



**FACULTAD DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA**

TESIS

CONCENTRACIÓN DE METALES DE LA ESPECIE VEGETAL *Aspidosperma rigidum* (remocaspi) Y SU RELACIÓN CON EL SUELO DONDE CRECE EN NINA RUMI Y PUERTO ALMENDRA

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE
QUÍMICO FARMACÉUTICO**

**PRESENTADO POR
ALEX MARCELO OLORTEGUI FARGE**

**ASESORA
Q. F. FRIDA ENRIQUETA SOSA AMAY, DRA.**

**IQUITOS, PERÚ
2021**

“Año del Bicentenario del Perú: 200 años de Independencia”

ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°002-PCGT-FFyB-UNAP-2021/OFICIO N°009-PCGT-UI/FFB- UNAP-2021

En la ciudad de Iquitos, Distrito de Iquitos, Departamento de Loreto, por vía Zoom de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, a los 25 días del mes de marzo de 2021, a horas 17:00, se dio inicio a la sustentación pública de Tesis titulado **“CONCENTRACIÓN DE METALES DE LA ESPECIE VEGETAL *Aspidosperma rigidum* (remocaspi) Y SU RELACIÓN CON EL SUELO DONDE CRECE EN NINA RUMI Y PUERTO ALMENDRA”**, aprobado con Resolución Decanal N°034-2021-FFyB-UNAP, presentado por el Bachiller: **ALEX MARCELO OLORTEGUI FARGE**, para optar el Título Profesional de Químico(a) Farmacéutico(a) que otorga la Universidad de acuerdo a Ley y Estatuto.

El jurado calificador y dictaminador designado mediante Resolución Decanal N°154-2020-FFyB-UNAP, está integrada por:

ING. REYNA GLADYS CÁRDENAS VDA DE REÁTEGUI, Dra.	Presidente
Q.F. LILIANA RUIZ VÁSQUEZ, Dra.	Miembro
ING. CLETO JARA HERRERA, MSc	Miembro

Luego de haber escuchado con atención y formulado las preguntas necesarias, las cuales fueron respondidas: Satisfactoriamente

El jurado después de las deliberaciones correspondientes, llegó a las siguientes conclusiones:


La sustentación pública y la tesis han sido Aprobadas con la calificación Muy Buena

Estando el bachiller apto para obtener el Título Profesional de Químico(a) Farmacéutico(a).

Siendo las 18:20 Hrs. se dio por terminado el acto Académico




ING. REYNA GLADYS CÁRDENAS VDA DE REÁTEGUI, Dra.
Presidente



Q.F. LILIANA RUIZ VÁSQUEZ, Dra.
Miembro

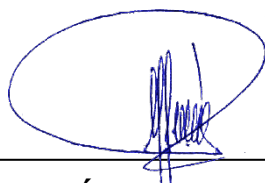


ING. CLETO JARA HERRERA, MSc
Miembro



Q.F. FRIDA ENRIQUETA SOSA AMAY, Dra.
Asesora

JURADOS



ING. REYNA GLADYS CÁRDENAS VDA. DE REÁTEGUI, DRA.
CIP N° 28912
Presidenta del Jurado calificador y dictaminador




Q. F. LILIANA RUIZ VÁSQUEZ, DRA.
CQFP N° 12491
Miembro del Jurado calificador y dictaminador



ING. CLETO JARA HERRERA, MAG.
CIP N° 63042
Miembro del Jurado calificador y dictaminador

ASESORA



Q. F. FRIDA ENRIQUETA SOSA AMAY, DRA.
CQFP N° 03468
Asesora

DEDICATORIA

A mi **Padre Celestial** por la vida, la salud y bendiciones que me da, y por enviar a su Hijo Primogénito **Nuestro Señor Jesucristo** a redimir nuestros pecados y dar esperanza a nuestras vidas. Gracias por que me permitiste llegar a la meta.

A mis amados padres terrenales **Lucía Farge y Roger Olortegui**, por sus sabios consejos y su amor infinito; siempre atentos a inculcarme principios y valores que me permitan alcanzar una vida digna.

A las **próximas generaciones** que deseen conocer un poco acerca de este trabajo de investigación; mi deseo constante es que los conocimientos plasmados en estas hojas no vayan al olvido, sino que puedan tener repercusión positiva en un futuro.

Alex Marcelo Olortegui Farge

AGRADECIMIENTOS

A **Gilma Bella Delia** por ser compañera constante en mi vida, por el tiempo incondicional que me brinda, por su motivación y perseverancia.

A mi asesora, **doctora Frida Enriqueta Sosa Amay**, por su valiosa ayuda para la elaboración de este trabajo de investigación y por brindarme parte de sus conocimientos.

A mis **profesores de la Facultad de Farmacia y Bioquímica**, por sus aportes en mi formación; junto a muchos de ellos en el camino seguiré creciendo en esta noble labor al servicio de la humanidad.

A todas las personas que, de alguna forma, me acompañaron en este proceso, **familiares, amigos y compañeros de estudios**; este logro es solo el comienzo, pues hay que llegar tan lejos como lo demandé la profesión, es la identidad que elegí por la pasión de servir a mis semejantes.

ÍNDICE

JURADOS	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. ANTECEDENTES	4
1.2. BASES TEÓRICAS	5
1.2.1. Especie vegetal	5
1.2.2. Estructura del suelo	8
1.2.3. Respuestas de las plantas a la toxicidad por metales pesados	18
1.2.4. Las reacciones de intercambio en el sustrato	263
1.2.5. Los metales en las plantas	26
1.2.6. Implicancias de la toxicidad por metales en la salud, ambiente y seguridad alimentaria	334
1.2.7. Vigilancia epidemiológica de factores de riesgo por exposición e intoxicación por metales pesados y metaloides	35
1.2.8. Remediación de suelos	367
1.3. DEFINICIONES	38
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	40
2.1. HIPÓTESIS	40
2.2. VARIABLES	40
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	41
3.1. DISEÑO METODOLÓGICO	41
3.2. DISEÑO MUESTRAL	41
3.3. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	42
3.4. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	42
3.5. CONSIDERACIONES ÉTICAS MEDIOAMBIENTALES	43
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	44

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	57
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	62
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	63
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN	64
IX: ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Concentración por triplicado de Fe en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	44
Tabla 2. Concentración por triplicado de Zn en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	45
Tabla 3. Concentración por triplicado de Cu en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	46
Tabla 4. Concentración por triplicado de Mn en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	47
Tabla 5. Concentración por triplicado de Cr en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	48
Tabla 6. Concentración por triplicado de As en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	50
Tabla 7. Concentración por triplicado de Pb en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	51
Tabla 8. Concentración por triplicado de Cd en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	52
Tabla 9. Concentración por triplicado de Hg en órganos de la especie amazónica <i>A. rigidum</i> (remocaspi).	53
Tabla 10. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk	54
Tabla 11. Pruebas de correlación	55

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Concentracion promedio de hierro de las diferentes muestras tanto de suelo como de algunos órganos de remocaspi 49
- Figura 2.** Concentración promedio de cobre, manganeso, cromo y zinc, de las diferentes muestras tanto de suelo como de algunos órganos de remocaspi 49
- Figura 3.** Concentración promedio de cadmio, plomo, mercurio y arsénico, de las diferentes muestras tanto de suelo como de algunos órganos de remocaspi 54

RESUMEN

Los metales comprometidos en la reacción oxido-reducción son vitales a los seres vivos, no siendo así en los metales no redox. El objetivo de este trabajo fue relacionar el contenido de los metales: cobre, cromo, cadmio, zinc, hierro, manganeso, plomo, mercurio y arsénico entre la especie vegetal *Aspidosperma rigidum* (remocaspi) y el suelo que la sustenta, en las zonas de Nina Rumi y Puerto Almendra. La investigación de tipo correlacional y diseño experimental con tres repeticiones, tuvo 2 kg de cada muestra fresca de raíz, corteza y hojas, secadas y pesadas, que luego sufrieron digestión de ácidos y fueron analizadas en un espectrofotómetro de absorción atómica. Las concentraciones de los metales redox presentaron una concentración en los órganos de la especie, donde el $Fe > Zn > Mn > Cr > Cu$ y el coeficiente de variación muestral en su mayoría presentaron una muy baja variabilidad ($0 \leq CV \leq 0,1$) y baja variabilidad ($0,1 \leq 0,25$), lo que indica que la media fue representativa de la muestra; las concentraciones promedio fueron de forma ascendente: suelo de 0 a 20 < suelo de 20 a 40 < raíz < corteza < hojas. Para el caso de los metales no esenciales el $Pb > As > Hg > Cd$ y el coeficiente de variación muestral en su mayoría presentan una muy baja variabilidad ($0 \leq CV \leq 0,1$) y el mercurio que presentó una baja variabilidad ($0,1 < CV \leq 0,25$), siendo igualmente la media representativa de la muestra; las concentraciones en promedio fueron de forma bastante semejantes en las dos calicatas, con ligero descenso en la raíz y luego concentraciones semejantes en los órganos aéreos, solo el plomo mostró un comportamiento descendente con concentraciones mayores en las muestras de suelo que descendieron de la raíz a las hojas. Se concluyó que los oligoelementos analizados se encontraron en concentraciones adecuadas en los órganos del vegetal, no así los metales no esenciales donde todos se encontraron por encima de los VMP en material vegetal para uso medicinal.

Palabras clave: metales redox, metales no redox, plantas medicinales, metalotoxicidad.

ABSTRACT

The metals involved in the oxidation-reduction reaction are vital to living beings, not being the case in non-redox metals. Relate the content of metals: copper, chromium, cadmium, zinc, iron, manganese, lead, mercury and arsenic between the plant species *Aspidosperma rigidum* (remocaspi) and the soil that sustains it, in the area of Nina Rumi and Puerto Almendra. The correlational research and experimental design, with three repetitions, had as a sample 2 kg of each fresh sample of root, bark and leaves, dried and weighed, then acid digested and analyzed in an atomic absorption spectrophotometer. The concentrations of the redox metals presented a concentration in the organs of the species, where $Fe > Zn > Mn > Cr > Cu$ and the sample variation coefficient mostly show very low variability ($0 \leq CV \leq 0.1$) and low variability ($0.1 \leq 0.25$), which indicates that the mean was representative of the sample; Average concentrations were on average ascending: soil from 0 to 20 < soil from 20 to 40 < root < bark < leaves. In the case of non-essential metals, $Pb > As > Hg > Cd$ and the sample variation coefficient mostly present very low variability ($0 \leq CV \leq 0.1$) and mercury that presented low variability ($0.1 < CV \leq 0.25$), being likewise the representative mean of the sample; the average concentrations were quite similar in the two pits, with a slight decrease in the root and then similar concentrations in the aerial organs, only the lead showed a descending behavior with higher concentrations in the soil samples that descended from the root to leaves. It was concluded that the trace elements analyzed were found in adequate concentrations in the organs of the plant, not the non-essential metals, where all were found above the VMP in plant material for medicinal use.

Keywords: redox metals, non-redox metals, medicinal plants, metallotoxicity.

INTRODUCCIÓN

Las plantas medicinales o los productos de las mismas son de amplio uso a nivel mundial, según lo reporta la OMS/OPS. Se estima que el 80% de las poblaciones tropicales y subtropicales dependen de los remedios a base de especies vegetales para tratar, curar o diagnosticar sus enfermedades (1). De muchas de estas especies se aislaron componentes químicos que pasaron a ser insumos de la industria farmacéutica y cosmética; o son agentes terapéuticos de fitoterapéuticos o de aceites esenciales (2).

Para aprobar un recurso o producto terapéutico, ya sea que es un preparado artesanal o industrial, se requiere comprobar su efectividad, seguridad y calidad. Por lo que, es necesario realizar estudios de actividad farmacológica y toxicológica; así como de garantizar la calidad a lo largo de todo el proceso de producción, desde la obtención de la materia prima hasta que el recurso o producto llegue a ser consumido.

Sin embargo, debe primero probarse que no representa un riesgo de toxicidad. La inocuidad hace parte de la condición de calidad, requerida para ser usada con fines terapéuticos. Por lo que a los productos fitoterapéuticos según la autoridad sanitaria nacional e internacional se les exige en el protocolo analítico, la determinación de metales en la materia prima para verificar que su consumo no represente riesgos de metalo-toxicidad.

Sin embargo, hay una brecha en lo que respecta al control sanitario de plantas medicinales comercializadas por sus bondades medicinales, en mercados y paraditas en todo el Perú. En la región Loreto por sus características: geográfica, demográfica, cultural, económica y sanitaria, entre otras, se ha visto favorecida la práctica de la medicina étnicotradicional. En casi todos los mercados se encuentra al menos un puesto que oferta plantas medicinales. Y en la zona rural, es natural que los lugareños recurran al bosque para recolectar algún órgano vegetal que alivie o cure sus enfermedades (3).

En la selva tropical varias de las especies de *Aspidosperma* son de conocimiento de la sabiduría ancestral; es el caso de la especie *A. rigidum* (remocaspi), a cuya corteza se le atribuye diferentes usos terapéuticos. Se le expende como preparado hidroalcohólico generalmente mezclado con otras cortezas o sola en infusión; se consume en casos de enfriamiento, dolores articulares, malaria, entre otros usos. Esta especie presenta algunos estudios fitoquímicos y de actividad farmacológica, mas no cuenta con estudios de seguridad.

Las pruebas de seguridad comprenden estudios biológicos *in vitro* y en seres vivos (*in vivo, in situ*) que evalúen la toxicidad inherente a su composición; pero también abarcan los estudios de toxicidad por contaminantes microbiológicos y químicos (metales, pesticidas). Los niveles máximos aceptados de metales están sujetos a la exigencia de cada país, ajustándose a reglamentos y farmacopeas; todo con el fin de que una especie vegetal pueda consumirse como agente terapéutico.

Se tiene la premisa de que, algunos metales son constituyentes o cofactores de los seres vivos como sodio (Na), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), manganeso (Mn), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), cromo (Cr), entre otros; pero su concentración no puede exceder de ciertos límites nutricionales, porque al igual que los llamados metales no esenciales, como mercurio (Hg), cadmio (Cd), plomo (Pb) y el no metal arsénico (As), todos sin excepción dependiendo de su concentración, se constituyen en tóxicos para los seres vivos.

Esta condición determina que todo recurso vegetal sea evaluado en su capacidad de riesgo tóxico, en función de la concentración del catión. Lo preocupante es que la magnitud de los diferentes minerales en las especies botánicas depende de las matrices ambientales, en especial del sustrato donde enraízan, es por ello que se considera pertinente la relación dinámica suelo-planta.

Por lo que, conocer la metalo-toxicidad de la especie *A. rigidum* (remocaspi) es determinante; sobre todo porque los estudios de concentración de metales en esta especie y otras especies del género *Aspidosperma* según la literatura revisada son muy pocos, siendo importante contribuir con la carpeta de estudios de la especie *A. rigidum*, requeridos para validar su uso terapéutico etnotradicional; es por eso

que se determinó la relación entre la concentración de los metales: cobre, cromo, cadmio, zinc, hierro, manganeso, plomo, mercurio y arsénico en la especie vegetal *A. rigidum* (remocaspi) con el suelo donde crece en Nina Rumi y Puerto Almendra.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES

Zapata Valladolid (2019), en su tesis “Contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura” evaluó raíz y hojas de vegetales, que crecen en suelos piuranos que sufrieron extracción minera por veintiséis años hace más de veinte años; con el propósito de vigilancia y evaluación de riesgos a fin de encontrar plantas fitorremediadoras. Las muestras sufrieron digestión ácida por dos horas. Reportando concentraciones en un rango variado de aluminio, hierro (hojas entre 37,3 y 1938,9 y raíz entre 123,8 y 1187,8 ppm) y cobre, a diferencia de las concentraciones de plomo y cadmio que no superaron la sensibilidad del equipo de absorción de metales (1).

Peláez-Peláez et al. (2016), en el artículo “Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *Brachiaria* en el Magdalena medio colombiano” resalta que la industria petrolera ha generado una alerta en la salud pública por la liberación de cadmio y plomo al medio ambiente y la potencial intoxicación de la población. Las muestras las recolectaron a diferentes distancias entre 100 a 500 m de la fuente de emisión y correspondían a especies de la familia Poaceae con énfasis en especies del género *Brachiaria* y las calicatas se tomaron a una profundidad de 5 y 30 m La información la reportaron en consideración a las calicatas, tipo de pastura y con especial atención de las especies introducidas, la distancia de los transeptos al foco de emisión. Concluyeron que las concentraciones de mayor a menor fueron raíz > tallo > hojas y la matriz suelo ostentaba la mayor concentración a una profundidad de 5 cm (4).

Apaclla y Pezo (2015), en su tesis “Evaluación de metales en corteza de *Maytenus macrocarpa* (chuchuhuasi) de uso etnomedicinal en la región Loreto” en muestras recolectadas entre el kilómetro 17 al 50, en las inmediaciones de la carretera Iquitos-Nauta, determinaron la concentración de metales por absorción atómica. Reportaron que las concentraciones de cadmio (0,132 ppm) y plomo (0,3498ppm) superaban los límites máximos permisibles ($\leq 0,02$ y $\leq 0,2$ ppm, respectivamente),

y complementariamente determinaron las concentraciones de los oligoelementos Fe (38,150), Mn (3,350), Cu (4,790), Zn (13,300) y Cr (4,583) ppm (5).

Braz et al. (2009), refiere que las especies de *Aspidosperma* (Apocynaceae) abundan en los países de América. Los árboles varían de 2 a 60 m de altura, y crecen en una variedad de hábitats del centro-sur de Brasil, Paraguay y Argentina para la llanura de inundación del valle del Amazonas, y en elevaciones desde un punto a pocos metros sobre el nivel del mar hasta aproximadamente 2000 m. Perú y Bolivia (6).

1.2. BASES TEÓRICAS

1.2.1. Especie vegetal

A. Género *Aspidosperma* Mart. & Zucc.

Pertenece a la familia Apocynaceae, es una de las diez familias de dicotiledóneas más grandes; se le encuentra en zonas tropicales y subtropicales, desde México hasta las Antillas y al norte de Argentina.

B. Especies de *Aspidosperma*

El número de especies del género *Aspidosperma* es impreciso, reportó 80; Woodson reporta 52 especies; Marcondes-Ferreira y Kinoshita, reportan 43 especies con residencia en Brasil, 32 de ellas en la "Lista de especies de flora de Brasil (LEFB)"; se reportan 51 especies con nombre reconocido y con aproximadamente 90 sinónimos, de las cuales 21 de ellas se consideran endémicas de Brasil, siendo la especie patrón *A. tomentosum* (7) (8).

En Perú se tiene identificadas aproximadamente 17 especies, 14 de ellas habitan en la Amazonía peruana en planicie inundable estacional y suelos arenosos y a 11 de ellas se las encuentra en la región Loreto. De acuerdo con su localización por departamento se han identificado: *A. schultesis*, *A. cruentum*, *A. album* (en Loreto), *A. araracanga* y *A. desmanthum* (en Loreto y Ucayali), *A. exelsum* y *A. spruceanum*

(en Loreto y San Martín), *A. marcgravianum* (en Loreto, San Martín, Madre de Dios y Junín), *A. rigidum* (en Loreto, Madre de Dios, Huánuco y Pasco), *A. cylindrocarpon* (en Loreto, Huánuco y Junín), *A. parvifolium* (en Loreto, San Martín, Madre de Dios, Cajamarca, Ucayali y Pasco), *A. capitatum* (en Huánuco y Pasco), *A. carapanauba*, *A. macrocarpon* (en Huánuco, Junín, San Martín y Ucayali), *A. megaphyllum* y *A. myristicifolium* (en Madre de Dios) y *A. polyneuron* (en Amazonas y Cajamarca) (8).

C. Clasificación taxonómica de *Aspidosperma rigidum*

Reino	Plantae
Subreino	Tracheobionta
División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliophyta
Subclase	Asteridae
Orden	Gentianales
Familia	Apocynaceae
Subfamilia	Rauvolfioideae
Tribu	Alstonieae
Género	<i>Aspidosperma</i>
Especie	<i>rigidum</i>

D. Estudios etnofarmacológicos

El espectro de uso de especies del género *Aspidosperma* es diverso, las más conocidas son *A. excelsum*, *A. marcgravianum*, *A. rigidum* y *A. nitidum*, entre otras, con base en la información etnomédica; su uso popular se da en casos de enfermedades cardiovasculares, diabetes e hipercolesterolemia, malaria, reumatismo y en ciertos tumores, por diferentes grupos poblacionales de la región de América del Sur (Brasil, Perú, Argentina), Central y Norte (México) (9-11). Si bien la especie *A. rigidum* Rusby tiene un valor económico por su uso maderable, en esta oportunidad el interés es por su acción fitofarmacológica. En la selva peruana se reporta el consumo de su corteza en casos de diarrea, enfriamiento, dolores

articulares, fiebre, malaria, problemas hepáticos, migraña y dolor de cuerpo (3, 9-11).

Las infusiones o los extractos hidroetanólicos caseros o artesanales de corteza de tallo y en menor frecuencia de corteza de raíz u hojas son los preparados populares más usados. Los extractos de laboratorio se hacen sobre la base del uso etnotradicional, pero utilizan además de los solventes polares como agua y alcoholes otros solventes que permitan una extracción en diferentes gradientes de polaridad, con el fin de llegar a través del fraccionamiento al compuesto específico responsable de la actividad (3, 11). *A. subincanum* y *A. tomentosum* son especies brasileñas ampliamente utilizadas por la población para tratar diabetes mellitus e hipercolesterolemia (10).

E. Estudios de actividad farmacológica

El extracto de la corteza de tallo de la especie de *A. nitidum* presenta actividad contra *Plasmodium falciparum* y una baja citotoxicidad *in vitro* frente a hepatoma humano y células normales de riñón de mono (11). Las fracciones ácido-base del extracto crudo metanólico de corteza de tallo de esta especie presentan alcaloides con actividad *in vitro* frente a *P. falciparum* e *in vivo* en ratones infectados con *P. berghei* con una actividad a una concentración baja y muy baja respectivamente; por lo que, teniendo en cuenta su alto índice de sensibilidad de las fracciones de la corteza de esta especie, ricas en alcaloides, podrían ser útiles en el desarrollo de nuevos antipalúdicos tipo infusión para tratar la malaria en la región amazónica (11).

Asimismo, en las especies *A. cylindrocarpon*, *A. parvifolium*, *A. olivaceum*, *A. ramiflorum*, *A. spruceanum* y *A. tomentosum* recolectadas en Minas Gerais se comprobó que sus extractos tienen actividad *in vitro* contra cepas de *P. falciparum* resistente a cloroquina (W2) y sensible a cloroquina (3D7) a diferentes concentraciones entre 5,0 a 65,0 µg/mL (12). Los extractos etanólicos de *A. rigidum* mostraron una actividad, con un IC₅₀ a 1,6 µg/mL. Extractos metanólicos de las especies *A. schultesii*, *A. album*, *A. desmanthum*, *A. cruentum*, *A. spruceanum*, recolectadas en la Reserva Nacional Allpahuayo-Mishana, ubicada en la carretera Iquitos-Nauta km 25, demostraron actividad frente a diferentes cepas de

Pseudomonas (5, 10). *A. subincanum* y *A. tomentosum* son especies ampliamente utilizadas por la población brasileña para tratar algunas enfermedades.

F. Estudios fitoquímicos y actividades de compuestos aislados

Se sabe que varias especies de *Aspidosperma* poseen alcaloides principalmente de tipo indólico, por lo que se constituyen en marcadores quimiotaxonómicos del género (13, 14). Además de alcaloides, también poseen otras clases de metabolitos secundarios, entre ellos monoterpenos, triterpenos, esteroides, flavonoides, saponinas y ácidos orgánicos (11).

Algunas especies químicas aisladas de diferentes especies del género *Aspidosperma* como son aspidoscarpina, apparicina, ramiflorina A y B, han evidenciado *in vitro* actividad antiprotozoaria (*Plasmodium*, *Leishmania*) (14). De *A. rigidum* han obtenido alcaloides básicos extraídos de hoja, corteza y raíz; la 3 α -aricina y 1, 2 - isoreserpilina con actividad antiplasmodial (15). De corteza de *A. schultesii* obtuvieron alcaloides que demostraron tener actividad contra *Trypanosoma cruzi* y *Leishmania infantum* y citotoxicidad no específica contra células de mamíferos (16).

Los alcaloides tipo secamina aislados de la corteza de la raíz de *A. excelsum* presentaron actividad contra bacterias Gram positivas, *B. subtilis*. Y de *A. polyneuron* alcaloides activos contra *P. mirabilis* (9). Compuestos aislados de *A. subincanum* (21 alcaloides) y *A. tomentosum* (4 alcaloides y 1 flavonoide) han mostrado actividades antitumorales y antipalúdicas (10).

1.2.2. Estructura del suelo

El suelo se constituye en un sistema abierto donde se dan procesos físicos, químicos y biológicos derivados de la interacción dinámica entre biótica y abiótica. El suelo soporta la flora y fauna, pudiendo distinguirse ecosistemas agronómicos y ecosistemas forestales o boscosos (17). El suelo representa la capa externa de la litosfera constituida por rocas disgregadas, donde dependientes del estado físico de la materia se distinguen tres fases: sólida, líquida y gaseosa (17, 18).

En la **fase sólida** se distinguen la parte orgánica e inorgánica. En la parte orgánica, los desechos biológicos de la fauna contribuyen con la fertilización del suelo y a nivel de la rizosfera se da la interacción entre microfauna y planta, afectando la calidad del suelo. El análisis del contenido de C y N brinda información sobre la dinámica de la materia orgánica (17). La parte inorgánica del suelo es sustancial en principio para la flora, esta interacción suelo-planta es solo el primer eslabón de la cadena alimentaria y del equilibrio del ecosistema (17).

La **fase líquida** corresponde a la gran solución del suelo donde el agua contiene iones y gases disueltos disponibles para las plantas. Esta fase más la fase gaseosa son retenidas entre las partículas sólidas insolubles creando el microclima del suelo, favoreciendo la presencia de microorganismos, y determinando el relieve del suelo (17).

La **fase gaseosa** está constituida por O₂, CO₂, CH₄, N₂, entre otros. Su composición es determinante para el tipo de microorganismos que residen en el suelo. El aire y el agua puede acarrear contaminantes al suelo modificando la flora y la fauna naturales. En general, el suelo es muy importante en el manejo y conservación de los recursos naturales (17).

A. Formación de los suelos

Los horizontes se generan por los procesos edafogénicos y estos a su vez son determinados por los factores formadores del suelo: a) material parental o tipo de roca (determina la textura y propiedades químicas del suelo), b) el clima, c) el tipo y cantidad de vegetación, d) los organismos y calidad de la materia orgánica (MO) y e) el tipo y velocidad de reacciones. La precipitación pluvial influye en la acidez del suelo y bajan las bases intercambiables; la temperatura y precipitaciones altas producen suelos muy intemperizados. El tipo de suelo determina el tipo de organismos y estos a su vez determinan la calidad del suelo, relieve y el tiempo que determinan su morfología (17).

Estos factores a su vez determinan procesos que se dan en el suelo como: a) adición (de hojarasca y sedimento), b) pérdida (los procesos de lavado y

volatilización), c) traslocación (es decir movimientos ascendentes y descendentes) y d) transformación (reacciones de oxidación, reducción, hidratación, humificación); este último proceso es altamente dinámico y favorece la disponibilidad de nutrientes. Las plantas son organismos que modifican la calidad del suelo por procesos de absorción, acumulación de hojarasca, las cuales liberan paulatinamente nutrientes, modifican el microclima favoreciendo la fauna del suelo, forman galerías en el suelo favoreciendo la infiltración e intemperismo de los minerales del suelo (17).

Los metales pesados (MP) están naturalmente presentes en el suelo, pero las actividades geológicas y antropogénicas han incrementado la concentración de MP en todas las matrices ambientales con elementos como cadmio, arsénico, plomo, mercurio. Estos metales provenientes de fuentes artificiales se movilizan en el suelo y están biológicamente disponibles en los fenómenos de formación del suelo y al no ser biodegradables se acumulan y persisten por mucho tiempo en los suelos. El nivel de metales pesados en el fondo geológico es importante determinar, así como conocer el contenido promedio de metales como Al, Cd, Cu, Mn, Pb y Zn por su alto uso antropogénico (17, 19).

Los indicadores de la calidad del suelo más ampliamente utilizados son: 1) propiedad del suelo como profundidad, forma, tamaño y estabilidad de los agregados, cantidad y calidad de la MO fraccionada por tamaño, nutrimentos, estructura de la macrofauna y microorganismos, 2) potencial productivo, calidad y seguridad alimentaria y manejo de insumos, salud animal y humana y factores ambientales (erodabilidad y contaminación).

B. Metales tóxicos presentes en los suelos por actividades antropogénicas

El **suelo** es el principal sumidero de productos químicos tóxicos y de concentraciones excesivas de micronutrientes que son arrastrados por escorrentías y terminan en los sedimentos acuáticos. La salud de los ecosistemas es afectada por procesos geogénicos y antropogénicos. Factores como el crecimiento industrial, crecimiento de las grandes ciudades y el incremento del transporte han determinado el incremento de actividades antropogénicas como: mayor uso de

combustibles, petroquímicos y deposición en la atmósfera, fertilizantes (Cd, Pb, Hg y F) y plaguicidas (Cu, Hg, Pb, Mn, As, Cr y Zn), emisiones industriales (metales y restos de ácidos), minería (xantatos, sulfuros y cianuro), lixiviados de residuos domésticos, uso de aguas residuales en riego agrícola, incorporación de procesos de cosecha, almacenamiento y venta de productos agrícolas (4, 17), compost, biosólidos (estiércol animal, lodos de depuradora y de alcantarillado municipales).

Las **aguas residuales** que deberían ser tratadas para remover los metales, pero no pueden ser del todo removibles y terminan en los suelos y sedimentos por diferentes procesos, causando un estrés abiótico en una comunidad biótica y esto determina que las especies de flora más resistentes ejerzan una fuerte competencia por su subsistencia (20). Por otro lado, procesos de fundición y la quema de carbón, petróleo y desechos contribuyen liberando contaminantes metálicos (As, Cr, entre otros) a la atmósfera.

Los **biosólidos** generalmente de naturaleza orgánica, como el compost, estiércol de ganado y lodos de alcantarillado municipales (MSS) contribuyen a la acumulación de metales pesados (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Se, Ni, Mo, Zn, Sb) que pueden filtrar por los horizontes del suelo y alcanzar las aguas subterráneas (20).

Las aguas residuales domésticas muchas veces son usadas para regadillo de cultivo de vegetales para consumo humano. Si bien contienen cantidades relativamente bajas de metales; sin embargo, hay un riesgo de acumulación en los suelos a largo plazo.

Las aguas residuales industriales y de procesos mineros de extracción, relaves y fundición, se descargan directamente en depresiones naturales, así como en humedales por mucho tiempo sin tratamiento. Muchos de los tratamientos de recuperación que se usan para estos lugares son prolongados y costosos y pueden que no resulten eficientes. Esta contaminación del suelo representa una injuria al ecosistema y un peligro para la salud humana por su disponibilidad en alimentos de origen vegetal y animal (20). Una gran variedad de industrias como el curtido, textil, petroquímica, derrames involuntarios de petróleo o consumo de productos derivados del petróleo, insecticidas e industrias farmacéuticas son también

tributarias de contaminación por metales. Lo mismo se tiene emisiones gaseosas que luego se deponen (20).

Las sustancias químicas como fertilizantes de fosfato (P) proceden de rocas que también tienen metales pesados que enriquecen el sustrato con elementos traza (Mo), pero igualmente introduce metales tóxicos (Cd). Por otro lado, el fósforo (P) al acomplejarse con el aluminio (Al), reduce la adsorción de Mo en el suelo. Algunos fungicidas y lodos aportan Cu en niveles tóxicos. El Cr (III) es un producto de la curtiembre y el Cr (VI) del tratamiento de la madera, este último es un potente tóxico y cancerígeno (20).

La materia orgánica (MO) del suelo juega un papel importante en la remediación de metales y el ciclo de nutrientes; ya que al acumularse en el suelo afecta la relación entre plantas, microbiota del suelo y metales. Las plantas y microorganismos se retroalimentan de manera dinámica compleja y biológicamente estable, en respuesta a los metales del suelo; disminuyendo las concentraciones efectivas de metales en el suelo, logrando mitigar sus efectos. Los metales a menudo son adsorbidos u ocluidos por carbonatos, materia orgánica, óxidos de Fe y Mn y minerales primarios o secundarios (18).

La MO, particularmente la hojarasca, puede proporcionar metales, los cuales se unen pasivamente a la superficie o activamente gracias a la actividad de las comunidades microbianas. Este secuestro de metales en el suelo o la **absorción** por MO depende de las tasas de **absorción** y retención por los distintos tipos de tejido del vegetal, la translocación y la liberación por descomposición. Algunas correlaciones del contenido total orgánico y metales del suelo son significativas (como es el caso del As y V) (18).

Las plantas poseen la capacidad de tolerar metales en su interior, remediar o la facilidad para aceptarlos con la colaboración de simbiontes microbianos del suelo (organismos en su rizosfera), que afectan la composición de la comunidad biótica. Las comunidades microbianas junto con la comunidad de plantas terrestres son una respuesta a la contaminación; los microbios como son hongos y bacterias, están alterando el ambiente del suelo a medida que se translocan, absorben o secuestran

y remedian los contaminantes. Las micorrizas tienen un efecto positivo y de protección, permitiendo el desarrollo del bosque, el crecimiento del vegetal; pero la relación entre micorrizas de las plantas y los metales en el suelo varían según sea un arbusto o árbol y la especie (18).

Algunos estudios destacan los efectos tóxicos de los metales sobre los microbios y su metabolismo, otros revelan el incremento de determinadas poblaciones microbianas inducidas por metales. Los cambios en la composición de la comunidad microbiana y su funcionamiento se asocian con la comunidad de plantas sucesionales, edad y composición. Una comunidad forestal parece estar compuesta por un estado de sucesión arrestada. Los estresores abióticos dan lugar a la sucesión, a veces atípica, detenida o a término (18).

Los efectos a largo plazo versus los efectos a corto plazo de los metales pueden ser muy diferentes, especialmente porque el desarrollo de resistencia o cambios en la comunidad microbiana pueden tener lugar durante un largo periodo de tiempo, mientras que la toxicidad por metales en plantas y microbios puede ser típicamente observado en una escala de tiempo mucho más corta. Las concentraciones de Cd, Hg y Pb se creen son oligoelementos necesarios para muchos microbios, pero tóxicos a concentraciones mayores (18).

C. Mecanismos de transformación de metales pesados en los suelos

Los mecanismos que transforman los iones metálicos en el suelo son diversos; en el caso del plomo se ha reportado que es retenido en el suelo por sorción, precipitación, y reacciones de complejación; la pérdida se puede deber a que la planta lo absorbe, o bien se lixivia o volatiliza. Este último mecanismo es compartido en el caso de elementos que tienden a formar compuestos gaseosos como el As, Hg y Se (21). Cuanto más bajo es la concentración del metal en solución y más sitios disponibles para sorción, es más probable que los procesos de sorción/desorción determinen la concentración de la solución del suelo. Sin embargo, el destino de los metales en el ambiente del suelo depende tanto de las propiedades del suelo como de los factores ambientales (22).

C.1. Proceso de sorción/desorción

La retención de iones en la superficie del suelo cargado se da por mecanismos: a) específicos (enlaces químicos) y b) no específicos (adsorción por atracción electrostática) (23). La dinámica porcentual del metal pesado en solución (iones) y en la fase sólida depende tanto de las propiedades del suelo como de la composición de la solución del suelo. El pH del suelo es el factor principal que influye en el proceso de sorción del metal, a mayor pH menor cantidad de cationes disueltos; los aniones inorgánicos (HPO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-}) y orgánico (citrato, iones de ligando oxalato, ácido fúlvico y carbono orgánico disuelto presente en el suelo afecta la concentración del metal pesado en la solución del suelo. Los aniones inorgánicos pueden formar complejos de pares de iones con metal pesado no permitiendo su sorción o incrementar la carga negativa en partículas del suelo, lo que incrementa la sorción de catiónicos metálicos (22).

El pH alto disminuye los cationes metálicos en la fase líquida del suelo. Se incrementan los óxidos de Fe, Al y Mn; quelación con materia orgánica y algo con inorgánica y precipitación de hidróxidos metálicos. Factores como la temperatura y la concentración, la fuerza iónica y pH que controlan la interacción, la naturaleza de las especies metálicas, catión dominante y ligandos inorgánicos y orgánicos de la solución del suelo; todos en suma favorecen la formación de complejos orgánicos y cuando el pH de la solución aumenta, se disocian los radicales orgánicos como: carboxilato, fenólico, alcoholes y carbonilos, aumentando su afinidad por los cationes metálicos (22).

C.2. Precipitación/disolución

La presencia de aniones como SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , OH^- y HPO_4^{2-} determinan un pH alto y alta concentración de residuos pesados; donde los iones metálicos precipitan inmovilizando el metal (24). Este proceso es útil para evitar los lixiviados, retener metales. Los procesos de coprecipitación más oxihidróxidos a pH bajos para sanear suelos contaminados con Pb^{2+} , As (V) de manera más eficaz que los procesos de sorbato/sorbente (22).

Los suelos contaminados pueden ser diluidos o remediarse por procesos físicos, químicos y biológicos. Las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo dependen de los procesos edafogénicos (17).

C.3. Reducción de oxidación

Los metales como As, Cr, Hg y Se son los más comúnmente sometidos a reacciones de óxido-reducción microbiana, lo que afecta su especiación y movilidad. La solubilidad y la movilidad de los metaloides dependen tanto del estado de oxidación como de la forma iónica; tal es el caso del As (III) de sedimentos y suelos que pueden ser oxidados por bacterias a As (V); este estado de oxidación tiene una fuerte afinidad por el suelo inorgánico de manera que queda inmovilizado. También pueden encontrarse presentes arsénico elemental y arsina (H_2As). Las bacterianas de los sedimentos pueden provocar reacciones de reducción y metilación del As y usar el sulfato como aceptor terminal de electrones (22).

En el caso de Cr los microorganismos pueden mejorar la movilización y la biodisponibilidad del Cr al favorecer la oxidación de Cr (III) a Cr (VI). La reducción de Cr (VI) a Cr (III) puede estar mediada por procesos abióticos como lo faculta la disponibilidad de electrones Fe^{2+} y por procesos bióticos, tal es el caso de la presencia de microorganismos en suelos ricos en MO, la que actuaría como donantes de electrones (25). Asimismo, en el caso del Hg, las bacterias particularmente juegan un papel importante en su reducción (22).

C.4. Metilación/Desmetilación

Se produce la metilación de metal a través de productos químicos (abióticos) y procesos biológicos. Este proceso convierte los elementos metálicos del suelo (como ocurre con el As, Hg y Se) en derivados metilados que se eliminan posteriormente de la célula por volatilización. Los principales agentes metilantes microbianos son metilcobalamina (CH_3CoB_{12}) y S-adenosilmetionina (SAM), el primero involucrado en la metilación de Hg y el segundo en la metilación de As y Se. La biometilación se considera el proceso dominante en suelos y ambientes acuáticos. Los microorganismos en los suelos y sedimentos actúan como

metiladores biológicamente activos, Los grupos metilo proceden de la materia orgánica tanto para la metilación biótica como abiótica en suelos y sedimentos. La metilación está controlada por fracciones orgánicas de bajo peso molecular, presencia de ácido fúlvico y alternativa de los aceptores de electrones. El mercurio se metila a través de vías abióticas y bióticas, en esta última la vía dominante se da por bacterias reductoras de sulfato y disimiladoras de hierro (22).

En el caso de As, la biometilación puede darse como productos de la excreción directa por algas o microbios o por la degradación de órganos arsénicos celulares más complejos que salen como compuestos volátiles, ej. las alquilarsinas, que podrían perderse fácilmente en la atmósfera. La biometilación de selenio (los hongos son más activos) ayuda a su excreción y se da en ambientes contaminados. La desmetilación del selenio en sedimentos anóxicos puede conducir a seleniuro y DMSe (de Se VI) que es menos tóxico y se retiene en el sistema; en ambientes aerobios puede darse por un organismo metilotrofo obligado similar a *Methanococcoides methylutens*. Una reacción de desmetilación anaeróbica puede resultar en la formación de H₂Se tóxico (22).

D. Las retroalimentaciones del suelo

Estos procesos son fundamentales para la dinámica relación entre plantas, organismos del suelo y contaminantes metálicos del suelo, conocer las diferentes formas de interacción es importante, ya que la ecología comunitaria y sus mecanismos de interacción y desarrollo pueden ayudar a predecir los mecanismos de interacción. Hay tres tipos de relaciones de retroalimentación: 1) plantas y organismos del suelo, 2) metales del suelo y organismos del suelo y 3) metales y plantas del suelo.

Los **mecanismos de interacción** impulsan la **remediación** de metales y la sucesión de la comunidad, si esta relación se entiende ayudará para recuperar los suelos contaminados con metales. Los diferentes metales interactuarán con plantas y organismos del suelo en muy diferentes formas. También cuenta la variabilidad en la carga de metal y las interacciones de la materia orgánica del suelo (SOM) (18). La composición de la **comunidad microbiana del suelo** puede influir

significativamente en la renovación de enzimas presentes en el suelo; las hidrolasas y transferasas juegan un papel en la descomposición. Los contaminantes metálicos pueden inhibir o activar las enzimas, hecho que debe conocerse para ser evaluado y asegurar un control de la relación entre la composición de la comunidad microbiana y el recambio enzimático. Existe una gran variación de respuesta enzimática frente al mismo contaminante (26), cuando concurren medidas de potencial enzimático con medidas de composición de la planta o comunidad microbiana y caracterización de los metales del suelo; de conocerse los mecanismos de interacción pueden conocerse los resultados (18).

La secuenciación generacional microbiana, vinculada a medición de la actividad enzimática, revelará cambios en la estructura de la comunidad microbiana, eso puede informar sobre el funcionamiento y los ensayos enzimáticos pueden revelar directamente el potencial funcional de la comunidad del suelo. Medidas de actividades enzimáticas asociadas con carbono, fósforo y el ciclo del nitrógeno indicará la facilitación indirecta de producción primaria y puede proporcionar información sobre nutrientes y limitación. La secuenciación de próxima generación puede revelar genes de resistencia y genes que codifican proteínas que contribuyen a resolver la contaminación por metales. Contar con data de largo plazo puede revelar patrones de la sucesión y la dinámica de la comunidad; sin embargo, los estudios revelarán que los organismos beneficiosos favorecen el aumento de la biomasa y/o se detecta la función de la enzima de la planta en los suelos contaminados y no así en los no contaminados (18).

A esto se suman los contaminantes denominados retroalimentadores negativos como son: agentes patógenos, plagas de nemátodos e insectos del suelo que ocasionan cambios en la estructura y diversidad de la comunidad vegetal. También es importante contar con datos de las tendencias a lo largo del tiempo de los gradientes de contaminación, así como identificar el sitio específico, el umbral crítico de estructura y la función ecológica, describir la variación de las comunidades y los factores abióticos para poder desarrollar teorías ecológicas (18).

Los efectos de los metales en el suelo se dan en el tiempo y de diferente magnitud. Es importante identificar los factores que proporcionan información predictiva sobre

la trayectoria de un sitio en particular y de la diversidad de ambientes contaminados que permitan elaborar teorías ecológicas referenciales y así dar una solución a suelos contaminados con metales. En su mayoría a los sitios perturbados o contaminados no se les puede determinar el legado ecológico, por ser de poca data en el tiempo y si los datos con que se cuentan no están bien documentados y tienen un sesgo cultural, de investigación, ya que no están estandarizados los parámetros ecológicos que sirvan para la métrica (18).

E. Detección de la polución en el suelo

Los indicadores de la micro y macrofauna son relevantes para determinar la salud del suelo, ej. las comunidades de nematodos del suelo. Por otro lado, es necesario que la contaminación por metales induzca cambios en el metabolismo microbiano, prueba de ello se ve en que la biomasa no se reduce y por el contrario se da paso a la resistencia del vegetal para hacer frente a la metalo-toxicidad (27).

También se cuenta con una gran variedad de sensores para poder detectar la contaminación que identifican trazas de metales y material orgánico. Hay biosensores electrónicos basados en metales nanoporosos, hechos de óxido metálico/metal y material a base de carbono mesoporoso; el espacio intermedio sintonizable, con actividad electroquímica notable, alta conductividad electrónica y buena biocompatibilidad. Estos sensores metálicos son de rango lineal muy grande, con límites de detección extremadamente bajos, permiten detectar múltiples sustancias orgánicas, iones de Hg, H₂O₂ que luego de usarlos son desechados e ilógicamente pasan a ser contaminantes del medio ambiente (27).

1.2.3. Respuestas de las plantas a la toxicidad por metales pesados

En la **rizosfera** que corresponde a la interfaz suelo-planta se facilitan los procesos físicos y químicos donde se da la respuesta fisiológica de las plantas a los cambios ambientales; presentándose la liberación de exudados y una cascada de cambios químicos, pH, potencial redox, liberación de aniones y transformación de nutrientes. Estos sucesos biológicos se dan por asociación de la planta con microorganismos dándose mecanismos adaptativos que incluye cambios en la longitud de la raíz y el

área afectada por la temperatura, la humedad y el contenido de nutrientes del suelo (22, 28).

Las plantas por supervivencia tienen que mantener la homeostasis general de los metales que les permita alcanzar su máximo potencial genético para el crecimiento, desarrollo y reproducción. La regulación hormonal es altamente compleja, permitiendo a las plantas retener la plasticidad de crecimiento durante el desarrollo y colectivamente, son probablemente, los principales medios por los cuales las plantas responden al estrés abiótico y biótico (19, 29-32).

Las plantas expuestas a suelos contaminados donde los metales se unen a la pared celular o exudados celulares implementan mecanismos de desintoxicación; a fin de conferir tolerancia al estrés por metales pesados y maximizar la productividad del vegetal y minimizar el daño ambiental pueden: a) evitar o reducir su absorción en la raíz restringiendo los iones metálicos al apoplasto, b) inhibir el transporte a larga distancia. De absorberse se dan uno o más mecanismos que involucran cambios moleculares y fisiológicos en respuesta al estrés por metales pesados (19); todos apuntan a evitar la acumulación de metales específicos y pueden darse por: a) exclusión de ciertos metales del ambiente intracelular, b) el transporte del metal, su quelación, y secuestro de iones tóxicos en compartimientos vacuolares donde son almacenados, a fin de que no participen en el mecanismo molecular celular (28).

Las proteínas fitoquelatina y metalotioneína, ricas en cisteína, son ligandos que capturan y secuestran metales pesados, tanto esenciales como no esenciales por quelación que luego se acumulan en las vacuolas (33). Cuando esta opción se agota, las plantas activan mecanismos de respuesta al estrés oxidativo. La respuesta al estrés por metales pesados implica una complicada red de **transducción de señal** que se activa al detectarse la presencia del metal pesado, dándose la síntesis de: a) proteínas relacionadas con el estrés y b) moléculas de señalización como proteínas de choque térmico, hormonas y especies reactivas de oxígeno, y finalmente, c) la activación de la transcripción de genes específicos para contrarrestar el estrés por metales (28).

Las vías de transducción de señal relevantes incluyen: a) el sistema Ca^{2+} -calmodulina, b) hormonas, c) señalización por especies reactivas de oxígeno (ROS) y d) la cascada de fosforilación de proteína quinasas activada por mitógenos (MAPK); todos convergen en activar genes relacionados con el estrés. Diferentes vías de señalización sirven para responder a diferentes metales pesados (34).

Sistema de Ca^{2+} -Calmodulina responde a factores de estrés abiótico como son: temperatura, estrés osmótico, anoxia, perturbación mecánica, exposición tóxica (por Cd, Ni y Pb). El exceso de metales pesados hace que los canales de Ca incorporen mayor cantidad de Ca^{2+} , este ion interactúa dentro de la célula con la calmodulina para propagar la señal y posteriormente para regular genes implicados en el transporte, el metabolismo y tolerancia de metales pesados. Este sistema que responde a exposición tóxica por Ni y Pb afecta la dinámica de absorción en forma contradictoria excluyendo Ni^{2+} y acumulando Pb^{2+} (28).

Las hormonas vegetales además de cumplir un rol fisiológico y de desarrollo, también son importantes para enfrentar el estrés abiótico que afecta el crecimiento y productividad del vegetal. Dependiendo de la especie, hay genes de hormonas que son afectados por la presencia de niveles tóxicos de Cd, Cu, Fe y Zn y que, como mecanismos de defensa y alivio de la toxicidad de metales pesados, elevan los niveles de ácido abscísico, auxina, brasinoesteroide y etileno en las vías de señalización (19). El Cd y Cu estimulan la expresión y actividad de la enzima sintasa, lo hacen incrementando los niveles de 1-aminociclopropano carboxilato (ACC) al inducir la acumulación de ácido jasmónico (JA). La presencia de concentraciones altas de Cd en el suelo, incrementan los niveles de ácido salicílico (SA) en la raíz protegiéndola de la peroxidación lipídica (19, 22, 28, 35).

Las fitohormonas brasinoesteroides (BR), aproximadamente son sesenta y se clasifican según el número de carbonos en su estructura, entre ellos se conocen Brasinolida (BL), 28-homobrassinolide (28-HomoBL) y 24-epibrassinolide (24-EpiBL). Estas fitohormonas en condiciones normales están comprometidas en regular la expansión y alargamiento de las células, fotomorfogénesis, floración, fertilidad masculina, germinación de semillas, arquitectura vegetal, formación de estomas y senescencia en plantas. Pero también responden a la señalización,

mecanismos de defensa y alivio de los efectos tóxicos de los metales; de manera que el contenido total de fitoquelatina bajo estrés por plomo pueden incrementarse (19).

La exposición al estrés metálico provoca la generación de entidades radicalarias del oxígeno (ROS) y la planta activa mecanismos metabólicos complejos de tolerancia que incluye vías antioxidantes. Esto permitiría que la planta continúe con su vida. Se producen enzimas como: superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), peroxidasa (POD), ascorbato peroxidasa (APX), glutatión reductasa (GR) y glutatión sulfotransferasa (GST). Los excesos de ROS y sus productos de reacción que no pueden ser captados por antioxidantes causan estrés oxidativo, lo que afecta a los metabolitos primarios de las plantas. Las actividades de las enzimas antioxidantes también están reguladas por las BR, por lo que, la tolerancia está asociada con una mayor expresión de genes relacionados con funciones antioxidantes (36).

El **ácido abscísico (ABA)** es una fitohormona multifuncional que interviene en muchas etapas del ciclo de vida de la planta incluyendo el desarrollo y latencia de semillas. En las raíces esta vía de señalización regula la respuesta al estrés abiótico (sequías, metales y otros), semillas y otros. Diferentes estudios han demostrado que los niveles de ABA se incrementan en respuesta al estrés por concentraciones altas de metales pesados Cd, Hg, Pb, As, Ni, Cu y Zn permitiendo tolerancia al acumular ROS y Ca^{2+} que como consecuencia activa transitoriamente la proteinquinasa activada por mitógenos (MAP) quinasa. Asimismo, el ácido abscísico participa en la regulación de la fitoquelatina sintasa en tubérculos de papa (37).

La **auxina** participa en la plasticidad, crecimiento y desarrollo de las plantas [ácido indol-3-acético (IAA)] y su respuesta a una diversidad de señales ambientales, como el ajuste fino del manejo del estrés. La interacción entre auxina y la homeostasis y la toxicidad por metales pesados degrada represores transcripcionales AUX/IAA asociados a los factores que responden a la auxina (ARF) inhibiendo la transcripción de genes (19).

El etileno, hormona del crecimiento vegetal, está involucrado en muchos procesos de desarrollo, como la "triple respuesta" en plántulas (abscisión de hojas, maduración de frutos y senescencia). También está involucrado en la respuesta al estrés abiótico demostrado una mayor producción de etileno en plantas expuestas a niveles tóxicos de metales pesados (34, 38).

La acumulación de etileno, sugiere una posible relación entre auxina y etileno; por lo que hay investigaciones que sugieren que la adición de fitohormonas (auxina + selenio) sería útil en fitorremediación. Asimismo, hay estudios donde concentraciones altas de Cd inducen la acumulación de óxido nítrico (NO), que a su vez reprime el transporte de auxina disminuyendo sus niveles en el ápice de la raíz y por ende reduce el tamaño del meristemo de la raíz (39).

Un conjugado de auxina Indole-3-acetyl-aspartate (IAA-Asp) puede modular la actividad de catalasa y peroxidasa, así como inducir la carbonilación de proteínas y disminuir la concentración de peróxido de hidrógeno (40). Las auxinas [IAA o el ácido acético naftaleno (NAA)] pueden promover modificación de las propiedades de la membrana, reduciendo los efectos tóxicos por la exposición a metales pesados (41). El NAA aumenta la retención de metales en las raíces fijándolo a hemicelulosa (42).

El etileno se obtiene en el ciclo de Yang a partir de la metionina y la S-adenosilmetionina sintetasa (ACS); es la enzima limitante de la velocidad de síntesis y junto con la enzima ACC oxidasa (ACO) son fundamentales para formar etileno y el estrés metálico puede expresar los genes codificantes de estas proteínas aumentando la producción de etileno y la reducción del crecimiento y desarrollo de las plantas; sin que esté del todo claro el papel del etileno en la toxicidad por metales (19). Otras sustancias como el ácido giberélico y la citoquinina son claves para mitigar la tensión por metales (42, 43).

1.2.4. Las reacciones de intercambio en el sustrato

A. Las características de reacciones de intercambio catiónico

a) Equivalencia: en las reacciones de intercambio catiónico se verifica el intercambio de equivalencias químicas, es decir, 1meq de uno por 1meq de otro.

b) Reversibilidad: conforme al principio de acción de masas, la dinámica de la relación de concentración de cationes retenidos puede ser modificada cuando cambia la concentración de los iones en solución. Sin embargo, si el pH del sistema cambia, la reacción no será estrictamente reversible. Del mismo modo, si ocurre la fijación de iones como K^+ y/o NH_4^+ , o bien, si se originan polímeros de $Al_2(OH)_3$.

c) Velocidad de reacción: esta magnitud se mide por la cantidad de sustancia que se transforma en la unidad de tiempo y depende de la naturaleza, estado de división y concentración de las sustancias reaccionantes, así como de la temperatura del sistema y la presencia de catalizadores.

d) Límites: el grado de sustitución de un catión por otro, depende tanto de las concentraciones relativas de cationes en la fracción soluble del suelo como de la fuerza de intercambio de dichos cationes.

B. El complejo absorbente

Las partículas coloidales, tanto orgánicas (húmicas) como minerales (arcillosas) forman parte del complejo absorbente del suelo y están saturadas de una forma lábil con H^+ , K^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , etc., las que pueden entrar en intercambio iónico con los cationes disueltos en la solución de suelo. Las micelas coloidales están cubiertas por una capa difusa de cationes absorbidos, adheridos a ella por fuerza menor de manera que pueden intercambiarse con más facilidad por cationes de la solución del suelo (44).

Los suelos ricos en partículas coloidales poseen una alta capacidad de absorción y la capacidad de absorción del suelo se expresa en términos de 1 meq por 100 g de suelo. El máximo poder o capacidad de absorción lo poseen algunos suelos como chernozem y rendzinas, poder que puede ser de 40 a 60 meq por 100 de suelo. Sin embargo, los suelos ácidos lateríticos y podsolicos tienen una baja capacidad de absorción, aproximadamente de 10 a 15 meq en 100 g de suelo (44).

Los suelos arenosos tienen baja capacidad de absorción de cationes, ligeros y pobres en absorción de cationes en suelos arenosos, ligeros y pobres en materia orgánica, generalmente se explica por el bajo contenido de fracciones coloidales.

La capacidad de retención de aniones en la mayoría de los suelos agrícolas es mucho más pequeña que la capacidad de retención de cationes. El intercambio de aniones suele quedar enmascarado por el intercambio catiónico, mucho más extendido en la mayoría de los suelos.

C. Reacción del suelo

En términos de productividad agrícola es importante la reacción del suelo que depende de su estructura, la solubilidad de los minerales, la disponibilidad de nutrimentos, la actividad de los microorganismos y la absorción de iones por parte de las plantas.

El desarrollo de los suelos ácidos es resultado natural del proceso de temporización en las regiones que cuentan con suficiente agua de lluvia para arrastrar, fuera de los horizontes superficiales del suelo, sales solubles (primordialmente de calcio y de magnesio). Contrariamente, cuando la precipitación es escasa y no elimina los productos básicos de la intemperización, se desarrollan suelos alcalinos. Asimismo, algunos suelos contienen cantidades de piedra caliza y otras rocas básicas (44).

Es importante el estudio de las causas, los métodos de determinación y los procedimientos para cambiar la reacción del suelo. Con frecuencia sucede, en la práctica agrícola, que uno de los factores limitantes para obtener la cosecha máxima de los cultivos es la reacción del suelo (pH), el exceso de acidez, la alcalinidad o la salinidad. Por lo que los suelos por su reacción, se dividen en: suelos ácidos, suelos neutros, suelos alcalinos o básicos y suelos halomórficos o salinos. Siendo importante en la reacción del suelo su acidez o su alcalinidad (44).

La acidez o alcalinidad de un suelo depende mucho del equilibrio entre micelas cargadas negativamente y cationes cargados positivamente (sobre todo calcio,

magnesio, potasio y sodio). Estos cationes suelen llamarse bases porque, generalmente, cuando las cargas positivas de aquellas exceden en número a las cargas negativas de las micelas, existen suficientes iones hidroxilo para alcalinizar el sistema. El suelo ácido es cuando la solución es inversa y muchas de las cargas negativas de las micelas se hallan equilibradas por iones H^+ y Al^{3+} . Los suelos arenosos, con baja capacidad de bases de cambio, tienen poca aptitud para retener el calcio absorbido por el complejo absorbente y fácilmente lo ceden a las aguas infiltrantes en los terrenos limosos, y sobre todo arcillosos (44).

La cantidad de cada catión básico presente en el suelo se distribuye en tres partes: a) especies minerales inaccesibles a las plantas, b) cationes intercambiables absorbidos en micelas y utilizables a través del proceso de intercambio catiónico y c) cationes en solución que existen en menor cantidad y son fácilmente utilizados por las plantas.

D. El potencial de hidrógeno - pH del suelo

El pH del suelo depende de diversos factores como son la estación del año, las prácticas de cultivo, el horizonte muestreado, el contenido hídrico en el momento del muestreo, la técnica para determinar el pH, incluyendo los factores que intervienen en la formación del suelo.

Los procesos de lavado eliminan bases del suelo y, por lo tanto, tienden a provocar, con el tiempo, un descenso en el pH. Este proceso es importante en los suelos jóvenes, perdiendo influencia en los seniles, donde los procesos meteorizantes han eliminado la mayor parte de las acillas. Los fertilizantes que contienen azufre o nitrógeno acidifican el suelo, y producen, en pocos años, efectos apreciables. Cuando el pH es demasiado bajo, la aplicación de cal permite subirlo y, por el contrario, en los suelos básicos puede conseguirse un descenso mediante la aplicación de yeso. En casi todos los suelos es posible lograr un descenso de pH mediante la aplicación de azufre que, una vez oxidado por los microorganismos, forma ácido sulfúrico (44).

E. Naturaleza de la acidez del suelo

En la mayoría de los suelos minerales, gran parte de la acidez reside en la fracción de arcilla. En el caso de algunos suelos compuestos de arena y humus, la acidez se debe, sobre todo, al humus. Hay también algunos suelos que contienen una cantidad suficiente de sulfuros generalmente de hierro que por oxidación pueden derivar en una considerable cantidad de ácido sulfúrico. También se hallan presentes, en cantidades mínimas, otros ácidos inorgánicos cuya cantidad varía según la época del año.

Las cargas negativas de los minerales arcillosos se originan, inicialmente, por la sustitución isomórfica en su estructura cristalina, y por la disolución del hidrógeno desde los ángulos de los cristales. Mientras las cargas negativas de la arcilla estén ampliamente satisfechas de iones básicos, el suelo exhibirá escasa acidez, pero, en cuanto los iones básicos se pierdan por lixiviación, o por la utilización de plantas, y sean sustituidos por iones hidrógeno, aumentará entonces la acidez del suelo (44).

Se ha testificado una mayor cantidad de metales pesados en los suelos para evitar el progreso de crecimiento de las plantas, la absorción de nutrientes, procesos fisiológicos y metabólicos. Esto también afecta la clorosis, el daño a las puntas de las raíces, minimizado agua y absorción de nutrientes y deterioro de las enzimas (45). Los metales pesados, similares a otros estresores ecológicos, también fomentan el antioxidante amplificando procesos enzimáticos en plantas.

1.2.5. Los metales en las plantas

En las plantas, los metales pesados como el cadmio, plomo y níquel son muy tóxicos en cantidad relativamente baja. El efecto tóxico de los metales pesados es el producto de la interacción de los cationes con iones de las macromoléculas biológicas. Los metales pueden ser una fuente de disminución en la hidrólisis a saber de, α -amilasa, fosfatasa, ARN y proteínas. Interrumpen las actividades enzimáticas sustituyendo los iones metálicos de las metaloenzimas y evitan diversos desarrollos fisiológicos de las plantas.

Diferentes metales son cruciales para las plantas, mostrando papeles principales en su anabolismo y catabolismo, como cofactores de enzimas para el rendimiento metabólico. Metales como Zn, Fe, Cu, Cr y Co son nutrientes críticos, pero a mayores cantidades se convierten a elementos tóxicos. Las plantas cultivadas en los suelos contaminados con Zn y Cu almacenan una porción abundante de estos metales en las raíces. Se sabe que el cobre es importante, pero también es venenoso para numerosos sistemas biológicos. Es diferente el caso del plomo y cadmio que no tienen efectos favorables reconocidos en las plantas siendo únicamente tóxicos y letales. El nivel umbral de plomo permitido para frutas y frutas pequeñas es 0,10 y 0,20 mg/kg, respectivamente.

A. Los metales bioactivos, redox y no redox

Los metales bioactivos son aquellos que sobre la base de sus propiedades fisicoquímicas se dividen en dos grupos: metales redox tales como Cr, Cu, Mn y Fe, y metales no redox como Zn, Cd, Ni, Hg y Al. Los metales redox pueden generar directamente lesión oxidativa en plantas a través de reacciones de Haber-Weiss y Fenton, que conducen a la producción de ROS, lo que resulta en estrés oxidativo por desequilibrio entre prooxidantes y homeostasis antioxidante. Por el contrario, los metales no redox actúan indirectamente como estresores oxidativos por varios mecanismos, incluido el agotamiento de glutatión; se une a grupos sulfhidrilo de proteínas, inhibiendo enzimas antioxidantes o enzimas productoras de ROS como NADPH oxidasas (46). Por lo tanto, altas concentraciones de contaminantes metálicos afectan a nivel molecular y fisiológicos a las plantas, sin que necesariamente se conozca el mecanismo por el cual ocurre.

Los cationes metálicos esenciales (Co, Cu, Cr, Mn, Zn) se denominan así porque en concentraciones fisiológicas no perjudican el balance hídrico, el crecimiento y desarrollo, ya que los micronutrientes desempeñan un papel importante en el metabolismo del vegetal.

Hierro: representa el 5% de la corteza terrestre ocupando el cuarto lugar de abundancia en el sustrato; sin embargo, está considerado con una biodisponibilidad muy baja para los vegetales en la matriz suelo. Este micronutriente procede de los

minerales primarios del sustrato. 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), siendo el último el más abundante en la corteza terrestre, pero la forma ferrosa es fisiológicamente más importante para las plantas y en general para los seres vivos (47).

Este elemento posee una facilidad para permutar entre sus dos estados de oxidación y establecer enlaces de coordinación estables y solubles que contribuyen a desarrollar múltiples funciones fisiológicas y bioquímicas, que son elementales para la vida; como es el transporte de O_2 que se intercambia por CO_2 en el proceso de respiración. Si bien el suelo es rico en hierro, la forma iónica asimilable en la fracción soluble no está biodisponible para los órganos absorbentes de la planta en las cantidades requeridas. Este elemento es un factor limitante para el crecimiento de las plantas y su insuficiencia se traduce en clorosis, caracterizada por la coloración verde pálido de las hojas en contraste con el verde intenso de las venas.

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 síntesis de la clorofila. La movilización y lixiviación del zinc es mayor en suelos ligeramente ácidos donde compite con otros cationes por los sitios de intercambio (48). El Zn^{2+} es la forma química como la planta puede incorporar el zinc de la solución del suelo. Este estado iónico del zinc está más disponible en sustratos con pH ácido; los suelos alcalinos presentan una deficiencia de este elemento. Sin embargo, como todo exceso afecta a la morfología en este caso de las hojas, donde las clorosis de las hojas tiernas se ven más pequeñas con retardo de crecimiento y desarrollo radicular reducido.

El incremento del zinc en el matiz sólido del suelo es la consecuencia de la labor antropogénica, básicamente minera y por emisión de aguas residuales que alcanzan los sembríos, ya sea por cumplir una función de riego o por contaminación. También llega con los fertilizantes en forma de sal de sulfato de zinc (ZnSO_4) y luego puede transformarse a especies insolubles dependiendo de parámetros edáficos (pH, humedad, nutrientes, composición química, tipo de partículas del sustrato, conductividad eléctrica, cantidad de sales y otros). Y, por

otro lado, el metabolismo microbiano puede contribuir a que la planta incorpore este micronutriente.

Cobre: es un metal esencial y de transición utilizado en los cableados eléctricos por su buena conductividad de la corriente eléctrica y el calor. Es un elemento traza abundante, micronutriente que es fácilmente ligado por enlaces covalentes a la materia orgánica, en cualquiera de sus dos estados de oxidación, Cu^+ y Cu^{2+} . Por esta cualidad reactiva la cantidad de cobre en el suelo es correspondiente a la cantidad de materia orgánica, el pH del medio y de la disposición de agentes complejantes (49).

Los iones de cobre de la fracción soluble del sustrato o sus compuestos solubles son fácilmente absorbidos por las raíces de las plantas. El cobre es requerido en reacciones de óxido-reducción en procesos metabólicos donde se intercambian sus estados de oxidación. También activa varias enzimas o está integrado a algunas de ellas. Por ej. de enzimas que influyen en la fotosíntesis y el metabolismo de los carbohidratos y del nitrógeno. El cloroplasto contiene alrededor de 50% del cobre ligado a la plastocianina, una cuproproteína no enzimática ligada al transporte de este metal (35).

Un exceso tóxico del cobre interfiere la división celular a nivel del ápice y la elongación radicular, y por ende la propia organización del sistema radicular. En suelos con $\text{pH} \geq 6,0$ su disponibilidad disminuye. La minería puede liberar grandes cantidades de cobre activo a los suelos y de allí alcanzar los tejidos de las plantas. En los yacimientos cupríferos se encuentra en forma de óxidos y sulfuros, de donde es extraído por explosiones. También el suelo recibe aportes a través de fertilizantes, fungicidas y pesticidas (19).

Manganeso: es un metal muy común en la corteza terrestre. Bajo la forma de óxido e hidróxido formando concreciones con otros elementos metálicos. Elemento requerido para el crecimiento de las especies vegetales, por lo tanto, es de interés su estudio en la composición química de los suelos. Siendo de interés el Mn^{2+} que es fácilmente absorbido por las raíces de las plantas. Este ion de manganeso se mantiene en equilibrio con las formas de óxidos del elemento en el sustrato.

Participa en la fotólisis del agua y la producción de oxígeno molecular (O_2) al formar parte de la mangano-proteína; también participa en la síntesis proteica y asimilación del amonio. Así como en reacciones metabólicas relevantes como la formación de nitratos a partir de nitrógenos. Como en todos los cationes pH del suelo y el valor del potencial redox son relevantes para que la planta retenga el manganeso. Por su parte, el manganeso es liberado del suelo con pH próximos a 6,0 y se incrementa su solubilidad conforme desciende el pH. El Mn^{2+} puede sufrir procesos de lixiviación con facilidad. Si su concentración es excesiva interfiere con el proceso de fotosíntesis de las plantas y su desarrollo (33).

Cromo: se le encuentra en la mayoría de los suelos, pero su disponibilidad para los vegetales está limitada y no se le atribuye función biológica alguna en las plantas. En forma de cromo (III) es un oligoelemento esencial para el hombre. Sin embargo, el Cr (VI) es nocivo para la salud humana.

Metales no esenciales: son fitotóxicos y zootóxicos y es necesario reducir al mínimo la exposición a estos metales pesados para evitar el estrés oxidativo. Para que represente un riesgo de toxicidad depende de su disponibilidad y el tipo de suelo, su entrada en la cadena alimentaria de acuerdo con la tasa y magnitud de absorción de las plantas, luego por la tasa de transferencia a los animales y el hombre.

Los metales al no sufrir degradación química son difíciles de eliminar de los suelos, por lo que persisten por mucho tiempo. Y si se trata de metales tóxicos introducidos a las matrices ambientales por la mano del hombre, los mecanismos para depurarlas ya sean bióticos o abióticos demandan tiempo y recursos. Si se espera que las plantas extraigan los metales pesados, será con consecuencias para la misma planta y se corre el riesgo que se convierta en un círculo vicioso al ser introducidos a la cadena trófica.

Cadmio: es un metal pesado escaso en la corteza terrestre y no esencial para la biótica dado que no se le conoce función biológica alguna; considerándose tóxicos todas sus especies químicas. Algunos suelos contienen concentraciones

inusualmente altas y procede de rocas ricas en compuestos de cadmio; pero extrañamente, a fines del siglo pasado se comenzó a reportar un incremento preocupante de este metal en el sustrato y en ciertas especies vegetales (50).

El cadmio no tiene ninguna función fisiológica conocida en los vegetales, ni en ningún otro ser vivo, y es notorio que su presencia inusual produce disminución del tamaño de las plantas, relacionado con la especie. Ante el incremento de cadmio es posible la aparición de otras alteraciones morfológicas como atrofia y clorosis, hojas de coloración marrón-rojiza y arrugadas. Si las concentraciones son elevadas se incrementa su movilidad en el vegetal, causando daños en las hojas con intensificación de la clorosis y enrollamiento de las mismas; asimismo, el crecimiento de las raíces y los brotes decrece. La sensibilidad al cadmio varía de acuerdo con el órgano de la planta. Generalmente la sensibilidad de mayor a menor es en: raíces > tallos > hojas > frutas > semillas (51) (36). Los valores tolerables para cultivos agrícolas a nivel internacional (en mg/kg) según Kaabata y Pendias (2004) mencionado por Peláez y col. (2016) es de 0,05 a 0,5 y los valores excesivos o tóxicos están entre 5 a 30 ppm.

Ya de por sí el cadmio (Cd) resulta tóxico, aún a muy bajas concentraciones; ya que cuando se van incrementando sobre todo en los órganos de demanda comestibles, se pone en peligro el rendimiento y la calidad de las cosechas. Algunos estudios han demostrado que las plantas responden al estrés oxidativo liberando enzimas antioxidantes tales como: peroxidasa (POD), catalasa (CAT) y superóxido dismutasa (SOD) (52). Algunos experimentaron agregando brasinoesteroides a cultivos estresados para reducir el daño causado por este metal (53). La respuesta fue evidente, aumentaron la actividad del sistema antioxidante y mejoraron el rendimiento y calidad del fruto (19, 54).

Subproductos industriales de la minería y de fundiciones, han sido liberados con poca o casi ningún tratamiento, deteriorando diferentes ecosistemas. Lo cierto es que, comenzaron a preocupar sus elevadas concentraciones en vegetales que forman parte de la dieta humana. El cadmio tiene una vida media larga por lo que, en un consumo crónico se bioacumula y, además, es biopersistente por su afinidad a la materia orgánica que lo hace perdurable. En exposiciones crónicas aparecen

diversas patologías como difusión renal y enfermedades obstructoras en el pulmón. En el sistema óseo se intercambia por el calcio produciendo osteoporosis.

Plomo: está entre los metales más pesados y es el más abundante en la corteza terrestre. Forma parte de la estructura de las rocas de la corteza terrestre, principalmente como galena, pero carente de valor biológico, para ser vivo alguno. Es omnipresente en las matrices suelo y agua, hábitat innegable de las plantas y dependiendo de la textura del suelo. Tiende a acumularse cerca de la superficie del suelo.

Esto explica porque vegetales con raíces cortas presentan mayor concentración, que aquellos vegetales con raíces profundas. Como los otros cationes metálicos es adsorbido y está disponible para los vegetales sobre todo en suelos de pH bajo. Los valores referenciales a nivel internacional para vegetales (mg/kg) son de 0,2 a 20, con un rango tolerable en cultivos agrícolas 0,05 a 10, tóxico de 30 a 300. El plomo degrada el suelo con tendencia a la disminución de la productividad y desaparición de nichos ecológicos que afectan la fauna. En la especie humana la exposición a niveles elevados afecta procesos bioquímicos y uno de ellos es que afecta la síntesis de la hemoglobina.

El Perú es el primer productor de plomo en América Latina y cuarto a nivel mundial, su extracción explica en parte su incremento en suelos peruanos; además la industria y la minería son también tributarios de la contaminación ambiental (55).

El plomo y el cadmio lideran por ser abundantes y por ser particularmente tóxicos. Es preocupante e inquietante conocer como este incremento se relaciona con una serie de alteraciones de la salud en la especie humana; especialmente con enfermedades cardiovasculares, renales, nerviosas y óseas. Se diagnostican las patologías, pero casi nunca se cuantifican metales para ver si son la causa de la misma. La absorción de plomo ingerido pone en riesgo la salud pública. Algunos efectos crónicos de la intoxicación por plomo son los cólicos, el estreñimiento y anemia (20).

Los alimentos contaminados con metales pesados pueden agotar seriamente algunos nutrientes esenciales en el cuerpo que son más responsables de la disminución de las defensas inmunológicas, retraso del crecimiento intrauterino, deterioro de facultades psicosociales, discapacidades asociadas con la desnutrición y alta prevalencia del tracto gastrointestinal superior de tasas de cáncer (20).

1.2.6. Implicancias de la toxicidad por metales en la salud, ambiente y seguridad alimentaria

Organismos internacionales han puesto su preocupación en la seguridad alimentaria. La contaminación por metales pesados afecta la producción y la calidad de los cultivos y amenaza la salud y la vida de los animales y los seres humanos a través de la cadena alimenticia. Lo más preocupante es que al ser encubierta la toxicidad puede causar efectos a largo plazo e irreversibles. Los suelos son la matriz ambiental más difícil de depurar y la velocidad a la que se acumulan los metales pesados depende de las propiedades fisicoquímicas del suelo y en los cultivos depende de la eficiencia propia de cada especie para detoxificar (47, 56).

Los alimentos contaminados con metales pesados pueden reducir severamente algunos nutrientes vitales en el cuerpo, que son responsables de incapacidades relacionadas con desnutrición. Los vegetales aportan a la dieta micronutrientes y vitaminas, además de metabolitos primarios en la dieta humana que son vitales porque proporcionan los oligoelementos, o elementos menores o traza, esenciales para una buena salud si provienen de una fuente orgánica o vegetal. Los de fuente inorgánica o metálica son tóxicos. Las plantas dependen para su crecimiento de nutrientes que pasan del suelo a la planta y es en las hojas donde se acumulan mayores cantidades de metales pesados (20).

Los metales pesados como cadmio, cobre, plomo, níquel y zinc, ingeridos con los alimentos o el agua y en otros casos aspirados, interfieren con la bioquímica y la fisiología de animales y los seres humanos. La sintomatología es variada y específica de cada metal, a lo cual se suma la concentración del tóxico metálico y la especie química. Además, en el organismo las características toxicocinéticas,

como el tiempo de vida media de estos metales pesados es variada, dependiendo del órgano donde se depositan y en su mayoría, es prolongada, provocando la bioacumulación en órganos del cuerpo donde se almacena, produciendo efectos secundarios molestos (20).

La existencia de metales pesados venenosos en lagos, embalses y aguas de ríos perturba la vida de los nativos, que dependen de estos cuerpos de agua para su suministro regular. El pescado se informa como una de las principales fuentes de proteínas para los humanos que juegan un papel en la reducción del nivel de colesterol en la sangre y ofrecen grasas omega-3 ácidos que minimizan el peligro de accidente cerebrovascular y trastornos relacionados con el corazón (45); sin embargo, pueden ser una fuente de metales pesados, el pescado puede almacenarlo a través de la cadena alimentaria y el agua.

Algunos metales pesados demostraron producir daño a las células germinales en animales de ambos sexos, así como efectos citotóxicos, mutagénicos y cancerosos, disminución de las defensas inmunológicas, retraso en el crecimiento, reducción de las capacidades psicosociales. Muchas veces el contenido de los metales se biomagnifican en las especies vegetales y luego pasan a la cadena trófica y llegan a los seres humanos y su salud.

Así, la exposición continua de cadmio en comestibles y agua da como resultado la acumulación de cadmio en los riñones causando enfermedades renales; un mayor contacto con Cd puede provocar trastornos pulmonares como bronquiolitis, enfisema y alveolitis. El plomo y el cadmio se incluyen entre los metales pesados más abundantes y venenosos; cantidades por encima de lo permitido en los comestibles muchas veces no se han relacionado con la etiología de varios trastornos, particularmente con trastornos cardiovasculares, nerviosos, renales y óseos (20).

El plomo es conocido por los impactos negativos en la salud humana. En los niños, por la nocividad del plomo, se presentan, debilidad y daño en el sistema nervioso central, causa lesiones duraderas en el sistema nervioso centro y periférico. El Pb se almacena en los huesos intercambiándose por el Ca; de manera que más del

90% del plomo reservado en el cuerpo existe en el esqueleto. Además, durante lactancia y embarazo, el plomo pasa de los huesos de la madre a los bebés y fetos amamantados y puede provocar lesiones cerebrales en niños pequeños, En adultos puede incrementar la presión sanguínea (PA), además, es carcinógeno y mutagénico. El plomo a nivel sanguíneo produce una disminución de la producción de hemoglobina y causa anemia, altera el funcionamiento del riñón, sistema reproductivo, articulaciones y sistemas cardiovasculares y causa molestias gastrointestinales como cólicos y estreñimiento.

El zinc es un componente de varias enzimas como son las polimerasas ribonucleicas, anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa y fosfatasa alcalina en humanos. La falta de zinc puede resultar de un consumo nutricional insuficiente, absorción reducida, innecesaria excreción o trastornos hereditarios en el metabolismo del zinc. Mayores concentraciones de Zn a las requeridas puede causar deterioro del crecimiento y la reproducción. Para el caso del cobre en los seres humanos, subconcentraciones séricas, dan como resultado aparición de neutropenia, anemia y trastornos esqueléticos (46).

1.2.7. Vigilancia epidemiológica de factores de riesgo por exposición e intoxicación por metales pesados y metaloides

Los metales pesados son un subgrupo de elementos químicos con potencial efecto tóxico en los seres humanos, como son Pb, Hg, As, Cd, entre otros, y su procedencia, además de natural, se da por origen antropogénico en las matrices ambientales, representando un riesgo para la salud de todos los ecosistemas.

Por lo que la vigilancia por exposición a metales pesados es un evento sujeto a vigilancia epidemiológica y de notificación obligatoria, como lo manda la Norma Técnica de Salud NTS 111-2014-MINSA/DGE - V.01, que explícitamente manda que se haga la *Vigilancia epidemiológica en salud pública de factores de riesgo por exposición e intoxicación por metales pesados y metaloides* con Resolución Ministerial 006- 2015/MINSA, donde están los procesos para la vigilancia y notificación mensual.

La implementación de la vigilancia epidemiológica en el país está dirigida a conocer para luego prevenir y controlar la exposición e intoxicación por metales pesados y metaloides a los peruanos a lo largo del territorio nacional. El espíritu de la norma busca estándares en la metodología de la vigilancia y mantener articulada los sectores comprometidos en la vigilancia epidemiológica en salud pública de factores de riesgo por exposición e intoxicación por metales pesados y metaloides.

1.2.8. Remediación de suelos

Existen varias estrategias de **remediación** entre físicas (reemplazo del suelo), químicas (inmovilización aplicando cal y fosfato) y biológicas o biorremediación *in situ* y *ex situ* utilizando microorganismos rizosféricos o plantas fitorremediadoras, siendo esta última la más prometedora, menos costosa y una práctica agronómica convencional y sin perjuicio para el ambiente.

Clasificación de las técnicas de fitorremediación

Las técnicas de fitorremediación permiten recuperar cuerpos de agua, suelo, aire y sedimentos; se pueden aplicar tanto a contaminantes orgánicos como inorgánicos:

A. Fitoextracción: esta fitotecnología *in situ* es muy prometedora para la recuperación de los suelos contaminados con químicos orgánicos o inorgánicos. Algunas plantas pueden acumular elementos inorgánicos esenciales (Fe, Mn, Zn, Cu, Mg y Mo) y sin función biológica (Cd, Cr, Pb, Co, Ag, Se y Hg), absorbiéndolos del suelo o la atmósfera y concentrados en partes cosechables como la fitomasa. Este proceso se llama fitominería y permite obtener un beneficio económico. Estas especies suelen presentar un sistema radicular pronunciado, gran producción de biomasa, acumular y resistir altas concentraciones de metales en brotes. Este proceso reduce la concentración de metales recuperando suelos contaminados y equilibrando los niveles de estos tóxicos en el interior de la planta en un tiempo definido (1).

B. Fitoestabilización: consiste en que las plantas mejoran las propiedades físicas y químicas del medio, al reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el

entorno. Para ello la planta es capaz de realizar la inmovilización *in situ*. Los contaminantes absorbidos por las raíces son depositados en formas inocuas, de manera que impiden su absorción por otros organismos y la afectación de 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 (1).

C. Fitoimmobilización: es una técnica de contención que 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. 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) (1).

D. Fitovolatilización: es una técnica de contención que consiste en la absorción, metabolismo y transpiración de los contaminantes a través de la planta. Ciertas especies vegetales capturan contaminantes y los transforman para luego expulsarlos por transpiración como especies menos tóxicas a la atmósfera. Se da cuando las plantas en crecimiento absorben agua y diversos tipos de contaminantes, los cuales suelen ser transportados a las hojas y cabe la posibilidad de evaporarse o volatilizarse pasando a la atmósfera. Esta técnica se aplica generalmente para la descontaminación de aguas subterráneas (1).

E. Fitodegradación: consiste en que ciertas especies vegetales asociadas a microorganismos degradan contaminantes orgánicos en productos menos tóxicos o mineralizados hasta dióxido de carbono y agua. Las plantas digieren con ciertas enzimas los contaminantes en los tejidos vegetales en moléculas más simples, sin la concurrencia de microorganismos. Algunos productos de la degradación

catalítica de contaminantes son utilizables para las plantas. Esta técnica es utilizada en el tratamiento de suelos, sedimentos, lodos y aguas subterráneas (1).

F. Rizofiltración: esta técnica amigable con el ambiente consiste en adsorber y absorber los metales pesados contaminantes del medio acuoso a través de la raíz. Las plantas cultivadas en invernaderos, cuando su sistema radicular está bien desarrollado, se introducen en el agua contaminada con metales, para que las raíces absorban y acumulen los tóxicos y cuando las raíces se saturan, las plantas se cosechan para su disposición final. La rizofiltración es una de las opciones que presenta mejor relación de costo-beneficio respecto de otros métodos empleados para el tratamiento de efluentes líquidos (1).

1.3. DEFINICIONES

Oligoelementos en la raza humana: los micronutrientes son esenciales para la vida y los más importantes son dieciséis. Estos elementos forman parte de biomoléculas o actúan como cofactores enzimáticos, aún en muy pequeñas cantidades, de manera que la vida sin ellos no es viable. Su requerimiento varía según el estado fisiológico y el sexo del individuo; algunos de estos elementos químicos como el hierro forman parte de la problemática mundial de salud, ya que el 53% de los fallecimientos de niños menores de cinco años se relacionan con la nutrición deficiente, La anemia por deficiencia de hierro se relaciona con deficiencias en el rendimiento estudiantil y laboral, así como con la mortandad materno (20%) e infantil (12).

Metales pesados: son un subconjunto de elementos metálicos con una densidad relativa alta (supera mínimamente cinco veces la densidad del agua) y un peso atómico alto; su contenido en la corteza terrestre es en bajas concentraciones y en formas no disponibles como minerales, sales, entre otros compuestos. Agrupa a los metales de transición, algunos metaloides, lantánidos y actínidos. Tienen un alto valor económico por su requerimiento en la industria tecnológica; por tanto, son de atractivo minero, pero un problema serio de contaminación de las matrices ambientales atentando contra la abiótica y biótica (1).

Mapa de riesgo: es una representación visual que permite identificar y comparar información de interés. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha manifestado la conveniencia de realizar los mapas de riesgo interactivos de suelos contaminados con metales por encima de los límites establecidos, manifestando que es importante aplicar nanotecnología en el desenvolvimiento de procesos y estrategias para la temprana detección, valoración y remediación de los suelos. Estos mapas deben incluir las especies químicas encontradas, su reactividad química y bioquímica.

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. HIPÓTESIS

H₀: El contenido de metales en la especie vegetal *A. rigidum* y el contenido de metales en el suelo que la sustenta tienen un comportamiento independiente.

H_a: El contenido de metales en la especie vegetal *A. rigidum* y el contenido de metales en el suelo que la sustenta está relacionado.

2.2. VARIABLES

2.2.1. Variable independiente

Metales en el suelo donde habita *A. rigidum* (remocaspi).

2.2.2. Variable dependiente

Metales en órganos de la especie vegetal *A. rigidum* (remocaspi).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. DISEÑO METODOLÓGICO

El tipo de investigación propuesto fue correlacional. Se relacionó las concentraciones de los metales presentes en el suelo con las concentraciones encontradas en los diferentes órganos vegetales muestreados de la especie *A. rigidum* (remocaspi). El diseño fue experimental, con tres repeticiones por cada órgano vegetal analizado, para determinar las concentraciones de los metales en *A. rigidum* (remocaspi) y el suelo que la sustenta en el área de estudio.

3.2. DISEÑO MUESTRAL

La población vegetal estuvo representada por árboles de la especie botánica *A. rigidum* (remocaspi) que crecen en el área de influencia de la presente investigación. La muestra consistió de 2 kilos aproximadamente de sustrato del suelo tomados a una profundidad de 0 a 20 y de 20 a 40 cm, y de muestras de los diferentes órganos vegetales de la especie *A. rigidum* (remocaspi). La georreferenciación se hizo con la ayuda de un equipo de posicionamiento satelital (GPS), en unidades UTM UPS18 M, siendo las coordenadas de la muestra uno (X:0678583, Y: 9501655), muestra dos (X: 0681210.1, Y: 9574924.6) y muestra tres (X: 0681247.5, Y: 9575136.5).

El muestreo fue por conveniencia, tomando en cuenta los transeptos (caminos) por donde transitan los materos (hombres conocedores de las especies del bosque), esto con la finalidad de no crear nuevas entradas que perturben el bosque.

Criterios de selección: se incluyeron en el estudio, árboles adultos en buen estado de conservación. Asimismo, se excluyeron a plantas atacadas por hongos y lianas, así como árboles con hojas marchitas o secas.

3.3. PROCEDIMIENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Se identificaron dentro del área de estudio los lugares donde crece *A. rigidum* (remocaspi).

Se recolectaron las muestras y las excicatas para su identificación en el *Herbarium Amazonense* de la UNAP. Se muestrearon tres individuos con sus respectivos suelos teniendo en cuenta los criterios de selección.

Las muestras georreferenciadas fueron debidamente rotuladas, consignándose lugar y fecha.

Las muestras vegetales fueron acondicionadas: retirándose la tierra, los cuerpos extraños y el material maltratado, luego se dejó secar a temperatura ambiente al resguardo de la luz solar, y cuando estuvieron secas, fueron guardadas en un lugar seco sin exposición a la luz e insectos.

En un crisol se procesó 0,5 g de cada muestra de tierra u órgano vegetal pulverizado (raíz, corteza y hojas) por triplicado, se dejó evaporar la humedad residual en estufa de 110 °C durante tres horas. Transcurrido este tiempo se mineralizó la muestra en mufla a 550 °C x 24 horas, finalmente se extrajeron los metales a analizar por digestión ácida en caliente (tratando con 10 mL de HCl 6 N) y realizando dos lavados con 10 mL de HCl 3N.

Los analitos fueron cuantificados sin tener en cuenta el estado de oxidación del catión, sino que se cuantificó en forma total. La concentración del analito fue determinada por el método de absorción atómica por flama (SpectrAAVarian AA 240), con gas de arrastre aire/acetileno, temperatura de ionización 3000 °C y lámparas de cátodo hueco como señal.

3.4. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

La información fue procesada con el *software* de SPSS versión 24, los datos descriptivos se presentaron en tablas, luego se midió la correlación previa

normalización y homogenización de datos antes de medir la correlación lineal de las muestras de suelo con los diferentes órganos de *A. rigidum* (remocaspi) estudiados. Para interpretar el coeficiente de variabilidad (CV) se tomó en cuenta el siguiente criterio:

$0 \leq CV \leq 0,1$	Variabilidad muy baja
$0,1 < CV \leq 0,25$	Variabilidad baja
$0,25 < CV \leq 0,4$	Variabilidad moderada
$0,4 < CV \leq 0,5$	Variabilidad alta
$CV > 0,5$	Variabilidad muy alta

3.5. CONSIDERACIONES ÉTICAS MEDIOAMBIENTALES

Por los fines científicos del estudio, no se atentó contra los árboles muestreados, ya que retirar muestras de raíz, corteza y hojas de la especie, no conllevan a la destrucción del árbol al momento de la recolección.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Tabla 1. Concentración por triplicado de Fe en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	408	39,9	299,1	
	409,3	40,6	283,2	
	412,4	45,8	290,3	
\bar{x}	409,90	42,10	290,87	247,62
DS	2,26	3,22	7,97	187,68
CV	0,01	0,08	0,03	0,758
Hojas	669,6	---	791,8	
	660,4	---	783,5	
	658,3	---	786,8	
\bar{x}	662,77	---	787,37	725,07
DS	6,01	---	4,18	88,11
CV	0,01	---	0,01	0,122
Corteza	692,6	52,2	60	
	687,3	50,4	65,3	
	688,2	48,7	68,4	
\bar{x}	689,37	50,43	64,57	268,12
DS	2,84	1,75	4,25	364,87
CV	0,004	0,03	0,06	1,360
Suelo de 0 a 20 cm	76,7	69	60,6	
	71,6	63,4	66,1	
	72,8	65,2	63,3	
\bar{x}	73,7	65,87	63,33	67,63
DS	2,67	2,86	2,75	5,40
CV	0,04	0,04	0,04	0,079
Suelo de 20 a 40 cm	220,3	734,6	73,7	
	225,6	723,4	70,3	
	224,8	725,6	68,4	
\bar{x}	223,57	727,87	70,8	340,74
DS	2,86	5,93	2,69	343,85
CV	0,01	0,01	0,04	1,009

Según la tabla 1, referente al contenido de hierro, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una muy baja variabilidad ($<0,1$); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles, según el suelo de donde proceden, tiene una dispersión alta.

Tabla 2. Concentración por triplicado de Zn en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	8,1	4,1	12,4	
	8,5	4,2	11,6	
	8,4	4,3	11,8	
\bar{x}	8,33	4,20	11,93	8,15
DS	0,21	0,1	0,42	3,86
CV	0,02	0,02	0,03	0,474
Hojas	5,6	---	46,6	
	5,3	---	45,3	
	5,2	---	45,5	
\bar{x}	5,37	---	45,80	25,58
DS	0,21	---	0,7	28,58
CV	0,04	---	0,02	1,117
Corteza	5,7	28,6	10,9	
	5,3	27,3	11,3	
	5,5	27	11,2	
\bar{x}	5,50	27,63	11,13	14,75
DS	0,2	0,85	0,21	11,50
CV	0,04	0,03	0,02	0,779
Suelo de 0 a 20 cm	2,4	4,2	8,3	
	2,5	4	8,4	
	2,4	4	8,4	
\bar{x}	2,43	4,07	8,37	4,95
DS	0,06	0,12	0,06	3,06
CV	0,02	0,03	0,01	0,618
Suelo de 20 a 40 cm	3,2	5,9	8,5	
	3,4	5,8	8,6	
	3,5	6	8,5	
\bar{x}	3,37	5,90	8,53	5,93
DS	0,15	0,1	0,06	2,58
CV	0,05	0,02	0,01	0,434

De acuerdo con la tabla 2, referente al contenido de zinc, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una muy baja variabilidad ($<0,1$); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles según el suelo de donde proceden tiene una dispersión alta.

Tabla 3. Concentración por triplicado de Cu en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	4,07	2,06	6,21	
	4	2,2	6	
	4,1	2,2	6	
\bar{x}	4,06	2,15	6,07	4,09
DS	0,05	0,08	0,12	1,96
CV	0,01	0,04	0,02	0,478
Hojas	2,8	---	15,52	
	2,6	---	15,2	
	2,8	---	15,6	
\bar{x}	2,73	---	15,44	9,08
DS	0,12	---	0,21	8,98
CV	0,04	---	0,01	0,989
Corteza	2,84	12,72	5,47	
	2,7	13,4	5,5	
	2,7	13,5	5,4	
\bar{x}	2,75	13,21	5,46	7,14
DS	0,08	0,42	0,05	5,42
CV	0,03	0,08	0,01	0,760
Suelo de 0 a 20 cm	1,18	2,1	4,16	
	1,1	2	4,1	
	1,2	2	4,4	
\bar{x}	1,16	2,03	4,22	2,47
DS	0,05	0,06	0,16	1,57
CV	0,05	0,03	0,04	0,638
Suelo de 20 a 40 cm	1,62	2,93	4,24	
	1,5	2,7	4,3	
	1,5	2,7	3,5	
\bar{x}	1,54	2,78	4,01	2,77
DS	0,07	0,13	0,45	1,23
CV	0,04	0,05	0,11	0,444

De acuerdo con la tabla 3, referente al contenido de cobre, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra, presentó una muy baja variabilidad (<0,1); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles según el suelo de donde proceden tiene una dispersión muy alta.

Tabla 4. Concentración por triplicado de Mn en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	19,2	2,5	19,2	
	18,6	2,1	18,7	
	18,4	2,3	18,6	
\bar{x}	18,73	2,30	18,83	13,29
DS	0,42	0,2	0,32	9,51
CV	0,02	0,09	0,02	0,716
Hojas	1,3	---	62,6	
	1,1	---	60,4	
	1	---	63,8	
\bar{x}	1,13	---	62,27	31,7
DS	0,15	---	1,72	43,23
CV	0,13	---	0,03	1,364
Corteza	14,4	0,9	6,5	
	14	0,8	6,2	
	13,8	0,8	6,1	
\bar{x}	14,07	0,83	6,27	10,17
DS	0,31	0,06	0,21	7,05
CV	0,02	0,07	0,03	0,693
Suelo de 0 a 20 cm	3,9	1,1	2,7	
	3,4	0,9	2,6	
	3,5	0,9	2,6	
\bar{x}	3,60	0,97	2,63	2,4
DS	0,26	0,12	0,06	1,33
CV	0,07	0,12	0,02	0,554
Suelo de 20 a 40 cm	0,73	3	1	
	0,6	2,7	1	
	0,7	2,6	1,1	
\bar{x}	0,68	2,77	1,03	1,49
DS	0,07	0,21	0,06	1,12
CV	0,1	0,08	0,06	0,749

De acuerdo con la tabla 4, referente al contenido de manganeso, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones de cada muestra presentó una muy baja variabilidad ($<0,1$); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles según el suelo de donde proceden tiene una dispersión muy alta.

Tabla 5. Concentración por triplicado de Cr en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	2,2	8,4	1,1	
	1,9	8,3	1	
	2,1	8,2	1	
\bar{x}	2,07	8,30	1,03	3,8
DS	0,15	0,1	0,06	3,932
CV	0,07	0,01	0,06	1,035
Hojas	11	---	20,4	
	11,5	---	19,5	
	11,4	---	19,5	
\bar{x}	11,30	---	19,80	15,6
DS	0,26	---	0,52	6,010
CV	0,02	---	0,03	0,387
Corteza	13,1	4,2	3,1	
	13,4	4	3,3	
	13,4	4,3	3,3	
\bar{x}	13,30	4,17	3,23	6,9
DS	0,17	0,15	0,12	5,562
CV	0,01	0,04	0,04	0,806
Suelo de 0 a 20 cm	5,5	0,9	4	
	5,4	1	3,6	
	5,2	1,1	3,9	
\bar{x}	5,37	1,00	3,83	3,4
DS	0,15	0,1	0,21	2,217
CV	0,03	0,1	0,05	0,652
Suelo de 20 a 40 cm	0,9	4,1	0,9	
	0,8	4,3	0,9	
	0,8	4,2	0,8	
\bar{x}	0,83	4,20	0,87	2,0
DS	0,06	0,1	0,06	1,934
CV	0,07	0,02	0,07	0,984

De acuerdo con la tabla 5, referente al contenido de cromo, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones presentó una muy baja variabilidad ($<0,1$); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles según el suelo de donde proceden tiene una dispersión muy alta.

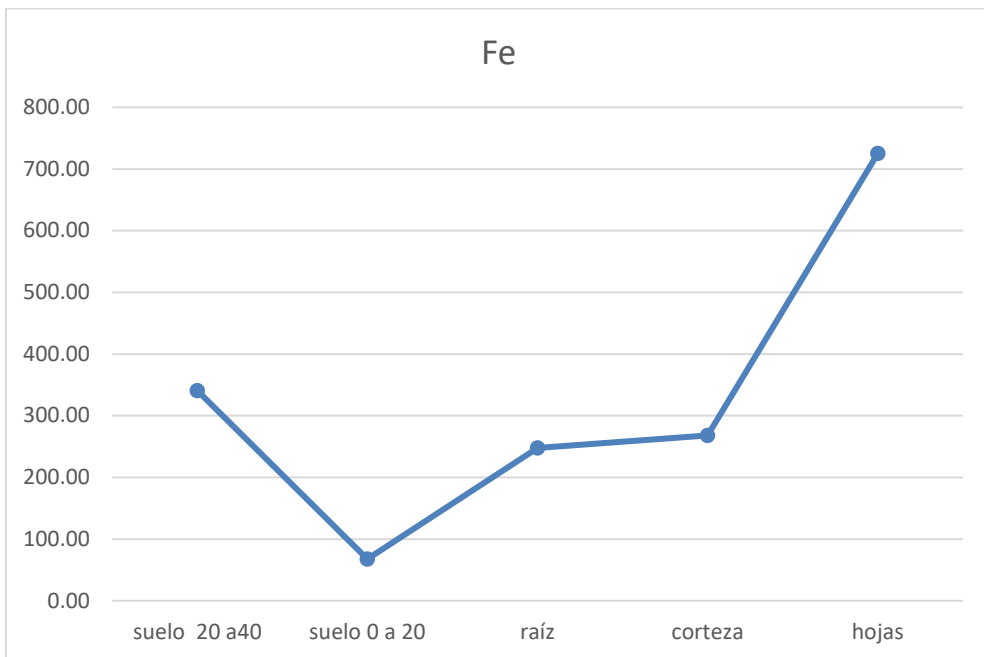


Figura 1. Concentración promedio de hierro de las diferentes muestras tanto de suelo como de algunos órganos de remocaspi.

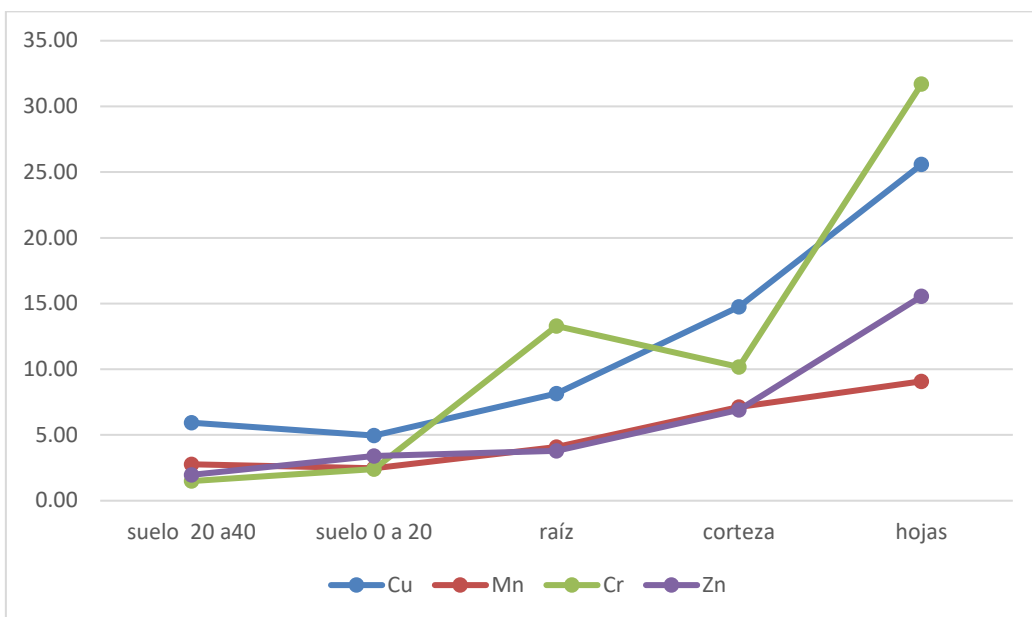


Figura 2. Concentración promedio de cobre, manganeso, cromo y zinc, de las diferentes muestras tanto de suelo como de algunos órganos de remocaspi.

Tabla 6. Concentración por triplicado de As en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	3,6	16,6	8,8	
	3,8	17,2	8	
	3,3	17	8,1	
\bar{x}	3,57	16,93	8,30	9,60
DS	0,25	0,31	0,44	6,77
CV	0,07	0,02	0,05	0,706
Hojas	17,6	---	27,4	
	17,8	---	26	
	17,3	---	25,4	
\bar{x}	17,57	---	26,27	21,92
DS	0,25	---	1,03	6,15
CV	0,01	---	0,04	0,281
Corteza	22,6	13,5	21	
	20,8	14	20	
	20,4	13,5	18,9	
\bar{x}	21,27	13,67	19,97	18,30
DS	1,17	0,29	1,05	4,06
CV	0,06	0,02	0,05	0,222
Suelo de 0 a 20 cm	18,6	14,6	28,3	
	17,4	12,8	25,6	
	16,8	13,3	26,4	
\bar{x}	17,60	13,57	26,77	19,31
DS	0,92	0,93	1,39	6,76
CV	0,05	0,07	0,05	0,350
Suelo de 20 a 40 cm	12,8	14,9	4,1	
	12,4	14,6	3,9	
	12,8	14,5	3,9	
\bar{x}	12,67	14,67	3,97	10,43
DS	0,23	0,21	0,12	5,68
CV	0,02	0,01	0,03	0,545

De acuerdo con la tabla 6, referente al contenido de arsénico, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones presentó una muy baja variabilidad ($<0,1$); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles según el suelo de donde proceden tiene una dispersión muy alta.

Tabla 7. Concentración por triplicado de Pb en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	1,5	24	18	
	1,7	23,5	18,4	
	1,7	23,4	18,5	
\bar{x}	1,63	23,63	18,30	14,52
DS	0,12	0,32	0,26	11,47
CV	0,07	0,01	0,01	0,790
Hojas	1,7	---	2,1	
	1,6	---	1,8	
	1,5	---	1,9	
\bar{x}	1,60	---	1,93	1,76
DS	0,1	---	0,15	0,23
CV	0,06	---	0,08	0,132
Corteza	19,1	1,9	1,6	
	18,7	1,6	1,7	
	18,7	1,7	1,5	
\bar{x}	18,83	1,73	1,60	7,38
DS	0,23	0,15	0,1	9,91
CV	0,01	0,09	0,06	1,342
Suelo de 0 a 20 cm	31,4	13,9	3,8	
	30,3	13,4	3,4	
	30,7	13,5	3,2	
\bar{x}	30,80	13,60	3,47	15,95
DS	0,56	0,26	0,31	13,81
CV	0,02	0,02	0,09	0,866
Suelo de 20 a 40 cm	1,6	40,8	16,2	
	1,8	38,7	15,7	
	1,9	38	15,8	
\bar{x}	1,77	39,17	15,90	18,94
DS	0,15	1,46	0,26	18,88
CV	0,09	0,04	0,02	0,997

De acuerdo con la tabla 7, referente al contenido de plomo, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones presentó una muy baja variabilidad ($<0,1$); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles según el suelo de donde proceden tiene una dispersión muy alta.

Tabla 8. Concentración por triplicado de Cd en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	2,1	2,5	1,7	
	2	2,43	1,57	
	2,06	2,4	1,5	
\bar{x}	2,05	2,44	1,59	2,02
DS	0,05	0,05	0,1	0,42
CV	0,02	0,02	0,06	0,210
Hojas	6,1	---	4,7	
	6,1	---	4,7	
	6,1	---	4,68	
\bar{x}	6,10	---	4,69	5,39
DS	0	---	0,01	0,99
CV	0	---	0	0,185
Corteza	4,7	8,3	3	
	4,7	8,28	2,95	
	4,68	8,28	2,93	
\bar{x}	4,69	8,29	2,96	5,31
DS	0,01	0,01	0,04	2,71
CV	0	0	0,01	0,512
Suelo de 0 a 20 cm	4,5	4,7	1,1	
	4,44	4,65	1,02	
	4,45	4,66	1,01	
\bar{x}	4,46	4,67	1,04	3,39
DS	0,03	0,03	0,05	2,03
CV	0,01	0,01	0,05	0,601
Suelo de 20 a 40 cm	6,2	6,3	3,1	
	6,15	6,25	3	
	6,18	6,25	3,12	
\bar{x}	6,18	6,27	3,07	5,17
DS	0,03	0,03	0,06	1,82
CV	0	0	0,02	0,352

De acuerdo con la tabla 8, referente al contenido de cadmio, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones presentó una muy baja variabilidad ($<0,1$); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles según el suelo de donde proceden tiene una dispersión muy alta.

Tabla 9. Concentración por triplicado de Hg en órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi).

Árbol	1	2	3	
Raíz	0,9	5,2	2,2	
	0,8	6,3	1,9	
	0,8	6,2	1,8	
\bar{x}	0,83	5,90	1,97	2,90
DS	0,06	0,61	0,21	2,66
CV	0,07	0,1	0,11	0,917
Hojas	6,4	---	6,8	
	7,4	---	6,3	
	7,3	---	6,5	
\bar{x}	7,03	---	6,3	6,66
DS	0,55	---	0,25	0,51
CV	0,08	---	0,04	0,077
Corteza	5,6	9,4	5,3	
	5,6	10,8	5,2	
	5,7	10,7	5,3	
\bar{x}	5,63	10,30	5,27	7,06
DS	0,06	0,78	0,06	2,80
CV	0,01	0,08	0,01	0,397
Suelo de 0 a 20 cm	4,6	3,7	7,1	
	4,5	3,6	6,9	
	4,5	3,7	6,8	
\bar{x}	4,53	3,67	6,93	5,04
DS	0,06	0,06	0,15	1,69
CV	0,01	0,02	0,02	0,335
Suelo de 20 a 40 cm	7,2	6,7	1	
	8	7,3	1,2	
	8,2	7,4	1,3	
\bar{x}	7,80	7,13	1,17	5,36
DS	0,53	0,38	0,15	3,65
CV	0,06	0,05	0,13	0,680

De acuerdo con la tabla 9, referente al contenido de mercurio, se aprecia que el coeficiente de variación de las repeticiones presentó una muy baja variabilidad ($<0,1$); en cuanto a los promedios de las muestras por cada órgano, la variabilidad fue muy alta lo que indica que, la media aritmética de los diferentes órganos de los árboles según el suelo de donde proceden tiene una dispersión muy alta.

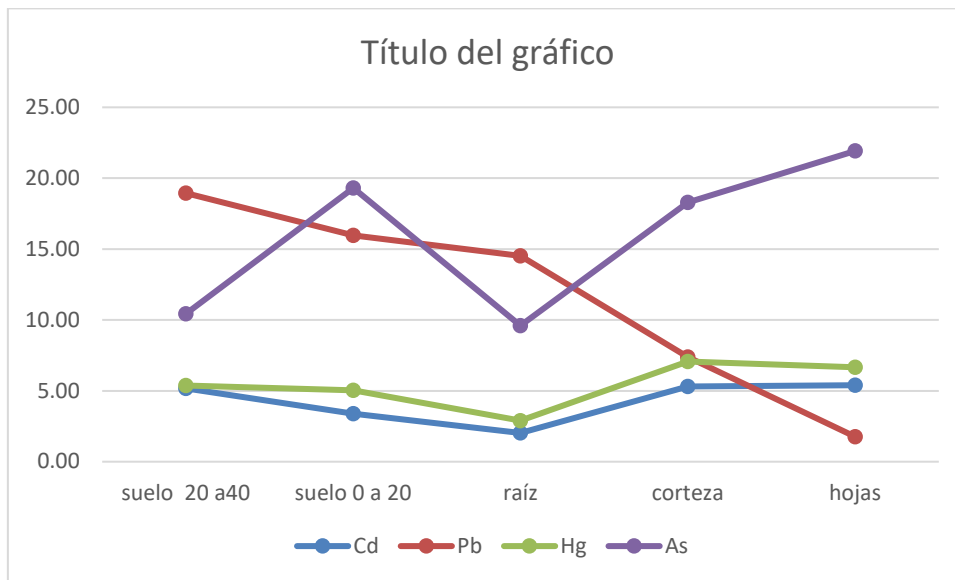


Figura 3. Concentración promedio de cadmio, plomo, mercurio y arsénico, de las diferentes muestras tanto de suelo como de algunos órganos de remocaspi.

Estadística inferencial

Tabla 10. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Metal planta	Estadístico	gl	Sig.
Fe	,869	8	,148
Cu	,805	8	,032
Mn	,735	8	,006
Cr	,915	8	,394
Zn	,760	8	,010
Cd	,922	8	,449
Pb	,711	8	,003
Hg	,937	8	,582
As	,969	8	,892
Mg	,901	8	,298

La prueba de hipótesis para análisis de relación del contenido de metales entre los órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi) y el suelo que la sustenta, que mediante la prueba de Shapiro-Wilk los metales hierro, cromo, cadmio,

mercurio, arsénico y magnesio demostraron tener una tendencia normal; por lo que, se usó la prueba de correlación de Pearson. Y para los metales cobre, manganeso, zinc y plomo que demostraron una distribución no paramétrica se usó el Coeficiente de correlación Rho de Spearman.

La significancia bilateral a las pruebas de correlación de Pearson y Rho de Spearman (tabla 11) corridas para la variable concentración de metales, indican que el contenido de los metales en los órganos de la especie amazónica *A. rigidum* (remocaspi) en relación con el contenido de metales en el suelo que la sustenta tienen un comportamiento independiente.

Tabla 11. Pruebas de correlación.

Metal en la plana	Prueba de correlación	Suelo 0-20	Suelo 20-40
Fe	Correlación de Pearson	0,460	-0,554
	Sig. (bilateral)	0,251	0,154
	N	8	8
Cu	Coeficiente de C. Rho de Spearman	0,630	0,630
	Sig. (bilateral)	0,094	0,094
	N	8	8
Mn	Coeficiente de C. Rho de Spearman	0,277	-0,277
	Sig. (bilateral)	0,506	0,506
	N	8	8
Cr	Correlación de Pearson	0,169	-0,158
	Sig. (bilateral)	0,690	0,709
	N	8	8
Zn	Coeficiente de C. Rho de Spearman	0,630	0,630
	Sig. (bilateral)	0,094	0,094
	N	8	8
Cd	Correlación de Pearson	0,378	0,373
	Sig. (bilateral)	0,356	0,363
	N	8	8
Pb	Coeficiente de C. Rho de Spearman	-0,063	0,342
	Sig. (bilateral)	0,881	0,407

	N	8	8
Hg	Correlación de Pearson	0,367	0,207
	Sig. (bilateral)	0,371	0,622
	N	8	8
As	Correlación de Pearson	-0,225	-0,240
	Sig. (bilateral)	0,593	0,568
	N	8	8

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Las muestras obtenidas en **suelos** de la cuenca del bajo Nanay proceden de suelos extremadamente ácidos, con baja materia orgánica y fertilidad baja, que condicionan la presencia y acumulación de cationes metálicos; según lo reportó Flores (2014), quien analizó muestras de suelos en la misma zona de intervención del presente estudio (57).

Esto se corresponde con los resultados de concentraciones altas de **hierro** sobre todo a una profundidad de 20 a 40 cm (tabla 1); al ser más baja la concentración en las calicatas de 0 a 20 cm podría explicarse por la lixiviación del metal dada la alta pluviosidad que suele presentarse en la selva baja, además la lixiviación es una característica de los suelos ácidos.

Contrariamente en el caso del **zinc** la dispersión en el suelo fue de 2,4 a 8,8 ppm (tabla 2), encontrándose deficiente en dos de los suelos, siendo más alta en el suelo 3. Esta concentración es compatible con lo reportado por Singh (2005), quien refiere que el Zn es el ion más deficiente en la mayoría de suelos del mundo donde los niveles críticos de Zn en el suelo varían entre 0,6 y 2,0 mg de Zn/kg de suelo.

Los valores de **cobre** en las muestras de suelo analizadas fueron muy bajas (tabla 3), en contradicción con las concentraciones de hierro encontradas (tabla 1) las cuales fueron muy altas. Al parecer la mayor concentración del Fe compite en la solubilidad del Cu en la fase líquida del suelo, que le permita mayores concentraciones biodisponibles para el vegetal; esto sin dejar de reconocer que, por los resultados encontrados la concentración de cobre en el suelo fue pobre (tabla 3, figura 2).

Las concentraciones en las muestras de suelo encontradas para el **manganeso** fueron de todos los oligoelementos analizados unas de las más bajas en la matriz suelo (tabla 4, figura 2); lo cual no asegura su biodisponibilidad adecuada para el vegetal. Por los valores encontrados se aprecia que el vegetal lo requiere en mayores cantidades a las encontradas en el suelo; esto dado que, el manganeso

es requerido para múltiples reacciones en relación con la fotosíntesis y procesos metabólicos como el de formación de nitratos a partir de nitrógeno (33).

Con respecto al **chromo**, ion al que no se le conoce actividad biológica alguna en vegetales (58), en el caso específico del suelo se encontró en concentraciones aparentemente bajas (tabla 5, figura 2) que fueron ligeramente superadas en los órganos del vegetal. Según describe Choppala (2015) pudiera ser que la gran cantidad de hierro presente en los suelos analizados, contribuya a la disponibilidad de Cr (VI), pero no así la baja cantidad de materia orgánica (25).

Para el caso del **cadmio** en las diferentes muestras del suelo (tabla 8, figura 3) estuvo por encima de los valores referidos para suelos agrícolas en USA (<0,01 a 2 ppm), reportado por Holmgren y col. según lo menciona Peláez-Peláez (2016).

En tanto los valores de **plomo** se encontraron en cifras superiores a 30 ppm (tabla 7); los mismos que son superiores a los reportados por Peláez-Peláez (2016) en suelo colombiano donde se desarrolló actividad petrolera; cuyos promedios en las calicatas no superaron las 10 ppm, encontrándose la mayor concentración en la muestra tomada a 100 m de distancia a la refinería (fuente contaminante) y a 5 cm de profundidad (4).

En el **mercurio** las diferentes muestras del suelo mostraron valores que superan el VMP ($\leq 5,0$ ppm) (tabla 9); pero con un rango de dispersión amplio.

Los promedios del **arsénico** estuvieron por debajo o alrededor de 20 ppm (tabla 6), solo en el suelo a una profundidad de 0 a 20, que corresponde al árbol tres la concentración fue superior. En todos los metales tóxicos analizados en las muestras de suelo las concentraciones superaron los VMP.

Los resultados de los metales analizados en el suelo muestreado, indican que los cationes están disponibles en la solución del suelo para ser absorbidos por los vegetales (19). Si bien el bosque puede modificar la calidad del suelo por el exceso de hojarasca que asegura el retorno de los metales extraídos al suelo, el cambio del microclima y la biótica del mismo en una dinámica completamente natural del

ecosistema; lo cierto es que, los mecanismos de transformación difieren para cada metal (28) (18). Lo interesante sería retirar la hojarasca de aquellas especies que de alguna manera extraen los metales tóxicos del suelo, a fin de depurar el bosque.

De los **oligoelementos** analizados, Zapata (2019) encontró en suelos piuranos posterior a los veinte años de contaminación por la minería, concentraciones muy altas de Fe en las especies *Salvia corrugate* (1187,7 ppm) (56) y *Baccharis latifolia* (1938,9 ppm) (1); mientras que en el presente estudio se encontraron para la especie *A. rigidum* concentraciones por debajo de 800 ppm (tabla 1) siendo más altas en las muestras procedente del suelo uno y tres; esto teniendo en cuenta que en la Amazonía de Loreto la actividad industrial está casi ausente y la agrícola es baja; se diría que la concentración alta del hierro es de origen geológico, ya que la actividad presente en la Amazonía como son la actividad petrolera y la minería informal no precisamente son aportantes de este metal.

Para el caso del **zinc** las concentraciones en todas las muestras estuvieron en su mayoría inferiores o muy cercanas a 10 ppm (tabla 2), excepto la muestra 3 de hojas y la 2 de corteza, estos niveles podrían deberse a que el Zn es un elemento débilmente retenido en los suelos (47). El **cobre** se encontró en su mayoría concentraciones por debajo o alrededor de 5 ppm salvo la muestra 3 de hojas y la 2 de corteza que casi triplicaron esta concentración (tabla 3). En las concentraciones del **manganeso** se vio mayor variación, con predominio de concentraciones por debajo o alrededor de 10 ppm (tabla 4); hay que tener en cuenta que el Mn^{2+} puede sufrir procesos de lixiviación con facilidad y no quedar disponible para el vegetal (32). Al **chromo**, catión que no se le conoce utilidad para las plantas, pero si para los animales y el ser humano; siendo este metal tóxico para las plantas, se tiene que los niveles en la raíz fueron semejantes a las del suelo, no así en las hojas y corteza uno, donde se encontró concentraciones superiores a 10 ppm (tabla 5).

En suelos de interés para el presente estudio, Apacla y Pezo reportaron para *M. macrocarpa* que las concentraciones de los oligoelementos de mayor a menor fueron $Fe > Zn > Cr > Cu > Mn$ (5). Resultados que, de alguna manera guardan cierta relación con los hallados en el presente estudio, donde las concentraciones

encontradas en forma descendente fueron Fe > Zn > Mn > Cr > Cu (tablas de 1 a la 5, figuras 1 y 2); esta distribución entre los diferentes órganos coincide con lo reportado teóricamente.

En todos los metales esenciales analizados (tabla 1 a 5), la tendencia es que, el contenido del metal supere la concentración del sustrato y sea mayor en las hojas, lugar donde se espera se dé la mayor actividad bioquímica. Es posible que, al ser los cationes cobre, zinc, y manganeso cofactores o constituyentes de ciertas enzimas; ante concentraciones biodisponibles bajas, la planta implemente mecanismos de absorción en contra de la gradiente de concentración (figura 1 y 2). De esta manera, no se vea afectado el crecimiento, ni el balance hídrico y desarrollo de la planta, aspectos fisiológicos que en esta investigación no son materia de estudio, pero el concepto ayuda a explicar porque las concentraciones en los órganos superan a las concentraciones del suelo.

La especie *A. rigidum* (remocspi) al ser una planta superior, puede implementar respuestas hormonales ante concentraciones tóxicas de metales. Teóricamente esta especie al liberar ácido salicílico, ácido abscísico, así como la presencia de ciertas enzimas, está capacitada para destruir entidades radicalarias del oxígeno (ROS). Los oligoelementos como Fe, Mn, Cu y Zn (tablas 1-4) a través de reacciones de Haber-Weiss y Fenton pueden generar ROS ya que son metales redox (19)(53).

Las concentraciones de los elementos no esenciales que no son requeridos por la planta (figura 3), tal es el caso del **arsénico**, tuvieron promedios por debajo o alrededor de 20 ppm, con excepción de las hojas (tabla 6). Para el **plomo** la mitad de las muestras presentaron concentraciones alrededor de 2 ppm y la otra mitad estuvieron cercanas a 20 ppm o duplicaron este valor (tabla 7). Estos resultados difieren de lo reportado por Peláez-Peláez y col. cuyos promedios en los vegetales no superaron las 10 ppm, que reporta que el nivel umbral de plomo permitido para frutas está entre 0,10 a 0,20 mg/kg (4). Asimismo, Apaella y Pezo (2015), en zonas aledañas a las del actual estudio, encontraron concentraciones altas tanto de plomo como cadmio (5), donde se reporta que el plomo no debe ser >0,2 ppm.

En el caso de las concentraciones en los órganos vegetales para el **cadmio**, cuyas especies químicas todas son tóxicas, se encontró en las muestras valores alrededor de 5 ppm (tabla 8). Mientras que Peláez-Peláez y col. (2016) en suelos aledaños a una refinería encontró valores en su mayoría <1 ppm siendo en orden decreciente en la raíz > tallo > hojas, y en el suelo las mayores concentraciones la reportaron a una profundidad de 5 cm y a una distancia de 100 m de la refinería. Es pertinente reconocer que este tóxico metálico tiene una vida media larga, se bioacumula y es biopersistente por su afinidad a la materia orgánica; detalles que cuentan si esta especie es consumida con frecuencia por las personas. Apacla y Pezo (2015) reportaron que las concentraciones de **cadmio** (0,132 ppm) y **plomo** (0,3498 ppm) superaban los valores máximos permisibles. Los valores tolerables para cultivos agrícolas a nivel internacional (en mg/kg) según Kaabata y Pendias (2004) mencionado por Peláez y col. (2016) es de 0,05 a 0,5 y los valores excesivos o tóxicos están entre 5 y 30.

Las concentraciones del **mercurio** estuvieron por debajo o alrededor de 10 ppm (tabla 9). Los metales sin actividad biológica también superaron los VMP. Es de tener en cuenta que los alimentos contaminados con metales pesados pueden reducir severamente algunos nutrientes vitales en el cuerpo, que son responsables de incapacidades relacionadas con desnutrición.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

1. Las concentraciones de los metales cobre, cromo, cadmio, zinc, hierro, manganeso, plomo, mercurio y arsénico en la especie vegetal *A. rigidum* (remocaspi) en relación con el suelo que la sustenta, en la zona de Nina Rumi y Puerto Almendra, tienen un comportamiento independiente.

2. Las concentraciones de los metales cobre, cromo, zinc y manganeso estuvieron en concentraciones biodisponibles para el vegetal; pero el hierro se encontró en concentraciones más elevadas que el resto de los oligoelementos. En el caso del cadmio, plomo, mercurio y arsénico en muestras de suelo de 0 a 20 y de 20 a 40 cm de profundidad donde crece la especie botánica *A. rigidum*, se encontraron altas concentraciones de Pb por encima de los valores máximo permisibles, en orden decreciente las concentraciones fueron el plomo > arsénico > mercurio > cadmio.

3. Las concentraciones de los metales esenciales hierro, manganeso, cobre, zinc y cromo en los órganos del vegetal, en general superaron las concentraciones halladas en el suelo; eso podría indicar que el vegetal los requiere en mayor concentración de las biodisponibles, especialmente en los órganos aéreos. Las concentraciones en forma descendente fueron el Fe > Zn > Mn > Cr > Cu a predominio de las hojas > corteza > raíz. En el caso del cadmio, mercurio y arsénico en general superaron ligeramente la concentración del suelo; a diferencia del plomo cuyas concentraciones fueron inferiores a las del suelo, siendo mayores en la raíz y menores en los órganos aéreos de la especie botánica *A. rigidum*.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

Al conocer que las concentraciones de los diferentes metales analizados se encuentran por encima de los valores máximos permitidos y que si bien la especie sobrevive; se considera que es importante complementar con los estudios de anatomía y fisiología vegetal para ver cuánto afecta al crecimiento y al desarrollo del vegetal.

Por ser una especie de uso medicinal cuyo consumo es esporádico, no tiene mucho peso la cantidad ingerida; sin embargo, es importante conocer la concentración de estos metales en los diferentes tipos de extractos que suelen consumirse, para acercarnos más a la cantidad real que pueda consumirse por toma y tratamiento etnomedicinal.

Por ser un hecho recurrente el encontrar valores elevados de metales que superan el VMP, es conveniente contar con evaluaciones periódicas y la elaboración de mapas de tendencia para poder evaluar la data en el tiempo y su distribución en las diferentes zonas del área de influencia de los estudios de este tipo que viene realizando la Facultad de Farmacia y Bioquímica.

CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

1. Zapata-Valladolid J. Contenido de metales pesados en vegetación alrededor de una mina cerrada en la región Piura. Tesis. Piura: Universidad de Piura, Ingeniería Industrial y de Sistemas; 2019.
2. Ocampo R, Mora G. Las Plantas Medicinales de América Latina como Materia Prima ¿Cuál es, o debería ser su papel?. BLACPMA. 2019; 9(5): pp. 323-325.
3. Oliveira DR, Krettli AU, Aguilar AC, Leitao GG. Evaluación etnofarmacológica de plantas medicinales utilizadas contra malaria por comunidades quilombola de Oriximina, Brasil. *Journal of Ethnopharmacology*. 2015 Jul 10; pp. 424-434.
4. Peláez-Peláez MJ, Peláez-Peláez J, Gómez López. Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de *Brachiaria* en el Magdalena medio colombiano. *Revista.luna.azul*. 2016 julio-diciembre;(43); pp. 2-21.
5. Apacla Pérez RE, Pezo Lloja Alis Fabiola. Evaluación de metales en corteza de *Maytenus macrocarpa* (chuchuhuasi) de uso etnomedicinal en la región Loreto. Tesis. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Farmacia y Bioquímica; 2015.
6. Braz de Oliveira J, Koike L, Machado Reis FdA, Eguchi Y, Endo H, Nakamura V, et al. Preliminary studies on the antibacterial activity of crude extracts and alkaloids from species of *Aspidosperma*. *Pharmaceutical Biology*. 2009; 47(11): pp. 1085-1089.
7. de Paula C, Dolabela MF, Braga de Oliveira A. *Aspidosperma* Species as Sources of Antimalarials. Part III. A Review of Traditional Use and Antimalarial Activity. *Planta Med*. 2014 marzo; (80): pp. 378-386.
8. Ayala F. Taxonomía vegetal Gymnospermae y Angiospermae de la Amazonía peruana. Centro de Estudios Teológicos de la Amazonía Peruana (CETA). Iquitos: 1ra edición; 2003.
9. Pessini GL, Aquino PGV, Bernardo VB, Costa MA, Nakamura CV, Ribeiro EAN, et al. Evaluation of antimicrobial activity of three *Aspidosperma* species. *PHOL*. 2012 abril 30; 1: pp. 112-119.

10. de Almeida V, Silva G, Silva F, Rodrigues Valadares Campana P, Foubert K, Dias Lopes C, et al. *Aspidosperma* species: A review of their chemistry and biological activities. *Journal of Ethnopharmacology*.
11. Coutinho P, Campos Aguiar C, dos Santos A, Lima C, Lima Rocha G, Zani L, et al. *Aspidosperma* (Apocynaceae) plant cytotoxicity and activity towards malaria parasites. Part I: *Aspidosperma nitidum* (Benth) used as a remedy to treat fever and malaria in the Amazon. *memorias.ioc.fiocruz.br*. 2013 diciembre; 108(8): pp. 974-982.
12. Dolabela F, Oliveira SG, Peres JM, Nascimento JM, Póvos MM, Oliveira AB. In vitro antimalarial activity of six *Aspidosperma* species from the state of Minas Gerais (Brazil). *An Acad Bras Cienc*. 2012; 84(4).
13. Avendaño Pezo OO, Sangama Córdova M. Aislamiento e identificación de alcaloides de la corteza del tronco y corteza de la raíz de *remo caspi* *Aspidosperma camporum* (Müll.arg.) utilizado como antiparasitario. Tesis. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana; 2017.
14. Sosa-Amay FE. Evaluación de metales pesados en recursos terapéuticos vegetales de la ciudad de Iquitos. Tesis. Iquitos: Universidad Nacional de Trujillo, Sección de Postgrado en Ingeniería Química; 2016.
15. Vieira MN, Leitao SG, Porto C, Oliveira DR, Correa Pinto S, Braz-Filho R, et al. Application of ph-zone-refining countercurrent chromatography for the separation of indole alkaloids from *Aspidosperma rigidum* Rusby. *Journal of Chromatography A*. 2013;(1319): pp. 166-171.
16. Reina M, Ruiz-Mesía W, Ruiz-Mesía L, Martínez-Díaz R, González-Coloma A. Indole Alkaloids from *Aspidosperma rigidum* and *A. schultesii* and their Antiparasitic Effects. *Z. Naturforsch*. 2011; (66): pp. 225-234.
17. Bautista Zúñiga F, Estrada Medina H. Conservación y manejo de los suelos. *Ciencias* 50. 1998 abril-junio; pp. 50-55.
18. Krumins A, Goodey NM, Gallagher F. Plant-soil interactions in metal contaminated soils. *Soil Biology & Biochemistry*. 2015 octubre 24; pp. 224-231.

19. Bücke-Neto L, Sobral Paiva L, Dorneles Machado R, Arenhart RA, Margis-Pinheiro. Interactions between plant hormones and heavy metals responses. *Genetics and Molecular Biology*. 2017; (40): pp. 373-386.
20. Sardar K, Ali S, Samra H, Afzal S, Fatima S, Bilal Shakoor M, et al. Heavy Metals Contamination and what are the Impacts on Living Organisms. *Greener Journals*. 213; 2(4): pp. 172-179.
21. Bolan NS, Choppala G, Kunhikrishnan A, Park JH, Naidu R. Microbial transformation of trace elements in soils in relation to bioavailability and remediation. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2013; 225(56).
22. Seshadri B, Bolan NS, Naidu R. Rhizosphere-induced heavy metal(loid) transformation in relation to bioavailability and remediation. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*; 15(2).
23. Zenteno M.D.C, de Freitas, R.C.A., Fernandes, R.B.A., Fontes, M.P.F., Jordão, C.P. Sorption of cadmium in some soil amendments for in situ recovery of contaminated soils. *Water Air Soil Pollut*. 2013; 224(8).
24. Ok, Y. S., Oh, S. E., Ahmad, M., Hyun, S., Kim, K. R., Moon, D. H., Lee, S. S., Lim, K. J., Jeon, W.T. and Yang, J. E. Effects of natural and calcined oyster shells on Cd and Pb immobilization in contaminated soils. *Environ. Earth Sci*. 2010.
25. Choppala G, Bolan N, Kunhikrishnan A, Skinner W, Seshadri B. Concomitant reduction and immobilization of chromium in relation to its bioavailability in soils. *Environ Sci Pollut Res*. 2015; 22(9).
26. He LY, Zhang YF, Ma HY, Su LN, Chen ZJ, Wang QY. Characterization of copper-resistant bacteria and assessment of bacterial communities in rhizosphere soils of copper-tolerant plants. *Elsevier*. 2010; 44(6).
27. Zhou Y, Zhang Y, Tang L, Long B, Zeng G. Nanoporous Materials Based Sensors for Pollutant Detection. In *Nanohybrid and Nanoporous Materials for Aquatic Pollution Control*, pp. 265-284.
28. Manara A. Plant Responses to Heavy Metal Toxicity. 2012 abril 22; pp. 27-53.

29. Nishiyama R, Watanabe Y, Fujita Y, Le DT, Kojima M, Werner T, et al. Analysis of Cytokinin Mutants and Regulation of Cytokinin Metabolic Genes Reveals Important Regulatory Roles of Cytokinins in Drought, Salt and Abscisic Acid Responses, and Abscisic Acid Biosynthesis. *American Society of Plant Biologists*. All rights reserved. 2011; 23.
30. Chan Z. Expression profiling of ABA pathway transcripts indicates crosstalk between abiotic and biotic stress responses in *Arabidopsis*. *Elsevier*. 2012 Aug; 100(5).
31. Colebrook EH, Thomas SG, Phillips AL, Hedden. The role of gibberellin signalling in plant responses to abiotic stress. *The Journal of Experimental Biology*. 2014; 217(8).
32. Xu Y-X, Mao J, Chen W, Qian T-T, Liu S-C, Hao W-J, Li C-F and Chen L Identification and expression profiling of the auxin response factors (ARFs) in the tea plant (*Camellia*). *Plant Physiol Biochem*. 2016; 98(10).
33. Clemens S, Kim EJ, Neumann D, Schroeder JI. Tolerance to toxic metals by a gene family of phytochelatin synthases from plants and yeast. *EMBO J*. 1999; 18(12).
34. DalCorso G, Farinati S, Furini A. Regulatory networks of cadmium stress in plants. *Plant Signal Behav*. 2010 Jun; 5(6).
35. Chibuike GU, Obiora SC. Heavy Metal Polluted Soils: Effect on Plants and Bioremediation Methods. *Applied and Environmental Soil Science*. 2014 agosto 12.
36. Xie Y, Hu L, Du , Sun X, Amombo E, Fan J, et al. Effects of Cadmium Exposure on Growth and Metabolic Profile of Bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.]. *PLoS ONE*. 2014 diciembre 29; 9(12).
37. Stroinski A, Chadzinikolau K, Gisewska K, Zielezinska M. ABA or cadmium induced phytochelatin synthesis in potato tubers. *BIOLOGIA PLANTARUM*. 2010; 54(3).
38. Khan M.I.R, Nazir F, Asgher M, Per TS, Khan . Selenium and sulfur influence ethylene formation and alleviate. *Journal of Plant Physiology*. 2015 Sep; 173(9).

39. Yuan H, Huang X. Inhibition of root meristem growth by cadmium involves nitric oxide-mediated repression of auxin accumulation and signalling in Arabidopsis. Wiley Online Library. 2015 Jul.
40. Ostrowski M CAaJA. The auxin conjugate indole-3-acetyl-aspartate affects responses to cadmium and salt stress in *Pisum sativum* L. J Plant Physiol. 2016; 191(9).
41. Hac-Wydro K, Sroka A and Jabło K. The impact of auxins used in assisted phytoextraction of metals from the contaminated environment on the alterations caused by lead (II) ions in the organization of model lipid membranes. Colloids Surfaces B Biointerfaces. 2016; 143(6).
42. Zhu XF, Wang ZW, Dong F, Lei GJ, Shi YZ, Li GX and Zheng. Exogenous auxin alleviates cadmium toxicity in *Arabidopsis thaliana* by stimulating synthesis of hemicellulose 1 and increasing the cadmium fixation capacity of root cell walls. J Hazard Mater. 2013; 263.
43. Masood A, Khan MIR, Fatma M, Asgher M, Per TS and Khan NA. Involvement of ethylene in gibberellic acid-induced sulfur assimilation, photosynthetic responses, and alleviation of cadmium stress in mustard. Plant Physiol Biochem. 2016; 104.
44. Cepeda Dovala JM. Química de suelos. México; 2016.
45. Al-Busaidi M., Yesudhanon P., Al-Mughairi S., Al-Rahbi W.A.K., Al-harthy K.S., Al-Mazrooei N.A. and Al-Habsi S.H. Toxic metals in commercial marine fish in Oman with reference of national and international standards. Chemosphere. 2011; 65.
46. Bielen A, Remans T, Vangronsveld J, Cuypers A. The Influence of Metal Stress on the Availability and Redox State of Ascorbate, and Possible Interference with Its Cellular Functions. Int J Mol Sci. 2013 Mar; 14.
47. Reyes YC, Vergara I, Torres OE, Díaz M, González EE. Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo. 2016 julio-diciembre; 16(2): pp. 68-77.
48. Mejía C. Metales pesados en suelos y plantas: contaminación y fitotoxicidad. Scribd. 2011 Jun.

49. Oroño DI. 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. Tesis. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires; 2011.
50. Kamran S, Shafaqat A, Samra H, Sana A, Muhammad BS, Saima AB, et al. Contaminación por metales pesados y cuáles son los impactos en los organismos vivos. *Greener Journal of Environmental Management and Public Safety*. 2013 Aug; 2(4).
51. Pérez García E, Azcona Cruz I. Los efectos del cadmio en la salud. *Rev Esp Méd Quir*. 2012 julio-setiembre; 17(3): pp. 199-205.
52. Rady MM, Osman A. Response of growth and antioxidant system of heavy metal-contaminated tomato plants to 24-epibrassinolide. *Afr J Agric Res*. 2012; 7.
53. Hasan SA, HSaAA. Brassinosteroids protect photosynthetic machinery against the cadmium induced oxidative stress in two tomato cultivars. *Chemosphere*. 2011; 84.
54. Hayat S, Ali B, Hasan SA and Ahmad A. Brassinosteroid enhanced the level of antioxidants under cadmium stress in *Brassica juncea*. *Environ Exp Bot*. 2007; 60.
55. Yarasca Bejarano JL. Modelo sistémico para evaluar la recuperación de suelos contaminados por plomo en el distrito de Concepción. Tesis. Huancayo: Universidad Nacional del Centro de Perú; 2015.
56. Hadia-e F, Ambreen A. Heavy metal pollution - A mini review. *J Bacteriol Mycol Open Access*. 2018; 6(3): pp. 179-181.
57. Flores Vargas L. Distribución espacial y ubicación fisiográfica de cuatro especies vegetales. Tesis. Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana; 2014.
58. Sharma A, Kapoor D, Shahzad J, Kumar B, Bali A, Jasrotia S, et al. Chromium Bioaccumulation and Its Impacts on Plants: An Overview. *Plants*. 2020; 9(100).

CAPÍTULO IX: ANEXOS

Anexo 1. Certificación de la especie vegetal.



INSTITUCION CIENTIFICA NACIONAL DEPOSITARIA DE MATERIAL BIOLÓGICO
CODIGO DE AUTORTIZACION AUT-ICND-2017-005

CONSTANCIA

El coordinador del Herbarium Amazonense (AMAZ) del CIRNA, de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana

HACE CONSTAR:

Que, la muestra botánica presentado por **ALEX MARCELO OLORTEGUI FARGE**, Bachiller de la Escuela de Formación Profesional de Farmacia y Bioquímica, de la Facultad de Farmacia y Bioquímica, de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana, pertenece a la tesis titulada: "**CONCENTRACIÓN DE METALES DE LA ESPECIE VEGETAL *Aspidosperma rigidum* (remo caspi) Y SU RELACION CON EL SUELO DONDE CRECE EN NINA RUMI Y PUERTO ALMENDRA**", fue verificado y determinado en este Herbarium Amazonense (AMAZ), del Centro de Investigación de Recursos Naturales (CIRNA), de la Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP), como a continuación se indica:

Cod.Amaz	Nombre vulgar	Nombre Científico	Familia
028913	remo caspi	<i>Aspidosperma rigidum</i> Rusby	Apocynaceae

Se expide la presente constancia al interesado, para los fines que estime conveniente.

Atentamente,

Iquitos, 30 de diciembre, 2020

Blgo. Richard J. Huaranca Acostupa M.Sc.
Coordinador de Herbarium AMAZ
CIRNA-UNAP



Anexo 2. Operacionalización de variables.

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Tipo de variable por su naturaleza	Indicador	Escala de medición ppm (VMP)	Valores de las categorías
Independiente: Metales en el suelo	Metales presentes en suelos donde crece <i>Aspidosperma rigidum</i> (remocaspi)	Concentración de metales presentes en calicatas de 0 a 20 cm y de 20 a 40 cm	Cuantitativa	Presencia de metales: Fe, Cu, Cr, Mn, Zn, As, Cd, Pb y Hg	As no >0,1 Cd no >0,02 Pb no >0,2 Hg no >0,01	mg/kg
Dependiente: Metales en la especie vegetal	Metales absorbidos por la especie vegetal <i>Aspidosperma rigidum</i> (remocaspi)	Metales presentes en la raíz, tallo y hojas de <i>Aspidosperma rigidum</i> (remocaspi)	Cuantitativa	Metales absorbidos: Fe, Cu, Cr, Mn, Zn, As, Cd, Pb y Hg	As no >0,1 Cd no >0,02 Pb no >0,2 Hg no >0,01	mg/kg