



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

CONTENIDO DE METALES PESADOS EN VEGETACIÓN ALREDEDOR DE UNA MINA CERRADA EN LA REGIÓN PIURA

Jean Zapata-Valladolid

Piura, marzo de 2019

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área Departamental de Ingeniería Industrial y de Sistemas

Zapata, J. (2019). *Contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura* (Tesis para optar el título de Ingeniero Industrial y de Sistemas). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Piura, Perú.



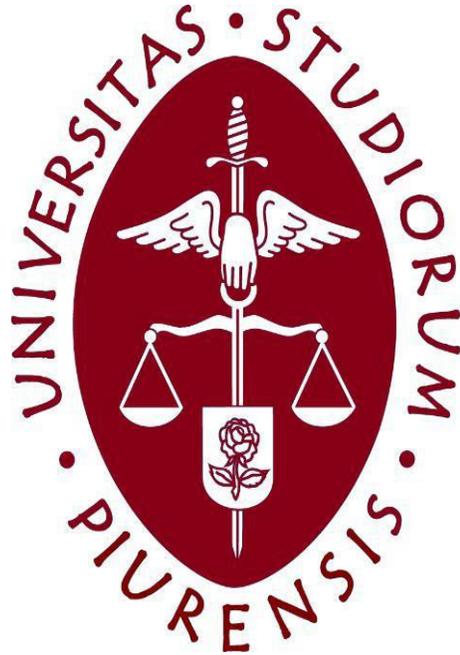
Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

UNIVERSIDAD DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA



“Contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura”

Tesis para optar el Título de Ingeniero Industrial y de Sistemas

Jean Carlo Zapata Valladolid

Asesora: Dra. Fabiola Ubillús Albán

Piura, marzo de 2019

Le agradezco a Dios y a mis padres,
especialmente a mi madre, a quien
con todo mi amor le dedico esta
tesis, por todo su esfuerzo,
dedicación, preocupación y
sacrificio diario a lo largo de mi
carrera. Dignos de mi eterna
gratitud.

Prólogo

La contaminación por metales pesados es una de las preocupaciones ambientales más importantes en el Perú y en el mundo, debido a que causa efectos adversos en los seres vivos.

En nuestro país este tipo de contaminación, relacionada con la minería, ha estado en el centro de los principales problemas de salud humana, causando conflictos socioambientales debido a la generación de sustancias tóxicas que afectan a la agricultura y el ecosistema por acciones inadecuadas en la operación y cierre de una mina.

En este sentido, la población del distrito de Canchaque ha sido significativamente afectada, la mina Turmalina extrajo cobre entre los años 1970 y 1996, y fue cerrada sin un restablecimiento sobre las condiciones del ambiente y de los problemas causados durante su explotación, como por ejemplo la generación de aguas ácidas, bocaminas sin taponar y canchas de relaves en mal estado. Estos problemas pueden ser atribuidos a una mala gestión política administrativa y la poca cautela por el respeto a las normas del estado peruano.

La elaboración de la presente tesis surge a raíz de una investigación realizada en 1997 por los doctores Jaume Bech, Pedro Tume y José Luis Barranzuela y otros colaboradores; quienes publicaron unas mediciones del contenido de metales pesados en suelos y plantas. Los investigadores, preocupados por los altos contenidos de metales pesados que encontraron en aquella oportunidad, han considerado oportuno muestrear nuevamente la misma zona para evaluar la evolución de la contaminación.

Esta investigación se realizó con el objetivo de determinar el contenido de metales pesados en plantas endémicas, y contribuir al estudio de problemas por metales pesados en el país, como líneas de base ambientales, que puedan encontrar alternativas de solución ecológica a mediano plazo, si fuera el caso.

Un estudio acerca de la calidad del agua en 2014 reveló concentraciones elevadas de aluminio, arsénico, sodio y magnesio que superaban los estándares permitidos en la quebrada “Mina” de donde se capta el agua para la población de Palambla y el río Canchaque.

Por ello se propone cuantificar el contenido de algunos metales pesados de especies vegetales que crecen alrededor de la mina, aplicando el método de digestión por vía húmeda, considerado uno de los métodos tradicionales más utilizados que permite mineralizar las muestras sólidas orgánicas y pasarlas a solución acuosa con concentraciones detectables por un instrumento de medida. En la actualidad hay poca información disponible sobre el impacto ambiental de los sitios mineros en el país, de este modo los resultados servirán como referencia para futuros monitoreos y gestiones de diversidad biológica que realicen las autoridades competentes, organismos públicos e instituciones del estado que velan por la salud y la protección del ambiente; promoviendo la conservación de los ecosistemas naturales.

Esta investigación incentiva la educación por el ambiente, el intercambio de información, el desarrollo de la capacidad de los recursos humanos y la investigación científica, referidos a la diversidad biológica y a la utilización sostenible de sus componentes.

Por último, agradezco a la Dra. Fabiola Ubillús, por su asesoría, apoyo y contribución a la realización de esta investigación. Al personal del Laboratorio de Química de la Universidad de Piura, especialmente, la Sra. Janet Ramírez y la Sra. Dalila Urizar, por su ayuda y guía técnica brindada durante el desarrollo en la parte experimental de esta investigación. Y a los Dres. Tume y Barranzuela impulsores de esta investigación.

Resumen

Esta tesis se enfoca en el contenido de metales pesados en vegetación cercana a una mina cerrada en la región Piura con el propósito de evaluar la contaminación por metales pesados en especies vegetales y proporcionar información para futuros estudios de monitoreo y evaluación de riesgo de zonas similares.

La zona de muestreo de la vegetación analizada se ubica en el distrito de Canchaque donde está la mina Turmalina, que operó entre los años 1970 y 1996. Para la medición del contenido de metales pesados se utilizó una digestión por vía húmeda y la determinación por espectrometría de absorción atómica (AAS), empleando los recursos existentes en el Laboratorio de Química de la Universidad de Piura. En este sentido, los mejores resultados de digestión del material vegetal (hojas y raíces) se obtuvieron con una relación ácido nítrico – ácido perclórico (4:1), y un tiempo de digestión de 120 minutos.

Los resultados muestran una elevada concentración de aluminio, hierro y cobre. Los metales más tóxicos como el plomo y el cadmio están por debajo del límite de detección. La absorción de metales pesados mediante vegetación endémica es una alternativa ecológica para la remediación de suelos en ecosistemas contaminados por la minería.

Índice

Introducción	1
1. Aspectos generales	3
1.1. Metales pesados.....	3
1.1.1. Definición.....	3
1.1.2. Características de los metales.....	3
1.1.3. Impacto ambiental	8
1.1.4. Metales pesados en el Perú.....	9
1.2. Fitorremediación	10
1.2.1. Plantas hiperacumuladoras	14
1.2.2. Clasificación de las técnicas de fitorremediación.....	14
1.2.3. Ventajas y desventajas de la fitorremediación	17
1.2.4. Fitorremediación en el Perú.....	18
1.3. Marco legal sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad biológica... 19	
1.4. Descripción del área de estudio.....	20
1.5. Antecedentes de contaminación de la zona problema	22
1.6. Clima de la zona de estudio.....	24
1.7. Flora cercana a la mina cerrada	26
1.8. Fauna cercana a la mina cerrada.....	26
2. Parte experimental	29
2.1. Muestreo.....	29
2.2. Selección de especies vegetales a analizar	31
2.3. Equipos y materiales	36

2.3.1.	Materiales	36
2.3.2.	Reactivos	36
2.3.3.	Equipos.....	37
2.4.	Preparación de las muestras	40
2.5.	Selección del método de digestión por vía húmeda	41
2.6.	Cuantificación de metales pesados por AAS.....	42
3.	Resultados y discusión.....	49
	Conclusiones.....	55
	Referencias bibliográficas	57
	Anexos.....	67
	Anexo A - Resúmenes de datos de seguridad.....	69
	Anexo B – Último reporte periodístico sobre la mina Turmalina	73
	Anexo C - Parámetros de calidad y límites máximos permisibles del agua	74
	Anexo D - Resultado de concentraciones de metales pesados en suelos muestreados.....	76
	Anexo E - Preparación de la pasta saturada.....	77
	Anexo F -Tablas de concentraciones de metales pesados en otras especies vegetales.....	78

Índice de figuras

Figura 1.	Pasivos ambientales mineros – PAM, 2015.....	11
Figura 2.	Conflictos socio – ambientales, agosto de 2016.	12
Figura 3.	Principales lugares de contaminación por metales pesados en el Perú.....	13
Figura 4.	Vista satelital de la zona de estudio.	21
Figura 5.	Muestreo de plantas y suelos.	30
Figura 6.	Diagrama de operaciones para determinar la concentración de metales pesados en materia vegetal.	31
Figura 7.	<i>Baccharis latifolia</i>	33
Figura 8.	(a) <i>Gardoquia cf. Sericea</i> , (b) <i>Pityrogramma tartarea</i>	34
Figura 9.	(a) <i>Pteridium arachnoideum</i> , (b) <i>Salvia corrugata</i>	35
Figura 10.	Mortero de ágata.	36
Figura 11.	(a) Estufa, (b) Placa calefactora.	38
Figura 12.	Balanza analítica.	38
Figura 13.	Equipo de AAS.	40
Figura 14.	Partes de espectrofotómetro de absorción atómica.	40

Figura 15. Producto de la molienda de la muestra.	41
Figura 16. Curva de calibración de cadmio.....	44
Figura 17. Curva de calibración de cobre.....	45
Figura 18. Curva de calibración de plomo.	47
Figura 19. Curva de calibración de zinc.....	48

Índice de tablas

Tabla 1. Datos promedio de temperatura y precipitación recopilados entre 1982 y 2012.	25
Tabla 2. Código de terrenos.....	30
Tabla 3. Especies seleccionadas.	32
Tabla 4. Parámetros instrumentales óptimos de AAS de llama.....	43
Tabla 5. Datos de la curva de calibración para el cadmio.	44
Tabla 6. Datos de la curva de calibración para el cobre.	45
Tabla 7. Datos de la curva de calibración para el plomo.....	46
Tabla 8. Datos de la curva de calibración para el zinc.	48
Tabla 9. Propiedades de los suelos.	50
Tabla 10. Concentraciones de metales pesados en materia vegetal.....	51

Introducción

Actualmente, existe a nivel mundial una disminución de las extensiones de tierra de uso agrícola debido a la expansión industrial, acarreado consigo un desarrollo de industrias que añaden desperdicios al ecosistema. La industria minera es una de las vías donde los metales pesados se encuentran en altas cantidades, contribuyendo a un grave problema de contaminación del suelo y del agua, siendo estos los medios por los que llegan a afectar al hombre.

La minería es una de las actividades económicas más dinámicas en el Perú. En el distrito de Canchaque operó hasta principios de los años noventa la mina Turmalina la cual dinamizó la economía local y regional; no obstante, causó una serie de daños ambientales produciendo grandes cantidades de relaves que a menudo contienen concentraciones de metales dañinos como cadmio, cobre y plomo debido a una mala gestión administrativa y ambiental.

Hoy en día se planifican y fiscalizan estrictamente los cierres de operaciones de actividades mineras. Por ello, existen instituciones y organizaciones dedicadas a mejorar la calidad del agua y remediar áreas impactadas por la minería, con el afán de proteger la salud pública. Los estudios de metales pesados producto de la industria minera exigen una medición mediante técnicas convencionales y modernas; como la espectroscopía óptica acoplada de plasma inducido (ICP OES), la espectroscopía de masas acoplada de plasma inducido (ICP MS), o la espectroscopía de inyección de flujo de mercurio (FIMS), así como la espectrometría de absorción atómica, técnica convencional para el análisis de metales, que incrementa su sensibilidad añadiéndole la técnica la generación de hidruros y horno de grafito.

Los resultados de la absorción atómica, con el generador de hidruros y con el FIMS, son más exactos y constituyen un gran soporte analítico en la variabilidad de matrices; por otro lado, las técnicas de ICP OES e ICP MS permiten una mayor precisión y velocidad en la obtención de resultados, además de analizar elementos no metálicos como azufre y fósforo.

La escasez de recursos económicos en este trabajo llevó a realizar la medición de concentración de metales por medio de la espectrometría de absorción atómica de llama en el

Laboratorio de Química de la Universidad de Piura, esta técnica permite la detección de metales hasta el orden de las partes por millón – ppm.

La espectrometría de absorción atómica (AAS) también se ha usado para analizar trazas de muestras geológicas, biológicas, metalúrgicas, cementos, aceites para maquinaria, sedimentos marinos, farmacéuticos y atmosféricos. En el departamento de Piura, el laboratorio de química de la Universidad de Piura es el único en realizar el servicio de determinación de metales pesados en materia vegetal, entre otros, por medio de la espectrometría de absorción atómica (AAS).

La presente tesis tiene como propósito determinar el contenido de metales pesados en vegetación cercana a una mina cerrada en la región Piura. Para una mejor comprensión el trabajo se ha dividido en tres capítulos. El primer capítulo expone un panorama general sobre la función que cumplen los metales pesados en la vegetación y el impacto ambiental de un alto contenido de metales pesados que causa en los suelos. Así mismo se promueve el tema sobre la fitorremediación, la descripción y los antecedentes de la zona de estudio de la cual se extrajeron las muestras vegetales.

El segundo capítulo comprende la parte experimental. En ella se describe el proceso para analizar las muestras, con los recursos existentes en el laboratorio de química. Tomando como referencia la información recogida de artículos científicos realizados en otros países se adaptó el método, y se usó la digestión por vía húmeda para la disolución de la muestra y posterior cuantificación analítica.

En el tercer capítulo se discuten los resultados obtenidos por medio de la espectrometría de absorción atómica de llama, de ellos se observa la posible capacidad de absorber metales pesados en algunas especies vegetales, y una mejor tolerancia a la alta concentración de metales como el aluminio, el hierro y el cobre.

Finalmente, en las conclusiones se pretende proyectar esta investigación para futuros estudios de monitoreo y evaluación de riesgos en zonas mineras similares. Así como promover el estudio de especies vegetales para remediar la contaminación en el suelo.

Capítulo 1

Aspectos generales

1.1. Metales pesados

1.1.1. Definición

Se denomina metales pesados a los componentes de un subconjunto de elementos químicos con propiedades metálicas que presentan una relativa alta densidad (por lo menos cinco veces mayor que la densidad del agua) y un peso atómico alto; se encuentran sobre la corteza terrestre en bajas concentraciones en forma de minerales, sales u otros compuestos. Se incluyen principalmente a los metales de transición, algunos metaloides, lantánidos y actínidos. Cabe destacar que en esta categoría entran prácticamente todos los elementos metálicos de interés económico, por tanto, de interés minero.

1.1.2. Características de los metales

- Aluminio

El aluminio se encuentra por encima del 15 % en la corteza terrestre como óxido de aluminio (Al_2O_3), el cual es poco soluble en suelos neutros o alcalinos y no alcanzaría concentraciones tóxicas para los vegetales; sin embargo, con la reducción del pH del suelo se incrementa la solubilidad del aluminio (Al^{3+}) hasta llegar a ocupar más de la mitad de los sitios de

intercambio iónico del suelo (Wallnöfer y Engelhardt, 1995 citado en Casierra - Posada, 2007). Estas formas iónicas han demostrado ser muy tóxicas para las plantas, provocando inicialmente la inhibición del desarrollo radicular, tanto en longitud como en grosor; es por ello que se ve reducido el volumen de las raíces.

La alta concentración de aluminio (Al^{3+}) en el suelo reduce considerablemente la calidad y el rendimiento de los cultivos. Su concentración en las plantas usualmente es más alta en las raíces que en los tejidos aéreos (Casierra - Posada, 2007), dentro de la raíz el aluminio tiene afinidad con los componentes de la pared celular, afectando la absorción del agua y de los nutrientes, influyendo de una manera negativa en el crecimiento y desarrollo de la planta.

- **Cadmio**

El cadmio es un metal pesado no esencial para los seres vivos; por tanto, este elemento como sus compuestos son muy tóxicos; además, es poco abundante en la corteza terrestre. Algunos suelos pueden tener niveles de cadmio elevados porque las rocas de las que se formaron tenían el elemento en su composición; sin embargo, a finales del siglo XX la contaminación ambiental por cadmio ha aumentado y se le encuentra como un subproducto de actividades industriales como la minería y la fundición de metales afectando de forma progresiva diferentes ecosistemas.

La principal fuente de contaminación de cadmio en el ser humano es la ingesta de vegetales contaminados con este metal (Norvell et al. 2000). El cadmio es biopersistente, y una vez absorbido por la materia orgánica sigue siendo residente por muchos años, aunque suele ser excretado eventualmente. En seres humanos la exposición a largo plazo causa diversas patologías como difusión renal o enfermedades obstructoras en el pulmón. También puede producir efectos sobre el tejido óseo (osteoporosis).

El cadmio no tiene ninguna función fisiológica conocida en los vegetales y el principal síntoma de contaminación de cadmio es la disminución del crecimiento de las plantas, dependiendo de la sensibilidad de la especie, también es posible la aparición de otros síntomas como atrofia y clorosis, hojas arrugadas y con coloración marrón-rojiza. (Ferguson, 1990). La concentración de cadmio no es la misma en las diferentes partes de la planta. Generalmente la secuencia es: raíces > tallos > hojas > frutas > semillas (Ferguson, 1990; Jinadasa, et al. 1997; Nigam et al., 2001, citado en Herrera Marcano, s.f.).

- **Cobre**

El cobre es un metal de color rojizo y con brillo metálico; excelente conductor de la electricidad y del calor. Es uno de los metales traza más abundantes, uno de los micronutrientes con mayor fuerza de retención por la materia orgánica, se produce como Cu^+ y como Cu^{2+} debido a su tendencia a formar enlaces covalentes de gran fuerza. (Luo y Christie, 1998 citado en Orroño D., 2002).

Los iones de cobre en la solución del suelo en forma de Cu^+ o Cu^{2+} son absorbidos por las raíces de las plantas, así como complejos solubles de cobre. El cobre es necesario en numerosos procesos bioquímicos tales como reacciones redox que generalmente dependen del cambio de valencia del ion. Además, también forma parte de varias enzimas que influyen en la fotosíntesis y el metabolismo de los carbohidratos y del nitrógeno.

La mayor parte del cobre en la planta se encuentra en el cloroplasto, correspondiendo alrededor del 50 % a la plastocianina, una proteína no enzimática.

La toxicidad por cobre afecta a la división celular a nivel del ápice radicular (la punta de la raíz), la elongación radicular y también la organización del sistema radicular en general. La concentración de cobre en el suelo depende del contenido de materia orgánica, el pH y de la disponibilidad de agentes complejantes¹. Este metal no siempre se encuentra totalmente disponible para ser absorbido por las plantas. Algunos factores, como el pH afectan su disponibilidad ya que aumenta cuando el pH tiene valores inferiores a 6,0.

El aporte de relaves de la industria minera, pueden hacer que grandes cantidades de cobre activo se incorporen al suelo y a las plantas. En los yacimientos de cobre se le puede hallar como óxidos y sulfuros, en ambos casos la extracción parte del fragmentado de rocas mediante detonaciones de explosivos convencionales.

- **Hierro**

El hierro es el cuarto elemento más abundante en el suelo, por lo menos un 5 % de la corteza terrestre está constituida por este elemento; sin embargo, su biodisponibilidad en el suelo es normalmente muy baja. Al igual que el resto de nutrientes el punto de partida del hierro en el suelo son los minerales primarios.

¹Son moléculas tanto sintéticas como naturales que forman uniones con los nutrientes menos estables que los quelantes. A cambio son completamente biodegradables y más fáciles de producir.

Es el micronutriente más requerido por las plantas; estas pueden absorber el hierro en sus estados de oxidación Fe^{2+} (hierro ferroso) y Fe^{3+} (hierro férrico), aunque la mayoría del hierro en la corteza terrestre está en forma férrica, la forma ferrosa es fisiológicamente más importante para las plantas. Su facilidad para cambiar de estado de oxidación y formar quelatos² estables y solubles hacen que esté implicado en un gran número de funciones fisiológicas. No obstante, la disponibilidad del hierro para las raíces normalmente es muy bajo.

Por otro lado, la deficiencia de hierro es un factor limitante en el crecimiento de las plantas; aparece en las hojas como un color verde pálido (clorosis) mientras que las venas permanecen verdes, desarrollando un agudo contraste.

- **Manganeso**

El manganeso es un elemento muy común en la corteza terrestre. Generalmente, se presenta en el suelo como óxido e hidróxido formando concreciones junto a otros elementos metálicos. Este metal es indispensable para el crecimiento de las plantas, por ello es de gran interés en la química de los suelos (Chapman, D. y Pratt F., 1988).

La fracción más importante para las plantas es el Mn^{2+} , debido a que es la fracción más disponible para ser absorbida por las raíces. Esta forma de manganeso se encuentra en equilibrio con los óxidos de manganeso presentes en el suelo. Influye directamente sobre la fotosíntesis al ayudar a la síntesis de la clorofila; además, tiene un rol en varias reacciones metabólicas importantes incluyendo la conversión del nitrógeno en forma de nitratos.

Los valores del potencial redox y del pH del suelo son importantes en la planta para la retención del manganeso. Por su parte, la liberación del manganeso comienza con valores cercanos a 6,0 y se intensifica a medida que el pH disminuye presentando cierta movilidad en el suelo lixiviándose con facilidad. Las altas concentraciones también limitan el proceso fotosintético de las plantas y con ello el desarrollo de las mismas.

²También llamados complejos de iones metálicos son estructuras químicas en la cual un ion como el calcio (Ca^{2+}) o el Cobre (Cu^{2+}) se unen a un sustrato.

- **Plomo**

Entre los metales más pesados, el plomo es el más abundante en la corteza terrestre, de color blanco azulado y alta densidad ($11,35 \text{ g/cm}^3$). En general, el plomo se encuentra en todas las rocas de la corteza terrestre; el mineral más común es la galena y carece de valor biológico, es decir, no es requerido para el funcionamiento de los seres vivos. (Chapman, D. y Pratt F., 1988). El plomo no es esencial para el crecimiento de las plantas; sin embargo, está omnipresente en los sistemas de suelo y agua de las plantas, tendiendo a acumularse cerca de la superficie del suelo. Las plantas con raíces poco profundas están expuestas a concentraciones relativamente más altas que los cultivos con raíces más profundas (Walsh et al., 1975; John, 1975 citado en Acevedo E. et al., 2005). La adsorción y solubilidad de este metal en el suelo va incrementándose al disminuir el pH de los suelos.

El plomo puede reducir la productividad de la vegetación debido a que degrada el suelo, consiguiendo efectos negativos en la fauna. Los altos niveles de la exposición pueden dar lugar a efectos bioquímicos tóxicos en los seres humanos que causan problemas en la síntesis de la hemoglobina.

El Perú es el primer productor de plomo en América Latina y cuarto a nivel mundial, su elevada concentración se debe principalmente a las actividades antropogénicas como la industria y la minería.

- **Zinc**

El zinc es un micronutriente esencial para las plantas, uno de los elementos traza más débilmente retenidos en los suelos, participa en varios procesos metabólicos y es utilizado en la formación de la clorofila (Chapman, D. y Pratt F., 1988). La movilización y lixiviación del zinc es mayor en suelos ligeramente ácidos al aumentar la competencia con otros cationes por los sitios de intercambio (Mejía, 2011).

La planta absorbe iones de zinc de la solución del suelo principalmente como Zn^{2+} . El zinc está más disponible para su absorción cuando el sustrato tiene pH bajo; por esta razón los suelos alcalinos tienden a presentar con mayor frecuencia una deficiencia creciente de este elemento.

Por otra parte, el exceso de zinc se puede manifestar como una reducción en el tamaño de las hojas, clorosis en las hojas nuevas, retraso en el crecimiento de la planta y desarrollo radicular reducido. Las altas concentraciones de zinc en el suelo, son una consecuencia de las actividades antropogénicas que derivan de actividades como la minería y el riego de suelos agrícolas con aguas residuales.

1.1.3. Impacto ambiental

Los efectos respecto al ambiente son bastante graves, la contaminación de metales pesados en el suelo es un proceso dinámico y engloba la acción de factores naturales y antropogénicos; contamina tanto los cultivos como a las plantas silvestres; en casos extremos provoca la contaminación de aguas subterráneas y superficiales por escorrentía o lixiviación, específicamente cambia la alcalinidad del suelo; claramente se ve influenciada por factores externos del entorno como el pH, la temperatura, la humedad, etc.

La contaminación del ambiente por metales pesados se da de una manera silenciosa, y cuando percibimos el daño que producen es demasiado tarde y termina siendo peligroso para la salud. La peligrosidad de los metales pesados reside en que no son degradables (ni química, ni biológicamente) y no pueden ser eliminados del ambiente. Precisamente, los suelos son uno de los mayores depósitos en los cuales se evidencia la contaminación ambiental, además, tienden a bioacumularse y biomagnificarse, es decir, un elemento químico puede acumularse en los organismos vivos alcanzando un aumento en su concentración a medida que ascienden en la cadena trófica; provocando efectos tóxicos diversos. Esto se debe a que los organismos superiores no disponen de mecanismos eficientes de expulsión de metales pesados.

Los organismos vivos necesitan diferentes cantidades de “metales pesados” para su metabolismo como hierro, cobre, manganeso y zinc en pequeñas dosis, los niveles excesivos pueden ser muy perjudiciales para el organismo.

Cuando en los metales pesados se dan niveles muy altos de biodisponibilidad tanto para los elementos esenciales (cobre, hierro, manganeso, molibdeno, níquel y zinc) como los no esenciales (cadmio, cromo, plomo y mercurio), estos llegan a ser tóxicos y el riesgo que suponen para la salud humana y animal se agrava por su larga persistencia en el suelo. En un grado pequeño se pueden incorporar a nuestros cuerpos vía el alimento, el agua potable o el aire.

Todos los seres vivos pueden resultar seriamente afectados por la contaminación de metales pesados por consumo de pequeñas dosis durante largos periodos. Una creciente concentración de estos metales en la cadena alimenticia puede provocar daños en la salud (cancerígenos) (Birley et al, 1999 citado en Avelino C., 2013).

Por otra parte, la industria minera genera numerosas sustancias minerales y orgánicas al ambiente, donde los metales pesados están presentes en la composición de efluentes y residuos, y varían, dependiendo del origen de cada uno de ellos. El incremento de concentración de estos metales en el agua se debe, principalmente a los lixiviados de los vertederos o vertidos de aguas residuales que asimismo son una fuente de contaminación.

También existen aguas que sufren un proceso de enriquecimiento natural en metales pesados al atravesar acuíferos formados por rocas que los contienen en su composición. La absorción de metales pesados por plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria.

Actualmente se realizan investigaciones con el objetivo de resolver la contaminación originada por metales pesados en suelos, mediante estrategias basadas en el uso de plantas que tienen la propiedad de absorber metales pesados; a este proceso se le denomina como “fitorremediación”.

1.1.4. Metales pesados en el Perú

La contaminación por metales pesados es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan a nuestro planeta, producido por los procesos productivos del hombre (fuentes antropogénicas), generando efectos adversos en los seres vivos; problemática a la que el Perú no es ajeno.

En el territorio peruano entre los agentes contaminantes identificados tenemos: el plomo, mercurio, aluminio, arsénico, magnesio, manganeso, hierro y cobre (R.M. N° R.M. N° 525-2005/MINSA). En el Perú, el costo anual ligado a la exposición por plomo está comprendido entre 800 millones de nuevos soles y 1200 millones de nuevos soles (Larsem, Bjorn y Elena Strukova. Reporte final, Banco Mundial: Reporte del Análisis Ambiental de Perú, 2005).

Las actividades humanas han generado un efecto considerable en la concentración y movilidad de los metales pesados en el ambiente y en algunos casos graves efectos a la salud de los seres vivos.

El constante desarrollo industrial, así como el crecimiento de las ciudades que se observa en el presente, conlleva el incremento de la generación de residuos tanto de origen doméstico como industrial. La mayor parte de los residuos industriales son tóxicos que difícilmente son reciclables y, por tanto, provocan problemas serios en su manejo y disposición.

Complementariamente el MINSA se preocupa por brindar mayor conocimiento sobre el impacto ambiental y los riesgos a la salud ocasionados por la exposición a los distintos metales pesados y otras sustancias químicas; sin embargo, cada vez es mayor la presencia de las poblaciones ubicadas dentro del área de influencia de las actividades productivas. No obstante, la principal medida de protección para que la población no continúe expuesta a los metales pesados, es la reubicación de las personas a otros lugares no afectados por la contaminación.

Esto no es solo un tema sobre exposición de metales pesados de algunas mineras que están funcionando ahora, sino también de pasivos ambientales generados por inadecuados cierres de operaciones de actividades mineras, dichos pasivos terminan

formando parte del ecosistema. en los últimos años se han dictado la Ley de Cierre de Minas (Ley 18090) y la Ley de Pasivos Ambientales de las Actividades Mineras (Ley 28271) con los objetivos de legislar el proceso de identificación de pasivos ambientales mineros (PAM), establecer la responsabilidad de remediación y restauración de las áreas afectadas y también mitigar los impactos negativos de los productos mineros sobre la salud de la población y el ecosistema. Los suelos, el aire y el agua son los principales medios contaminados por metales pesados a través de los pasivos ambientales mineros (ver figura 1).

En nuestro país la contaminación del agua ha estado en el centro de los principales conflictos socioambientales, mayormente relacionados con la minería. La gravedad del problema radica en los procesos que generan sustancias elevadamente tóxicas y peligrosas, como ácido sulfúrico y metales pesados (níquel, cobalto, cobre, zinc, cadmio, plomo, mercurio, etc.), que terminan difundiéndose en el ambiente, afectando a cultivos y animales, hasta llegar a los pobladores que viven cerca del área de influencia de la minera. Algunas ciudades relacionadas con casos de contaminación y minería son: Cerro de Pasco (Pasco), Espinar (Cuzco), Conga (Cajamarca) y Canchaque (Piura), entre otros (ver figura 2).

A continuación, se muestra el mapa del Perú donde se señalan los principales lugares de exposición de metales pesados, metaloides y otras sustancias químicas; producto de actividades extractivas, productivas, de servicios formales e informales (ver figura 3).

1.2. Fitorremediación

En las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos o emplazamientos contaminados y recuperar los ecosistemas afectados por la creciente emisión de sustancias contaminantes, destacando aquellas que proceden de las actividades industriales, agropecuarias y mineras. Cuando estas tecnologías se basan en el uso de plantas reciben el nombre de fitorremediación. (Salt et al., 1998 citado en Carpena R, 2007).

El concepto de usar plantas para limpiar suelos contaminados no es nuevo, hace 300 años las plantas fueron propuestas para el uso en el tratamiento de aguas residuales. La fitorremediación (del griego “phyto” = planta y “remedium” = mal por corregir), se fundamenta en el uso conjunto de plantas, enmiendas del suelo y técnicas agronómicas para remover, contener, o disminuir la toxicidad de los contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en agua, suelos, lodos y sedimentos (Chaney et al., 1997 citado en Orroño D., 2002). Dentro de las técnicas de restauración de suelos afectados por la contaminación, la fitorremediación ha adquirido importancia por ser un procedimiento pasivo, estéticamente agradable al ambiente, útil para remediar simultáneamente una gran variedad de contaminantes, que aprovecha la energía solar para remediar suelos contaminados; sin embargo, es una tecnología primitiva debido a la falta de información y resultados, pues los proyectos sobre esta técnica son de periodos largos. Las plantas cultivadas en suelos contaminados absorben, concentran y precipitan metales pesados en su biomasa y se convierten en una alternativa económica para la exclusión de los contaminantes en el suelo.

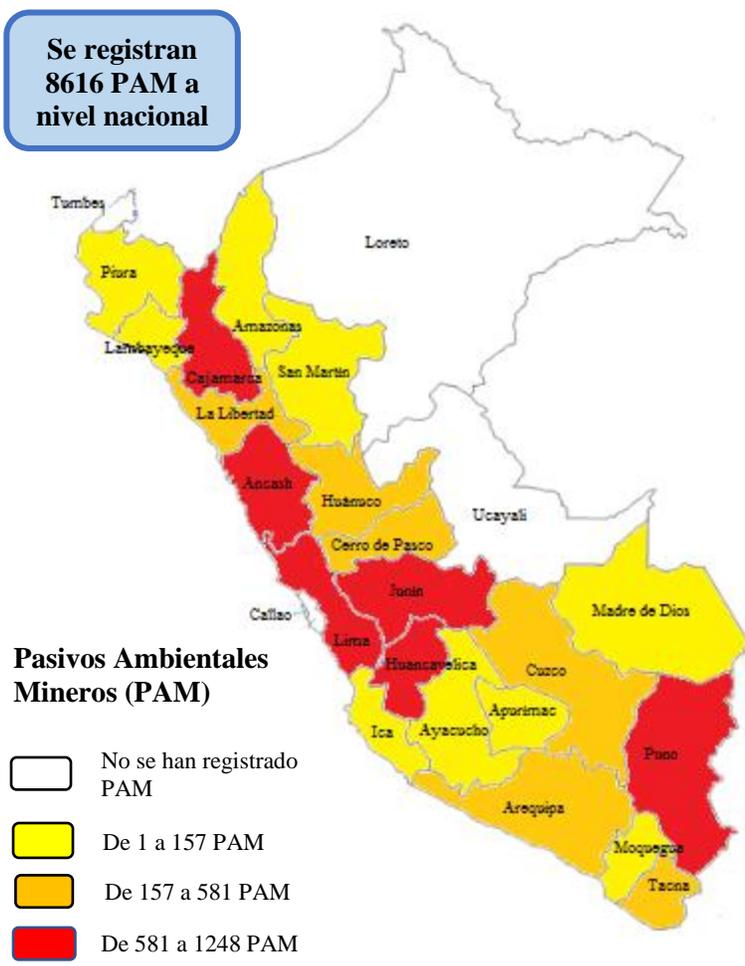
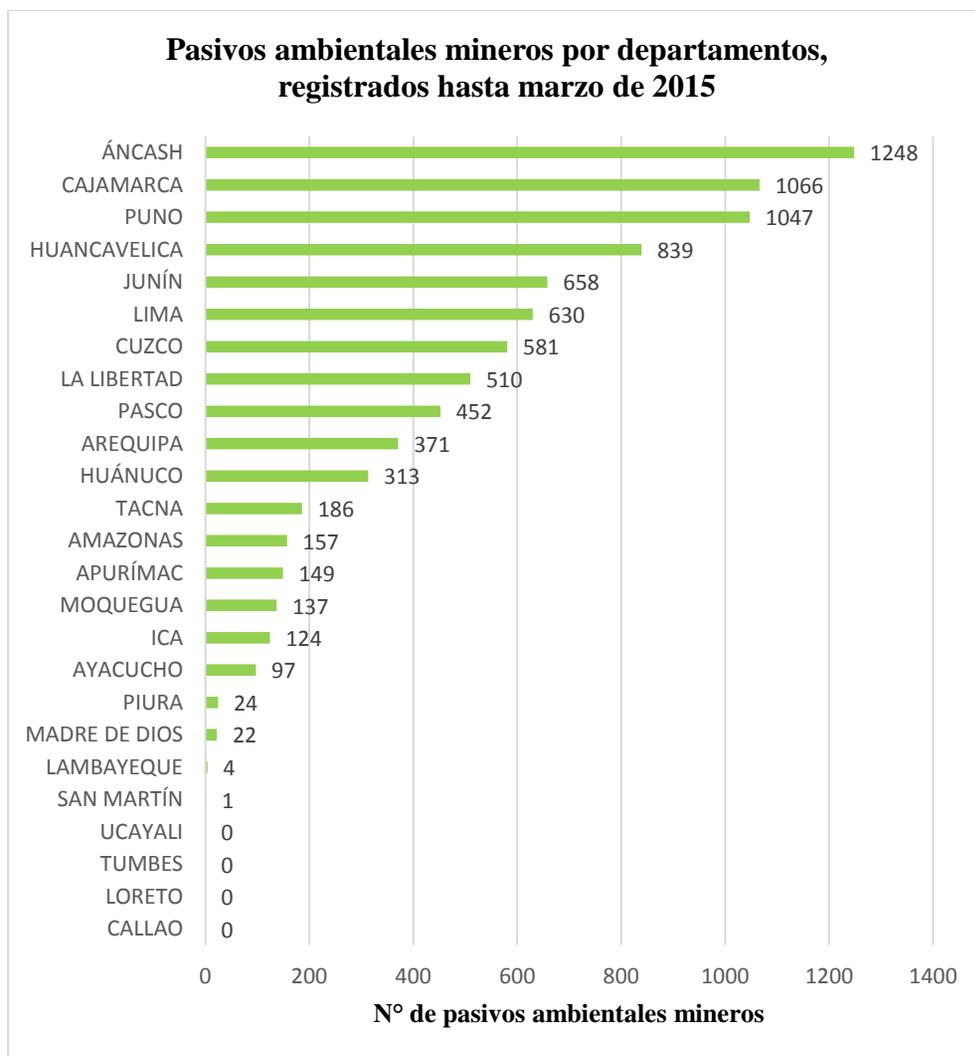


Figura 1. Pasivos ambientales mineros – PAM, 2015.

Fuente: Vigilancia epidemiológica en metales pesados. Semana epidemiológica N°52 – 2016. MINSA.

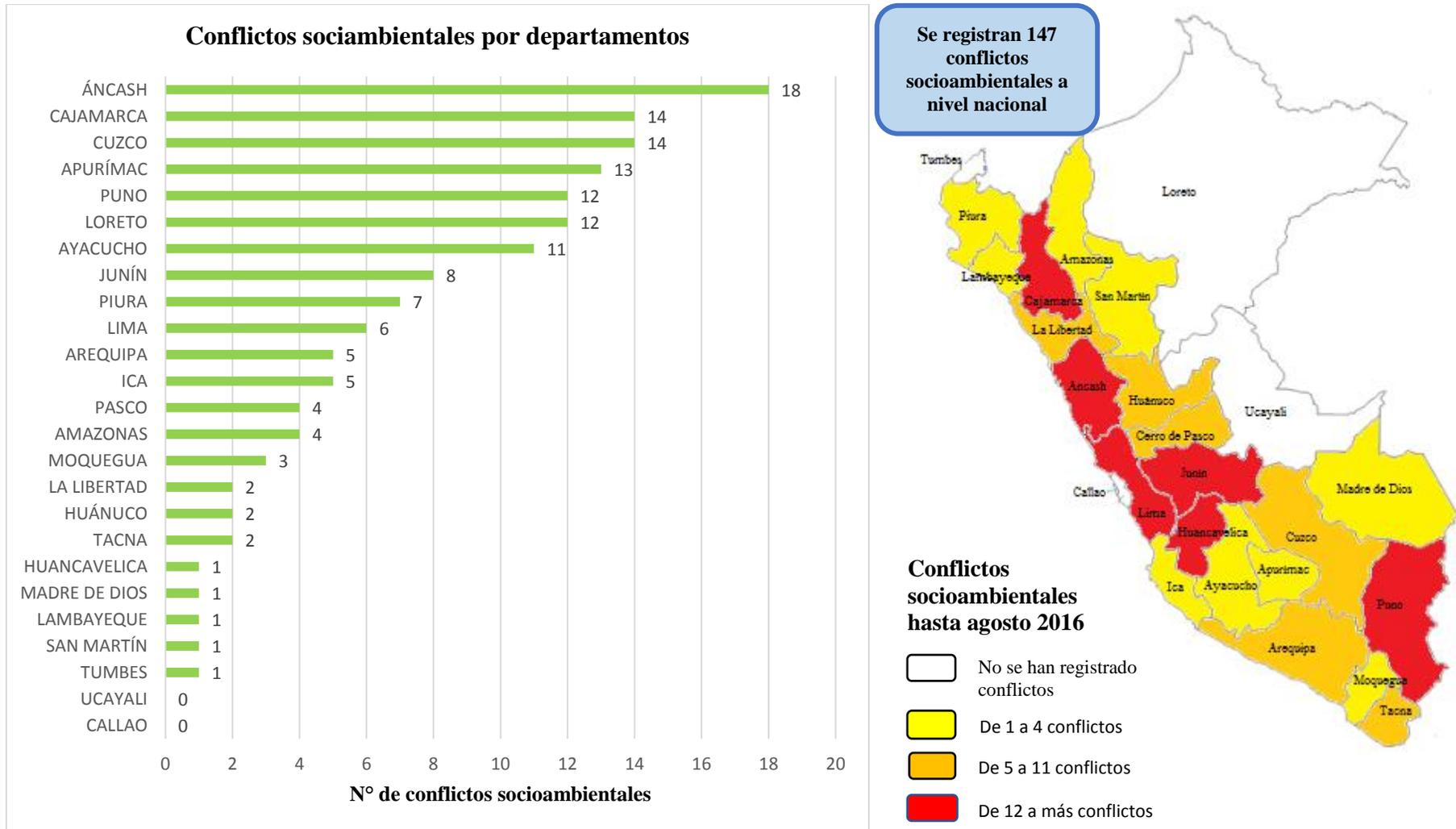


Figura 2. Conflictos socio – ambientales, agosto de 2016.

Fuente: Vigilancia epidemiológica en metales pesados. Semana epidemiológica N°52 – 2016. MINSA.

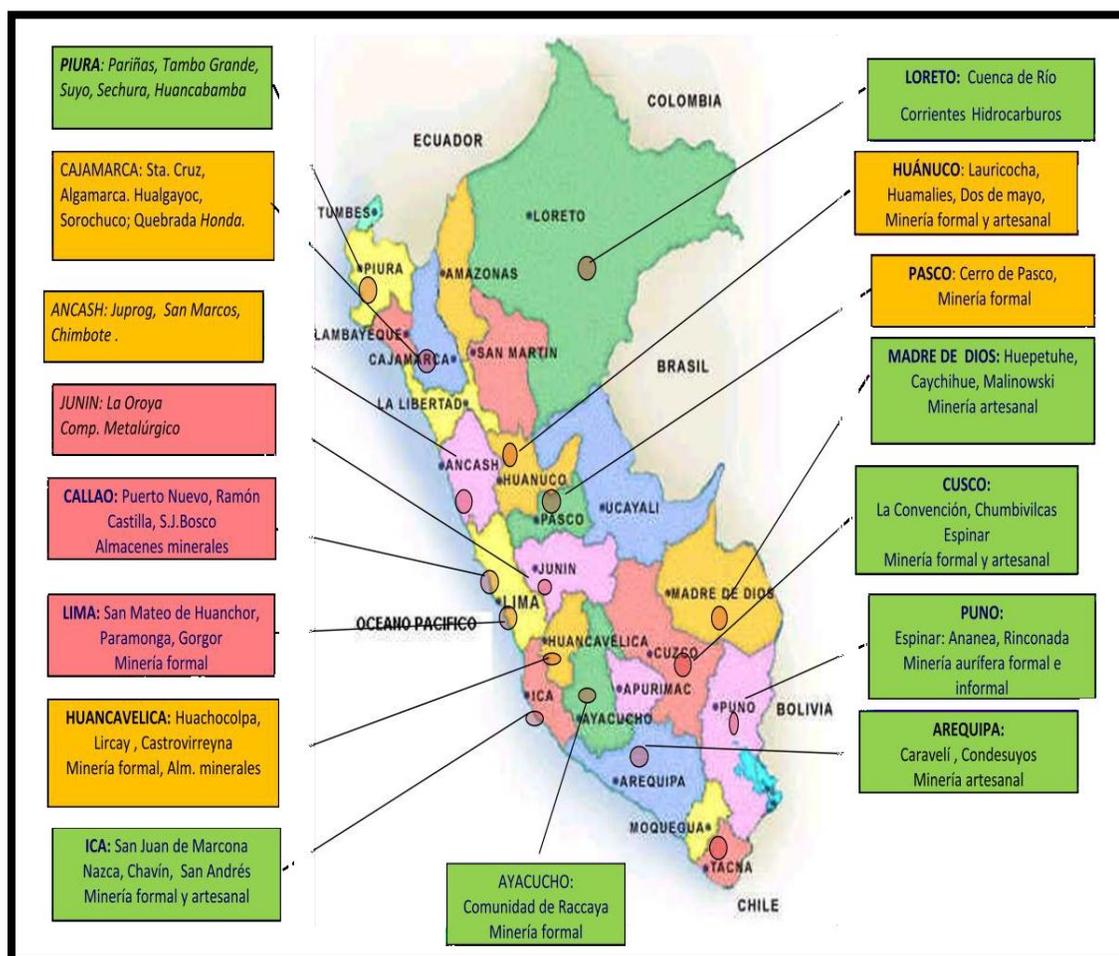


Figura 3. Principales lugares de contaminación por metales pesados en el Perú.
Fuente: ESN de metales pesados, 2012.

El principal objetivo de la fitorremediación es maximizar la transferencia de contaminantes hacia los órganos de las plantas (hojas y raíces), de modo que parte de la masa total de contaminante sea removida. Un sistema eficiente de fitorremediación requiere especies de plantas que satisfagan dos requisitos: tolerancia a metales y capacidad de acumulación, asimismo, la planta ideal debería poseer la habilidad de sobrevivir al exceso de más de un metal en el medio de crecimiento. El propósito final de la fitorremediación de un suelo no debe ser solo excluir o reducir el contaminante, sino recuperar la calidad del suelo.

En recientes investigaciones se ha demostrado que la fitorremediación es una solución prometedora para la limpieza de sitios contaminados por una variedad de metales, aunque también tiene una serie de limitaciones. Actualmente se realizan estudios sobre la descontaminación de suelos, sedimentos y agua, originada por sustancias tóxicas, mediante estrategias basadas en el uso de plantas que tienen las propiedades de acumular contaminantes como, hidrocarburos, metales pesados y no metales, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo.

1.2.1. Plantas hiperacumuladoras

El término hiperacumulador hace referencia a plantas capaces de absorber cien veces más las concentraciones “normales” de metales que el resto de otras especies sin mostrar síntomas de toxicidad. Todas las plantas poseen un potencial para absorber una variedad de metales del suelo, pero la mayor parte tienden solamente a absorber los que son esenciales para su supervivencia y desarrollo; solo un menor grupo de plantas son una notable excepción a esta regla; las plantas hiperacumuladoras pueden absorber, tolerar y trastocar altos niveles de ciertos metales.

En la década de 1990 se realizaron los primeros experimentos utilizando plantas hiperacumuladoras para extraer metales de lugares contaminados, y desde entonces se han descubierto muchas plantas con esta capacidad, que acumulan distintos metales. La capacidad de absorción por parte de la planta varía según el tipo de contaminante, tipo de suelo y pH del mismo, por lo que aparece la posibilidad de adaptar la elección de la vegetación al nivel y tipo de contaminación (Llugany, M, J, 2007, p. 7).

La hiperacumulación es un fenómeno raro, y la base evolutiva de su selección ha sido una incertidumbre desde su descubrimiento. Algunos estudios recientes sugieren que la acumulación inusual de metales, confiere a estas plantas la capacidad de limitar su depredación y las infecciones microbianas causantes de enfermedades vegetales (Boyd y Martens, 1994 citado en Becerra Castro C., 2007).

La identificación de nuevas especies de plantas con alta producción de biomasa y crecimiento robusto; con la característica de tolerar y acumular metales múltiples, se han convertido en un importante aspecto para la fitorremediación.

En los últimos años, la ingeniería genética está comenzando a emerger como una forma relativamente rápida y efectiva, incrementando las capacidades de las plantas como la creación de plantas transgénicas con alta tolerancia y capacidad de acumulación de metales pesados. El entorno de las plantas hiperacumuladoras desvela la necesidad de impulsar mayores conocimientos que aumenten la rentabilidad y eficacia de dichas plantas: sus aplicaciones son interesantes en muchas áreas, y particularmente importantes en la protección del ambiente. La fitorremediación continúa siendo motivo de debates en los ambientes académico - científicos y profesionales.

1.2.2. Clasificación de las técnicas de fitorremediación

Las técnicas de fitorremediación se pueden aplicar tanto a contaminantes orgánicos como inorgánicos, presentes en sustratos sólidos o líquidos. Entre estas técnicas se distinguen las siguientes:

a. Fitoextracción

Parece ser la técnica más prometedora de estas fitotecnologías para la recuperación de metales en los suelos contaminados (Chaney, 1983 citado en Valdivia, s.f.). Las plantas acumulan elementos tóxicos inorgánicos en grandes cantidades en la biomasa que son retirados del suelo mediante absorción y concentración en las partes cosechables. Cuando el metal fitoextraído puede ser recuperado de la biomasa, se obtiene un beneficio económico, este proceso se denomina fitominería.

El objetivo es reducir la concentración de metales en suelos contaminados, para regular los niveles de estos en el interior de la planta en un tiempo definido.

b. Fitoestabilización

Es una tecnología en la cual las plantas reducen la biodisponibilidad de los contaminantes en el entorno, mejorando las propiedades físicas y químicas del medio.

Mediante distintos mecanismos la planta es capaz de inmovilizar los contaminantes del suelo o el agua por medio de adsorción y acumulación de sustancias en las raíces. Los contaminantes son absorbidos por las raíces, donde son depositados en formas inocuas, evitando así los efectos tóxicos sobre otros seres vivos e impidiendo que se afecten las napas subterráneas. De igual forma este proceso limita la biodisponibilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire. Minimiza significativamente los posibles efectos adversos al ambiente y su transferencia a la cadena trófica.

c. Fitoimmobilización

Provoca la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz, los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción, adsorción o precipitación (Carpena y Bernal, 2007).

Las raíces de las plantas liberan ciertos compuestos (exudados) al suelo de su entorno (rizosfera) estimulando la supervivencia, el crecimiento y la actividad de los microorganismos de la rizosfera que degradan los contaminantes orgánicos. La eficiencia de esta tecnología puede ser incrementada incorporando microorganismos con capacidad de degradar contaminantes orgánicos y/o mediante la adición de compuestos para estimular los procesos de la simbiosis planta-microorganismo (bioestimulación).

d. Fitovolatilización

Consiste en la absorción, metabolismo y transpiración de los contaminantes a través de la planta. Algunas plantas captan contaminantes y los liberan en una forma menos tóxica a la atmósfera a través de la transpiración.

Se produce a medida que las plantas en desarrollo absorben agua junto con diversos tipos de contaminantes, algunos de estos pueden llegar a las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera. Esta técnica se aplica generalmente para la descontaminación de aguas subterráneas.

e. Fitodegradación

Las plantas y microorganismos se asocian para degradar contaminantes orgánicos en productos inofensivos o mineralizarlos hasta anhídrido carbónico y agua. Los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales en moléculas más simples y al mismo tiempo las plantas van generando enzimas. Algunas enzimas ayudan a catalizar la degradación, descomponiendo estos contaminantes en productos utilizables para las plantas.

Esta técnica es utilizada en el tratamiento de suelos, sedimentos, lodos y aguas subterráneas, la degradación de contaminantes puede ocurrir en un ambiente libre de microorganismos debido a las enzimas producidas por la planta.

f. Rizofiltración

Esta técnica utiliza las plantas para adsorber y absorber los metales pesados contaminantes del medio hídrico 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, y a medida que las raíces se van saturando; las plantas se cosechan y se disponen para su uso final.

La rizofiltración es una de las opciones que presenta mejor relación de costo - beneficio respecto a otros métodos empleados para el tratamiento de efluentes líquidos. Además, es naturalmente amigable con el ambiente, las plantas que se utilizan con este fin se cultivan en invernaderos, con las raíces sumergidas en agua, en lugar de tierra.

1.2.3. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Entre las ventajas que presentan estas técnicas de fitorremediación destacan las siguientes:

- Gasto financiero de bajo costo.
- Es una tecnología sostenible.
- Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos.
- Permiten su aplicación, tanto en suelos como en aguas.
- Es eficiente para tratar diversos tipos de contaminantes *in situ*.
- Impacto regenerativo, evita una ruptura crítica del suelo y preserva el ecosistema, mejorando sus propiedades físicas y químicas debido a la formación de una cubierta vegetal.
- Es poco perjudicial para el ambiente.
- No requiere personal especializado para su manejo.
- No requiere consumo de energía.
- Metodología con alta probabilidad de aceptación pública, ya que es estéticamente agradable.
- Evita la excavación y el tráfico pesado.
- Los metales absorbidos por las plantas, pueden ser extraídos de la biomasa como recursos para después ser reciclados.
- No produce contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares para desechos.

La fitorremediación muestra una serie de limitaciones, como las que se muestran a continuación:

- Proceso de recuperación relativamente lento en especies como los árboles o arbustos.
- Es dependiente de las estaciones.
- Se requieren áreas relativamente grandes.
- No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.
- Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta.
- En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.
- En el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente.
- Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión.
- Algunas especies pueden absorber muchos metales venenosos, lo que implica un riesgo potencial en la cadena alimenticia.

1.2.4. Fitorremediación en el Perú

Las plantas tienen un papel importante en el ambiente debido a que reciclan la materia a través de los ciclos biogeoquímicos. Existen especies de plantas metalofitas, que han desarrollado los mecanismos fisiológicos para absorber, tolerar y sobrevivir en suelos degradados por actividades mineras con alto nivel de metales (Becerril et al., 2007). La fitorremediación se ubica como una tecnología limpia debido a que los contaminantes son absorbidos y degradados y, además, a su aproximación respetuosa con los procesos ecológicos.

El Perú enfrenta en la actualidad problemas ambientales serios, en un contexto económico que no le permite aplicar de forma generalizada las soluciones de control de contaminación ambiental que son utilizadas en países desarrollados. Sin embargo, existe una gran preocupación por los efectos nocivos que una gran diversidad de compuestos tóxicos produce en los recursos hídricos y los suelos. En los ecosistemas andinos de nuestro país situados por encima de los 3300 metros de altitud se forman las cabeceras de las cuencas de las Vertientes Occidental y Oriental de los Andes, aquí podemos encontrar praderas de pastizales, parches de bosques y matorrales (Young et al. 1997 citado en Jara – Peña, 2014), muchos de ellos amenazados por la minería y actividades asociadas. Las actividades mineras depositan sus residuos sobre la superficie del entorno causando la contaminación del suelo, desaparición de la vegetación, pérdida de su productividad y disminución de la biodiversidad, representando un problema ambiental de gran preocupación (Alkorta et al. 2010 citado en Jara – Peña et al., 2014).

Buscar estrategias para incitar la actividad de remediación de las plantas autóctonas es un gran reto, pero, al mismo tiempo, representa una gran oportunidad para el desarrollo de proyectos de investigación que pueden ser llevados en el campo. Para lograr el éxito en la aplicación de estas técnicas de remediación es necesario realizar estudios para su adaptación que pueden llevar a nuevos desarrollos. Deben tomarse en cuenta que las características de cada suelo son diferentes y que no todas las plantas se adaptan fácilmente a cualquier hábitat; cabe mencionar que, en el caso del Perú los suelos tienen características físicas, químicas y biológicas muy particulares que los hace diferentes de suelos de otras regiones del mundo.

Todo esto precisa de un enfoque multidisciplinario con una importante integración de áreas como biología, hidrogeología, geotecnia, fisicoquímica y química, sin dejar de lado lo referente a la legislación.

Para el sector académico se vislumbra la oportunidad de estudiar problemas de contaminación específicos, con miras a desarrollar propuestas de solución aplicables en el Perú, en un mediano plazo.

Actualmente existen estudios destinados a resolver la contaminación originada por metales pesados en suelos, mediante estrategias basadas en el uso de plantas que tienen la propiedad de absorber metales pesados.

1.3. Marco legal sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad biológica.

El tema que estudia la presente tesis se encuentra enmarcada en la ley N°26839, la cual norma la conservación de la diversidad biológica y la utilización sostenible de sus componentes en concordancia con los artículos 66 y 68 de la constitución política del Perú.

Artículo 66°. - Los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación. El Estado es soberano en su aprovechamiento. Por ley orgánica se fijan las condiciones de su utilización y de su otorgamiento a particulares. La concesión otorga a su titular un derecho real, sujeto a dicha norma legal.

Artículo 68°. - El Estado está obligado a promover la conservación de la diversidad biológica y de las áreas naturales protegidas.

Según el artículo 3 de la presente ley en el marco del desarrollo sostenible, la conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica implica:

- Conservar la diversidad de ecosistemas, especies y genes, así como mantener los procesos ecológicos esenciales de los que dependen la supervivencia de las especies.
- Promover la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de la diversidad biológica.
- Incentivar la educación, el intercambio de información, el desarrollo de la capacidad de los recursos humanos, la investigación científica y la transferencia tecnológica, referidos a la diversidad biológica y a la utilización sostenible de sus componentes.
- Fomentar el desarrollo económico del país en base a la utilización sostenible de los componentes de la diversidad biológica, promoviendo la participación del sector privado para estos fines.

En cumplimiento de la obligación contenida en el artículo 68 de la Constitución Política del Perú, el Estado promueve:

- La adopción de un enfoque integrado para el manejo de tierras y agua, utilizando la cuenca hidrográfica como unidad de manejo y planificación ambiental.
- La conservación de los ecosistemas naturales, así como las tierras de cultivo, promoviendo el uso de técnicas adecuadas de manejo sostenible.
- La prevención de la contaminación y degradación de los ecosistemas terrestres y acuáticos, mediante prácticas de conservación y manejo.
- La rehabilitación y restauración de los ecosistemas degradados.
- La generación de condiciones, incluyendo los mecanismos financieros y disposición de los recursos necesarios para una adecuada gestión de la diversidad biológica.
- La incorporación de criterios ecológicos para la conservación de la diversidad biológica en los procesos de ordenamiento ambiental y territorial.

- Esfuerzos cooperativos e iniciativas conjuntas entre el sector público y privado para la conservación de la diversidad biológica y la utilización sostenible de sus componentes.

Según el artículo 25 el estado con participación del sector privado, promueve:

- El desarrollo de la investigación científica, el acceso, generación y transferencia de tecnologías apropiadas, incluida la biotecnología.
- La investigación aplicada a la solución de problemas referidos a la pérdida, degradación o disminución de los componentes de la diversidad biológica.

Respecto al artículo 26, se declara prioridad e interés nacional la investigación científica sobre:

- Manejo y conservación de los ecosistemas y especies silvestres de importancia económica, científica, social o cultural.
- Conocimiento, conservación y aplicación industrial y medicinal de los recursos genéticos mediante biotecnología tradicional y moderna.
- Restauración de las zonas degradadas.
- Desarrollo de tecnología apropiada y el uso complementario de tecnologías tradicionales con tecnologías modernas.

El artículo 31 manifiesta que el Estado debe realizar la gestión de diversidad biológica a través de las autoridades competentes que, para los efectos de la presente ley, son los ministerios, organismos públicos descentralizados y otros órganos de acuerdo a las atribuciones establecidas en sus respectivas normas de creación.

1.4. Descripción del área de estudio

El área donde se realizó el muestreo de plantas se encuentra geográficamente ubicado en el distrito de Canchaque, provincia de Huancabamba, departamento de Piura (norte del Perú) en los Andes Occidentales de la cordillera (latitud 5°21'58,8'' S; longitud 79°34'06,0'' W) a una altitud de 2600 msnm. El territorio de Canchaque, esta surcado por numerosas quebradas, existiendo dos grandes cuencas que reciben los caudales de las quebradas, la cuenca del río Bigote y la cuenca del río Pusalca o río Canchaque. En la figura 4 se muestra una vista satelital de la zona de estudio, donde se realizó el muestreo de la vegetación, señalado con un ícono de color rojo.

El impacto ambiental se percibe por la biodiversidad alrededor de la mina; así como la contaminación de aguas superficiales y subterráneas. El abandono inadecuado de los relaves, la presencia de pasivos ambientales mineros, la antigua infraestructura del campamento minero, planta concentradora, accesos y depósitos de relave; altera la calidad del suelo, existiendo el riesgo de contaminación principalmente en el entorno de los depósitos de relave impulsado por la acción erosiva de las precipitaciones pluviales en la cuenca del río Piura (Mendoza, 2012).

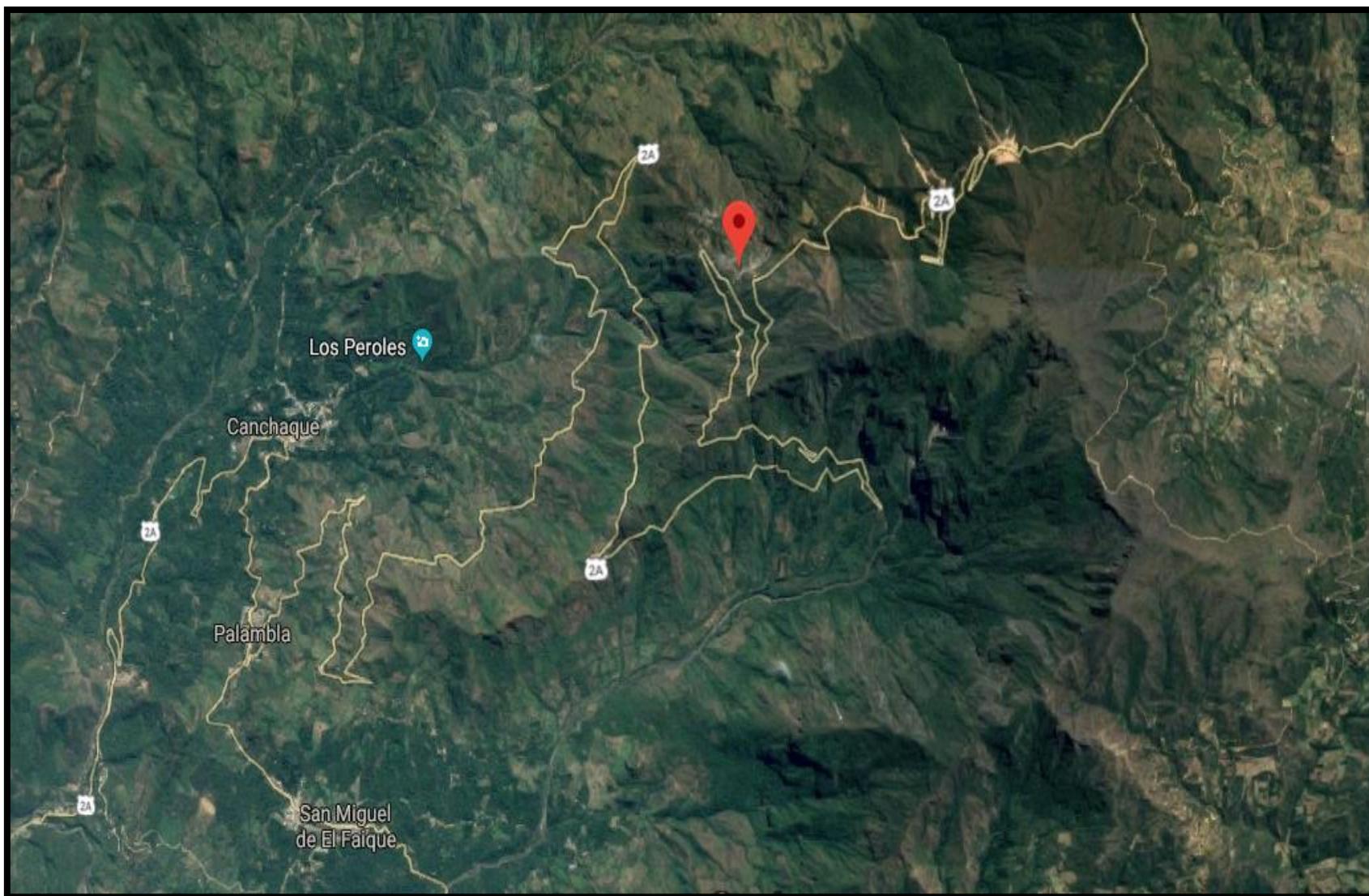


Figura 4. Vista satelital de la zona de estudio.
Fuente: Google maps.

Dentro del área de la mina los recursos hídricos están limitados sólo a aguas superficiales provenientes de quebradas y puquiales, no existiendo aguas subterráneas. El relieve del área muestreada va cambiando cuando se va aproximando a la mina. Se alcanzan a contemplar pequeñas dunas con escasa vegetación y al continuar avanzando el relieve cambia a cerros de gran elevación cubiertos de vegetación, básicamente esto se debe a la intensa influencia de precipitaciones pluviales (Mendoza, 2012).

La zona de investigación está cercana al complejo eco-regional de los andes del norte (CEAN) y, es considerado por el fondo mundial para la naturaleza (WWF) como una de las eco-regiones más importantes del mundo, los Andes del norte tienen casi el mismo número de especies que las vastas tierras bajas del Amazonas. La WWF junto con los países de Perú, Colombia, Ecuador y Venezuela han unido esfuerzos para analizar los patrones de biodiversidad en la región y establecer los requisitos espaciales para su conservación a largo plazo. Está constituido por once ecorregiones distintas pero interrelacionadas que encapsulan el macizo complejo de montañas ubicadas en las tierras altas de la región andina tropical, se extiende desde 11° latitud N en la Sierra Nevada de Santa Marta, en el norte de Colombia a lo largo de 2000 km hacia el sur hasta el paso montañoso Abra de Porculla, en la depresión de Huancabamba en el norte de Perú, ubicada cerca de 6° latitud S.

Siete de las 11 ecorregiones que conforman el CEAN están clasificadas como bosque húmedo montano (bosques de neblina) y cuatro como páramo. La depresión de Huancabamba es el límite sur del complejo que sirve de barrera biogeográfica al movimiento de especies, separando la región de los Andes del norte de la de los Andes del sur (Duellman, 1979).

Los bosques húmedos de montaña conforman un elemento ecológico integrador de países hermanos y deberían ser considerados santuarios ecológicos internacionales, por sus especiales características y diversos servicios al género humano. En nuestros páramos como en la selva de neblina de Llanta (Ayabaca) y Segunda Cajas (Huancabamba), podemos encontrar especies registradas en vías de extinción por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y por las propias leyes peruanas.

1.5. Antecedentes de contaminación de la zona problema

La explotación minera sobre el yacimiento de cobre y molibdeno en la mina Turmalina se inició en el año 1961, a pesar de que ya era conocida desde hacía mucho tiempo atrás, luego fue explotada para extraer molibdeno por la compañía Cía. Minera Hochschild.

La extracción del cobre se realizó unos años después en la década de 1970 por la compañía minera Perla S.A. y fue en esos años cuando empezaron los problemas de relaves, ya que se tenía un proyecto muy antiguo denominado “Pampa Quemada” que consistía en trasladar sus relaves desde la planta procesadora de minerales, ubicada a 3000 msnm hasta una zona desértica y despoblada en ese entonces, llamada “Pampa Quemada” a 1500 msnm, estos terrenos cercanos al yacimiento de poca área y gran pendiente no eran adecuados y no tenían ningún tratamiento técnico que la ley exige, lo que trajo como consecuencia el desborde de estos relaves; años después se instaló un caserío en estos lugares (Reynaldo Arellano, 2000).

La disposición del relave y desmonte perjudica la calidad del aire por acción de la erosión eólica que genera partículas en suspensión contaminando la atmósfera, lo cual trasciende en la salud de los habitantes de los poblados cercanos; afectando además a la flora en la disminución de la eficacia de la fotosíntesis.

Durante la actividad minera los impactos suelen estar controlados o silenciados por la compañía extractiva, por lo que el problema se hace más evidente cuando la zona queda abandonada, producto de no ejecutar un plan de cierre eficiente que minimice los efectos posteriores de dicha explotación. La minera Perla S.A. presenta algunos antecedentes preocupantes; fue sancionada por incumplimiento de normas ambientales. En el año 2006 el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) publicó el inventario preliminar de pasivos ambientales mineros (PAM), donde se describe el inventario de pasivos ambientales en la mina Turmalina. El inventario registra 31 PAM en la región Piura (Mendoza, 2012).

En la actualidad, todas las actividades extractivas están obligadas a garantizar la restauración del área explotada. En general, los suelos iniciales de las minas se degradan o se pierden, generando nuevos suelos formados por materiales poco aptos para el desarrollo de procesos biológicos (Becerril et al. 2007).

En un inicio se extraían adicionalmente concentrados de molibdeno, pero la molibdenita se presenta únicamente en la parte superficial del yacimiento, que en la actualidad ya no existe (Maldonado, 2003). En la parte superior del yacimiento de la mina cerrada, el mineral predominante era la molibdenita cuyo contenido iba decreciendo en profundidad, lo inverso sucede con la calcopirita, mientras en la parte superior tiene un contenido del 0,60 %, a los 170 metros debajo del nivel de la cueva el contenido llega al 3 %. (Mendoza, 2012).

El yacimiento minero Turmalina, tiene una mineralización bien definida con minerales de mena como la bornita y calcopirita, y minerales ganga como la pirita, el cuarzo, la arsenopirita y la turmalina.

La mina durante sus años de explotación produjo diversos especímenes de minerales, entre ellos:

- Arsenopirita (AsS_2Fe): se presenta en cristales prismáticos, asociados siempre a la calcopirita o a la pirita.
- Bornita ($\text{Cu}_5\text{S}_4\text{Fe}$): es un mineral de cobre muy generalizado; de ocurrencia escasa este material se encuentra como impregnación de características tornasoladas asociadas a la calcopirita.
- Calcopirita (CuS_2Fe): es el mineral de cobre más corriente que predomina en el yacimiento y una de las fuentes más importantes de este metal, estaba diseminada por toda el área mineralizada, se presenta en forma masiva.
- Cuarzo (SiO_2): es un mineral de ganga y también abundante en el yacimiento, varía desde incoloro hasta blanco lechoso. Es muy resistente a los ataques, tanto mecánicos como químicos.

- Molibdenita (MoS_2): era común encontrar láminas de molibdenita de aproximadamente 1 cm, especialmente en la parte superior del yacimiento. Se le podía ver con bastante frecuencia de forma masiva.
- Pirita (FeS_2): es un sulfuro corriente y extendido se forma tanto en altas como en bajas temperaturas, está asociada a la calcopirita aparece diseminada en la roca o también en cristales cúbicos muy pequeños.
- Turmalina: es el mineral más abundante del yacimiento, es por eso que se le dio ese nombre a la mina. Esta ganga se encuentra frecuentemente asociada al cuerpo de cuarzo y puede presentarse en cristales prismáticos y fibrosos de estructura radial.
- Wolframita ($\text{WO}_4(\text{Fe}, \text{Mn})$): es la mena de tungsteno, ocurre en cristales irregulares. Se encuentra en poca cantidad.

Durante la vida útil de la mina y después del cierre de la misma, el principal impacto estaría dado por la posible formación de aguas ácidas, ya que minerales sulfurados como pirita y arsenopirita, forma parte de los relaves (Maldonado, 2003).

La mina Turmalina que dejó de operar hace más de dos décadas por problemas socioambientales aún continúa contaminando la cuenca del río Piura. Un estudio de monitoreo de la calidad del agua elaborado en el año 2014 y publicado en el diario “El Tiempo” (ver anexo B) revela que hay concentraciones de aluminio, arsénico y manganeso que sobrepasan los niveles estándar. El Ing. Fausto Ascencio, secretario técnico del Consejo de Recursos Hídricos, sostiene que esto se ha dado como consecuencia de no haber realizado el cierre de la mina como corresponde. El especialista del Consejo de Recursos Hídricos afirma que el estudio indica una concentración de arsénico 0,5 veces superior a los índices permitidos por las normas internacionales para el uso del agua de consumo humano que se muestran en el anexo C. Esta situación se presenta según el especialista debido a los restos de los pasivos ambientales mineros en la mina Turmalina.

De igual manera, la calidad del agua de la quebrada “Mina”, tiene 3,8 veces más aluminio que lo permitido y el río Canchaque tiene catorce veces más aluminio que los estándares internacionales. También hay altas concentraciones de manganeso, supera hasta en dos veces los valores estándares internacionales. La población más afectada ha sido la de Canchaque, porque usa el agua para su consumo en actividades diarias.

1.6. Clima de la zona de estudio

Según Antonio J. Brack, basándose en la fauna silvestre e incluyendo otros factores ecológicos como el suelo, el clima y la vegetación, estaría comprendida en la región ecozoogeográfica de los bosques y estepas secos del noroeste. Sin embargo, por la altitud y la topografía de la zona se encuentran presentes comunidades bióticas de otras biorregiones y carece de especies consideradas como típicas como el algarrobo (Mendoza, 2012).

El clima de San Miguel de El Faique distrito de Canchaque es un clima de estepa local. La estepa es un bioma que consiste en un territorio llano de vegetación herbácea. Estas regiones se encuentran lejos del mar y, entre verano e invierno presenta precipitaciones que no llegan a los 250 mm anuales.

El clima se clasifica como BSh (semiárido cálido) según el sistema Köppen-Geiger. El sistema de Köppen es una de las clasificaciones climáticas más utilizadas debido a su generalidad y sencillez, está basado en el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones que caracterizan dicho tipo de clima. Los parámetros para determinar el clima de una zona son las temperaturas y precipitaciones medias anuales y mensuales, junto con la estacionalidad de la precipitación.

La temperatura de San Miguel de El Faique varía gradualmente desde la parte baja donde es cálido seco a frío-seco, con una temperatura promedio de 21,1 °C. En las partes altas, las oscilaciones térmicas son mayores variando desde 5 °C hasta 15 °C (Reynaldo Arellano, 2000). La variación en la temperatura anual está alrededor de 1,7 °C (ver tabla 1).

Las precipitaciones pluviales son significativas y estacionarias con fuertes vientos de regular intensidad. Son mayores en verano (enero-marzo), mientras que la temporada más seca se produce en otoño tardío (junio) y en invierno (julio-septiembre). La precipitación más baja es en julio, y en marzo alcanza su pico. Entre los meses más secos y más húmedos, la diferencia en las precipitaciones es de 199 mm (ver tabla 1). Estos datos promedio de temperatura y precipitación fueron recopilados entre 1982 y 2012.

Tabla 1. Datos promedio de temperatura y precipitación recopilados entre 1982 y 2012.

Mes	Temp. Media (°C)	Temp. Min (°C)	Temp. Max (°C)	Precipitación (mm)
Enero	21,7	15,8	27,7	89
Febrero	21,8	16,1	27,5	128
Marzo	21,4	15,6	27,3	203
Abril	21,4	15,6	27,3	108
Mayo	20,8	14,3	27,3	24
Junio	20,9	14,3	27,6	12
Julio	20,1	14,2	27,1	4
Agosto	20,3	14,1	27,6	4
Setiembre	20,7	14,6	26,9	6
Octubre	21,1	14,7	27,5	16
Noviembre	21,1	14,6	27,7	18
Diciembre	21,4	14,6	28,0	33

Fuente: Climate-Data.org.

1.7. Flora cercana a la mina cerrada

En las zonas cercanas a la mina predomina una vegetación herbácea y arbustiva bastante densa cercana a los pocos cursos de agua en el área representadas por un conjunto de gramíneas y leguminosas. También existen muchas hierbas medicinales como el san pedro, la canchalagua, el palo santo y el chin-chin, los cuales curan una serie de enfermedades propias de la zona. Esta vegetación tiene una directa relación con la abundancia de las lluvias en los meses de verano y la distribución de las aguas.

El área estudiada está poblada por *Stipa mucronata* “ichu” y otras plantas como *Salvia corrugata*, *Baccharis latifolia* “la chilca”, *Pityrogramma tartarea* “helecho”, *Fabaceae* “leguminosas”, también se observaron arbustos endémicos como *Heliotropium peruvianum* “heliotropo”, de flores lilas perfumadas, *Caesalpinia tinctoria* “la tara”, *Polylepis weberbaueri* y *Pernettya prostrata* “macha-macha”; las cuales coinciden con algunas especies seleccionadas en el muestreo.

Las precipitaciones pluviales son beneficiosas en los valles interandinos de la sierra de Huancabamba donde la agricultura, la ganadería y los pastizales dependen de las lluvias que fluyen a las quebradas y puquiales.

Existen filtraciones de agua proveniente de precipitaciones pluviales que caen en el área de los depósitos de relaves y desmontes, así es como los restos de los relaves y materiales utilizados como producto de la explotación contaminan los suelos y, en consecuencia, la vegetación (Bob Mendoza, 2012). La contaminación o eliminación de la flora puede ocasionar la migración de algunas especies.

Algunas plantas tienen la capacidad de absorber metales pesados e integrarlos en algunos órganos sin perjudicar su fisiología. Las plantas silvestres tienen una gran habilidad de supervivencia y pueden desarrollar una gran cantidad de biomasa independiente de la relación con el clima y las condiciones del suelo (Tlustos et al., 2006 citado en C., Avelino, 2013).

La flora de zonas andinas ha sido poco estudiada, y merecen una mayor investigación por su elevada diversidad y abundancia de depósitos minerales metálicos de estas regiones, existen grandes posibilidades de descubrir nuevas especies que absorban metales pesados y contribuir en la revegetación del ambiente.

1.8. Fauna cercana a la mina cerrada

La fauna mantiene una relación directa con la distribución de la flora, el agua y el clima. La fauna de la zona ofrece características muy especiales; pues en ella se encuentran especies endémicas y animales andinos. Entre las especies más representativas se tienen el “venado gris” (*Odocoileus virginianus peruvianus*), ñaños o zorrillo (*Conepatus Sp*), la zarigüeya o muca-muca (*Didelphis azarae*), el conejo silvestre (*Oryctolagus cuniculus*), la comadreja (*Mustela Sp*), los sapos enanos, ranas grandes, tarántulas, escorpiones, arañas e insectos como moscas, escarabajos y saltamontes. Además, se tienen reptiles como el “macanche” (*Bothrops barnetti*),

pacasos y un sin número de aves, entre las más conocidas tenemos la “paloma cuculí” (*Zenaida asiática meloda*), el “cernícalo” (*Falco sparverius peruvianus*), el “aguilucho” (*Buteo polyosoma*) y el cóndor andino (*Vultur gryphus*) considerado una especie en situación vulnerable. Asimismo, también hay vacunos, ganado lanar y caprino. Las especies acuáticas, prácticamente no existen en la zona ya que los pocos cursos de agua no reúnen las condiciones adecuadas para la existencia de peces (Bob Mendoza, 2012).

Las especies de importancia comercial como ganado caprino y aves de corral se encuentran muy distantes del área cercana a la mina; sin embargo, según los campesinos hubo una elevada tasa de mortandad en relación al ganado vacuno debido a que los animales beben agua de las quebradas que bajan contaminadas por el relave de la mina (Reynaldo Arellano, 2000). Los animales pueden envenenarse ya sea por inhalación de polvo tóxico en la hierba o por consumo de plantas con un alto contenido de metales pesados (Williamson et al., 1982 citado en Durán P., 2010).

Los principales elementos tóxicos que se encontraron en el estómago de los vacunos muertos fueron molibdeno y una pequeña cantidad de sulfato de cobre. El molibdeno, el plomo y el cobre son tres elementos provenientes de los minerales como la molibdenita (MoS_2), la galena (PbS) y la calcopirita (CuS_2Fe) respectivamente, que fueron explotados en esta mina. (Reynaldo Arellano, 2000).

Capítulo 2

Parte experimental

2.1. Muestreo

La zona de muestreo corresponde a la sierra piurana, muy cerca al distrito de Canchaque, en los alrededores de la zona de relaves de la ex – mina Turmalina.

La zona de muestreo es la misma que se muestreó en 1997 para el trabajo: “*Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in northern Peru*” (Bech, J., et al., 1997). En dicha zona se puede ver aún los vestigios de algunas instalaciones de la ex – mina Turmalina, señalándose la zona a lo largo de la cual se ha realizado el muestreo. Se colectaron cinco muestras de suelos y cuarenta y cinco muestras de plantas siguiendo los protocolos establecidos para este tipo de muestreo.

En el caso de los suelos, materia de otro estudio, se excavaron pequeñas calicatas, o se tomó un perfil de ladera ya que el terreno es bastante accidentado, previa limpieza de la superficie, a fin de evitar la contaminación superficial de la muestra. Se trató de tomar, en lo posible, muestras de suelo en contacto con las plantas que se muestrearon.

En el caso de las plantas se escogió los especímenes que cuentan con la mayor cantidad de elementos requeridos para su caracterización y clasificación botánica: raíces, tallos y flores, aunque por la época no todas contaban con estos componentes.

En la figura 6 se incluyen algunos pasajes del muestreo descrito, así como de la codificación de las muestras de suelos y plantas.



Figura 5. Muestreo de plantas y suelos.
Fuente: Expedición de muestreo.

Los cinco terrenos aledaños a la mina Turmalina son identificados con un único código (ver tabla 2).

Tabla 2. Código de terrenos.

T1	Terreno 1
T2	Terreno 2
T3	Terreno 3
T4	Terreno 4
T5	Terreno 5

Fuente: Elaboración propia.

Sobre las muestras de los suelos se determinaron las concentraciones de metales pesados por espectrometría de absorción atómica en el laboratorio de química de la Universidad de Piura. Los datos de concentraciones se muestran en el anexo D.

2.2. Selección de especies vegetales a analizar

La selección de plantas es la primera operación que se realiza para determinar la concentración de metales pesados en materia vegetal, según el diagrama de operaciones elaborado por el autor. En el diagrama se diseña la secuencia de operaciones que se llevaron a cabo durante la parte experimental (ver figura 6).

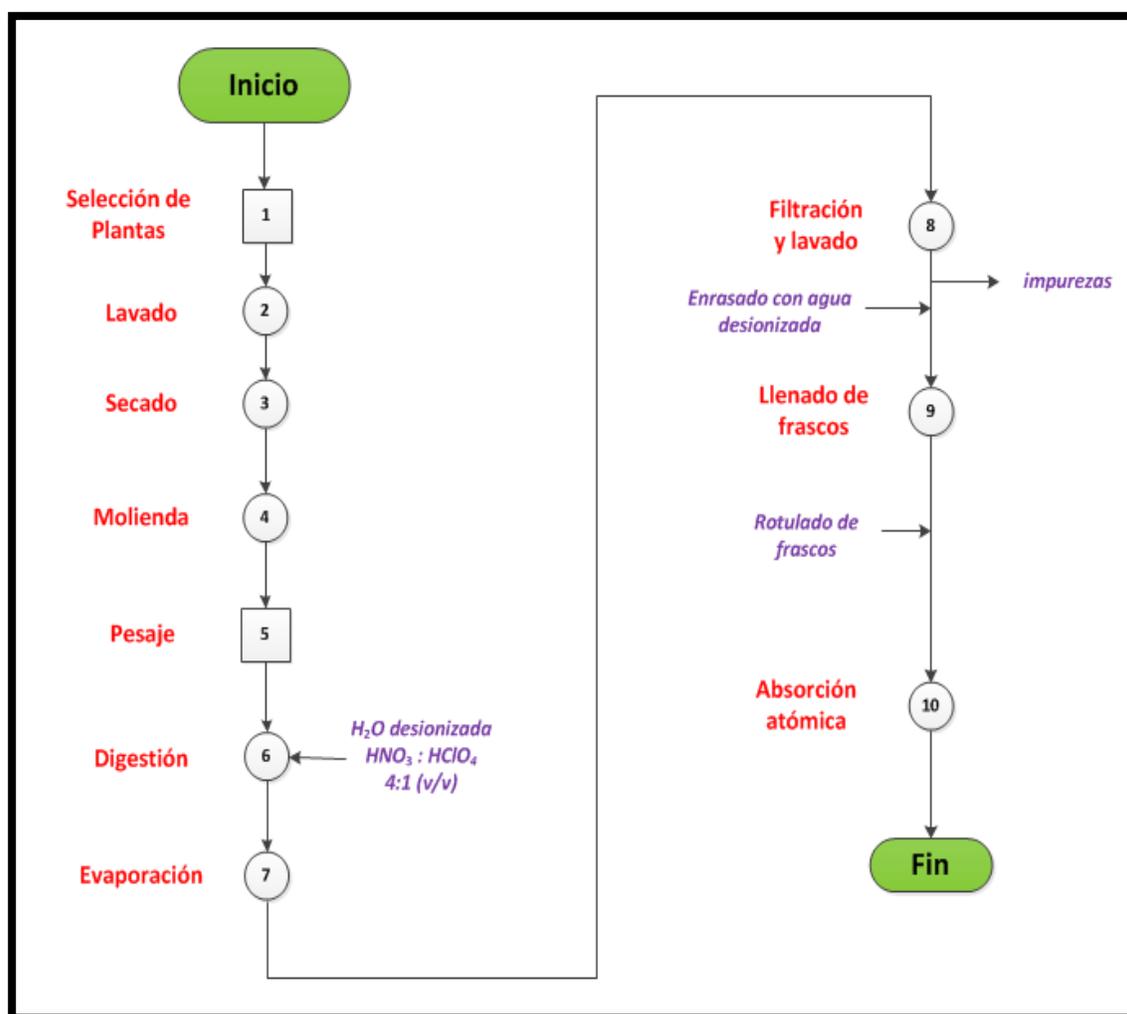


Figura 6. Diagrama de operaciones para determinar la concentración de metales pesados en materia vegetal.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las plantas, se seleccionaron cinco especies que representan a cuatro familias botánicas, cada una de ellas perteneciente a un terreno específico y diferente. La elección de estas plantas se realizó basándose en datos y características de familias de plantas hiperacumuladoras, también se dio relevancia a su distribución en el entorno geográfico, y, además, poder proporcionar una cantidad de muestra suficiente para el proceso de la digestión por vía húmeda.

En la tabla 3 se especifican las familias que pertenecen a cada especie seleccionada y el terreno del cual fueron sustraídas.

Tabla 3. Especies seleccionadas.

Especie	Familia	T1	T2	T3	T4	T5
<i>Baccharis latifolia</i>	Asteraceae		X			
<i>Gardoquia cf. sericea</i>	Lamiaceae				X	
<i>Pityrogramma tartarea</i>	Pteridaceae			X		
<i>Pteridium arachnoideum</i>	Dennstaedtiaceae					X
<i>Salvia corrugata</i>	Lamiaceae	X				

Elaboración: propia. Fuente: Dr. Jesús Charcape.

Baccharis latifolia

Hierba o arbusto propio de Sudamérica, presente en Bolivia, Ecuador, Argentina, Perú, Uruguay y Chile; de rápido crecimiento que puede alcanzar 2 metros de altura y hasta 3 cm de ancho, desprovisto de pelos con ramas que nacen a un mismo nivel alrededor de un eje. De raíz fibrosa, las hojas, de 10 cm a 20 cm de largo, son elípticas, enteras acumuladas y coriáceas³, peciolo de unos 4 mm de largo (ver figura 7). Su fruto es una cápsula ovoide. Se utiliza en jardinería para formar cercos vivos, para fijar suelos en laderas y terrazas. Vegeta en quebradas, pendientes rocosas y zonas alteradas, de 1000 msnm a 4000 msnm (Jesús Charcape, 2015).

En el Perú se la reporta en Amazonas, Ancash, Arequipa, Cajamarca, Cusco, Huánuco, Huancavelica Junín, La Libertad, Lima, Piura y Puno. Es una planta tintórea que viene siendo utilizada por los antiguos peruanos de las culturas prehispánicas, para obtener variedad de colores amarillos y verdes, es empleada hasta la actualidad con ese fin. Tiene propiedades medicinales (Jesús Charcape, 2015).

Según la etimología, *Baccharis* es un nombre genérico que proviene del griego *Bakkaris* dado en honor de Baco, dios del vino, para una planta con una raíz fragante; *latifolia*: del latín *latifolius* = que tiene las hojas anchas.

³Que tiene el aspecto y el tacto semejantes a los del cuero.



Figura 7. *Baccharis latifolia*.
Fuente: Elaboración propia.

Gardoquia cf. sericea

Hierba o arbusto endémico y perenne. Tiene hojas simples, márgenes dentados a enteros, a veces tienen los márgenes sobre la cara inferior y son peciolados (ver figura 8, a). Flores bisexuales o que posee estambre. Vegeta en zonas alteradas, pendientes rocosas, pastizales, riberas y bordes de caminos, de 2000 msnm a 4000 msnm, se la reporta en Amazonas, Ancash, Cajamarca, Huánuco, Junín, La Libertad, Lima, Pasco y Piura (Jesús Charcape, 2015).

Según la etimología, el género *Gardoquia* lo publicaron Ruiz & Pavón en Prodrumus:148, 1794; lo dedicaron al ilustre ministro de hacienda del rey de España, Carlo IV, Diego Gardoquim, protector de las artes y de las ciencias; y el epíteto específico *sericea* del latín *sericum* = cubierto de seda, cera de pelos cortos y finos.

Pityrogramma tartarea

Planta con tallo subterráneo, generalmente horizontal, de 5 mm a 10 mm de diámetro, ascendente o rastrera compacta a levemente reptante. Frondas de 40 cm a 50 cm de largo. Las escamas del rizoma tienen de 5 cm a 12 cm por 0,5 mm a 1 mm, pardo-rojizas a negruzcas, comúnmente densas. Lámina de 25 cm a 80 cm por 15 cm a 40 cm, angostamente triangular como una punta de lanza en hojas grandes (ver figura 8, b).

Vegeta en bosques nublados, en terrenos alterados, pendientes rocosas o epipétricas⁴, en paredones abiertos y zonas húmedas de 1000 msnm a 3800 msnm. En el Perú se la reporta en Cajamarca, Cusco, Huánuco, Junín, La Libertad, Pasco y Piura (Jesús Charcape, 2015).

⁴Que crecen en las rocas.

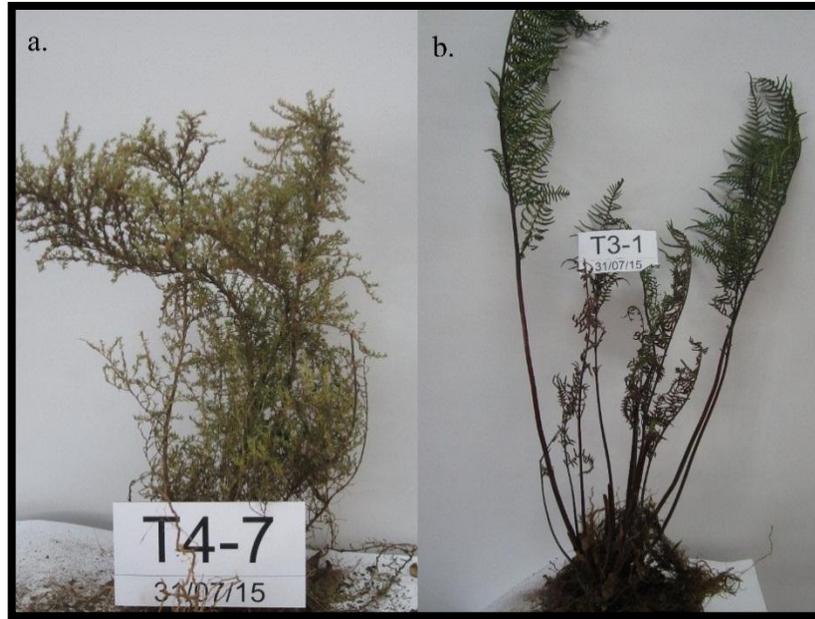


Figura 8. (a) *Gardoquia cf. Sericea*, (b) *Pityrogramma tartarea*.
Fuente: Elaboración propia.

Pteridium arachnoideum

Helecho isospóreo⁵ vivaz o perenne con un rizoma subterráneo muy desarrollado que llega a alcanzar hasta un metro de longitud de color pardo y cubierto de vellosidades oscuras (ver figura 9, a). Posee frondes muy grandes, de hasta 2 metros con láminas tripinnadas⁶ con pinnas ovoides y desprovisto de pelos y glándulas en el haz mientras que en el envés son muy pilosas, pecíolo menor o igual en longitud que lámina. Esporas trilletas muy ligeradas que se diseminan muy rápidamente por el viento. Vegeta en zonas alteradas, laderas rocosas, abiertas y pedregosas, bordes de caminos, matorrales de zonas lluviosas y de terrenos más bien pobre en bases, de 80 msnm a 3000 msnm. Se reporta en Amazonas, Ancash, Apurímac, Ayacucho, Cajamarca, Cusco, Huánuco, Junín, La Libertad, Lima, Loreto, Madre de Dios, Pasco, Piura, Puno, San Martín y Ucayali (Jesús Charcape, 2015).

Según la etimología, el nombre genérico *Pteridium* es un diminutivo de *Pteris* nombre latino procedente del griego *Pteron*, que significa ala, por la forma de las frondes y del sufijo griego *-ion* pequeño; el epíteto específico *aquilinum*: es un adjetivo latino que significa como águila.

⁵Dícese de las plantas criptógamas que sólo tienen esporas de una clase.

⁶Es un término botánico que designa aquellos órganos laminares que poseen pinnas numerosas a los lados de un eje principal.

Salvia corrugata

Arbusto perenne de los Andes, originario de Colombia, Perú y Ecuador. Alcanza una altura de 2,5 metros en su hábitat natural, y 1,2 metros en el cultivo. Hojas perennes y profundamente onduladas de 5 cm por 3,5 cm, de color verde oscuro en la parte superior, y con vetas de color marrón pálido y tricomas⁷ finos debajo (ver figura 9, b). Las flores son de color púrpura-azules de 2,5 cm de largo, con un pequeño cáliz de color púrpura oscuro verdoso, crecen en verticilos. Vegeta en áreas alteradas, pendientes rocosas y matorrales, donde crece a una altitud de 1000 msnm a 4000 msnm. En Perú se le reporta en Amazonas, Huancavelica, Lambayeque, La Libertad y Piura (Jesús Charcape, 2015).

Según la etimología, *Salvia* es un nombre que procede del latín *salvus*, que significa “salud” o *salveo*, que significa “curar”, aludiendo a las virtudes medicinales de las plantas de este género; y la palabra *corrugata*: epíteto latino que significa “arrugada”.



Figura 9. (a) *Pteridium arachnoideum*, (b) *Salvia corrugata*.
Fuente: Elaboración propia.

⁷Apéndices epidérmicos con diversa forma, estructura y función.

2.3. Equipos y materiales

2.3.1. Materiales

- Mortero de ágata:



Figura 10. Mortero de ágata.
Fuente: Elaboración propia.

- Material de vidrio:

Se empleó la vidriería usual de un laboratorio de química con el debido cuidado y en óptimas condiciones de limpieza. El material limpio, después del lavado de rutina, se sumerge en una solución de HNO_3 - agua (1:3) durante al menos 15 minutos sobre un recipiente de plástico dentro de un lugar seguro (por ejemplo, una campana extractora). Posteriormente se enjuaga varias veces con agua desionizada, se deja escurrir y se seca en un lugar libre de polvo.

2.3.2. Reactivos

- Agua desionizada:

Se utiliza agua desionizada con una conductividad eléctrica de $1,2 \mu\text{S}/\text{cm}$; ya que las sales en el agua pueden influir de forma adversa en los resultados. Dicha agua se obtuvo al exponer el agua de grifo a resinas cargadas eléctricamente, que se unen a los iones minerales o sales diluidas en el agua, como el calcio, hierro, cobre, sodio, bromuro y cloruro, y las eliminan.

- **Ácido nítrico (65,8 %; $\rho = 1,395 \text{ g/cm}^3$):**

El ácido nítrico concentrado caliente es un agente oxidante fuerte que disuelve todos los metales comunes; es muy utilizado sólo, o también en combinación con otros ácidos y agentes oxidantes, como el peróxido de hidrógeno, para descomponer muestras de materia orgánica y entonces poder determinar el contenido de metales pesados.

- **Ácido perclórico (70 %; $\rho = 1,668 \text{ g/cm}^3$)**

El ácido perclórico concentrado caliente es un potente agente oxidante. Se debe tener cuidado al utilizar este reactivo, a causa de su naturaleza potencialmente explosiva. El ácido concentrado frío no es explosivo, al igual que las disoluciones diluidas calientes; sin embargo, ocurren explosiones violentas cuando el ácido perclórico concentrado caliente entra en contacto con materiales orgánicos o sustancias inorgánicas fácilmente oxidables. Debido a esta propiedad, el reactivo concentrado debe ser calentado únicamente en campanas de extracción de gases que estén recubiertas por un vidrio protector.

Toda descomposición con este ácido debe hacerse en combinación con otro ácido, generalmente con ácido nítrico concentrado en exceso para reducir su reactividad (3 a 5 partes de nítrico por cada parte de perclórico).

- **Solución patrón**

Se utilizaron soluciones patrón de 1000 ppm y soluciones intermedias de trabajo de 100 ppm en medio acuoso.

2.3.3. Equipos

- **Estufa**

Se utilizó la estufa de ventilación forzada de la marca MEMMERT que se utiliza para secar y esterilizar recipientes de vidrio y de metal en el laboratorio. La materia es calentada por la salida de aire a una elevada temperatura consiguiendo absorber la humedad y eliminar la posibilidad que prevalezca algún tipo de contaminación en las muestras. Por lo general operan entre la temperatura ambiente (25 °C) y los 350 °C (ver figura 11, a).

- **Placa calefactora**

Es un equipo de laboratorio de sobremesa, portátil y autónomo que posee una estructura de excelente resistencia a ataques químicos y mecánicos, así como a la corrosión en general (ver figura 11, b).

Se utiliza generalmente para calentar sustancias en recipientes de vidrio o vasos de teflón, de forma controlada. Posee un selector de potencia que permite ajustar la emisión térmica y el tiempo necesario para calentar un determinado recipiente.



Figura 11. (a) Estufa, (b) Placa calefactora.
Fuente: Elaboración propia.

- **Balanza analítica**

Se utilizó una balanza semi micro analítica de marca OHAUS, modelo LUXER DISCOVERY, resolución 0,01 mg (ver figura 12), para tomar los pesos de las muestras molidas de materia vegetal.



Figura 12. Balanza analítica.
Fuente: Elaboración propia.

- **Espectrofotómetro de absorción atómica (AAS)**

Las mediciones de los elementos en estudio se realizaron utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, modelo 1100B, capaz de cuantificar la concentración de metales alcalinos, alcalinotérreos, de transición y otros elementos en disolución acuosa, aproximadamente unos setenta elementos. Las muestras son previamente digeridas, es decir, son tratadas con ácidos fuertes hasta destruir toda la materia orgánica y pasar toda la muestra a solución.

Este equipo permite la determinación de metales y minerales en muestras como agua, suelos agrícolas, suelos mineralógicos; en fluidos como la sangre y también en alimentos. Tiene la capacidad de proyectar un haz de luz monocromática a través de una muestra y medir la cantidad de luz que es absorbida por dicha muestra, esto permite indicar indirectamente qué cantidad de la sustancia que nos interesa está presente en la muestra.

Se tuvo como referencia el manual del equipo y experiencias de investigaciones anteriores, así como, las condiciones de temperatura, humedad, tiempo y tensión eléctrica con las que opera el espectrofotómetro que influyen en su propio comportamiento.

Los instrumentos espectroscópicos característicos (ver figura 13) constan de una fuente estable de energía radiante como por ejemplo una lámpara de cátodo hueco que es un cilindro hueco que está relleno de un gas inerte y posee el cátodo del metal que se está evaluando, es decir, que para cada metal que se analiza se emplea una lámpara distinta. Hay otra clase de lámparas que son lámparas de descarga sin electrodos, los cuales son bulbos de metal que contienen gas inerte en su interior y el metal del elemento que se va a analizar; esta lámpara funciona con energía eléctrica.

Además, precisa de un nebulizador cuya misión es convertir la muestra aspirada por el capilar en una nube de tamaño de gota muy pequeño, una cámara de premezcla donde las gotitas se mezclan con el oxidante y el gas combustible íntimamente, un mechero, el cual se sitúa sobre la cámara de premezcla y donde sale la llama con temperatura suficiente para poder comunicar a la muestra la energía suficiente para llevar los átomos a su estado fundamental, un monocromador, que es un dispositivo que aísla la radiación de longitud de onda de interés de todas las demás radiaciones emitidas en el proceso, un detector de radiación, que convierte la energía radiante en una señal utilizable (intensidad de corriente), un sistema de procesamiento y lectura de la señal, que visualice la señal detectada en una escala de medida, en una pantalla de osciloscopio, en un medidor digital.



Figura 13. Equipo de AAS.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 14 se muestra un esquema de los componentes del espectrómetro de absorción atómica por llama de la marca Perkin-Elmer utilizado para analizar los metales pesados de esta investigación.

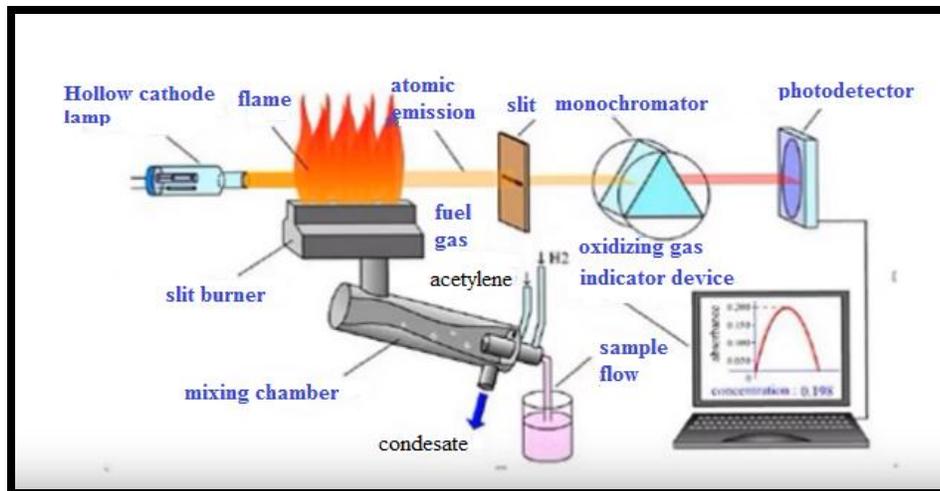


Figura 14. Partes de espectrofotómetro de absorción atómica.
Fuente: Elaboración propia.

2.4. Preparación de las muestras

Las plantas se separaron en hojas y raíces como muestra independiente. Cada planta fue lavada cuidadosamente con abundante agua desionizada para eliminar el polvo y cualquier

partícula de contaminante que podrían estar adheridas en hojas y raíces. Luego se envuelven intercalando con papel toalla, se secan y se guardan en sobres debidamente codificados.

Después cada muestra se seca en la estufa durante un periodo de 24 horas a 48 horas a una temperatura de 60 °C, a temperaturas mayores la muestra se puede descomponer. Y luego se molieron con mortero de ágata para su análisis.

Al finalizar el proceso de molienda las muestras representativas se guardan en recipientes plásticos herméticos a temperatura ambiente en un lugar exentos de humedad (ver figura 15).

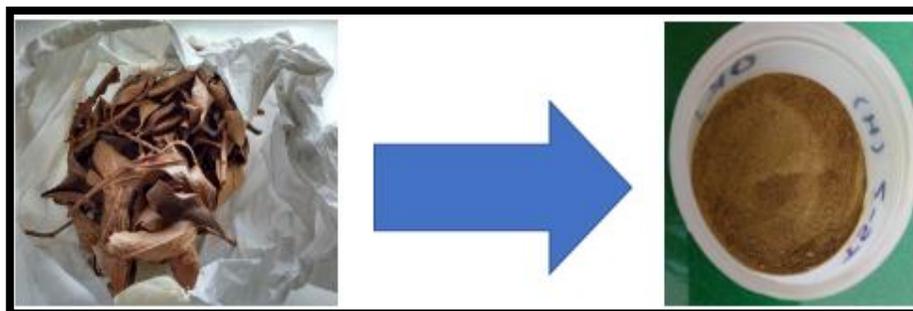


Figura 15. Producto de la molienda de la muestra.
Fuente: Elaboración propia.

2.5. Selección del método de digestión por vía húmeda

La digestión por vía húmeda de las muestras debía dar como resultado una solución acuosa perfectamente clara para determinar la concentración de metales pesados de especies vegetales seleccionados, empleando los recursos existentes en el laboratorio de química.

Existen diversas soluciones ácidas para la digestión de plantas, así, por ejemplo, se probó una mezcla de HNO_3 y H_2O_2 (5:2) y otra mezcla de HNO_3 y HClO_4 (4:1). Se descartó la primera mezcla porque no dio buenos resultados.

Procedimiento

Se pesa con exactitud de $\pm 0,00001$ g una cantidad aproximada de 0,3 g de muestra vegetal previamente molida en un vaso de precipitados de 250 mL. Luego, bajo la campana extractora de gases, se adicionan 5 mL de agua desionizada, 4 mL de HNO_3 y 1 mL de HClO_4 concentrados y se cubre con un vidrio de reloj.

En paralelo se digieren blancos de muestra. Se preparó un blanco en cada bloque de muestras digeridas. Los blancos miden la respuesta del procedimiento analítico a las impurezas o especies interferentes que existan en los reactivos o, simplemente, a las características del instrumento de medida.

Los vasos con la mezcla de reactivos se colocan sobre la plancha calefactora donde se exponen a un rango de calentamiento del 25 % del total de potencia de la plancha durante 50 minutos hasta la desaparición de los humos pardos formados; después se eleva el calentamiento de la plancha al 50 % durante 70 minutos hasta que se evaporen los ácidos y esfumen los humos densos blancos producidos por el ácido perclórico, se adiciona una pequeña cantidad de agua a los vasos fríos y se calientan la superficie para filtrar todos los digeridos por gravedad a través del papel de filtro Whatman # 42. La filtración debe ser realizada rápidamente en caliente.

El papel de filtro se plegó en cuatro partes y se adhiere a un embudo, de modo que el borde del mismo se encuentre entre 0,5 cm - 1 cm por encima del filtro, entonces es humedecido con un suave chorrillo de agua y presionando firmemente hacia abajo. El papel de filtro debe ajustarse fuertemente a toda la circunferencia superior.

Posteriormente se lava el filtro con agua caliente para arrastrar la muestra completamente. Se consigue un filtrado eficiente agregando varias porciones pequeñas de agua sucesivamente. Durante el lavado no debe agregarse agua hasta que la porción previamente añadida se haya filtrado por completo.

El filtrado y los lavados se recogen en un matraz aforado de 50 mL y se enrasa con agua desionizada. Las soluciones se guardan en frascos de plástico rotulados con el código correspondiente y se mantienen en refrigeración a 4 °C hasta la realización de las lecturas por AAS.

2.6. Cuantificación de metales pesados por AAS

Se procedió a medir los contenidos de Al, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn, siguiendo las normas e instrucciones establecidas por el manual del equipo Perkin Elmer.

Los parámetros instrumentales con los que se trabajó se presentan en la tabla 4, estas condiciones permitirán alcanzar la mayor sensibilidad del equipo. En la selección del combustible y el oxidante adecuado se tiene en cuenta la temperatura requerida para atomizar la muestra, siendo las flamas usadas las de acetileno/aire y acetileno/N₂O.

Las lecturas de Cd, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn se realizaron con llama aire/acetileno en proporción 8:1. La medición del Al se realizó con llama óxido nitroso/acetileno en proporción 6:6,5.

Las curvas de calibrado se elaboraron con dos estándares estableciendo el menor de ellos como patrón interno. Se prepararon dos estándares $S_1 = 1,00$ ppm y $S_2 = 2,00$ ppm. Algunas muestras tuvieron concentraciones altas que salieron fuera de los estándares antes mencionados como las muestras *Baccharis latifolia* y *Pityrogramma tartarea* durante la lectura de Cu; por ello se cambiaron los estándares a otros de mayor concentración, 2,00 ppm y 4,00 ppm respectivamente. Lo mismo ocurrió en la lectura de Zn y Fe para todas las muestras. Por otro lado, para la lectura del Al se prepararon estándares de $S_1 = 5,00$ ppm y $S_2 = 10,00$ ppm, dado que el rango lineal del aluminio y las concentraciones de Al en algunas de las muestras son relativamente altas.

Tabla 4. Parámetros instrumentales óptimos de AAS de llama.

Referencia	Elemento						
	Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Longitud de onda λ (nm)	309,3	228,8	324,8	248,3	279,5	283,3	213,9
Energía	75	64	76	67	69	72	68,1
Rango lineal (mg/L)	100	1,0	2	5,0	2	5,0	1,1
Límite de detección (mg/L)	1,1	0,016	0,032	0,10	0,03	0,19	0,018
Nebulizador	FS ^a	IB ^b	FS	FS	IB	IB	FS

^a Flow Spoiler

^b Impact Bead

Fuente: Manual del equipo de AAS.

Método de adición estándar

El método de adición estándar es una técnica de análisis cuantitativo que ayuda a minimizar los efectos de matriz en las señales de medición de analitos. Este método no elimina las interferencias, solo las compensa ya que se obtienen todas las señales analíticas bajo las mismas condiciones.

Se procedió a preparar las curvas de calibración con soluciones estándar en los rangos de linealidad que indica el manual del equipo. Según como se ha indicado anteriormente, pero utilizando como medio muestras digeridas, pues de esta forma las interferencias afectarán por igual tanto a la muestra problema como a los estándares ya que son preparados en la misma matriz y la curva se desplazará por encima del valor en la muestra.

Se prepararon cuatro estándares con adiciones de 0,25 ppm; 0,50 ppm; 0,75 ppm y 1,00 ppm para definir una nueva curva cuya intersección con el cero nos permitirá calcular el valor en la muestra. Todas se diluyen a un mismo volumen final para que los componentes de la muestra original queden a la misma concentración del estándar agregado.

Después de medir la señal de cada una de las disoluciones se representan estas respuestas en función de la concentración de analito patrón (cantidad conocida) añadido obteniéndose una línea recta que no pasa por el origen de coordenadas.

Por último, se extrapola la línea recta obtenida hasta cero absorbancias, la intersección con el eje horizontal (concentración) dará la respectiva concentración de interés en la muestra problema.

Para este método tomamos de referencia una muestra de las hojas de la especie *Baccharis latifolia*. Se midieron cuatro elementos: cadmio, cobre, plomo y zinc. El cobre, por ser el metal de extracción y de mayor abundancia en la zona muestreada. El cadmio por ser un metal altamente contaminante y nocivo para la salud de los seres vivos. Se eligió medir el plomo por mostrar en las mediciones anteriores estar por debajo del límite de detección. Y, por último, el zinc por ser un elemento cuya lectura no es muy precisa.

Curva de calibración de cadmio

Esta curva de calibración representativa ayuda a obtener un valor real de la concentración de cadmio, libre de cualquier interferencia por otros componentes, debido a que las mediciones anteriores están por debajo del límite de detección (ver tabla 5 y figura 16).

Se midió con una micropipeta 1,00 mL y 2,00 mL respectivamente y se llevaron a una fiola de 100 mL con agua destilada.

Estándares para la curva de calibración: $S_1 = 1,00$ ppm y $S_2 = 2,00$ ppm.

Patrón interno = 1,00 ppm.

Tabla 5. Datos de la curva de calibración para el cadmio.

Muestra	Cadmio (ppm)	Absorbancia
S_0	0,00	0,00
S_1	0,25	0,25
S_2	0,50	0,50
S_3	0,75	0,75
S_4	1,00	1,02

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 16, la curva de calibración ppm cadmio es lineal con un valor de $R^2 = 0,9998$, en el rango de concentraciones de 0,00 ppm a 1,00 ppm.

De acuerdo al factor de correlación (R^2) resultante de los datos con un valor de 0,9998; se puede concluir que los resultados arrojados por el equipo de absorción atómica con este estándar presentan una buena linealidad.

En este caso para el cálculo de las concentraciones se generó la ecuación $y = 1,016x - 0,0032$; la concentración de cadmio se obtiene extrapolando el valor de "x" cuando $y = 0$.

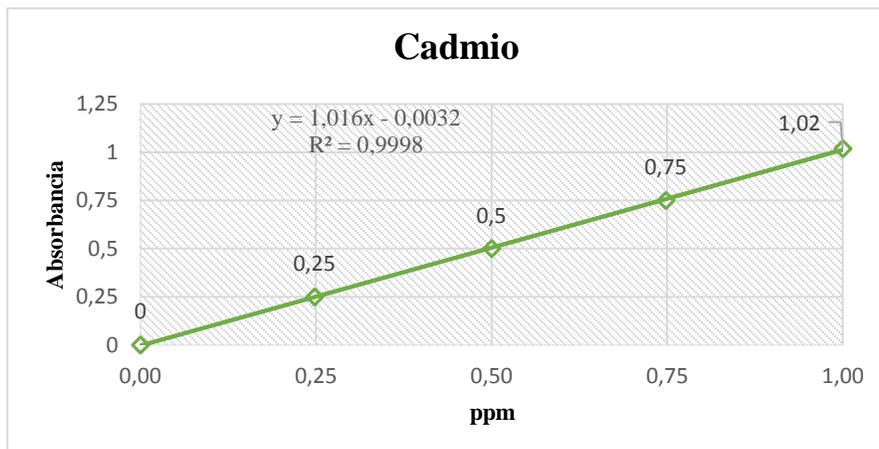


Figura 16. Curva de calibración de cadmio.

Fuente: Elaboración propia.

En este caso el valor negativo (-0,0032) de la constante, determina que el método de adición no es efectivo para este elemento, es tan pequeña la cantidad que a pesar de la adición el valor está dentro del ruido del instrumento.

Curva de calibración de cobre

De acuerdo a los datos de absorbancia medidos por el equipo de absorción atómica reportados en la tabla 6, se genera la curva de calibración que se muestra en la figura 17.

Se midió con una micropipeta 1,00 mL y 2,00 mL respectivamente y se llevaron a una fiola de 100 mL con agua destilada.

Estándares para la curva de calibración: $S_1 = 1,00$ ppm y $S_2 = 2,00$ ppm.
Patrón interno = 1,00 ppm.

Tabla 6. Datos de la curva de calibración para el cobre.

Muestra	Cobre (ppm)	Absorbancia
S ₀	0,00	0,53
S ₁	0,25	0,78
S ₂	0,50	1,00
S ₃	0,75	1,22
S ₄	1,00	1,51

Fuente: Elaboración propia.

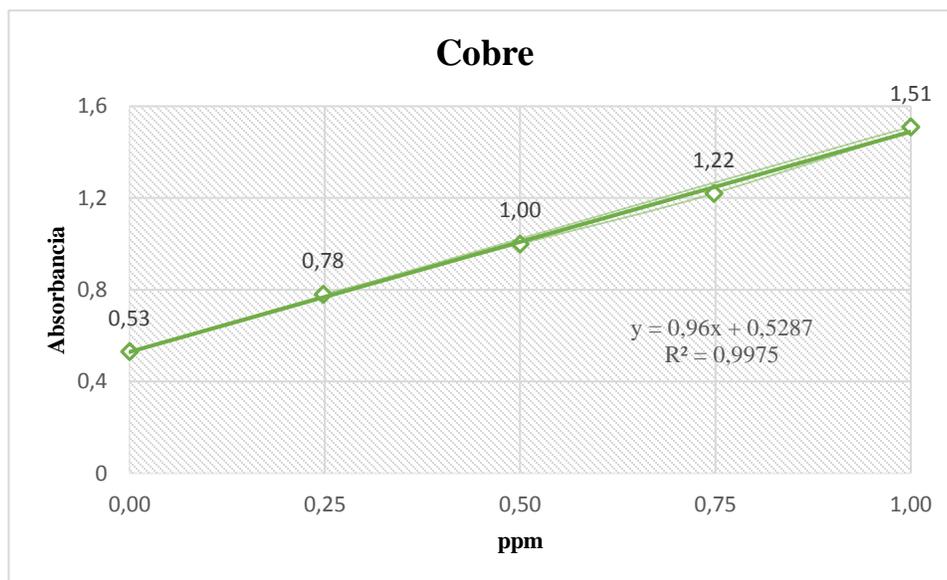


Figura 17. Curva de calibración de cobre.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 17, la curva de calibración ppm cobre es lineal con un valor de $R^2 = 0,9975$; en el rango de concentraciones de 0,00 ppm a 1,00 ppm.

De acuerdo al factor de correlación (R^2) resultante de los datos con un valor de 0,9975; se puede concluir que los resultados arrojados por el equipo de absorción atómica con este estándar presentan una buena linealidad.

En este caso para el cálculo de las concentraciones se generó la ecuación $y = 0,96x + 0,5287$ realizada; la concentración de cobre se obtiene extrapolando el valor de "x" cuando $y = 0$.

Al medir el analito en el equipo de absorción atómica se obtuvo una lectura de absorbancia directa igual a 0,53; suelen haber otros componentes en la muestra y estos interfieren en los resultados de la medición, lo que se conoce como efecto matriz. Al final por extrapolación la concentración real de Cu es 0,5507 ppm. Dicho valor está dentro del error experimental para esta técnica analítica.

Curva de calibración de plomo

Esta curva de calibración representativa ayuda a obtener un valor específico de la concentración de plomo, libre de cualquier interferencia por otros componentes, debido a que las mediciones anteriores están por debajo del límite de detección igual a 0,019 (ver tabla 7 y figura 18).

Se midió con una micropipeta 1,00 mL y 2,00 mL respectivamente y se llevaron a una fiola de 100 mL con agua destilada.

Estándares para la curva de calibración: $S_1 = 1,00$ ppm y $S_2 = 2,00$ ppm.
Patrón interno = 1,00 ppm.

Tabla 7. Datos de la curva de calibración para el plomo.

Muestra	Plomo (ppm)	Absorbancia
S ₀	0,00	0,04
S ₁	0,25	0,34
S ₂	0,50	0,61
S ₃	0,75	0,86
S ₄	1,00	1,13

Fuente: Elaboración propia.

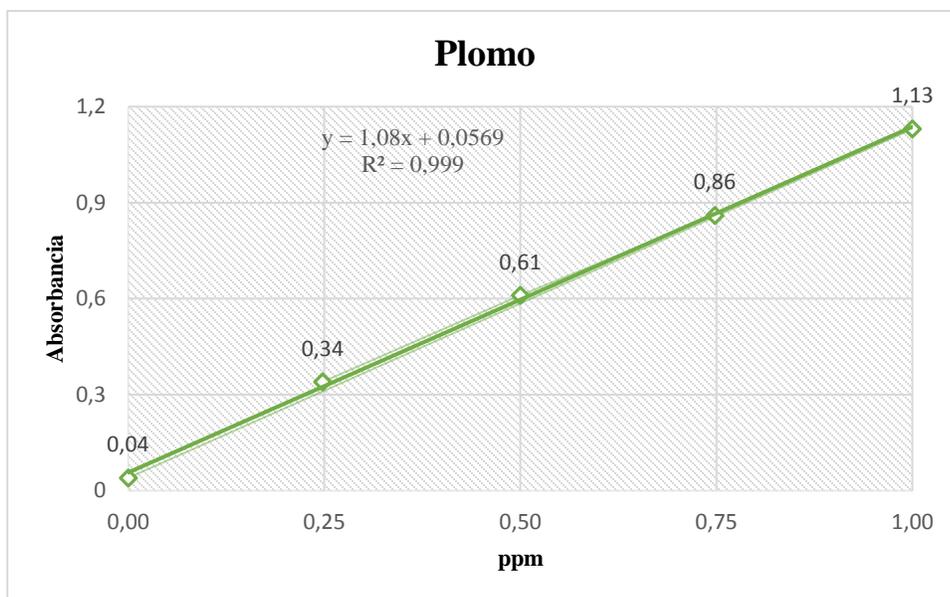


Figura 18. Curva de calibración de plomo.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 18, la curva de calibración ppm plomo es lineal con un valor de $R^2 = 0,999$, en el rango de concentraciones de 0,00 ppm a 1,00 ppm.

De acuerdo al factor de correlación (R^2) resultante de los datos con un valor de 0,999; se puede concluir que los resultados arrojados por el equipo de absorción atómica con este estándar presentan una buena linealidad.

En este caso para el cálculo de las concentraciones se generó la ecuación $y = 1,08x + 0,0569$; la concentración real de plomo absorbido se obtiene extrapolando el valor de “x” cuando $y = 0$.

Por lo tanto, la concentración acumulada de plomo en la muestra *Baccharis latifolia* es de 0,053 ppm. Dicha cantidad no pudo ser detectada anteriormente, debido a la pequeña cantidad de analito de interés presente en la muestra, dando lecturas por debajo del límite de detección (0,019 ppm).

Curva de calibración de zinc

De acuerdo a los datos de absorbancia estimados por el equipo de absorción atómica reportados en la tabla 8, se genera la curva de calibración que se muestra en la figura 19.

Se midió con una micropipeta 1,00 mL y 2,00 mL respectivamente y se llevaron a una fiola de 100 mL con agua destilada.

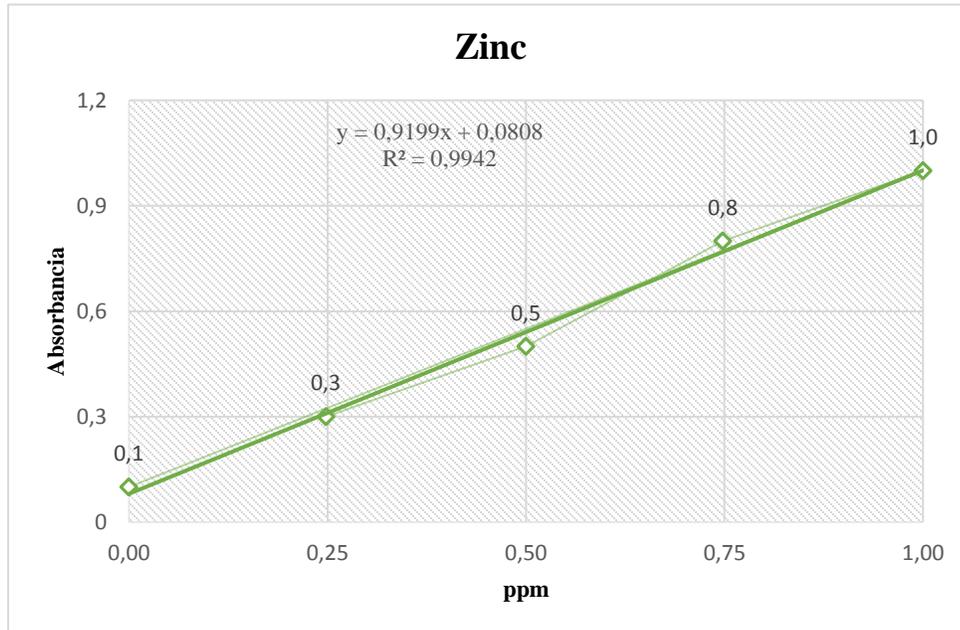
Estándares para la curva de calibración: $S_1 = 1,00$ ppm y $S_2 = 2,00$ ppm.

Patrón interno = 1,00 ppm.

Tabla 8. Datos de la curva de calibración para el zinc.

Muestra	Zinc (ppm)	Absorbancia
S ₀	0,00	0,1
S ₁	0,25	0,3
S ₂	0,50	0,5
S ₃	0,75	0,8
S ₄	1,00	1,0

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 19.** Curva de calibración de zinc.

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la figura 19, la curva de calibración de zinc es lineal con un valor de $R^2 = 0,9942$, en el rango de concentraciones de 0,00 ppm a 1,00 ppm.

De acuerdo al factor de correlación (R^2) resultante de los datos con un valor de 0,9942; se puede concluir que los resultados arrojados por el equipo de absorción atómica con este estándar presentan una buena linealidad.

En este caso para el cálculo de las concentraciones se generó la ecuación $y = 0,9199x + 0,0808$; la concentración real de zinc se obtiene extrapolando el valor de "x" cuando $y = 0$.

Al medir el analito en el equipo de absorción atómica se obtuvo una lectura con redondeo de un decimal igual a 0,1, suelen haber otros componentes en la muestra y estos interfieren en los resultados de la medición. Al final la concentración real de zinc resulta ser de 0,088 ppm.

Capítulo 3

Resultados y discusión

El desarrollo de la vegetación está condicionado por muchos factores tanto bióticos como abióticos, dentro de estos últimos se encuentran las propiedades fisicoquímicas de los suelos. En el Laboratorio de Química de la Universidad de Piura se determinaron los parámetros de conductividad eléctrica y el pH de los suelos aledaños a una temperatura de 25,2 °C. Para ello se realizó el método de extracto de pasta saturada conveniente para el análisis en las muestras de los suelos.

Se realizó con el propósito de describir los factores que pueden explicar la considerable disponibilidad de metal en el suelo y el aumento de las concentraciones de metales pesados en el material vegetal.

Los suelos de los diferentes terrenos de la mina presentaron una alta diferencia en pH y conductividad eléctrica. En la tabla 9 se observa que los terrenos T₄ y T₅ se clasifican como suelos ácidos, facilitando la acumulación de metales pesados por parte de las plantas. En el terreno T₂ el suelo es ligeramente alcalino, en el cual los metales pesados son absorbidos por las plantas con mayor dificultad. Y por último los terrenos T₁ y T₃, clasificados como suelos ligeramente ácidos posibilitan que las plantas tiendan a ser capaces de absorber con exceso los metales pesados. Potencialmente concentraciones fitotóxicas totales de aluminio, hierro y cobre se encontraron en la mayoría de las muestras del suelo (ver Anexo D).

Para este caso la medición del pH se lleva a cabo con un pH-metro portátil en pasta saturada. Las pruebas químicas de laboratorio demuestran que la reacción del pH del suelo afecta de modo significativo la disponibilidad y la absorción de metales pesados. Las especies y variedades de vegetales muestran diferente susceptibilidad a distintos niveles de pH.

Tabla 9. Propiedades de los suelos.

Terrenos	pH	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	Planta analizada
T ₁	6,23	366	<i>Salvia corrugata</i>
T ₂	7,61	1024	<i>Baccharis latifolia</i>
T ₃	6,90	1038	<i>Pityrogramma tartarea</i>
T ₄	4,71	473	<i>Gardoquia cf. sericea</i>
T ₅	4,68	390	<i>Pteridium arachnoideum</i>

Fuente: Elaboración propia.

La acidez está asociada a los suelos lixiviados y las altas precipitaciones. Limita el crecimiento de las plantas debido a que los metales pesados comienzan a disolverse en la humedad del suelo y se vuelven disponibles para las plantas. El bajo nivel de pH del suelo tiene una influencia muy importante especialmente en los metales como el aluminio, hierro, manganeso y cobre que aumentan su disponibilidad a medida que el pH disminuye.

Por otra parte, la conductividad eléctrica mide la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica al aprovechar la propiedad de las sales en la conducción de esta; por lo tanto, la conductividad eléctrica mide la concentración de sales solubles presentes en la solución del suelo. Su valor es más alto cuanto más fácil se mueva dicha corriente a través del mismo suelo por una concentración más elevada de sales.

Según los resultados presentados en la tabla 10, de las cinco especies analizadas, sobresale la especie *Pityrogramma tartarea* por absorber la mayor cantidad de Al en la zona de la raíz, además las plantas *Salvia corrugata* y *Gardoquia cf. sericea* también muestran una considerable cantidad de aluminio en la raíz. Por otra parte, la planta *Baccharis latifolia* posee una mayor concentración de Al en las hojas.

En la planta *Pteridium arachnoideum* la concentración de Al se encuentra por debajo del límite de detección, es decir que está debajo del valor mínimo detectable por el equipo de AAS.

En general, la especie *Pityrogramma tartarea* logra destacar por su capacidad de acumular más de 1000 ppm de Al en su raíz, de esta forma podría ser considerada para remediar suelos con alto potencial de contaminación.

En la tabla 10 se muestra que solamente la planta *Gardoquia cf. sericea* presenta concentración de Cd, posiblemente esto se deba por adsorción en la parte de la raíz.

Se han encontrado altas concentraciones de metales en la raíz, una cantidad de Cu por encima de los 1000 ppm que pertenece a la planta *Pityrogramma tartarea*.

Tabla 10. Concentraciones de metales pesados en materia vegetal.

Planta analizada	Concentraciones de metales pesados (ppm)													
	Al		Cd		Cu		Fe		Mn		Pb		Zn	
	Hojas	Raíz	Hojas	Raíz	Hojas	Raíz	Hojas	Raíz	Hojas	Raíz	Hojas	Raíz	Hojas	Raíz
<i>Salvia corrugate</i>	527,8	551,4	n.d.	n.d.	108,3	54,0	1187,7	534,5	51,5	28,1	n.d.	n.d.	100,6	55,0
<i>Baccharis latifolia</i>	319,2	n.d.	n.d.	n.d.	979,5	273,9	1938,9	779,5	83,5	32,9	n.d.	n.d.	117,2	109,4
<i>Pityrogramma tartarea</i>	n.d.	2396,6	n.d.	n.d.	37,7	1862,0	286,2	1187,8	37,2	30,2	n.d.	n.d.	19,2	80,1
<i>Gardoquia cf. sericea</i>	312,1	536,6	n.d.	10,1	16,8	37,9	147,9	535,0	524,3	87,9	n.d.	n.d.	72,8	62,0
<i>Pteridium arachnoideum</i>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	156,9	37,3	123,8	460,4	327,9	n.d.	n.d.	18,2	103,3

n.d. = no detectable o inferior al límite de detección (L.D.) del elemento cuantificado.

Límites de detección: L.D. Al < 1,1, ppm
 L.D. Cd < 0,016 ppm
 L.D. Cu < 0,032 ppm

L.D. Mn < 0,03 ppm
 L.D. Fe < 0,10 ppm

L.D. Pb < 0,19 ppm
 L.D. Zn < 0,018 ppm

Fuente: elaboración propia.

La planta *Baccharis latifolia* se extrajo de un suelo ligeramente alcalino y destaca por absorber una considerable cantidad de Cu, que es mayor respecto al contenido que absorben otras especies que pertenecen a suelos ácidos, donde la disponibilidad de este metal es más alta.

Las plantas *Baccharis latifolia*, *Salvia corrugata*, y *Pityrogramma tartarea* como se muestra en la tabla, pueden acumular grandes cantidades de Fe, superando las 1000 ppm. En contraste, las plantas *Gardoquia cf. Sericea* y *Pteridium arachnoideum* absorben una baja cantidad de este metal teniendo en cuenta que además crecieron en suelos ácidos.

Según los resultados obtenidos la planta *Pteridium arachnoideum*, absorbe más cantidad de Mn que el resto de especies analizadas, influenciada también por desarrollarse en un suelo que presenta un pH ácido, pues genera un incremento en la disponibilidad del Mn. Todas las plantas analizadas coinciden en tener una mayor concentración de Mn en las hojas.

Los valores de Pb en los órganos de las plantas están por debajo del límite de detección del equipo de absorción atómica. Esto demuestra que las plantas analizadas no son buenas para absorber grandes cantidades de Pb.

En la tabla 10 se observa que la planta con mejor capacidad para absorber Zn es la especie *Baccharis latifolia*; sin embargo, no logra alcanzar la expectativa de hiperacumulación para la remediación del suelo de este metal.

La vegetación cercana a la mina Turmalina ha recibido en los últimos 20 años descarga de contaminantes por los pasivos ambientales mineros, teniendo como consecuencia una mayor carga orgánica e inorgánica.

Las especies *Baccharis latifolia* y *Salvia corrugata* han acumulado cantidades importantes de metales pesados procedentes de suelos, principalmente en la parte aérea, por otra parte, en la especie *Pityrogramma tartarea* el órgano que presentó una alta acumulación de metales fue la raíz.

Las plantas analizadas han mostrado capacidad para acumular metales pesados en la raíz y en las hojas, especialmente elementos como Fe y Cu los cuales señalan valores superiores a los 1000 ppm.

Según los resultados, la especie *Pityrogramma tartarea* se observan valores elevados de Al, Fe y Cu absorbidos, a pesar de no desarrollarse en un suelo ácido, esto puede deberse a que esta especie pertenece a la familia de los helechos los cuales son empleados como plantas fitorremediadoras.

En el caso de la especie *Baccharis latifolia* demuestra poder acumular grandes cantidades de Fe y Cu. Otra especie como la *Salvia corrugata* es capaz de acumular una gran cantidad de metales pesados como Fe y Al tanto en las hojas como en la raíz.

En los resultados se observaron concentraciones altas de Cu absorbidas por la planta *Baccharis latifolia*, excediendo los valores considerados normales (ver anexo F), 49 veces más alto en las hojas y 14 veces más alto en la raíz; además, esta planta pertenece a una familia que tiende a absorber y tolerar grandes cantidades de metales lo cual hace posible este resultado; sin embargo, existe la posibilidad que el resultado sea vea afectado por un mal lavado de la planta.

Respecto al contenido de Fe, nuestra especie de *Baccharis latifolia* analizada logra absorber en las hojas seis veces más y en las raíces tres veces más sobre la concentración absorbida en suelos no contaminados.

Por otra parte, la concentración de Zn en las hojas y raíces de la planta *Baccharis latifolia* se encuentra dentro del valor considerado como normal en esta especie (ver anexo F).

En todas las muestras, las concentraciones de Cd y Pb estaban por debajo de los límites de detección; a excepción de la especie *Gardoquia cf. sericea* es la única que logró superar el límite de detección en el Cd, esto pudo deberse a que este metal fue adquirido por la planta por medio de adsorción, y no por absorción, ya que el suelo del que fue extraída dicha planta es muy ácido facilitando la movilización del Cd conllevando a que se pueda detectar esta concentración en el equipo de absorción atómica .

Según los resultados obtenidos, en general, las poblaciones de plantas procedentes de suelos contaminados son más resistentes a los metales, por ende, las concentraciones absorbidas son mayores que las poblaciones de la misma especie desarrollada en suelos menos contaminados (Baker, 1987 citado en Durán P., 2010).

En el análisis realizado, las plantas han acumulado bajas concentraciones de Pb, a pesar del contenido reportado por los suelos cercanos a la mina Turmalina (ver anexo D).

Las concentraciones de metales pesados absorbidos por las plantas dependen de factores como el pH y la conductividad eléctrica del suelo que altera su disponibilidad, además; cada planta desarrolla estrategias de tolerancia y selectividad de metales propios de cada especie.

Conclusiones

- Las plantas *Salvia corrugata*, *Baccharis latifolia*, *Pityrogramma tartarea*, *Gardoquia cf. sericea* y *Pteridium arachnoideum* son capaces de crecer en suelos con alto contenido de metales pesados y tienen la capacidad de acumularlos tanto en hojas como en la raíz.
- En cuanto a la especie *Pityrogramma tartarea*, basándose en los resultados obtenidos, es posible que pueda acumular elevadas concentraciones de metales pesados como Al (2396,6 ppm), Fe (1187,77 ppm) y Cu (1862,03 ppm) en la raíz, ya que pertenece a la familia de helechos que pueden absorber grandes cantidades de metales. Además, aunque se tuvo mucha precaución durante el lavado de las especies muestreadas, este proceso podría afectar en los datos.
- Respecto a elementos de Pb y Cd se detectaron valores por debajo del límite de detección en las especies vegetales analizadas.
- La especie *Pityrogramma tartarea* tiene un gran potencial para acumular metales pesados y podría ser considerada para remediar suelos contaminados por minería en zonas similares a las que se exponen en este estudio.
- Las concentraciones de Cu en las hojas y en las raíces han sido 49 veces mayores y 14 veces mayores, respectivamente, que las concentraciones normales de este elemento en la planta *Baccharis latifolia* (ver anexo F).
- El contenido de Zn en las hojas y las raíces estuvo dentro del valor considerado como normal; mientras que el Fe los superó seis veces, en la parte de las hojas de la planta *Baccharis latifolia* y tres veces en la parte de las raíces de la planta antes mencionada.

- Las concentraciones de Cu han sido todo un gran problema local en los sedimentos de los ríos de Canchaque, y también en la vegetación de los alrededores de la mina, por ello la presente investigación impulsa la utilización de especies vegetales para reducir la carga de metales en los suelos contaminados, ya que a partir de los suelos y plantas los metales pesados pueden llegar a través de la cadena trófica hasta las personas.
- Los resultados de esta investigación no se han podido comparar con los obtenidos en el artículo científico *Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru* porque se analizaron diferentes especies vegetales en cada investigación; sin embargo, los valores obtenidos por el Dr Bech et al., (1997) son más altos que los obtenidos en esta tesis (ver anexo F). Ambos estudios ayudan a comprender la capacidad de absorber metales pesados en algunas plantas endémicas localizadas en regiones de grandes altitudes.
- La minería es una de las actividades extractivas con mayores problemas socioambientales, en el caso de la mina Turmalina al no realizar un correcto cierre de operaciones los pasivos ambientales mineros fueron contaminando los suelos y aguas, afectando principalmente a la población de Canchaque.
- El Gobierno Regional de Piura debe promover y preocuparse por la remediación de los pasivos ambientales mineros por las empresas mineras, que estén interesadas en invertir. Las autoridades correspondientes pueden ser más estrictos en los contratos con estas empresas; ya que la pérdida de la biodiversidad y la afectación de la calidad ambiental constituyen un riesgo en el desarrollo socioambiental en la región.
- La presente investigación proporciona importante información como línea de referencia en el contexto de contaminación por metales pesados para futuros estudios de monitoreo en la zona y evaluaciones de riesgo corrigiendo las deficiencias que se tuvieron en el presente trabajo.
- Se recomienda realizar otros estudios acerca de las especies vegetales aledañas a esta zona minera, que permitan ampliar el aspecto de su capacidad fitorremediadora en ambientes contaminados. Estas investigaciones podrían determinar la magnitud de la contaminación.
- Actualmente, en el departamento de Piura, el Laboratorio de Química de la Universidad de Piura es el único en realizar el servicio de determinación de metales pesados en materia vegetal por AAS. Esta investigación en particular se realizó empleando el método de digestión por vía húmeda utilizando los instrumentos y equipos de este laboratorio.

Referencias bibliográficas

Abad, P. (1999). La biotecnología en el impacto ambiental y su aplicación en el Perú. Recuperado el 13 de julio del 2017, de https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/viewFile/522/484

Acevedo E., et al. (2005) Criterios de calidad de suelos y aguas de riego. (2005). Recuperado el 15 de junio de 2017, de http://biblioteca-digital.sag.gob.cl/documentos/medio_ambiente/criterios_calidad_suelos_aguas_agricolas/inicio.htm

Agriculturers, red de especialistas en agricultura (2015, 5 de agosto). La fitorremediación: Plantas para tratar la contaminación ambiental. Recuperado el 16 de abril, de <http://agriculturers.com/la-fitorremediacion-plantas-para-tratar-la-contaminacion-ambiental/>

Aprobación de inventario inicial de pasivos ambientales mineros. (2006, 15 de junio). Boletín oficial de normas legales de El Peruano. Recuperado de http://www.gacetajuridica.com.pe/servicios/normas_pdf/Junio_2006/19-06-2006/pag_321845-321656.pdf

Arellano, S. R. (2000). Estudio Geológico Ambiental y su relación con la explotación de los recursos minerales en la cuenca hidrográfica del río Piura. Tesis de grado de Ingeniería Ambiental. Universidad Nacional de Piura. Facultad de Ingeniería de Minas. Piura, Perú.

Avelino, c. (2013). Eficacia de la fitoextracción para la remediación de suelos contaminados en villa de Pasco. Tesis de grado de Maestro en Investigación y docencia universitaria con mención en investigación científica y tecnológica. Universidad del Callao. Facultad de Ciencias Económicas. Callao, Perú.

Ballesteros, J.L. (2011). Determinación de la eficacia de *Azolla caroliniana* como matriz de hiperacumulación de metales pesados cuantificados. Recuperado el 16 de julio del 2017 de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/5046>

Becerra Castro, C., García Lestón M., Monterroso C., Kidd P. (2007). Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente "Ecosistemas", 16, 26 - 43.

Becerril, J., et al. (2007). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente "Ecosistemas", 16, 1-6.

Bech, J., et al. (1997). Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in northern Peru. *The Science of the Total Environment*, 203, 83-91.

Bech, J., et al. (2002). Plants from mine spoils in the south american area as potencial sources of germplasm for phytoremediation technologies. *Acta Biotechnol*, 22, 1-2, 5-11.

Bech, J., et al. (2016). Screening for new accumulator plants in potential hazards elements polluted soil surrounding Peruvian mine tailings. *Catena*, 136, 66-73.

Beltrán, M. (noviembre, 2001). Fitoextracción en suelos contaminados con cadmio y zinc usando especies vegetales comestibles. Recuperado de <http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/185/Fitoextraccion%20en%20suelos%20contaminados.pdf?sequence=1>

Bonilla, S. (2013). Estudio para tratamientos de biorremediación de suelos contaminados con plomo, utilizando el método de fitorremediación. Recuperado el 21 de julio de 2017, de <http://www.dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4400/1/UPS-ST000985.pdf>

Cakmak, I. (2015). La importancia del zinc en las plantas y su dinámica en el suelo. (s.f.). Recuperado el 16 de julio de 2017, de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/la-importancia-del-zinc-en-las-plantas-y-su-dinamica-en-el-suelo>

Campillo, R. & Sadzawka. A. (s.f.). La acidificación de los suelos. Origen y mecanismos involucrados. Recuperado el 16 de junio de 2017, de <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/serieactas/NR33853.pdf>

Cano, M., Castilla, I., Cruzado, A., Huamani, J., Moreno, H., Torres, C., et al. (1984). Análisis de suelos, tejido vegetal, agua y fertilizantes. (3ª ed.). Lima: [s.n.].

Carpena, R., Bernal, M. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Revista científica de ecología y medio ambiente*. 16, 1-3.

Casierra, F. (2007). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*. 1, 246-257.

Castillo, C. (junio, 2015). Contaminación minera e intoxicación por metales pesados en el Perú. Recuperado el 13 de julio de 2017, de <https://divagando.lamula.pe/2015/06/05/contaminacion-minera-e-intoxicacion-por-metales-pesados-en-el-peru/ccperalta/>

Chapman, D.H. y Pratt F.P. (1988). Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. (6a ed.). México, D.F.: Editorial Trillas.

Charcape J. (2015). Informe: Determinación de plantas de Turmalina Canchaque – Piura. Piura, Perú.

Clasificación climática de Köppen. (s.f.). recuperado el 13 de julio de 2017, de <http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>

D’Huicque, L. (2014). Química analítica I disolución – disgregación. Recuperado el 17 de julio de 2017, de <http://repositorio.ub.edu.ar/bitstream/handle/123456789/6151/4194%20-%20completo%20-%20quimica%20analitica%201%20-%20dhuicque.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Delgadillo, A. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 597-612. Recuperado el 15 de abril de 2018, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n2/v14n2a2.pdf>

Digestión (química analítica). (abril, 2014). Recuperado el 13 de junio de 2017, de <https://www.clubensayos.com/Ciencia/DIGESTIÓN-quimica-Analitica/1640641.html>

Dirección General de Salud de las Personas. Contaminación con metales pesados. (s.f.). Recuperado el 13 de julio de 2017, de Ministerio de salud https://www.minsa.gob.pe/portalweb/06prevencion/prevencion_2.asp?sub5=3

Du Laing, G., et al. (2003). Performance of selected destruction methods for the determination of heavy metals in reed plants (*Phragmites australis*), *Analytica Chimica Acta*, 497, 191-198.

Duellman, W. (1999). Distribution patterns of amphibians in South America. pp. 255- 328 en: W. E. Duellman (Ed.), Patterns of distribution of amphibians. A global perspective. Johns Hopkins University Press, Baltimore.

Durán, P. (2010). Transferencia de metales de suelo a planta en áreas mineras: Ejemplos de los Andes peruanos y de la Cordillera Prelitoral Catalana. Tesis para optar al título de Doctora por la Universidad de Barcelona dentro del programa de “Biología Vegetal”. Universidad de Barcelona. Barcelona, España.

European Regional Development Fund. Fitorremediación, (s/f). Recuperado el 15 de abril de 2018, de <http://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>

Flores, B. (2011). Diseño y validación de un método de análisis por espectrofotometría UV-VIS para Cinc (II) y Mercurio (II) en muestras acuosas. Tesis de grado para optar el título de licenciado en Química. Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad de Ciencias e ingeniería. Lima, Perú.

García, H., Morán, H., Acosta, Y., Senior, A. y Fernández, N. (2006). Análisis comparativo de dos técnicas de digestión para la determinación de metales pesados en lodos residuales. Multiciencias, vol. 6, núm. 3, 234-243. Recuperado el 21 de abril de 2018, de <http://www.redalyc.org/pdf/904/90460305.pdf>

Gómez, J. (1993). Estudio de factibilidad para el tratamiento y almacenamiento de relaves de la mina Turmalina. Tesis de grado de Ingeniería de Minas. Universidad Nacional de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

González, D. (2015). Métodos de descomposición para muestras de roca, minerales, sedimentos y suelo. Recuperado el 23 de mayo de 2017, de <https://es.scribd.com/document/262002136/Descomposicion-de-Muestras-Por-Via-Humeda>

Herrera, T. (s.f.). La contaminación con cadmio en suelos agrícolas. Recuperado el 11 de junio de 2017, de http://www.academia.edu/7195023/LA_CONTAMINACIÓN_CON_CADMIO_EN_SUELOS_AGRÍCOLAS_Cadmiun_contamination_in_agricultural_soils

Hoja de datos de seguridad ácido nítrico. (s.f.). Control técnico y representaciones, S.A. Recuperado el 17 de junio de 2017, de <https://www.ctr.com.mx/pdfcert/Acido%20Nitrico.pdf>

Hoja de datos de seguridad de ácido perclórico. (s.f.). Control técnico y representaciones, S.A. Recuperado el 17 de junio de 2017, de <https://www.ctr.com.mx/pdfcert/Acido%20Perclorico.pdf>

Ibáñez, J. (2007). Acidez y alcalinidad (pH) o reacción del suelo. Curso de diagnóstico de suelos en campo. Recuperado el 16 de julio de 2017, de <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/04/24/64266>

Instrumentación científica. Catálogo 2003/2005. (2002). Barcelona: [s.n.].

Inventario de Pasivos Ambientales Mineros – 2016. (2016). Recuperado el 17 de noviembre de 2017, de <http://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=d6f4d9401446401a891fbf4ffc2544&extent=-88.3975,-19.8141,-55.9439,-1.2368>

Jackson, M.L. (1982). Actividad de los iones hidrógeno, su determinación en los suelos. Análisis químico de suelos (pp. 67-81). Barcelona: Omega.

Jara - Peña, E. et al., (2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. Revista peruana de biología, 21, 145 – 154.

Jiménez, S. (2011). Estado actual de conocimiento del uso de algunos de los helechos presentes en Colombia. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8838/tesis783.pdf?sequence=1>

Juárez, M. (s.f.). Hierro en el sistema suelo-planta. Recuperado el 16 de julio del 2017, de <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/HIERRO.pdf>

La mina Turmalina sigue contaminando la cuenca del Piura. (2014, 15 de marzo). Diario El Tiempo. Página 4.

Larsem, Bjorn y Elena Strukova. (2005). Reporte final, Banco Mundial: Reporte del Análisis Ambiental de Perú.

Ley N°26839 sobre la conservación y aprovechamiento sostenible de la diversidad biológica. (2015). Recuperado el 18 de junio del 2017, de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N°-26839.pdf>

Listado de pasivos ambientales. (s.f.). Recuperado el 27 de mayo de 2017, de Ministerio de energía y minas <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/REGISTROS/PASIVOS/ANEXO%20C%20PASIVOS.pdf>

Llugany, M. (2007). Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre? Revista científica de ecología y medio ambiente: Ecosistemas, 16, 4-9.

López, P. (2011). Fitorremediación en los suelos de Mayoc, San Mateo, Huarochirí – Lima. Recuperado el 13 de junio del 2017, de <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/1588>

López, M. (2017, 30 de octubre). Contaminación minera en Perú: informe médico reveló presencia de metales pesados en menores. Recuperado el 14 de abril de 2018, de <https://wayka.pe/presencia-metales-pesados-en-ninos-de-los-andes/>

Lotti G. y Galoppini C. (1986). Análisis por vía húmeda. C. Coello. Análisis químico agrario (pp. 16-55). Madrid: Alhambra.

Maldonado, C. (2003). Operación minera: Mina Turmalina producción, plan ambiental, costos y comercialización. Tesis de grado de Ingeniería de Minas. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Lima, Perú

Marrero-Coto, J. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. Recuperado el 21 de julio de 2107, de <http://www.redalyc.org/pdf/2231/223124988007.pdf>

Mejía, C. (2011). Metales pesados en suelos y plantas: contaminación y fitotoxicidad. Recuperado el 27 de junio del 2017, de <https://es.scribd.com/doc/204360496/METALES-PESADOS-EN-SUELOS-Y-PLANTAS-CONTAMINACION-Y-FITOTOXICIDAD>

Mendoza, V. S. (2012). Evaluación ambiental en los pasivos mineros de la mina Turmalina. Tesis de grado de Ingeniería de Minas. Universidad Nacional de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

Metales pesados. (2014, 24 de septiembre). Recuperado el 15 de marzo de 2018, <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/metales-pesados/>

Metrix Laboratorios. Campanas de extracción. (2016, 8 de febrero). Recuperado el 11 de marzo del 2017, <http://www.metrixlab.mx/campanas-de-extraccion/>

Mónica Brenda. (2017). Ventajas y desventajas. Recuperado el 27 de mayo de 2017, de http://fitorremediacion-bm.mex.tl/1355595_VENTAJAS-Y-DEVENTAJAS.html

Muñoz, J. (2017). Determinación de cadmio en fertilizantes, plantas de *Oryza sativa* L. y suelos de la provincia del Guayas: Propuesta de saneamiento. (Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero Ambiental). Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/17569/1/TESIS%20JORGE%20MUÑOZ%202017.pdf>

Norvell, W.A., Wu, J., Hopkins, D.G., Welch, R. 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chlorine and chelate-extractable soil cadmium. *Soil Science Society of America Journal* 64, 2162-2168.

NPC Comunicaciones. (2003). Para Canchaque, la mina Turmalina es caso cerrado. Recuperado el 16 de julio de 2017, de <http://www.oocities.org/factortierra/hu/03/01251844.html>

Núñez, R. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. Recuperado el 13 de junio de 2017, de http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf

Orroño, D. (2002). Acumulación de metales (cadmio, zinc, cobre, cromo, níquel y plomo) en especies del género *Pelargonium*: suministro desde el suelo, ubicación en la planta y toxicidad. Recuperado de <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2011orronodanielaines.pdf>

Palminteri, S. y Powell, G. (2001). Visión de la biodiversidad de los andes del norte. (pp. 4-8). Santiago de Cali, Colombia. World Wildlife Found.

Parámetros de calidad y límites máximo permisibles. (s.f.). Recuperado el 20 de junio de 2017 de <http://www.sunass.gob.pe/doc/normas%20legales/legisla%20web%28cambio%29/normas/calidad%20de%20agua/Oficio%20677.pdf>

Paz, C. (s/f). Estufa de secado. Recuperado el 10 de marzo de 2018, de <http://www.instrumentosdelaboratorio.net/2012/08/estufa-de-secado-u-horno-de-secado.html>

Prieto. J., González. C., Román. A. & Prieto. F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10, 29-44. Recuperado el 25 de marzo de 2018, de <http://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

Rodríguez, I., Villarreal, E. & Acosta, J. (2011). Memoria sobre la geología económica de la región Piura. Recuperado el 15 de junio de 2017, de http://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/468768/2011_GE33_Memoria_Geologia_Economica_Piura.pdf/710d21b0-bf67-4326-869a-ecfc88eec267

Rodríguez-Serrano, M. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente: Ecosistemas*, 17, 139-146.

Ruiz, I. (2002). Determinación de plomo y cadmio en peces. Tesis de grado de Ingeniería Industrial y de Sistemas. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.

Sadzawka, A., Grez. R., Carrasco. M. & Mora. M. (2004). Métodos de análisis de tejidos vegetales. Recuperado el 25 de mayo de 2017, de http://www.cofes.org.ar/descargas/relas/4_jornada/Manual_chilenos_tejido_vegetal.pdf

Salazar, P. (2018). Aplicación de la extracción con agua regia para analizar elementos traza en suelos contaminados. Tesis de grado de Ingeniería industrial y de sistemas en elaboración. Universidad de Piura. Facultad de ingeniería. Piura, Perú.

Sierra, R. (diciembre, 2006). Fitorremediación de un suelo contaminado con plomo por actividad industrial. Recuperado de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/271/T15921%20SIERRA%20VILLAGRANA,%20RUBEN%20%20TESIS.pdf?sequence=1>

Sierra, Carlos. (2017, 8 de junio). Una relación intensa: el hierro, el suelo y las plantas. Recuperado el 30 de marzo de 2018, de <http://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Analisis/2016/02/02/Una-relacion-intensa-El-hierro-el-suelo-y-las-plantas.aspx>

Sierra, Carlos. (2017, 15 de septiembre). Una mirada a la relación entre el cobre, el suelo y las plantas. Recuperado el 30 de marzo de 2018, de <http://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Analisis/2016/03/29/Una-mirada-a-la-relacion-entre-el-cobre-el-suelo-y-las-plantas.aspx>

Skoog, D. (2015). Fundamentos de química analítica. Recuperado el 13 de junio de 2017, de <http://latam.cengage.com/skoog/>

Sobitec Perú. Hierro en las plantas. (2017). Recuperado el 27 de junio de 2017, de <http://www.sobitecperu.com/hierro-en-las-plantas/>

Torres et al. (2007). Estudio preliminar de la fitorremediación de cobre divalente mediante *Pistia stratioides* (lechuga de agua). *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3, 13-20.

Valencia, J. (2014). Digestión ácida. Recuperado el 23 de mayo de 2017, de <https://prezi.com/t1jq45eoxtvq/digestion-acida/>

Valdivia, M. (s.f.). Fitoextracción de metales pesados en suelos contaminados. Recuperado el 17 de junio de 2017 de <https://www.monografias.com/trabajos96/fitoextraccion-metales-pesados-suelos-contaminados/fitoextraccion-metales-pesados-suelos-contaminados.shtml>

Vargas, J. (2012). Estudio evaluativo de los metales contaminantes y sus alternativas de prevención. *Ciencia & Desarrollo*, 14, 9 – 14.

Verde, J., Vega, E., López, J., Estrada, M., Malpica, F., Martínez, F., et al. (2013). *Manual de prácticas de laboratorio. Química analítica. (1ra ed.)* México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Anexos

Anexo A - Resúmenes de datos de seguridad

Ácido nítrico

1. Identificación de la sustancia

Denominación: ácido nítrico

Para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

2. Identificación de los peligros

Provoca quemaduras graves.

3. Composición

Fórmula: HNO_3 ; M = 63,01 g/mol

4. Primeros auxilios

Indicaciones generales: en caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

Inhalación: trasladar a la persona al aire libre. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.

Contacto con la piel: lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. Pedir inmediatamente atención médica. Extraer el producto con un algodón impregnado en polietilenglicol 400.

Ojos: lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir inmediatamente atención médica.

Ingestión: beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.

5. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

Precauciones: no inhalar los vapores.

Procurar una ventilación apropiada.

Evitar el contacto con la piel, los ojos y la ropa.

Prevenir la contaminación del suelo, aguas y desagües.

Recoger con materiales absorbentes o en su defecto arena o tierras secas y depositar en contenedores para residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante. Neutralizar con sodio hidróxido diluido.

6. Manipulación y almacenamiento

Manipulación: sin indicaciones particulares.

Almacenamiento: recipientes bien cerrados. En local bien ventilado. Temperatura ambiente. No almacenar en recipientes metálicos.

7. Propiedades físicas y químicas

Aspecto: líquido transparente e incoloro.

Olor: característico.

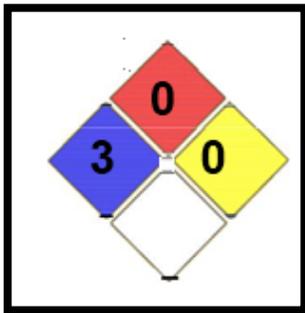
Punto de ebullición: 121 °C

Punto de fusión: -47 °C

Densidad: 1,395 g/cm³

Solubilidad: soluble en agua.

8. Otra información



Fuente: Control Técnico y Representaciones S.A.

Ácido perclórico

1. Identificación de la sustancia

Denominación: ácido perclórico.

Para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

2. Identificación de los peligros

Peligro de explosión en caso de calentamiento. Peligro de fuego en contacto con materias combustibles. Provoca quemaduras graves.

3. Composición

Solución acuosa: ácido perclórico 70 %

Fórmula: HClO_4 ; $M = 100,46 \text{ g/mol}$

4. Primeros auxilios

Indicaciones generales: en caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

Inhalación: trasladar a la persona al aire libre. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.

Contacto con la piel: lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. Pedir inmediatamente atención médica.

Ojos: lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir inmediatamente atención médica.

Ingestión: beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.

5. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

Precauciones: no inhalar los vapores.

No permitir el paso al sistema de desagües. Evitar la contaminación del suelo, aguas y desagües.

Recoger con materiales absorbentes o en su defecto arena o tierra seca y depositar en contenedores para residuos para su posterior eliminación de acuerdo con las normativas vigentes. Limpiar los restos con agua abundante.

6. Manipulación y almacenamiento

Manipulación: mantener el lugar de trabajo y los instrumentos bien limpios. Posible formación de percloratos explosivos. Evitar que el producto se seque en lugares poco accesibles (ranuras, baldosas, etc.).

Almacenamiento: recipientes bien cerrados. En local bien ventilado. Almacenar por separado o en recinto exclusivamente destinado a sustancias que favorecen la ignición.

Alejado de fuentes de ignición y calor. Refrigerado (inferior a 15 °C). No almacenar en recipientes de metales ligeros.

7. Propiedades físicas y químicas

Aspecto: líquido transparente e incoloro.

Olor: inodoro.

Punto de ebullición: 198 °C

Punto de fusión: -18 °C

Densidad: 1,668 g/cm³

Solubilidad: miscible con agua.

8. Otra información



Fuente: Control Técnico y Representaciones S.A.

Fuente: <https://www.ctr.com.mx/pdfcert/Acido%20Perclorico.pdf>, 2017.

<https://www.ctr.com.mx/pdfcert/MSDS%20ACIDO%20NITRICO.pdf>, 2017.

Anexo B – Último reporte periodístico sobre la mina Turmalina

LOCAL 4 EL TIEMPO
PIURA, SÁBADO 15 DE MARZO DE 2014

Afirma especialista del Consejo de Recursos Hídricos

La mina Turmalina sigue contaminando la cuenca del Piura

La mina Turmalina que dejó de operar hace más de veinticinco años sigue contaminando la cuenca del río Piura. Un estudio de monitoreo de la calidad del agua revela que hay concentración de aluminio, arsénico, sodio y manganeso. Fausto Ascencio, secretario técnico del Consejo de Recursos Hídricos, sostiene que no se ha realizado el cierre de la mina como corresponde.

De acuerdo al estudio, la concentración de arsénico supera en 0,5 veces los índices permitidos por las normas internacionales para el uso del agua en el consumo poblacional y recreacional. El agua, dice el estudio, se puede potabilizar con un tratamiento convencional. Esta situación se presenta debido a los vestigios del pasivo ambiental de la compañía minera Turmalina.

Igualmente, la calidad del agua de la quebrada Mina, de donde se capta el agua para la población de Palambra tiene 3,8 veces más aluminio que lo permitido y el río Canchaque tiene catorce veces más aluminio que los estándares internacionales. Cabe señalar que estas quebradas y ríos son afluentes del Piura.

En cuanto al sodio, el estudio señala que la cuenca baja del Piura tiene alta concentración de sodio, lo cual altera la calidad del agua que toman los animales y para el riego. Hay zonas en donde el nivel de sodio supera hasta siete veces los niveles permitidos.

Igualmente, hay altas concentraciones de manganeso. Se supera hasta en dos veces los valores de los estándares internacionales.

Al respecto, el director de Energía y Minas de Piura, Alfredo Guzmán Zegarra, sostiene que en reiteradas oportunidades ha solicitado al Ministerio de Energía y Minas iniciar el proceso de cierre de la mina, pero hasta ahora no se hace. La población más afectada es la de Canchaque, porque usa el agua para su consumo.

El plan de cierre de la mina, lo debe hacer la empresa que tuvo la concesión y explotación y que hace un cuarto de siglo abandonó la zona.

MINERÍA ILEGAL

En cuanto a la posible contaminación del agua por parte de la minería ilegal, Fausto Ascencio, secretario técnico del Consejo de Recursos Hídricos, indica que aún no se puede medir el impacto, porque los metales pesados tienden a acumularse en el fondo de los ríos y quebradas y hasta ahora lo que se ha hecho son análisis del agua. "En breve comenzaremos un trabajo de monitoreo de sedimentos y podremos determinar qué es lo que hay", dijo.

MÁS CONTAMINACIÓN

Según Fausto Ascencio, todos los ríos de la región Piura están contaminados y en el caso de Piura, toda la cuenca tiene residuos fecales (heces) conocidas técnicamente con coliformes termotolerantes. A lo largo del recorrido del río recibe los desagües sin tratamiento de todas las poblaciones. En el caso del río Piura, recibe el desagüe de Canchaque, Morropón, Chulucanas, Tambogrande, Catacaos, La Arena y La Unión. "Todas las municipalidades arrojan sus desagües a los ríos o las quebradas sin ningún tratamiento", señaló.

Las concentraciones de residuos fecales llegan a ser hasta seis veces por encima de los estándares de calidad ambiental del agua.

Al respecto, el jefe de la Autoridad Administrativa del Agua (AAA), Carlos Gastelo, indicó que su institución aplica las sanciones respectivas, pero las instituciones apelan y pocas veces llegan a pagar las multas correspondientes.

Ascencio sostiene que para evitar la contaminación de los ríos, las municipalidades deben construir sus plantas de tratamiento de aguas residuales.

ARSÉNICO

La exposición al arsénico puede causar varios efectos sobre la salud, como es irritación del estómago e intestinos, disminución en la producción de glóbulos rojos y blancos, cambios en la piel, e irritación de los pulmones. Es sugerido que la toma de significantes cantidades de arsénico puede intensificar las posibilidades de desarrollar cáncer, especialmente las posibilidades de desarrollo de cáncer de piel, pulmón, hígado, linfa.

Fuente: Diario "El Tiempo".

Anexo C - Parámetros de calidad y límites máximos permisibles del agua

El agua potable debe cumplir con las disposiciones legales nacionales, a falta de estas, se toman en cuenta normas internacionales. Los límites máximos permisibles (LMP) referenciales (**) para el agua potable de los parámetros que se controlan actualmente, se indican en el cuadro siguiente.

Tabla C.1 – Parámetros de calidad del agua potable.

Parámetro	LMP (**)	Referencia
Coliformes totales, UFC/100 mL	0 (ausencia)	(1)
Coliformes termotolerantes, UFC/100 mL	0 (ausencia)	(1)
Bacterias heterotróficas, UFC/mL	500	(1)
pH	6,5 – 8,5	(1)
Turbiedad, UNT	5	(1)
Conductividad, 25°C µS/cm	1500	(3)
Color, UCV – Pt-Co	20	(2)
Cloruros, mg/L	250	(2)
Sulfatos, mg/L	250	(2)
Dureza, mg/L	500	(3)
Nitratos, mg NO ₃ ⁻ /L (*)	50	(1)
Hierro, mg/L	0,3	0,3 (Fe + Mn = 0,5) (2)
Manganeso, mg/L	0,2	0,2 (Fe + Mn = 0,5) (2)
Aluminio, mg/L	0,2	(1)
Cobre, mg/L	3	(2)
Plomo, mg/L (*)	0,1	(2)
Cadmio, mg/L (*)	0,003	(1)
Arsénico, mg/L (*)	0,1	(2)
Mercurio, mg/L (*)	0,001	(1)
Cromo, mg/L (*)	0,05	(1)
Flúor, mg/L	2	(2)
Selenio, mg/L	0,05	(2)

Fuente: sunass.gob.pe.

Notas:

- (1) Valores tomados provisionalmente de los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (1995).
- (2) Valores establecidos en la norma nacional “Reglamento de Requisitos Oficiales físicos, químicos y bacteriológicos que deben reunir las aguas de bebida para ser consideradas potables”, aprobado por Resolución Suprema del 17 de diciembre de 1946.

(3) En el caso de los parámetros de conductividad y dureza, considerando que son parámetros que afectan solamente la calidad estética del agua, tomar como referencia los valores indicados, los que han sido propuestos para la actualización de la norma de calidad de agua para consumo humano especialmente para aguas subterráneas.

(*) Compuestos tóxicos

(**) Oficio Circular No 677-2000/SUNASS-INF.

Mediante este oficio la SUNASS estableció los valores límite máximo permisibles referenciales de los parámetros de control; ello originado por la carencia de una norma nacional actualizada, ya que la vigente data del año 1946 y no considera varios parámetros, como turbiedad, coliformes, pH, aluminio, nitratos, cadmio, mercurio, cromo, entre otros: para los cuales se ha tomado los valores guía que recomienda la Organización Mundial de la Salud, OMS.

Fuente: sunass.gob.pe, 2017

Anexo D - Resultado de concentraciones de metales pesados en suelos muestreados

Tabla D.1 - Concentración de metales pesados en suelos muestreados.

	Concentración de metales pesados en suelos (ppm)									
	T1	T1'	T2	T2'	T3	T3'	T4	T4'	T5	T5'
Aluminio	40 495,87	40 442,39	36 983,47	37 140,97	33 677,69	33 839,55	25 619,83	25 586	31 198,35	31 363,49
Cadmio	2,31	2,31	3,64	3,65	4,3	4,09	2,31	2,31	1,98	1,98
Cobre	1 223,14	1 188,51	3 925,62	3 961,7	4 297,52	3 961,7	743,8	693,3	628,1	660,28
Hierro	43 250,69	42 093,10	45 454,55	44 569,16	47 933,88	47 870,58	51 446,28	49 314,96	43 305,79	42 918,45
Manganeso	628,1	627,27	495,87	528,23	661,16	660,28	237,6	239,35	256,2	266,18
Plomo	148,76	113,9	157,02	167,13	363,64	495,21	231,4	198,09	159,09	150,63
Zinc	165,29	165,07	270,66	272,37	462,81	429,18	128,93	151,87	157,02	123,8

Fuente: Pierre Salazar, 2018.

Anexo E - Preparación de la pasta saturada

Para esto se usa una muestra de suelo seco al aire, pasada por un tamiz de 2 mm; la fracción menor de 2 mm es la que se procesa.

La finalidad de preparar la pasta saturada de agua destilada es obtener un extracto del suelo en el cual se puede determinar la mayoría de sus características químicas.

El porcentaje de saturación está en función de las características físico-químicas del suelo y puede tomarse como un coeficiente hídrico del suelo.

Procedimiento

Pesar entre 200 g a 250 g de suelo, en un depósito que puede ser de plástico o vidrio, agregar agua destilada o desionizada al suelo e ir agitando con una espátula; agregar tanta agua como sea necesaria para obtener una pasta uniforme con las siguientes características.

- Que la superficie tenga un espejo húmedo sin que haya agua sobrenadante.
- Que al inclinar el recipiente la pasta se deslice limpiamente por las paredes.
- Que, al hacer un surco en el fondo con la espátula, éste se cierre al paso de ella después de dejar ver el fondo del recipiente.
- Que la espátula quede limpia al sacarla de la pasta.

Pesar el suelo saturado de agua en el recipiente.

Extracción de la pasta

Después de 30 minutos de saturada la muestra de suelo, se coloca la pasta en un embudo Buchner el cual ha sido antes cubierto con un papel de filtro. Este embudo puede ser colocado sobre un kitasato, para conectar vacío a los embudos que tienen la pasta de suelo y obtener el extracto con las sales en solución, el cual se recibe en un frasco.

El vacío aplicado es alrededor de $\frac{3}{4}$ atm.

Fuente: Cano M., et al. (1984). Análisis de suelos, tejido vegetal, aguas y fertilizantes. (pp. 33-34).

Anexo F -Tablas de concentraciones de metales pesados en otras especies vegetales

Tabla F.1 – Especie *Baccharis latifolia* crecidas en suelos no contaminados.

	<i>Baccharis latifolia</i> (ppm)
Cobre	20
Hierro	300
Manganeso	100
Zinc	200

Fuente: Paola Durán, 2010.

Tabla F.2. Rango de As y concentraciones de metales en especies de plantas seleccionadas muestreadas en diferentes sitios alrededor de la mina de cobre.

Especies	Concentraciones (µg/g)					(%)
	As	Zn	Cu	Mn	Al	Fe
<i>Miconia lutescens</i>	112 - 1650	58 - 131	37 - 142	226 - 442	6410 - 6800	1,85 - 4,97
<i>Bidens cynapiifolia</i>	130 - 1430	89 - 437	36 - 620	209 - 412	618 - 6510	0,58 - 5,67
<i>Paspalum racemosum</i>	1530 - 5280	275 - 604	188 - 1880	1210 - 1490	489 - 12125	6,68 - 7,08
<i>Paspalum tuberosum</i>	1130	61	300	40	183	0,96
<i>Spergularia grandis</i>	1175	92	334	68	1036	2,60
<i>Stellaria cuspidata</i>	589	239	275	400	326	2,24
<i>Eupatorium sp.</i>	461	140	105	1285	26	1,50
<i>Eriochloa ramosa</i>	317	61	88	65	317	0,82

Fuente: Dr. Bech et al., 1997