorros proyectados
Pb en suelo, 0.405 ha	Extracción, disposición recolección.	(150-2009/ (25.26-.68)	Excavación y disposición	500/84.19	50-65%
Solventes en agua subterránea, 1.012ha	Degradación y control hidráulico	200/33.68 de instalación y mantenimiento inicial	Bombeo y tratamiento	700/ 117.87 costos de funcionamiento anual	50% de ahorro por tres años
Hidrocarburos en suelo, 0.405 ha	Degradación <i>in situ</i>	50-100/8.42- 16.84	Excavación, incineración y disposición	500/84.19	80%

Fuente: Movahed & Maeiyat, (2009).

Tecnología de fitorremediación: La fitorremediación se basa en los mecanismos fisiológicos básicos que realizan las plantas con microorganismos asociados mediante la nutrición, fotosíntesis y el metabolismo (tabla 2). El tipo de contaminante a tratar, las condiciones ambientales del área, el nivel de toxicidad y el nivel de limpieza que se requiera (Thangavel & Subbhuraam, 2004) serán factores para la selección de la tecnología a usar como medio de contención que puede ser la rizofiltración, la fitoestabilización y la fitoinmovilización o las de eliminación como son la fitodegradación, la fitoextracción y la fitovolatilización (Delgadillo-López & González-Ramírez, 2011a).

Tabla 2. Procesos Fitotecnológicos y mecanismos implicados en la adquisición, la eliminación y detoxificación de contaminantes.

FITOTECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	RUTAS DE LA CAPTACIÓN DEL CONTAMINANTE	MECANISMO	REFERENCIA APLICABLE
Fitoextracción	Transloca y concentrados de los contaminantes del suelo a través de raíces de las plantas en partes de plantas cosechadas, por ejemplo, brotes.	Absorción por las raíces de plantas	Adsorción absorción a través de la disolución en agua o a través de catión bombas acumulación o el secuestro	Cutcheon & Schnoor, (2008). Maestri et al., (2010), Marmioli et al. (2006) y Ali, Khan & Sajad, (2013b).
Fitoestabilización	Inmoviliza los contaminantes y reduce su biodisponibilidad	Absorción por las raíces de plantas	Sorción precipitación o formación de complejos en la rizosfera	Marmioli et al. (2006), Ali, Khan & Sajad, (2013b).
Fitotransformación	contaminantes a través de actividades metabólicas de la planta o enzimas de plantas	Absorción por las raíces de las plantas o el metabolismo dentro de la zona de la raíz	La absorción por el sistema de raíz que resulta en la transformación metabólica o enzimática dentro o	Marmioli et al. (2006) Ali, Khan & Sajad, (2013b)

			externo a las plantas	
Rizodegradación	Degradaciones de contaminantes por suelo vivienda microbios en rizosfera debido a la simulación de la actividad microbiana por las secreciones de plantas.	Transformación dentro de la zona de la raíz.	La secreción de exudados de la raíz o enzimas alrededor de zonas de las raíces y la degradación microbiana posterior de xenobióticos.	Tangahu et al., (2013) y Ali, Khan & Sajad, (2013b).
Fitovolatilización	Transforma contaminantes en fase de forma o gas volátil y su posterior liberación en la atmósfera a través de la Transpiración.	La captación de contaminantes solubles en agua por raíces de las plantas.	Modificación de los contaminantes durante la translocación vascular de las raíces a las hojas.	Marmioli et al. (2006), Ali, Khan & Sajad, (2013b).

Remediación de suelos

La necesidad del uso de los recursos naturales para el desarrollo social y tecnológico se incrementó a partir de la revolución industrial (1750 d.C.), actividades que tuvo como resultado la generación de desechos industriales y urbanos (De et al., 2007) ocasionando contaminación de suelo, agua y aire con metales pesados, compuestos orgánicos y otros materiales peligrosos (Virkyute & Latostenmaa, 2002). Debido a esta contaminación es necesario tomar acciones de remediación, para degradar los contaminantes a través de plantas (fitorremediación) o microorganismos (biorremediación) (Gómez, 2004). En el caso de la fitorremediación la técnica que mayor eficiencia tuvo para la remediación de ambientes contaminados con metales pesados (Bharti et al., 2012; De et al., 2007).

Sistema Vetiver

Es una planta perenne, perteneciente a la familia Poaceae, comúnmente conocida como la “hierba maravilla” (Prasad, 2015), crece en la India y es cultivada en muchos otros países, es conocida debido a sus capacidades y aplicación en la conservación de suelos y el agua, evita el deslizamiento de pendientes, usada para la medicina, perfumería, energía en hogares y biorremediación. El Vetiver (*Vetiveria zizanioides*) ha tomado mucha importancia en investigaciones de biorremediación para derrames mineros, petroleros, tratamiento de agroquímicos y eliminación de; pesticidas, agroquímicos, absorción de metales pesados, tratamiento y purificación de agua, eliminación de desechos nucleares, aplicación de humedales (Islam, Bhuiyan & Hossain, 2008; Islam, Bhuiyan & Hossain, 2010). Las características físicas; hojas carnosas, raíces de gran volumen y profundas, se posicionan de manera estable en los suelos, favoreciendo a la adsorción de metal y soportar condiciones climáticas intensas, hacen que el Gras Vetiver sea un extraordinario candidato para la fitorremediación (Dalton & Smith, 1996; Truong, Foong, & Guthrie M, 2010).

Características generales del pasto vetiver: El gras vetiver soporta temperaturas desde -9°C a más de 45° (seguías y épocas de alta humedad) (Briceña 2007), crece en altitud hasta de 2.800 msnm,. El vetiver resiste la mayor parte de las plagas y enfermedades, sus costos de establecimiento son muy económicos, y depende del cobro de mano de obra agrícola, para su cuidado y manejo, vive por un largo tiempo (Nash et al. 2017). Las limitaciones que presenta esta técnica son: la poca profundidad para las raíces, el tiempo de aplicación amplio y la biodisponibilidad del contaminante (Daza, 2011; Rodríguez 2014).

Ventajas en la aplicación del vetiver: Simplicidad: La aplicación del vetiver no es compleja a comparación de otros sistemas de remediación (Briceña 2007), de la misma forma su aplicación no representa costos significativamente altos bajos (Nash et al. 2017), el mantenimiento es mínimo (Delgadillo-López & González-Ramírez, 2011b). Plantas y hierbas aromáticas (Roc, 2014) que crecen sin problemas en ambientes con concentraciones altas de metales pesados son usadas ampliamente para la remediación, de estos el vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) y el pasto de limón (*Cymbopogon citratus*) (Lal et al., 2013) son conocidos a nivel mundial (tabla 3). El vetiver posee una alta tolerancia a metales, al estrés frente al gras limón y otras plantas (Nash, 1999; Grimshaw, 1990; Daza, 2011; Rodríguez 2014).

Tabla 3: Plantas y pastos con nivel de tolerancia de metales, tolerancia al estrés, medicinales

Planta /Gras	Tolerancia al metal	Tolerancia al estrés	Propiedad medicinal	Producción de energía
Vetiver	✓✓✓	✓✓✓	✓	✓✓✓
Limón	✓✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Tulsi	✓	✓	✓✓✓	✓
Stylo	✓	✓✓		✓✓

✓: bajo; ✓✓: medio; ✓✓✓: alto. Fuente: Prasad (2015).

El “Sistema Vetiver” es una atractiva tecnología que hace el uso del pasto vetiver (*Vetiveria zizanoides*), el mismo que ha sido ampliamente estudiado por “The Vetiver Network Internacional (TVNI)” (Baker & Truong, 1998) debido a sus características intrínsecas (Baker et al., 1994). Posee un sistema radicular profundo y abundante biomasa (Perfil, 2017; Banerjee et al., 2016; Pang et al., 2003). Que facilita la remediación de ambientes (Rotkittikhun & Chaiyarat, 2007), esta tecnología es usado para remediación de suelos y agua contaminada en países como; China, India y Sri Lanka, debido a su alta rentabilidad que representa entre el 80 a 90% menos del costo total en comparación a métodos convencionales los cuales son 40 a 60% más costosos. En países como Australia la tecnología del sistema vetiver cuesta entre 27% a 40% menos que las soluciones convencionales (Hengchaovanich, 1995).

Alta tolerancia a metales pesados: Relaves en China posee contenidos altos de metales pesados en plomo, zinc, cobre y cadmio y bajo contenido de nutrientes principales (Nitrógeno, Fosforo, potasio) incrementan la toxicidad de metales e infertilidad del suelo, la adición de sustrato de NPK (Shu et al., 2002) o estiércol aporta en gran medida el crecimiento y desarrollo del gras vetiver para disminuir el contenido de plomo y zinc en el suelo (Chiu, Ye & Wong, 2006). Los relaves de las minas de cobre Rakra, East Singhum, Jharkhand, contaminan el suelo con metales como níquel, manganeso, zinc, el gras vetiver con la adición de estiércol de pollo absorbe gran cantidad de manganeso y zinc en su biomasa (Das & Maiti, 2009), así mismo acumula metales más en la raíz más

que en los brotes, ya que pose encima que favorecen la acumulación de metales en las raíces (Banerjee et al., 2016).

El vetiver tolera la toxicidad de una amplia gama de metales pesados en el suelo, además posee un alto rendimiento para reducir el nivel de arsénico y cobre, en cuanto al cromo, este le afecta significativamente en concentraciones altas. las altas concentraciones de plomo no afectan al crecimiento del gras vetiver, llegando a alcanzar altos niveles de umbral para este metal. El vetiver se puede desarrollar en concentraciones bajas de mercurio. El vetiver puede tolerar altas concentraciones de níquel en el suelo (tabla 6) (Truong, 1999).

Tabla 4: Concentración máxima de metales pesados que limitan el crecimiento del Vetiver en comparación con las plantas.

Metal pesado	Umbral del crecimiento de plantas en general (mgKg-1)		Umbral del crecimiento del Vetiver (mgKg-1)	
	Umbral inferior	Umbral superior	Umbral inferior	Umbral superior
Arsénico	0,02-7,5	2,0	100-250	21-72
Cadmio	0,2-9,0	1,5	20-60	45-48
Cobre	0,5-8,0	nd	50-100	13-15
Cromo	0,5-10,0	nd	200-600	may-18
Plomo	nd	nd	>1 500	>78
Mercurio	nd	nd	>6	>0,12
Níquel	0,5-2,0	07-oct	100	347
Selenio	nd	feb-14	>74	>11
Zinc	nd	nd	>750	880

Nd: sin datos

Fuente: Truong (1999).

Tolerancia a la acidez: El pasto vetiver posee una alta tolerancia a un pH bajo (3.8 pH) en los suelos y a la toxicidad para el manganeso y aluminio, metales que están estrictamente relacionados al pH en el suelo (Truong, 2013). El vetiver se usa para la rehabilitación de tierras altamente contaminadas con manganeso (Taylor et al., 1989). La adición de nitrógeno y fósforo en el suelo facilita un desarrollo normal del vetiver en condiciones extremas acidez (Truong, 1994). (Carmona, 2001; Dalton & Smith, 1996).

Tolerancia a la alta salinidad: El nivel de salinidad máximo tolerante es de $E_{cse}=8$ dSm⁻¹, este nivel es limitante para el crecimiento de las plantas (Truong, 1999), pero el gras vetiver puede crecer en suelos salinos hasta 47.5 dS m⁻¹, así mismo crece en agua de mar con niveles de salinidad de 0 a 19.64 dS m⁻¹ (Tobergte & Curtis, 2013). El crecimiento del pasto Vetiver en suelos con un porcentaje de intercambio de sodio (ESP por sus siglas en inglés) de hasta 48% no se ve afectado (Bevan & Truong, 2017), valores de ESP mayores al 15% se consideran altamente sódicos (tabla 3) (Northcote & Skene, 1972; Truong, 1994).

Tabla 5: Nivel de tolerancia máxima del vetiver en comparación a otras especies.

Especie	Conductividad eléctrica del suelo (dSm-1)	
	Umbral de Salinidad	Reducción de los rendimientos en 50%
Pasto Bermuda (Cynodon dactylon)	6,9	14,7
Pasto Rhodes (CV Pioneer) (Chloris guyana)	7,0	22,5
Thynopyron elongatum	7,5	19,4
Algodón (Gossypium hirsutum)	7,7	17,3
Avena (Hordeum vulgare)	8,0	18,0
Vetiver (Vetiveria zizanioides)	8,0	20,0

Fuente: Tobergte & Curtis, (2013).

CONCLUSIÓN

. En países latinoamericanos como Perú, Chile y Bolivia superan los límites permisibles nacionales e internacionales de metales pesados en el suelo, debido a las actividades antropogénicas como la actividad minera, la industria química, la industria nuclear y la industria alimentaria, que generan altos volúmenes de desechos que en consecuencia de una mala disposición afectan al suelo depositando compuestos orgánicos e inorgánicos que cambian las características del suelo e incluso contribuyen con la pérdida de fertilidad de la misma.

La biorremediación es un mecanismo de limpieza para ambientes contaminados con productos orgánicos e inorgánicos, una de las técnicas que abarca este mecanismo es la fitorremediación que es un método eficiente para la eliminación de metales presentes en el suelo. La aplicación de la tecnología de fitorremediación posee costos bajos frente a los métodos de remediaciones convencionales, representando ahorros de más del 50% por hectárea de suelo, asimismo, este mecanismo usa como método de contención a la rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización, para la eliminación de contaminantes a la fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización. Para la fitorremediación de los suelos contaminados se tiene un conjunto de especies vegetales y sus microorganismos asociados para la extracción, acumulación, inmovilización o transformación de los metales presentes en el suelo, la remoción de estos metales es alta y significativamente eficiente.

La especie con buena capacidad de extracción y acumulación de metales es el gras vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) por sus aptitudes físicas y metabólicas que posee, el gras vetiver es resistente a plagas, enfermedades y a concentraciones altas de acidez, basicidad y salinidad presentes en el suelo. El gras vetiver posee un gran potencial para la remediación de compuestos contaminantes, rehabilitación de desechos mineros, relaves, y gran aptitud para acumular metales pesados en la raíz y el brote, además es resistente a la alta toxicidad de una gran grama de metales pesados en diferentes ambientes, el sistema vetiver es mucho más eficiente si se adecua a los suelos incorporando nitrógeno y fósforo.

RECENCIAS BIBLIOGRAFÍA

- Aktar, W., Sengupta, D. & Chowdhury, A. 2009. Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 2(1), pp. 1–12.
- Alberto, J. & Arbañil, P. 2010. Minería y contaminación ambiental en Piura.
- Ali, H., Khan, E. & Sajad, M. A. 2013^a. Phytoremediation of heavy metals Concepts and applications', *Chemosphere*, 91(7), pp. 869–88.
- Ali, H., Khan, E. & Sajad, M. A. 2013^b. Phytoremediation of heavy metals Concepts and applications., *Chemosphere*. Elsevier Ltd, 91(7), pp. 869–881. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.
- Andrei N. Tchernitchin, L. H. 2006. Relaves Mineros y sus Efectos en Salud, Medio Ambiente y Desarrollo Económico. Ejemplo de Relave en el Valle
- B. J. Alloway, D. C. A. 1997. Department of Environmental Biology University of Guelph Guelph, Ontario N1G 2W1 Canada G, pp. 216–218.
- Baker, A. J. M. et al. 1994. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 11(1–4), pp. 41–49.
- Baker, D. & Truong, P. N. V. 1998. Vetiver grass system for environmental protection.
- Banerjee, R. et al. 2016. Vetiver grass: An environment clean-up tool for heavy metal contaminated iron ore mine-soil. *Ecological Engineering*. Elsevier B.V., 90, pp. 25–34.
- Barceló, J. & Poschenrieder, C. 2003. Phytoremediation : principles and perspectives., *Contributions to Science*, Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, 2(3), pp. 333–344.
- Bevan, O. & Truong, P. 2017. The Effectiveness of Vetiver Grass in Erosion & Sediment Control at a Bentonite Mine in Queensland, Australia. (January 2002), pp. 1–6.

- Bharti, U. 2012. Journal of Plant Development Sciences.
- Boonyapookana, B. et al. 2005. Phytoaccumulation of lead by sunflower (*Helianthus annuus*), tobacco (*Nicotiana tabacum*), and vetiver (*Vetiveria zizanioides*)', Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 40(1), pp. 117–137.
- Briceña, L. y B. F. 2007. Evaluación de la eficiencia del vetiver (*Vetiver zizanioides*) en la conservación de suelos de ladera en parcelas yuqueras de mMacapo Edo, Cojodes', pp. 143–148.
- Buendía, H. 2012. Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el compost de aserrín y estiércol. Revista del Instituto de Investigación (RIGEO), 15(T 3), p. 88.
- Carmona, E. 2001. Contaminación De Suelos. Diagnostico Tecnico. Indicadores Ambientales., pp. 431–440. Available at: <http://www.carmona.org/ciudad21/BloqueII/Bloque22/Bloque2213.pdf>.
- Chantachon, S. 2003. Phytoextraction and Accumulation of Lead From Contaminated Soil By Vetiver Grass: Laboratory and simulated field study', 5255750, pp. 1–20.
- Chávez Rodríguez, L. 2014. Fitorremediación Con Especies Nativas En Suelos Contaminados Por Plomo. p. 114. Available at: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2435/T01-C517T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Chiu, K. K., Ye, Z. H. & Wong, M. H. 2006. Growth of *Vetiveria zizanioides* and *Phragmites australis* on Pb/Zn and Cu mine tailings amended with manure compost and sewage sludge: A greenhouse study. Bioresource Technology, 97(1), pp. 158–170. doi: 10.1016/j.biortech.2005.01.038.
- Cubillos, J. et al. 2014. Fitorremediación en Aguas y Suelos Contaminados con Hidrocarburos del Petróleo. Revista Ingeniería y Competitividad, 16(1), pp. 131–146.

- Cunningham, S. D. & Ow, D. W. 1996. Promises and Prospects of Phytoremediation', *Plant Physiology*, 110(3), pp. 715–719.
- Das, M. & Maiti, S. K. 2009. Growth of *Cymbopogon citratus* and *Vetiveria zizanioides* on Cu mine tailings amended with chicken manure and manuresoil mixtures: A pot scale study', *International Journal of Phytoremediation*, 11(8), pp. 651–663.
- De, D. 2007. *Electrorremediación De Suelos Contaminados, Una Revisión Técnica Para Su Aplicación En Campo*', *Rev. Int. Contam. Ambient*, 23(3), pp. 129–138.
- Delgadillo-lópez, A. E. & González-ramírez, C. A. 2011^a. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, pp. 597– 612.
- Delgadillo-lópez, A. E. & González-ramírez, C. A. 2011b. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 14 (2011): 597- 612', *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, pp. 597–612.
- Diez Lázaro, J. 2008. *Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: Evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas*. Tesis Doctoral, USC, pp. 1–344.
- Ecosistemas, R. 2007. Fitorremediación de suelos contaminados Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16(2), pp. 1–3.
- European Environment Agency 2014. *Progress in management of contaminated sites*', (Lsi 003), p. 37. doi: 10.2788/4658.
- Fallis, A. 2013. Biorremediación de suelos contaminados en Colombia', *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp. 1689–1699.
- Fan, X. & Song, F. 2014. Bioremediation of atrazine: recent advances and promises. *Journal of Soils and Sediments*, 14(10), pp. 1727–1737.
- FAO. (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i5126s.pdf>

- Francisco Belmonte Serrato, A. R. D. y J. M. B. 2010. Contaminación ambiental por estériles mineros en un espacio turístico en desarrollo, la sierra minera de cartagena-la unión (sureste de España)', *Rredalyc*.
- Ghosh, M. & Singh, S. P. 2005. Asian Journal on Energy and Environment A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of It's by Products', *As. J. Energy Env*, 6(604), pp. 214–231. doi: 10.1007/s10681-0141088-2.
- Grimshaw, R. G. 2014. An Introduction to Vetiver Grass Technology. pp. 1–15.
- Hengchaovanich, D. 2014. A Bioengineering and Phytoremediation Option for the New Millennium. pp. 23–27.
- Imanaka, T., Hayashi, G. & Endo, S. 2015. Comparison of the accident process, radioactivity release and ground contamination between Chernobyl and Fukushima-1. *Journal of Radiation Research*, 56(November), pp. i56– i61. doi: 10.1093/jrr/rrv074.
- International Atomic Energy Agency. 2001. Procedures and techniques for closure of near surface disposal facilities for radioactive waste.
- Islam, M. P., Bhuiyan, K. H. & Hossain, M. Z. 2008. Vetiver Grass as a Potential Resource for Rural Development in Bangladesh. pp. 1–18.
- Juwarkar, A. A. & Jambhulkar, H. P. 2008. Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach. *Bioresource Technology*, 99(11), pp. 4732–4741.
- Kates, R.W., Parris, T.M., & Leiserowitz, A. A. 2005. Science and Policy for Sustainable Development', *Environment*, 3(47), pp. 8–21.
- Kelley, C. et al. 2000. Incorporation of Phytoremediation Strategies into the Introductory Chemistry Laboratory', *Chem. Educator*, 5(00), pp. 140–143. doi: 10.1007/s00897000383a.
- Kim, I. G. et al. 2016. Reduction of Radioactive Waste from Remediation of Uranium-Contaminated Soil', *Nuclear Engineering and Technology*. Elsevier B.V, 48(3), pp. 840–846.

- Lal, K. et al. 2013. Productivity, essential oil yield, and heavy metal accumulation in lemon grass (*Cymbopogon flexuosus*) under varied wastewater-groundwater irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*. Elsevier B.V., 45, pp. 270–278.
- Lin, C. H. et al. 2008. Bioremediation of Atrazine-Contaminated Soil by Forage Grasses: Transformation, Uptake, and Detoxification. *Journal of Environment Quality*, 37(1), p. 196.
- López, P. et al. 2003. *La Minería y su Pasivo Ambiental*. Pp. 16.
- M Hofman, J. A. 2006. Phytoremediation Rhizoremediation. doi: 10.1007/978-14020-4999-4.
- Ma, L. Q., Tan, F. & Harris, W. G. 1997. Concentrations and Distributions of Eleven Metals in Florida Soils. *Journal of Environment Quality*, 26(3), p. 769. doi: 10.2134/jeq1997.00472425002600030025x.
- Maestri, E. et al. 2010. Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade-offs between traits and environment. *Environmental and Experimental Botany*, 68(1), pp. 1–13.
- Maffei, J. A. et al. 2012. Metales Pesados Disponibles y Totales en Suelos Irrigados del Río Mendoza. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, (January).
- Marcacci, S. et al. 2006. Conjugation of atrazine in vetiver (*Chrysopogon zizanioides* Nash) grown in hydroponics. *Environmental and Experimental Botany*, 56(2), pp. 205–215.
- Marthe-Lise Sjøvik 2008. Heavy metals in soil and water near mercury hotspots in Guizhou, China. Faculty of mathematics and natural sciences UNIVERSITY OF OSLO 11/2008.
- Miretzky, P., Saralegui, A. & Cirelli, A. F. 2004. Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina)', *Chemosphere*, 57(8), pp. 997–1005.

- Montenegro, G. et al. 2009. Contenidos de metales pesados en suelos cercanos a un relave cuprífero chileno', *Agrociencia*, 43(4), pp. 427–435.
- Montilla, P. A. F. 2010. Fundamento Teórico Sobre Tratamiento de Aguas Residuales Por Fitorremediación.
- Movahed, N. & Maeiyat, M. M. 2009. Phytoremediation and sustainable urban design methods', pp. 1–12.
- Nash, L. 2011. Vetiver – the plant Vetiver Characteristics – Shoots', pp. 1–24.
- Navarro, M. C. et al. 2008. Abandoned mine sites as a source of contamination by heavy metals: A case study in a semi-arid zone. *Journal of Geochemical Exploration*, 96(2–3), pp. 183–193. doi: 10.1016/j.gexplo.2007.04.011.
- P.A. Dalton, R.J. Smith, & P. N. V. T. 1996. Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped flood plain : hedge hydraulics. 1(95).
- Pal Gundersen, Pal A. Olsvik, E. S. 2001. Variations in heavy metal concentrations and speciation in two mining-polluted streams in central norway', 20(5), pp. 978–984.
- Pang, J. et al. 2003. Physiological aspects of vetiver grass for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes. *Chemosphere*, 52(9), pp. 1559–1570.
- Pennock, D. & McKenzie, N. 2016. Estado mundial del Recurso suelo.
- Perfil, V. E. R. E. L. 2017. Sistema Vetiver para la protección ambiental.
- Prasad, V. 2015. Energy plantation, medicinal and aromatic on contaminated soil. *Bioremedia*.
- Pretty, J. & Bharucha, Z. P. 2014. Sustainable intensification in agricultural systems', *Annals of Botany*, 114(8), pp. 1571–1596.
- Puga, S. et al. 2006. Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera', *Ecología Aplicada*, 5(1,2), pp. 149–155.
- Rico, C. & Bruto, P. I. 2010. Sus Dimensiones Y Problemas.

- Roc, C. 2014. Hierbas aromáticas y medicinales en México: tradición e herbs and medicinal plants in mexico : tradition &', (January 2013).
- De Rosa, C. T. et al. 2004. Implications of chemical mixtures in public health practice. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews*, 7(5), pp. 339–350.
- Rotkittikhun, P. & Chaiyarat, R. 2007. A glasshouse study', 66, pp. 45–53.
- Salt, D. E., Smith, R. D. & Raskin, I. 1998. Phytoremediation', *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49(1), pp. 643–668.
- Sánchez, J. & Rodríguez, J. 2010. Fundamentos y Aspectos Microbiológicos: Biorremediación', *Universidad de Oviedo*, 1, pp. 12–16.
- Schwitzguébel, J. Meyer, J. & Skidd, P. 2006. Pesticides Removal Using Plants : Phytodegradation', *Phytoremediation Rhizoremediation*, pp. 179–198.
- Shaw, G. & Bell, J. N. B. 1991. Competitive effects of potassium and ammonium on caesium uptake kinetics in wheat. *Journal of Environmental Radioactivity*, 13(4), pp. 283–296.
- Shu, W. et al. 2002. Use of Vetiver and Three Other Grasses for Revegetation of Pb/Zn Mine Tailings: Field Experiment', *International Journal of Phytoremediation*, 4(1), pp. 47–57.
- Singh, S. 2008. 'Phytoremediation of ¹³⁷cesium and ⁹⁰strontium from solutions and low-level nuclear waste by *Vetiveria zizanioides*', *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 69(2), pp. 306–311.
- Singh, S. 2008. 'Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) for phytoremediation of phenol. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 71(3),
- Steven McCutcheon & Jerald Schnoor. 2008. *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*, Science.
- Tangahu, B. V. et al. 2013. Phytoremediation of Wastewater Containing Lead (Pb) in Pilot Reed Bed Using *Scirpus Grossus*. *International Journal of Phytoremediation*, 15(7), pp. 663–676.

- Thangavel, P. & Subbhuraam, C. 2004. Phytoextraction: Role of hyperaccumulators in contaminated soil', *Proceedings of the Indian Natural Science Academy*, pp. 109–130.
- Tiwary, R. K. 2001. Environmental impact of coal mining on water regime and its management', Springer, pp. 185–199.
- Tobergte, D. R. & Curtis, S. 2013. Prevención y tratamiento de aguas y suelos contaminados. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp. 1689–1699.
- Truong, P. 1999. Vetiver Grass Technology For Mine Rehabilitation. Tech. Bull. No. 1999/2, PRVN / RDPB, Bangkok, Thailand, p. 19.
- Truong, P. N. V. P. 1994. Vetiver grass, its potential in the stabilisation and rehabilitation of degraded and Saline lands.
- Truong, P., Principal, E. & Naturales, R. 2013. La tecnología del pasto vetiver para protección ambiental', Departamento de Recursos Naturales de Queensland Brisbane, Australia.
- Truong PN, Foong YK, Guthrie M, H. Y. 2010. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils and water using vetiver grass environmental bioengineering.
- UNEP Programme, U. N. E. 2015. United Nations Environment Programme Evaluation of the Chemicals and Waste Sub-Programme. (October).
- Virkutyte, J., Sillanpää, M. & Latostenmaa, P. 2002. Electrokinetic soil remediation - Critical overview. *Science of the Total Environment*, 289(1–3), pp. 97–121.
- Watanabe, K. 2001. Microorganisms relevant to bioremediation. *Current Opinion in Biotechnology*, 12(3), pp. 237–241.