



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**PROPUESTA DE AGROMINERÍA EN SAN JOSÉ DEL  
PROGRESO, OAXACA.**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA  
GONZÁLEZ SÁNCHEZ MONTSERRAT**



**Ciudad Universitaria, CDMX**

**2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Antonio Huerta Cerdán  
**Vocal:** Faustino Juárez Sánchez  
**Secretario:** Balbina Ojeda Ramírez  
**1er. Suplente:** Juan Manuel De La Rosa Canales  
**2do. Suplente:** Andrés Vela Avitua

**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:**

Laboratorio de radioactividad natural, Instituto de geofísica, UNAM.

**ASESOR DEL TEMA:**

Dr. Faustino Juárez Sánchez

---

**SUSTENTANTE:**

Montserrat González Sánchez

---

# Índice

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>PROBLEMÁTICA.....</b>	<b>11</b>
<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>11</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>11</b>
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
OBJETIVOS PARTICULARES.....	12
<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>14</b>
GENERALIDADES DE ÁREA DE ESTUDIO.....	14
<i>Municipio de San José del Progreso, Oaxaca .....</i>	<i>14</i>
<i>Tipo de suelo, ubicado en esta región .....</i>	<i>16</i>
<i>Variedad de plantas que se adaptan a este tipo de suelo .....</i>	<i>18</i>
METALES PESADOS PRESENTES EN SERES VIVOS .....	18
<i>Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados .....</i>	<i>18</i>
<i>Plantas hiperacumuladoras .....</i>	<i>20</i>
<i>Metales pesados.....</i>	<i>22</i>
<i>Manganeso.....</i>	<i>24</i>
APLICACIONES DEL MANGANESO DENTRO DE LA INDUSTRIA.....	25
<i>Principales fuentes de exposición a los metales pesados .....</i>	<i>26</i>
DAÑOS A LA SALUD HUMANA, POR CONTACTO DIRECTO CON METALES PESADOS.....	27
<i>Efectos del Manganeso sobre la salud .....</i>	<i>29</i>
<i>Efectos ambientales del Manganeso .....</i>	<i>30</i>
MECANISMO DE ABSORCIÓN DE NUTRIENTES DE LAS PLANTAS .....	31
<i>Transporte .....</i>	<i>31</i>
<i>Difusión.....</i>	<i>34</i>
<i>Micorrizas .....</i>	<i>35</i>
AGROMINERÍA .....	36
TIPOS DE PROCESOS PARA REALIZAR LA AGROMINERÍA .....	38
<i>Ceniza.....</i>	<i>38</i>
<i>Fundición .....</i>	<i>38</i>
<i>Lixiviación .....</i>	<i>39</i>
<i>Recuperación de productos.....</i>	<i>39</i>
ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN Y EMISIÓN ATÓMICA .....	42
<i>Espectroscopía de Absorción atómica (AA).....</i>	<i>42</i>

<i>Fuente Luminosa</i> .....	43
<i>Espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado por inducción (ICP-OES, por sus siglas en inglés)</i> .....	45
<i>Curvas de calibración</i> .....	48
<i>Límites de detección y cuantificación</i> .....	50
<b>CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>51</b>
PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL .....	51
<i>Toma de muestras</i> .....	52
<i>Determinación de elementos</i> .....	54
SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL .....	59
<i>Electrolito en plantas</i> .....	59
<b>CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>61</b>
RESULTADOS PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL .....	61
RESULTADOS SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL .....	65
<i>Electrolito en plantas</i> .....	65
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES</b> .....	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>72</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>75</b>
ANEXO A .....	75
<i>Curvas de calibración</i> .....	75
ANEXO B .....	80
<i>Tablas de resultados</i> .....	80
ANEXO C .....	84
<i>Especies recolectadas como buenos candidatos hiperacumuladores de la región de los valles centrales del Estado de Oaxaca</i> .....	84
ANEXO D .....	93
<i>Especies endémicas de la región</i> .....	93
ANEXO E .....	95
<i>Datos estadísticos del programa Surfer</i> .....	95

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de municipio de San José del Progreso, Oaxaca (Censo General de Población y Vivienda 2000). .....	14
Figura 2. Tipo de sembradíos que se desarrollan, según el tipo de suelo de la región (Instituto Nacional de estadística, 2001). .....	16
Figura 3. Área de investigación en Oaxaca. ....	17
Figura 4. Proceso de bioacumulación en humanos (Ecoticias, 2016). .....	19
Figura 5. Representación esquemática del proceso de la acumulación de metales, en plantas desde los suelos (Singh et al., 2003). .....	21
Figura 6. Ubicación de daños en cuerpo humano, según la exposición (Trabajo, 2004). .....	28
Figura 7 Hoja con deficiencia de manganeso (Bloodnick, 2018). .....	31
<i>Figura 8. Interacción de los metales pesados con las raíces de las plantas (Creces, Julio 2001).</i> .....	33
Figura 9. Movimiento de iones metálicos, a través de la raíz de las plantas (García, 2015). .....	34
Figura 10. Raíces colonizadas con micorrizas (J.P. Navarro Aviñó, 2007). .....	36
Figura 11. Proceso de agrominería para níquel (Antony van der Ent, 2015) .....	40
Figura 12. Diagrama de flujo, proceso de agrominería. ....	41
Figura 13 Equipo de absorción atómica (Juárez, 2010). .....	43
Figura 14 Funcionamiento de la producción de átomos libres en el quemador de un equipo de AA (Juárez, 2010). .....	43
Figura 15. Lámpara de descarga sin electrodos (Juárez, 2010) . .....	44
Figura 16. Representación de la disposición de un instrumento ICP-OES típico (Anon., 2013). .....	45
Figura 17. Esquema de la antorcha (Otero Romaní, 2009). .....	47
Figura 18. Proceso que tiene lugar en el plasma. (Otero Romaní, 2009) .....	48
Figura 19. Curva de calibración con estándar externo. ....	49
Figura 20. Diagrama de flujo de la metodología, primera parte experimental .....	51
<i>Figura 21. Valles Centrales de Oaxaca.</i> .....	53
<i>Figura 22. Diferentes puntos en los que se realizó el muestreo.</i> .....	53
Figura 23. Toma de diferentes tipos de muestras, de los Valles centrales de Oaxaca. ....	54

Figura 24. Lavado de muestras, eliminación de material proveniente por vía aérea. ....	55
Figura 25. Secado de la muestra, en estufa Fisher Scientific. ....	56
Figura 26. Trituración completa de toda la muestra (raíz, tallo, hoja y fruto).....	56
Figura 27. Cono de cuarteo.....	57
Figura 28. Mortero de ágata.....	57
Figura 29. Balanza analítica Velab.....	58
Figura 30. Digestión ácida, HCl, HNO <sub>3</sub> y HF de la marca MERCK alta pureza. ....	58
Figura 31. Equipo de Absorción Atómica Varian 50B. ....	58
Figura 32. Metodología de segunda etapa experimental. ....	59
Figura 33. Segunda recolección de muestras en Oaxaca. ....	60
Figura 34. Irrigación de especímenes con estándar multielemental. ....	60
Figura 35. Concentración en ppm de cobalto que se obtuvo en cada una de las muestras.....	61
Figura 36. Concentración en ppm de cobre que se obtuvo en cada una de las muestras.....	61
Figura 37. Concentración en ppm de cromo que se obtuvo en cada una de las muestras.....	62
Figura 38. Concentración en ppm de manganeso que se obtuvo en cada una de las muestras.....	62
Figura 39. Concentración en ppm de níquel que se obtuvo en cada una de las muestras.....	63
Figura 40. Concentración en ppm de plata que se obtuvo en cada una de las muestras.....	63
Figura 41. Concentración en ppm de plomo que se obtuvo en cada una de las muestras.....	64
Figura 42. Concentración en ppm de hierro que se obtuvo en cada una de las muestras.....	64
Figura 43. Captación de manganeso en el espécimen (Anexo C, Figura 58), conforme al número de irrigaciones. ....	65
Figura 44. Captación de manganeso en el espécimen (Anexo C, Figura 59), conforme al número de irrigaciones. ....	65

Figura 46. Captación de manganeso en el espécimen (Anexo C, Figura 62), conforme al número de irrigaciones. ....	66
Figura 47. Mapa de distribución de la contaminación en zonas alrededor de la mina Cuzcatlán.....	67
<i>Figura 48. Niveles de contaminación, en valles centrales de Oaxaca. ....</i>	<i>69</i>
Figura 49. Curva de calibración para cobalto. ....	75
Figura 51. Curva de calibración para cromo.....	76
Figura 52. Curva de calibración para hierro.....	76
Figura 53. Curva de calibración para manganeso. ....	77
Figura 54. Curva de calibración para níquel. ....	77
Figura 55. Curva de calibración para plata.....	78
Figura 57. Curva de calibración para manganeso. ....	79
Figura 58. Acacia farnesiana, especie originaria del municipio de San José del Progreso, Oaxaca.....	85
Figura 59. Bothriocloa hirtifolia. Especie originaria del municipio de San José del Progreso, Oaxaca.....	87
Figura 60. Piper auritum Kunth. Especie originaria del municipio de San José del progreso Oaxaca. ....	89
Figura 61. Asclepias oenotheroides. Especie originaria del municipio de San José del Progreso, Oaxaca. ....	91



## Introducción

En este trabajo se presenta la primera etapa de la propuesta para fomentar la agrominería en México, como es conocido las plantas en general absorben sus nutrientes a través de las raíces, estos nutrientes macro y micro son metales y algunos nitratos y compuestos fosforados.

La fijación de metales en las plantas dependerá del tipo de especie y de la geoquímica del suelo, por lo que es necesario considerar estas características. En el presente estudio se aplican diferentes asignaturas que se imparten en la carrera de Ingeniería Química Metalúrgica, que es esta formación completa, lo que permite desarrollar y/o proponer una alternativa minera ecológica y con responsabilidad social.

La selección de plantas debe ser de acuerdo a un criterio de ser hiperacumulador endémico de metales en la zona y para un metal en específico. A partir de esta hiperacumulación se puede considerar el procedimiento de despojo del metal acumulado, esto, constituye una segunda etapa de la propuesta de agrominería, la cual no es parte de este estudio.

México es un país minero en el cual se extraen diferentes metales ferrosos y no ferrosos, las formas de explotación son las tradicionales y estas no siempre son amables con el entorno natural, por lo que hace que esta actividad sea considerada contaminante y con daño a la naturaleza e incluso al ser humano, por ello es necesario encontrar formas alterna y amigables con el medio ambiente, en este caso la agrominería se propone como una alternativa, cabe mencionar que el termino agrominería es diferente al de fitorremediación, pues en la primera se busca recuperar los metales absorbidos en las plantas, mientras que en fitoremediación solo busca fijar parcialmente algún agente contaminante, inorgánico u orgánico y sin buscar su recuperación.

La agrominería surge inicialmente en Albania, en donde existen suelos llamados ultramáficos, que contienen de manera natural, cien veces más níquel que los suelos

normales y que son, por otra parte, ricos en hierro, cobalto, magnesio, etc. En el año de 1988, con la visita de dos estudiantes albaneses a Francia antes de la caída de la dictadura, llevaron a cabo estudios que les permitieron identificar plantas hiperacumuladoras de níquel.

Los cultivos que mostraron esta hiperacumulación interesan mucho a los agricultores albaneses, que tras la redistribución de tierras que tuvo lugar después de la caída de la dictadura, les permitió a estos nuevos propietarios reagruparse para explotar el níquel y otorgar, por fin, un valor a sus tierras.

En 2012, en Francia se lanzó un importante proyecto, llamado LORVER, financiado por la Región de Lorena para valorizar lo que se conoce como los abandonados: tierras baldías, suelos contaminados, lodos, residuos, etc. Con el fin de utilizar plantas para la extracción de metales pesados y recuperación de estos mismos. (Nancy Lorraine, 2007)

La agrominería es un conjunto de operaciones unitarias que involucra agrosistemas dedicados a la extracción de elementos metálicos estratégicos contenidos en suelos, seguidos de su recuperación y transformación para uso industrial. Este proceso se basa en plantas llamadas "hiperacumuladores" a través de un desarrollo de concentración y separación.

El uso de agrominería como una tecnología de recuperación de metales tiene muchas ventajas:

- La explotación de fuentes secundarias no convencionales, porque son demasiado pobres en metales, contaminados o de bajo depósito. Las plantas ayudan a enfocarse y algunas veces son específicas del elemento objetivo.
- El uso de tierras menos fértiles (con muy baja productividad alimentaria) debido a la presencia de metales. La agrominería puede proporcionar ingresos adicionales para los agricultores.

- La creación de muchos servicios de los ecosistemas, particularmente en zonas abandonadas, con mayor biodiversidad a través de la vegetación y la desintoxicación del suelo.

En México no se ha aplicado este tipo de explotación minera, lo más cercano ha sido aplicar procesos de fitorremediación en suelos contaminados, el proceso de fitorremediación es muy diferente al proceso de agrominería, ya que en el primero solo importa una fijación parcial de los metales y en algunos casos o en la mayoría de ellos es empleado para la limpieza de suelos contaminados por hidrocarburos, mientras que en el proceso de agrominería se promueve la fijación a mayor escala de los metales mediante el empleo de procesos micorrizables y susceptibles de ser despojados para su recuperación generalmente por vía electrolítica.

En este estudio se realizó trabajo de campo y de laboratorio que permite identificar un tipo de planta nativa de la zona de estudio con características hiperacumuladoras para un metal, así como una distribución geoquímica y de esta especie asociada a la del metal asimilado.

## **Problemática**

La explotación minera es altamente contaminante y la disposición de los residuos mineros (jales) constituye un riesgo mayor para las personas y el medio ambiente que las rodea.

En la zona de estudio “San José del Progreso, Oaxaca”, hay una alta actividad agrícola, que es la principal fuente de ingresos de las poblaciones que rodean a la reciente mina Cuzcatlán, que ha generado una polarización social en la población, además de polución, ya que las partículas finas y desechos que se envían a la presa de jales, son arrastradas por las corrientes eólicas y pluviales, mismas que se depositan en los suelos y cultivos, los cuales al ser ingeridos por personas y animales son nocivos y perjudiciales a la salud.

## **Hipótesis**

Un método de extracción-beneficio de metales complementario en minerales y/o desechos mineros, es mediante el uso masivo de plantas que hiperacumulen metales de importancia económica, en este caso Mn. Sí se determina qué especie de cultivo es hiperacumuladora bajo condiciones naturales de la zona, entonces, se puede emplear esta planta en agrominería como un proceso complementario de extracción minera y tratamiento de jales.

## **Objetivos**

Objetivos específicos

- Determinar el grado de asimilación de metales en plantas cercanas a la presa de jales de la mina Cuzcatlán en el municipio de San José del Progreso, Oaxaca. Esta asimilación dependerá de la bioacumulación natural y del tipo de planta que se trate, la cuantificación de esta bioacumulación se llevará a cabo haciendo el análisis químico de los metales presentes por ICP y Absorción Atómica.

## Objetivos particulares

- Fomentar la recuperación de metales de interés, a partir de jales y/o minerales de baja ley empleando plantas perenes, que, a diferencia de una fitorremediación, sean de fácil despojo de la carga metálica y composteo logrando un reaprovechamiento ecológico de las plantas usadas en el proceso, mostrando con ello a los agricultores las ventajas y ganancias que puede generar este proceso.
- Promover en México la agrominería como un método de extracción ecológica de metales. A partir de los resultados obtenidos para esta zona, se propondrá realizar primero un estudio de bioacumulación en plantas y diseñar el protocolo adecuado a cada zona evitando el uso de plantas externas

## Justificación

México posee una variedad de plantas, las cuales, pueden ser empleadas como bioacumuladores específicos, a diferencia de los procesos de fitorremediación, en la agrominería, los cultivos a usar deben ser capaces de absorber en gran cantidad los metales y ser fácilmente digeridos vía química para recuperar la carga metálica, también debe tener períodos cortos de desarrollo, mientras que las empleadas en fitorremediación no buscan esas condiciones ya que solo realizan la fijación de los metales y son retirados del lugar siendo empleado en la mayoría de los casos como forraje, lo que implica un mayor grado de riesgo.

Es, por lo tanto, de gran importancia desarrollar la agrominería ya que en este proceso si se realiza la recuperación de los metales. Para este estudio solo se pretende determinar el grado de fijación de los metales en plantas originarias de la zona, ya que tiene muchas ventajas sobre las plantas que no son perenes, principalmente por las condiciones medio ambientales en las que se desarrollan

Se estudian diferentes tipos de plantas que se encuentran alrededor de la Compañía Minera Cuzcatlán, con el fin de encontrar una especie hiperacumuladora capaz de asimilar metales que permita ser aplicada en la práctica de la agrominería. El principal metal que se busca es aquel, que sea acumulado en gran cantidad biomasa por las plantas y que su extracción sea sencilla y costeable, también se buscan otros metales con el fin de evaluar el nivel de contaminación que se genera en plantas y sembradíos que se encuentran en esta región.

## Capítulo 1. Antecedentes

### Generalidades de área de estudio

#### Municipio de San José del Progreso, Oaxaca

Este municipio se ubica en la parte central del estado de Oaxaca (Figura 1), en la región de los Valles Centrales en las coordenadas 96°41' de longitud oeste y 16°41' de latitud norte, a una altura de 1,580 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con los municipios de Asunción Ocotlán, San Pedro Mártir y Santa Lucía Ocotlán; al sur con Ejutla de Crespo y Coatecas Altas; al oriente con San Jerónimo Taviche; al poniente con San Pedro Apóstol, Magdalena Ocotlán y San Mártir de los Cansecos. Su distancia aproximada a la capital del estado es de 46 kilómetros (Tabla 1) (Censo General de Población y Vivienda, 2000).

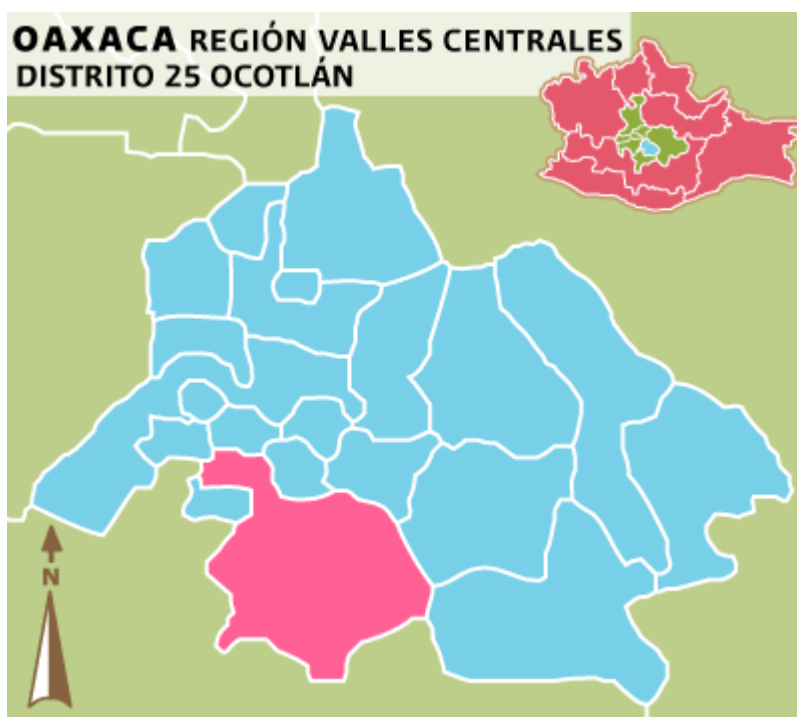


Figura 1. Ubicación de municipio de San José del Progreso, Oaxaca (Censo General de Población y Vivienda 2000).

*Tabla 1 Características principales del municipio de San José del Progreso, Oaxaca (Censo General de Población y Vivienda 2000).*

Orografía	Su superficie es casi en su totalidad montañosa. La cadena montañosa proviene de la cordillera del "Labrador", cuyas ramificaciones atraviesan los terrenos de Taviche y Lachigaya en el distrito de Ejutla.
Hidrografía	Sus afluentes pertenecen a la cuenca del río Atoyac.
Clima	Su clima va desde el templado al semifrío.
Principales ecosistemas	<p><b>Flora</b></p> <p>La vegetación del lugar es escasa, propia del clima templado seco, con una variación tal que se encuentran árboles de clima frío como la casuarina; también existen especies de clima semitropical como mangales, limonares, naranjales; árboles de sombra: sabinos, ahuehuetes, laureles, jacarandas, framboyanes, tulipanes de la India; auates, huamuchiles, magueyes y bejucos.</p> <p>Arbustos: mezquites, casah</p> <p><b>Fauna</b></p> <p>La poca fauna silvestre la comprenden los conejos, los tejones, los armadillos, las tuzas, los zorrillos, los tlacuaches y las ratas de campo; aves como los quebrantahuesos, las palomas, los gorriones, los jilgueros y los chupamirtos.</p> <p><b>Recursos Naturales</b></p> <p>Podemos encontrar minerales metálicos, depósitos de oro, plata, hierro, carbón, plomo, cobre, zinc, antimonio, titanio, asbesto, feldespato, fosforita, cuarzo, yeso, mica, ónix, mármol, caliza y sal.</p>
Características y uso de suelo	El tipo de suelo localizado en el municipio es plano, formado por materiales volcánicos muy delgados, procedentes de la desintegración de rocas madres, las cuales se encuentran a 10 o menos centímetros de profundidad.



## Tipo de suelo, ubicado en esta región

En las últimas décadas, la intensidad en el desarrollo agropecuario del país determinó, que los suelos más fértiles y profundos, con buena estructura y alto contenido de nutrimentos y materia orgánica tuvieran mayor demanda. Entre la mitad de los años 70 y finales de la primera década del siglo XXI, el porcentaje de suelos Luvisoles, Vertisoles y Phaeozems dedicados a las actividades agropecuarias pasó de 35.8% (24.1% dedicado a la agricultura y 11.7% en pastizales para la ganadería) a 44.4% (29.6% en agricultura y 14.8% en pastizales) (figura 2), este tipo de terreno da lugar a la cosecha de diferentes tipos de insumos, tales como, el arroz, frijol, calabaza, pepino y otras variedades de frutas y hortalizas. En menor magnitud, los suelos que se consideran poco aptos para la agricultura o la ganadería (como los Leptosoles, Regosoles y Calcisoles) también han sido utilizados para estos fines. A mitad de la década de los 70, el 9.9% de la superficie nacional de este conjunto de suelos estaba dedicado a las actividades agropecuarias, mientras que a finales de la primera década del siglo XXI, esta cifra se incrementó a 14% (7.4% en agricultura y 6.6% en pastizales) ( Instituto Nacional de estadística, 2001).

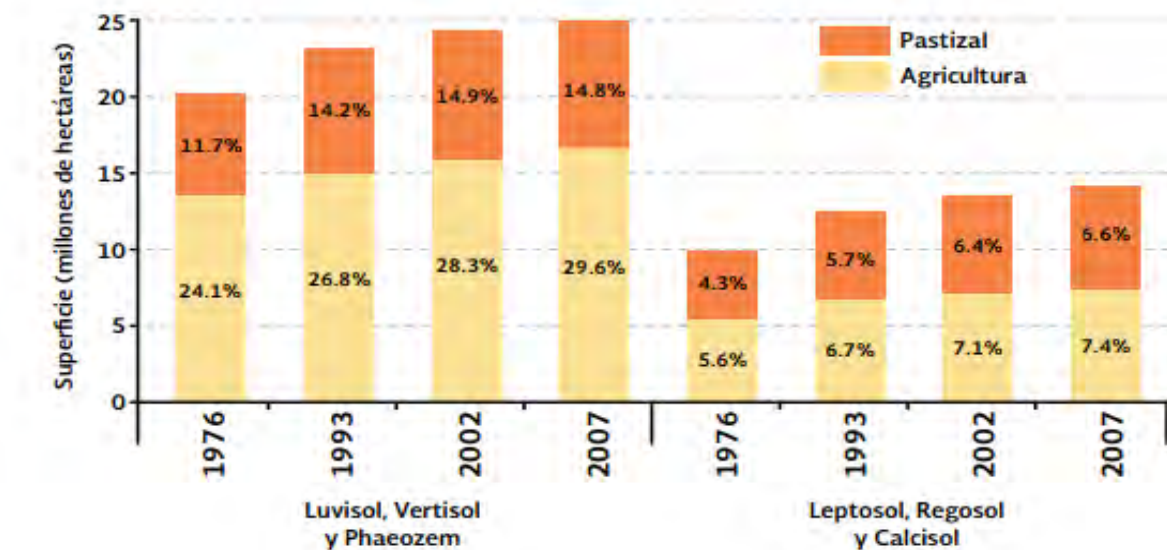


Figura 2. Tipo de sembradíos que se desarrollan, según el tipo de suelo de la región (Instituto Nacional de estadística, 2001).

Los suelos del tipo Luvisol (del latín, lavar), se encuentran sobre una gran variedad de materiales no consolidados, tales como las terrazas aluviales o los depósitos glaciales, eólicos, aluviales y coluviales. Son muy comunes en climas templados y fríos o cálidos húmedos con estacionalidad de lluvia y sequía.

Este tipo tiene lugar en bosques de coníferas y selvas caducifolias del sur del país. Se encuentran dentro de los suelos más fértiles, por lo que su uso agrícola es muy elevado y cubre por lo general, la producción de granos pequeños, forrajes y caña de azúcar. Los Luvisoles se extienden por alrededor de 500 a 600 millones de hectáreas en el mundo (IUSS, 2007). En México, se encuentran en la Sierra Madre Occidental, Guerrero, Oaxaca, Campeche y la Península de Yucatán, entre otras regiones (Instituto Nacional de estadística, 2001).

En la figura 3, se observa el área donde se realizaron los muestreos, en la cual se percibe, un suelo de tipo Luvisol, debido a que se encuentra en zonas con suaves pendientes o llanuras, en un clima en el que existen notablemente definidas las estaciones secas y húmedas. La arcilla de las capas superiores se acumula en las capas inferiores, donde frecuentemente se produce una acumulación de la arcilla y denota un claro enrojecimiento por la acumulación de óxidos de hierro.



*Figura 3. Área de investigación en Oaxaca.*

## **Variedad de plantas que se adaptan a este tipo de suelo**

México es un país de enorme riqueza natural y tiene el espectro más diverso de la flora de cualquier otro país del mundo. De todos los estados de México, Oaxaca cuenta con la más diversa flora y fauna de todos ellos, es hogar de alrededor de 30.000 especies de vegetación que representa el 5 % total de especies de plantas que aguarda el planeta. En su generalidad estas plantas se encuentran en árboles, arbustos, herbáceas, bulbosas, palmeras y trepadoras (Ver anexo D. Especies endémicas de la región).

## **Metales Pesados presentes en seres vivos**

### **Bioacumulación y biomagnificación de metales pesados**

Los metales pesados están considerados como muy peligrosos para los seres vivos en general, pues poseen una gran toxicidad, en parte debido a su elevada tendencia a bioacumularse en diferentes cultivos. La bioacumulación es un aumento de la concentración de un producto químico en un organismo biológico en un cierto plazo, comparada a la concentración del producto químico en el ambiente.

La toxicidad está causada frecuentemente por la imposibilidad del organismo afectado para mantener los niveles necesarios de excreción. El proceso se agrava durante el paso por las distintas cadenas tróficas (es aquella que describe el proceso de transferencia de sustancias nutritivas a través de las diferentes especies de una comunidad biológica), en la figura 4 se observa dos tipos de comportamiento en cadena, relacionado con el ser humano, tanto vía terrestre como acuática; debido a este proceso los niveles de incorporación sufren un fuerte incremento a lo largo de sus sucesivos eslabones, siendo en los superiores donde se hallan los mayores niveles de contaminantes.

A este proceso se le denomina biomagnificación; es decir, muchas toxinas que están diluidas en un medio pueden alcanzar concentraciones dañinas dentro de las células, especialmente a través de la cadena trófica (J.P. Navarro Aviñó, 2007).

Un claro ejemplo de la biomagnificación es el caso de mercurio que hay en el mar Mediterráneo en baja cantidad (como Metilmercurio), producto de desechos industriales. Es efectivamente absorbido por las algas, pero es deficientemente excretado. El zooplancton se alimenta de estas algas, luego el necton y luego grandes peces. Cualquier cosa que se alimente de éstos, tendrá grandes concentraciones de mercurio. De igual manera, especies como peces espada, tiburones o aves, tienen concentraciones más altas que aquellas expuestas directamente a esta sustancia.

Este proceso de contaminación, como en el caso del mercurio en el mar Mediterráneo, se lleva a cabo de igual manera en los suelos que se encuentran contaminados por metales pesados y que se utilizan para siembra de frutas y hortalizas de consumo humano y animal.

Los metales pesados son especies químicas no degradables. Por tal motivo, una vez arrojados al medio ambiente, sólo pueden distribuirse entre los entornos aire - agua - suelo, a veces cambiando su estado de oxidación, inclusive puede llegar a incorporarse a los seres vivos por medio de la cadena alimenticia. La presencia de metales pesados en alimentos constituye un tema de actualidad debido a la contaminación de la cadena trófica involucrada y a los daños que ocasionan a la salud pública (Aura Madero G., 2011). Los metales pesados entran en abastecimiento de agua por medio de residuos industriales y se deposita en corrientes de los lagos, los ríos, etc.



Figura 4. Proceso de bioacumulación en humanos (Ecoticias, 2016).

## **Plantas hiperacumuladoras**

Los hiperacumuladores son plantas naturales capaces de acumular grandes concentraciones de metal contenido en el suelo, estas pueden llegar a acumular excesivas cantidades de metales pesados en su follaje (1% del peso seco de la planta).

Este mecanismo, implica alta tolerancia específica a metales pesados, los cuales están presentes en el suelo en concentraciones que normalmente podrían considerarse fitotóxicas(González Chávez, 2005). Desde la década de 1990, han recibido una atención especial como herramienta para la remediación de suelos contaminados.

Estas plantas pertenecen a diferentes familias, por lo tanto la hiperacumulación es una adquisición independiente que ha surgido varias veces durante la evolución, pero que en todos los casos genera la habilidad de crecer en suelos metalíferos y acumular extraordinarias cantidades de metales pesados en órganos aéreos, a diferencia de los niveles encontrados en la mayoría de especies. Se sabe que las concentraciones de estos elementos químicos pueden ser entre 100 – 1000 veces mayores que las presentes en especies no hiperacumuladoras.

Las tres principales características que describen las plantas hiperacumuladoras son:

- Fuerte aumento de la tasa de absorción de metales pesados.
- Raíces que realizan la translocación más rápidamente.
- Gran habilidad por detoxificar y acumular metales pesados en hojas.

Por lo tanto, las plantas hiperacumuladoras están bien preparadas para la asimilación, translocación a hojas y acumulación de grandes cantidades de metales pesados en vacuolas o en paredes celulares.

Sin embargo, las plantas hiperacumuladoras deben ser endémicas de áreas contaminadas, debido a que las especies vegetales difieren ampliamente, en su

tolerancia a los diferentes tipos de metales pesados, al suelo y clima donde estas crecen.

Las plantas acumuladoras suelen ser autóctonas de un tipo particular de suelo o roca madre y pueden llegar a ser valiosos indicadores geo botánicos para depósitos minerales (A. J. M. Baker, 1989).

Las especies metálicas hiperacumuladoras, se presentan tanto en los trópicos como zonas templadas e incluyen hierbas, arbustos y árboles. Las características de estos taxones y formas de crecimiento distintas de sus únicas propiedades fisiológicas, es su distribución de campo restringido y alta grado de endemismo. Las áreas más fructíferas en la búsqueda de otras especies hiperacumuladoras serán sitios de naturaleza aislada y antigua mineralización (A. J. M. Baker, 1989).

Los metales pesados pueden provenir a través de diferentes vías, pero la principal es por medio de los mantos acuíferos, tales están en contacto directo con las raíces de la planta y presentes como iones, siendo absorbidos y asimilados por la misma, tal se observa en la figura 5.



*Figura 5. Representación esquemática del proceso de la acumulación de metales, en plantas desde los suelos (Singh et al., 2003).*

## Metales pesados

Los metales pesados son aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a  $5 \text{ g/cm}^3$  cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo los metales alcalinos y alcalinotérreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor del 0.01%.

No obstante son los elementos metálicos con peso atómico mayor al del hierro ( $55.85 \text{ g/mol}$ ), en total 59 de estos. Al hacer esta consideración, quedarían fuera numerosos metales con pesos atómicos inferiores que con frecuencia pueden ser metales contaminantes como el Mn ( $54.44 \text{ g/mol}$ ) o el Cr ( $52.01 \text{ g/mol}$ ) y otros elementos contaminantes que no son metales como As, F y P.

Por ello, se considera mejor hablar de elementos traza para los elementos metálicos y no metálicos que pueden constituirse como contaminantes en un suelo, ya que, aunque hay que reconocer que la mayoría de los contaminantes inorgánicos son (metales pesados), a veces, la contaminación del suelo se puede producir por altas concentraciones de otros elementos mayoritarios como Na, Fe o Al.

Junto a ellos hay otros elementos que, aunque son metales ligeros o no metales, se suelen englobar con ellos por orígenes y comportamientos asociados; es este el caso de As, B, Ba y Se. Los metales pesados se clasifican en dos grupos:

- Oligoelementos o micronutrientes. Necesarios en pequeñas cantidades para los organismos, pero tóxicos una vez pasado cierto umbral. Incluyen As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn.
- Sin función biológica conocida. Son altamente tóxicos e incluyen Ba, Cd, Hg, Pb, Sb, Bi (J.P. Navarro Aviñó, 2007).

Los elementos tóxicos, principalmente los metales pesados, se encuentran generalmente en bajas concentraciones en el medio ambiente (observar Tabla 2), aunque, como resultado de actividades antropogénicas, sus niveles se han incrementado. Así, se considera que existe contaminación del suelo cuando la

composición de este se desvía de su composición “normal”, denominado nivel o fondo biogeoquímico. También se define la contaminación del medio como la presencia de algún constituyente, causado por la actividad humana, en una concentración tal que afecta negativamente a su funcionamiento y a los organismos vivos presentes en él. Los metales pesados en el suelo suponen un riesgo por: su lixiviación hacia aguas superficiales y subterráneas, la absorción por las plantas, y finalmente, el paso a la cadena trófica. Cuando se dan niveles muy altos de biodisponibilidad, tanto los elementos esenciales (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo) como los no esenciales (Cd, Pb, Hg, Cr) pueden ser tóxicos (R. O. Carpena, 2007).

*Tabla 2 . Concentraciones elementales (microgramos/gramos) (R. O. Carpena, 2007).*

	Co	Cr	Cu	Pb	Mn	Ni	Zn
Corteza terrestre	25	100	55	13	950	75	70
Granito	3	20	13	48	195	1	45
Basalto	47	114	110	8	1280	76	86
Rocas ultramáficas	150	1600	10	1	1620	2000	50
Suelos no ultramáficos	10	60	20	10	850	40	50
Suelos ultramáficos	250	2500	20	10	1000	2500	40
Vegetación no ultramáficas	1	1	10	10	80	2	100
Vegetación ultramáficas	10	10	10	10	100	80	100



## Manganeso

Elemento químico, de número atómico 25 y peso atómico 54.938 g/mol. Es uno de los metales de transición del primer periodo largo de la tabla periódica; se encuentra entre el cromo y el hierro. Tiene propiedades en común con ambos metales. Aunque poco conocido o usado en su forma pura, reviste gran importancia práctica en la fabricación de acero.

El manganeso es un metal bastante reactivo. Aunque el metal sólido reacciona lentamente, el polvo metálico reacciona con facilidad y en algunos casos, muy vigorosamente. Cuando se calienta en presencia de aire u oxígeno, el manganeso en polvo forma un óxido rojo,  $Mn_3O_4$ . Con agua a temperatura ambiente se forman hidrógeno e hidróxido de manganeso (II),  $Mn(OH)_2$ . En el caso de ácidos, y a causa de que el manganeso es un metal reactivo, se libera hidrógeno y se forma una sal de manganeso (II). El manganeso reacciona a temperaturas elevadas con los halógenos, azufre, nitrógeno, carbono, silicio, fósforo y boro.

En sus muchos compuestos, presenta estados de oxidación de 1+ hasta de 7+. Los estados de oxidación más comunes son 2+, 4+ y 7+. Todos los compuestos, excepto los que contienen Mn II, son intensamente coloridos. Por ejemplo, el permanganato de potasio,  $KMnO_4$ , produce soluciones acuosas que son de color rojo púrpura; el manganato de potasio,  $K_2MnO_4$ , produce soluciones de color verde intenso. Los compuestos de manganeso tienen muchas aplicaciones en la industria.

El dióxido de manganeso se usa como un agente desecante o catalizador en pinturas y barnices y como decolorante en la fabricación de vidrio y en pilas secas. El permanganato de potasio se emplea como blanqueador para decoloración de aceites y como un agente oxidante en química analítica y preparativa (Emsley, 2001).

## **Aplicaciones del manganeso dentro de la industria**

El Mn es el cuarto metal más utilizado en el mundo, seguido del Al, Cu y Fe. Tiene una amplia gama de aplicaciones en diferentes tipos de industrias, aunque la principal es en el área de la siderurgia puesto que es un elemento crítico para la fabricación del acero crudo, el 90% del Mn que se extrae es utilizado con este fin. En diferentes usos al ya mencionado anteriormente, este se encuentra aleado con otros elementos para aplicaciones en:

- El estaño aleado con manganeso, es una aleación resistente a la corrosión del agua de mar y que se utiliza en la fabricación de hélices de barcos y torpedos.
- El cobre aleado con manganeso es utilizado en forma de cables para mediciones eléctricas de alta precisión, dado que su conductividad eléctrica apenas varía con la temperatura.
- En el acero, el manganeso mejora las cualidades de laminación y forjado, rigidez, resistencia, tenacidad, dureza, robustez y resistencia al desgaste.
- Aleado con calcio y níquel se utiliza en la fabricación de resistencias invariables con la temperatura.
- El dióxido de manganeso se usa como despolarizador de pilas secas, como decolorante del vidrio de color verde debido a la presencia de hierro, agente desecante, catalizador en la fabricación de pinturas y barnices y para la producción de cloro y de oxígeno.
- El permanganato de potasio se utiliza como blanqueador para la decoloración de aceites, es un fuerte agente oxidante, utilizado en química analítica y en medicina.

## Principales fuentes de exposición a los metales pesados

Los metales pesados en un pequeño grado se pueden incorporar a organismos vivos (plantas y animales) por vía del alimento y lo pueden hacer a través del agua y el aire como medios de translocación y dependiendo de su movilidad en dichos medios.

Como elementos traza, algunos metales pesados [por ejemplo, cobre (Cu), selenio (Se), zinc (Zn)] son esenciales para mantener un correcto metabolismo en los seres vivos y en particular en el cuerpo humano. Sin embargo, en concentraciones más altas pueden conducir al envenenamiento. La intoxicación por contacto o ingesta de metales pesados podría resultar, por ejemplo, de la contaminación del agua potable (tuberías de plomo), de las altas concentraciones de estos elementos en el aire, contaminan a los productos cerca de las fuentes de emisión, dando así entrada al envenenamiento vía la cadena alimenticia.

Los metales pesados pueden incorporarse a un sistema de abastecimiento de agua por medio de residuos industriales que son vertidos sin previos tratamientos, los que posteriormente se depositan en lagos, ríos y distintos sistemas acuíferos, por medio de este suceso pasan a las plantas que generalmente son el primer paso para la entrada de estos elementos en la cadena alimentaria.

La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta (Prieto Méndez, et al., 2009).

Los metales pesados presentes en los suelos no se comportan como elementos estáticamente inalterables, sino que siguen unas pautas de movilidad generales. La dinámica de los metales pesados en el suelo puede clasificarse resumidamente en cuatro vías (J.P. Navarro Aviñó, 2007):

- Movilización a las aguas superficiales o subterráneas.
- Transferencia a la atmósfera por volatilización.

- Absorción por las plantas e incorporación a las cadenas tróficas.
- Retención de metales pesados en el suelo de distintas maneras: disueltos o fijados, retenidos por adsorción, complejación y precipitación.

### **Daños a la salud humana, por contacto directo con metales pesados**

En general, la exposición a metales pesados a lo largo del tiempo está relacionada con varios tipos de cáncer, problemas en el desarrollo de fetos y niños, artritis, enfermedades cardiovasculares, dolencias renales, etc. En la Figura 6 se observa la afectación localizada que se puede llegar a obtener, según la exposición a diferentes metales pesados. A continuación, se indican los problemas más comunes causados por exposición a este tipo de elementos que se encuentran en mayor abundancia en la tierra:

- **Plomo:** afecta al sistema nervioso, está asociado a anemia, esclerosis, fatiga y a cáncer de riñón.
- **Mercurio:** asociado a alteraciones neurológicas, autismo, depresión, problemas del aparato respiratorio.
- **Arsénico:** está asociado a enfermedades vasculares, bronquitis, cáncer de esófago, de pulmón, laringe y vejiga, produce hepatotoxicidad. No es exactamente un metal, pero es un contaminante muy peligroso.
- **Berilio:** asociado a cáncer de pulmón y a la irritación de las mucosas y la piel
- **Cromo:** este metal pesado está asociado a cáncer de pulmón, hepatotoxicidad y nefrotoxicidad.
- **Cadmio:** está asociado a enfisema, cáncer de próstata, bronquitis, infertilidad, enfermedades vasculares, alteraciones neurológicas y toxicidad en riñones.
- **Níquel:** la exposición a largo plazo puede producir dolencias cardíacas, irritación de la piel y daños en el hígado.
- **Cobre:** causa daño en el hígado, en los riñones, está asociado a anemia y a irritaciones del intestino delgado e intestino grueso.

- **Manganeso:** daña el páncreas, el hígado, el aparato respiratorio, los riñones, el sistema nervioso central y está asociado al Parkinson.
- **Estaño:** asociado a dolor de cabeza, irritación de mucosas y piel, daños en el sistema inmunológico, depresión, trastorno del sueño y daños hepáticos.

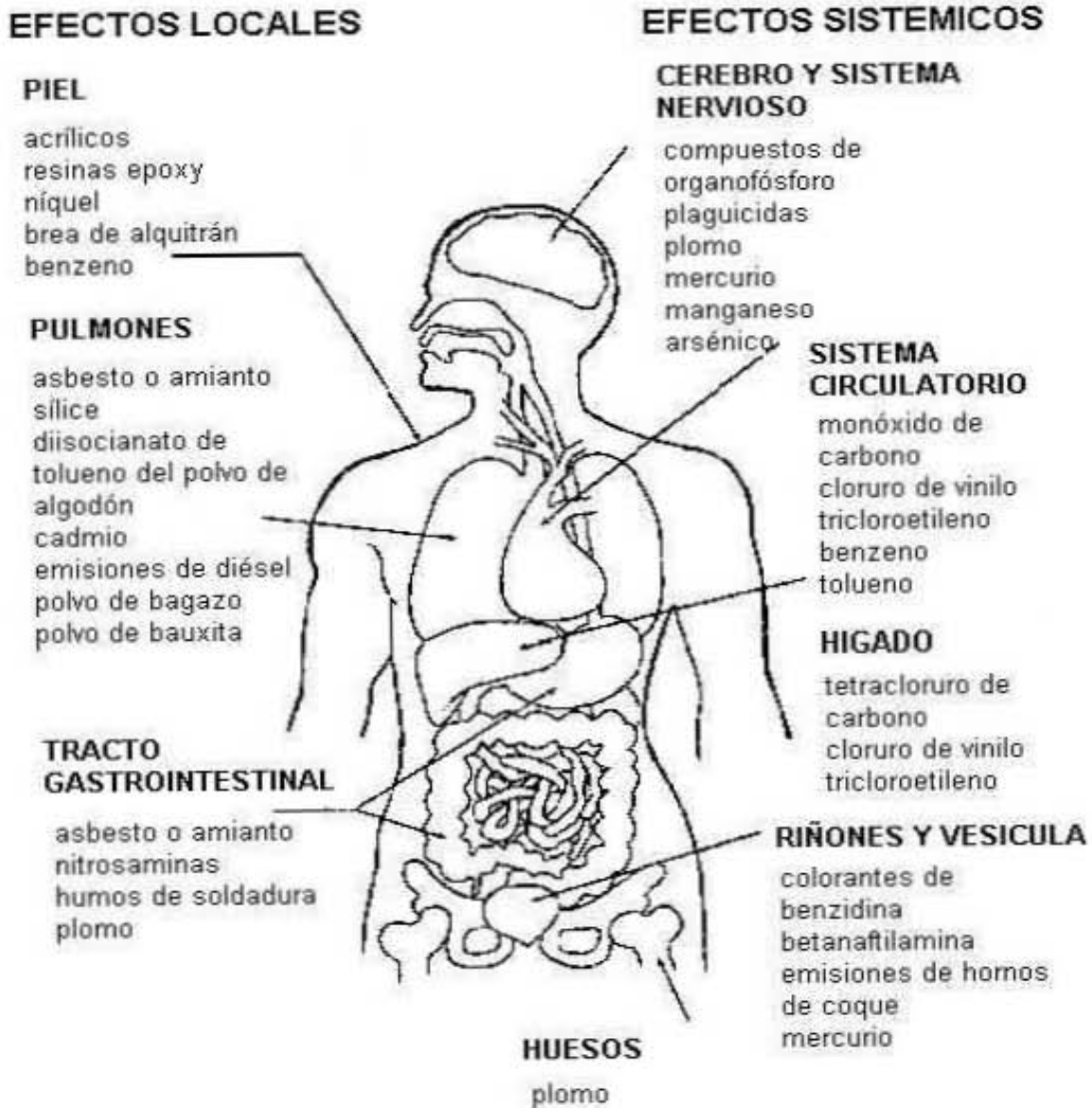


Figura 6. Ubicación de daños en cuerpo humano, según la exposición (Trabajo, 2004).

## **Efectos del Manganeso sobre la salud**

El manganeso es un elemento muy común que puede ser encontrado en todas partes en la tierra, es uno de los tres elementos trazas tóxicos esenciales, lo cual significa que no es sólo necesario para la supervivencia de los humanos, pero que también es tóxico cuando está presente en elevadas concentraciones en los humanos. Cuando las personas se encuentran expuestas a concentraciones mayores que las recomendadas a diario su salud disminuirá. Pero cuando la toma es demasiado alta los problemas de salud aparecerán.

La toma de manganeso por los humanos mayoritariamente tiene lugar a través de la comida, como son las espinacas, el té y las hierbas. Las comidas que contienen las más altas concentraciones son los granos y el arroz, las semillas de soja, huevos, frutos secos, aceite de oliva, judías verdes y las ostras. Después de ser absorbido en el cuerpo humano el manganeso será transportado a través de la sangre al hígado, los riñones, el páncreas y las glándulas endocrinas.

Los efectos del manganeso mayormente ocurren en el tracto respiratorio y el cerebro. Los síntomas por envenenamiento con manganeso son alucinaciones, olvidos y daños en los nervios. El manganeso puede causar Párkinson, embolia de los pulmones y bronquitis.

Cuando las personas se exponen al manganeso por un largo periodo de tiempo el daño puede llegar a ser importante. Un síndrome que es causado por el manganeso tiene los siguientes síntomas: esquizofrenia, depresión, debilidad de músculos, dolor de cabeza e insomnio (Anon., 2005).

El Manganeso es un elemento esencial para la salud de los humanos la falta de éste puede también causar efectos sobre la salud. Estos son los siguientes efectos:

- Aumento de peso
- Intolerancia a la glucosa
- Coágulos de sangre
- Problemas de la piel

- Bajos niveles de colesterol
- Desorden del esqueleto
- Defectos de nacimiento
- Cambios en el color del pelo
- Síntomas neurológicos

### **Efectos ambientales del Manganeso**

Los compuestos del manganeso existen de forma natural en el ambiente como sólidos en suelos y pequeñas partículas en el agua. Las partículas de manganeso en el aire están presentes en las partículas de polvo. Estas usualmente se depositan en la tierra en unos pocos días.

Los humanos aumentan las concentraciones de manganeso en el aire por las actividades industriales y a través de la quema de productos fósiles. El manganeso que deriva de estas actividades puede también entrar en la superficie del agua, en aguas subterráneas y en aguas residuales. A través de la aplicación del Manganeso como pesticida o bien por actividades mineras, el manganeso entrará en el suelo.

Para algunos animales la dosis letal es bastante baja, lo cual significa que tienen pocas posibilidades de supervivencia incluso a pequeñas dosis de manganeso cuando este excede la dosis esencial. El manganeso puede causar anomalías en los pulmones, hígado y corazón, debido al decremento de la presión sanguínea, fallos en el desarrollo de fetos de animales y daños cerebrales (Earnshaw, 1987).

En las plantas es uno de los elementos que más contribuyen al funcionamiento de varios procesos biológicos incluyendo la fotosíntesis, los iones del manganeso son transportados hacia las hojas después de ser tomados del suelo. Cuando muy poco manganeso puede ser absorbido desde el suelo, presenta una deficiencia causando: clorosis intervenal (hojas amarillas con venas verdes) en las hojas jóvenes y, en ocasiones, manchas bronceadas hundidas en las áreas cloróticas intervenales (Figura 7). También el crecimiento de las plantas puede verse disminuido y retrasado (Bloodnick, 2018).



*Figura 7 Hoja con deficiencia de manganeso (Bloodnick, 2018).*

El manganeso puede causar síntomas de toxicidad y deficiencia en plantas. Cuando el pH del suelo es bajo las deficiencias de manganeso son más comunes (Earnshaw, 1987).

### **Mecanismo de absorción de nutrientes de las plantas**

Las concentraciones anómalas de metales pesados en los suelos pueden deberse básicamente a dos tipos de factores: causas naturales y causas antropogénicas. Las causas naturales pueden ser entre otras, actividad volcánica, procesos de formación de suelos, meteoros, erosión de rocas, terremotos, etc. Las causas antropogénicas pueden ser la minería, la combustión de carburantes fósiles, la industria a través de los vertidos, emisiones, residuos (incineración, depósito), como algunos pesticidas y fertilizantes (J.P. Navarro Aviñó, 2007).

### **Transporte**

Los iones inorgánicos y el agua se transportan desde la raíz hasta las hojas mediante una serie de células tubulares que pertenecen a un tejido leñoso denominado xilema. La fuerza que mueve esta solución no radica en las células del tejido xilemático, sino en la fuerza propia del proceso de ósmosis y en otra fuerza, menos habitual, conocida como fuerza de succión. La ósmosis se produce porque



existe una gran diferencia de concentración entre la parte superior de la planta (hojas, inflorescencias) donde es mayor y la parte inferior, es decir existe un potencial hídrico favorable al impulso ascendente. La fuerza de succión se produce cuando en las hojas se pierde agua por transpiración, pues las moléculas perdidas producen una succión de nuevas moléculas cercanas para reemplazar a las anteriores, de tal manera que se produce una fuerza que atrae agua desde las raíces hacia las hojas (J.P. Navarro Aviñó, 2007).

Para la absorción de los nutrientes, la raíz cuenta con mecanismos ubicados en las membranas de las células epidérmicas y en los pelos absorbentes. La naturaleza de este mecanismo es compleja y en bioquímica se le clasifica como de tipo enzimático.

La raíz de la planta puede estar sumergida en una solución de distintos elementos, los cuales además pueden estar en proporciones diferentes de las necesarias para la planta. No obstante, las raíces tratan de tomar los elementos que necesita la planta independientemente de la composición del medio donde éstas se encuentran.

Si la composición de la solución nutritiva es demasiado distante de las necesidades de la planta, entonces se presentará un desbalance nutritivo que rápidamente empezará a intoxicar las raíces de la planta (García, 2015). La raíz posee cargas negativas en sus células, debido en gran medida a la presencia de grupos carboxilo del ácido péptico. Las cargas negativas de estas células de la rizodermis interaccionan con las positivas de los metales pesados presentes en el suelo, creando un equilibrio dinámico que facilita las entradas hacia el interior celular de esta forma los cationes entran por la pared celular que además es hidrofílica, lo que facilita el transporte iónico. Una vez unidas las cargas positivas a las negativas de la pared celular los metales pesados se transportan, en parte por la vía apoplástica, y a parte por la simplástica (J.P. Navarro Aviñó, 2007).

En la Figura 7 se observa la interacción del ión metálico con la pared celular de la raíz de la planta, esto depende de la permeabilidad de la membrana y tamaño del átomo que está cruzando hasta llegar a la vacuola y poder subir y fijarse a las hojas.

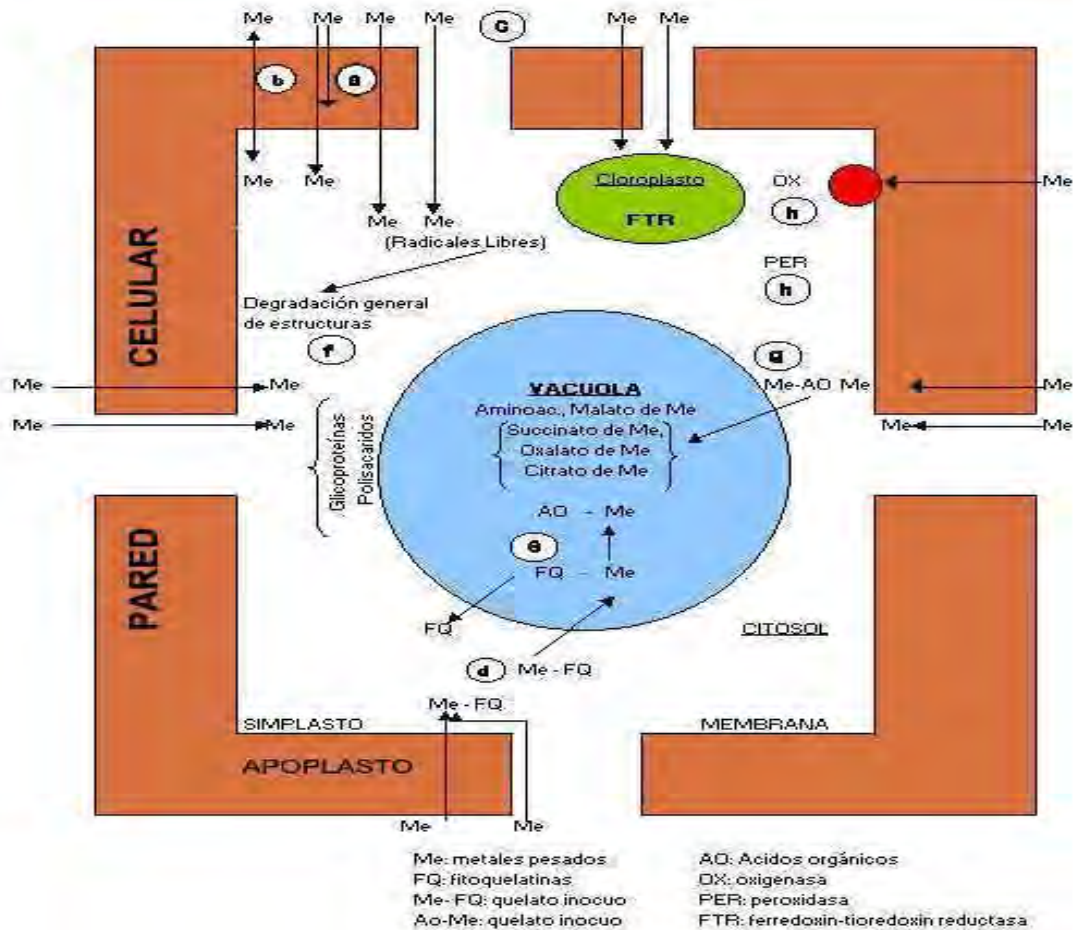


Figura 8. Interacción de los metales pesados con las raíces de las plantas (Creces, Julio 2001).

Las etapas que se llevan a cabo mediante la absorción de nutrientes son (Figura 9):

1. Flujo masivo. Los nutrientes se mueven en la solución del suelo hacia las raíces en la corriente de la transpiración.
2. Difusión. Según el gradiente de concentraciones.
3. Intercepción. Las raíces interceptan los iones al crecer en las zonas donde están los nutrientes.

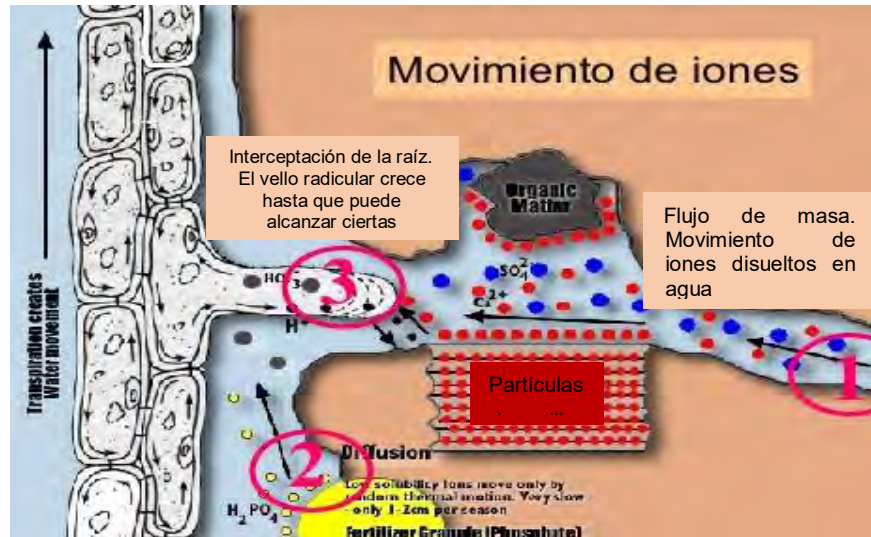


Figura 9. Movimiento de iones metálicos, a través de la raíz de las plantas (García, 2015).

## Difusión

La difusión es la migración espontánea de sustancias, de regiones de alta concentración a regiones donde la concentración es más baja. La difusión iónica ocurre en los suelos al disolverse los nutrientes formando iones. Los iones disueltos en la solución se moverán de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración. El área alrededor de la raíz en una planta con crecimiento activo tiene una baja concentración de nutrientes, así que los nutrientes, migrarán hacia el área de la raíz. Los nutrientes que son absorbidos por las raíces de las plantas a través de este mecanismo son el potasio (K) y el fósforo (P), ambos son de baja solubilidad.

Como se observa, el principal factor que influye en la difusión es el gradiente de concentración. El gradiente de concentración es la relación de los compuestos o nutrientes en el suelo, y ésta dado por el coeficiente de tortuosidad del suelo y el área de la raíz. La tortuosidad es el camino que los iones toman en la difusión. Una porosidad del suelo grande y una adecuada humedad hacen decrecer la tortuosidad, haciendo que la difusión sea más fácil y ocurra en mayor cantidad. A

poros pequeños (suelos arcillosos) y reducida humedad, la tortuosidad se incrementa. La movilidad de los iones o átomos es afectada por la temperatura, la difusión se hace mayor al incrementar esta temperatura; así también, a bajas temperaturas la difusión se ve limitada (López Domínguez, 2009).

Las propiedades químicas y físicas del suelo también influyen en la movilidad de los iones. A bajos pH la difusión de iones se da más rápidamente que en pH alcalinos. Al porcentaje de agua remanente en un suelo dos días después de haber sido saturado y permitido drenar libremente, se le denomina como capacidad de campo, cuando se alcanza este punto buena parte del agua retenida, puede ser utilizada por las plantas, funcionando como una reserva para ellas en tiempo de sequía (López Domínguez, 2009).

### **Micorrizas**

Las micorrizas son ciertos hongos del suelo que se encuentran en asociación simbiótica con las raíces de (la mayoría) de las plantas. La propia palabra define la simbiosis entre un hongo (mycos) y las raíces (rhizos) de una planta. La asociación física se produce porque las raíces de las plantas se unen con las hifas de determinados hongos. La planta obtiene del hongo la parte que viene del suelo mientras el hongo obtiene la parte que viene del aire, así la simbiosis proporciona por parte del hongo nutrientes minerales y agua (suelo), y por parte de la planta, sustratos energéticos y carbohidratos (fotosíntesis).

Las plantas micorrizadas presentan una mayor tolerancia a los metales pesados gracias y en parte, a la capacidad para retener a los metales en la raíz y el tallo (Figura 10), en una menor medida a la parte de las hojas de la planta. Una primera barrera a la entrada de metales pesados la constituiría la pared celular del hongo, que tiene una gran capacidad de adsorber cationes sobre su superficie, puesto que ésta se encuentra cargada negativamente. Además, el hongo selecciona el movimiento del metal a las raíces de la planta. Para ello se sirve de diversos mecanismos que varían según la especie del hongo y de la planta, y del metal. Se ha observado también una intensa actividad de translocación y absorción de

metales pesados en algunas especies por efecto de las micorrizas, evidenciando que funcionan en ambos sentidos, limitando la entrada de metales pesados y favoreciendo su acumulación y, por tanto, procurando una alternativa de utilización. En cualquier caso, los procesos esquematizados en que participan las micorrizas son:

- Absorción/adsorción de metales pesados en el hongo.
- Reducción del acceso de los metales pesados al apoplasto por hidrofobia.
- Quelación de los metales pesados con exudados del hongo.



*Figura 10. Raíces colonizadas con micorrizas (J.P. Navarro Aviñó, 2007).*

### **Agrominería**

La agrominería puede en principio emplearse para producir As, Se, Cd, Cu, Co, La, Mn, Ni, Pb, Tl y Zn, usando como hiperacumulador las plantas ya conocidas que absorben todos estos elementos. Los hiperacumuladores de La y Pb tienen poca acumulación característica y, por lo tanto, no están (actualmente) considerados para agrominería. La viabilidad económica depende del elemento precio de mercado del elemento, el rendimiento anual por unidad de área (biomasa producida y la cantidad contenida del elemento objetivo) y de la disponibilidad de superficie enriquecidas en este elemento (Antony van der Ent, 2015).

Los precios actuales (2018) por tonelada métrica son: de Cu (US \$ 10,217), de Ni (US \$ 13,086), de Al (US \$ 2195), de Mn (US \$ 3980), de Cd (\$ 1750) y de Zn (\$ 3474.481) ((SINEM), 2018). La agrominería es factible para elementos de alto costo adquisitivo.

Por lo que es en el caso de Ni, que es el mineral biológico en bruto más producido a partir de la agrominería experimental, ha sido procesado a través de un horno de arco para producir Ni metálico. Alternativamente; el biomineral es compatible como materia prima para mayor número de plantas hidrometalúrgicas de Ni (Antony van der Ent, 2015).

La elección de opciones de procesamiento de mineral depende de las condiciones locales de suelo y cultivo, integrando o innovando las cadenas de producción. Se estima que el biomineral en bruto es rentable aproximadamente si se tiene una recuperación del 85% del valor contenido de metal, pero si es mayor, el proceso es atractivo para su explotación y esto aumenta aún más la rentabilidad de la agrominería (R. O. Carpena, 2007).

Entre los factores que deben considerarse en los estudios de viabilidad económica se incluyen:

1. Costos totales de desarrollo y optimización a través de etapas de prueba a operación completa.
2. Costos anuales previstos, que incluyan costos de propagación, fertilización, mano de obra y maquinaria de riego (si es necesario), protección de plantas, cosecha y costos de la tierra.
3. Precio actual y pronosticado del metal (o sus compuestos) en los mercados mundiales.
4. El valor de la tierra en usos alternos.

La evaluación ambiental debe integrarse en el proceso para minimizar los resultados ambientales negativos. Específicamente, se debe alentar el uso de especies de plantas nativas para evitar posible propagación de especies invasoras (Antony van der Ent, 2015).

## **Tipos de procesos para realizar la agrominería**

### **Ceniza**

En la mayoría de los procesos, la biomasa se mide produciendo el metal contenido de hasta 20% en peso en su óxido más estable. Se requiere un control cuidadoso de las condiciones del reactor para obtener la fase de dicho metal deseada y mineralizar la materia orgánica sin volatilizar. Como la combustión es exotérmica, el calor, la energía derivada de esta reacción podría ser potencialmente recuperado.

Con alta temperatura de la ceniza ( $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), el residuo consiste principalmente en carbonatos y óxidos de los principales elementos metálicos presentes en la planta: K, Ca, Mg y Ni.

Puede haber una ventaja en baja temperatura de ceniza ( $<400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), donde se conserva en una forma reducida, que puede usarse como combustible o un agente reductor en etapas posteriores de procesamiento pirometalúrgico. El prelavado puede ayudar a aumentar el contenido de metal de la ceniza, ya que el  $\text{K}_2\text{CO}_3$  está contenido altamente soluble en agua (Antony van der Ent, 2015).

### **Fundición**

El tratamiento termoquímico de biomineral para rendimiento de metal requiere de calor, así como sustancias químicas adecuadas, reductores y fundentes para controlar las propiedades de la escoria. La producción de ferro-manganeso o manganeso de hierro fundido de mineral actualmente es económicamente factible para calidades por encima de 1.5 % en peso del metal. Una vez seco, la biomasa o el bio-mineral podrían integrarse en la alimentación de las fundiciones existentes, reduciendo la inversión de capital en las etapas iniciales del desarrollo del proceso (Antony van der Ent, 2015).

## Lixiviación

Otro método de extracción es lixiviar el metal en una solución acuosa, el procesamiento hidrometalúrgico de Ni típicamente utiliza  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{OH}$ -  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ , ó  $\text{NH}_4\text{OH}$   $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Las operaciones hidrometalúrgicas existentes podrían integrar el bio-mineral en su alimentación; por ejemplo, ácido a presión en donde se inyecta  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado en una autoclave a 250 °C solubilizando el Ni (Antony van der Ent, 2015).

## Recuperación de productos

Los procesos hidrometalúrgicos tienden a ser más flexible en las opciones de recuperación de productos y subproductos.

Una vez presente en solución acuosa a suficiente concentración y pureza, un producto de Ni puede recuperarse en numerosas formas; en el estado metálico por reducción electroquímica en placas, rondelles y polvos o como un compuesto químico ó precipitación evaporativa.

Un producto compuesto de Ni puede ser muy factible en su utilización debido a la simplicidad operativa del proceso o por su agregado valor en el mercado. Una opción simple sería químicamente precipitar Ni como un hidróxido, que consiste en  $\approx 40\%$  en peso de Ni (Ni recuperado).

Las opciones de valor agregado incluyen la producción de catalizadores de biomasa hiper-acumulador de Ni para química orgánica o cristalizar las sales de Ni puro, como  $\text{Ni}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (ANSH) que se ha producido a partir de cenizas. Estos procesos actualmente avanzan a escala piloto. La producción de  $\text{Ni K}_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  de la ceniza de la planta hiperacumuladora tratada con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  también ha sido demostrado, pero no desarrollado más allá del laboratorio a escala. Los subproductos del procesamiento hidrometalúrgico de bio-mineral (por ejemplo,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) se puede reciclar al área contaminada para mantener fertilidad de



macronutrientes en suelos (Antony van der Ent, 2015). En la figura 11 se observa el proceso de agrominería para el caso del Ni, la pureza en la que este se obtiene a través de las diferentes etapas del proceso. Demostrando así que esta metodología es factible para este caso obteniendo Ni con una pureza mayor al 99%.

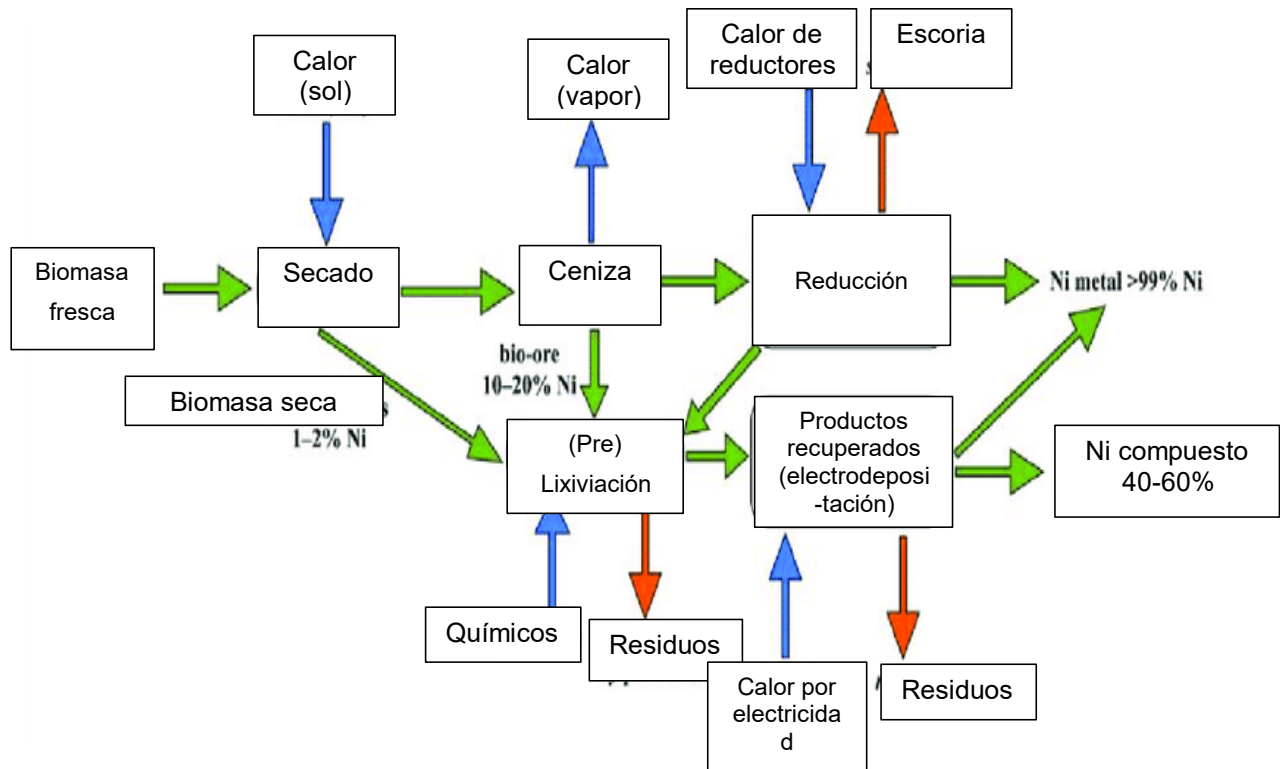


Figura 11. Proceso de agrominería para níquel (Antony van der Ent, 2015)

El proceso de agrominería, se lleva a cabo en diferentes etapas, desde la selección de la planta hiperacumuladora del metal que se requiere absorber, la siembra y la cosecha (entre estas etapas, se requiere un determinado periodo de tiempo, para la buena asimilación del metal en planta), hasta la preparación del espécimen elegido para llevarse a cabo el proceso de extracción por medios electrometalúrgicos, en la figura 12 se observa el diagrama de flujo del proceso propuesto a seguir para la extracción de metales pesados en plantas endémicas de la zona estudiada.

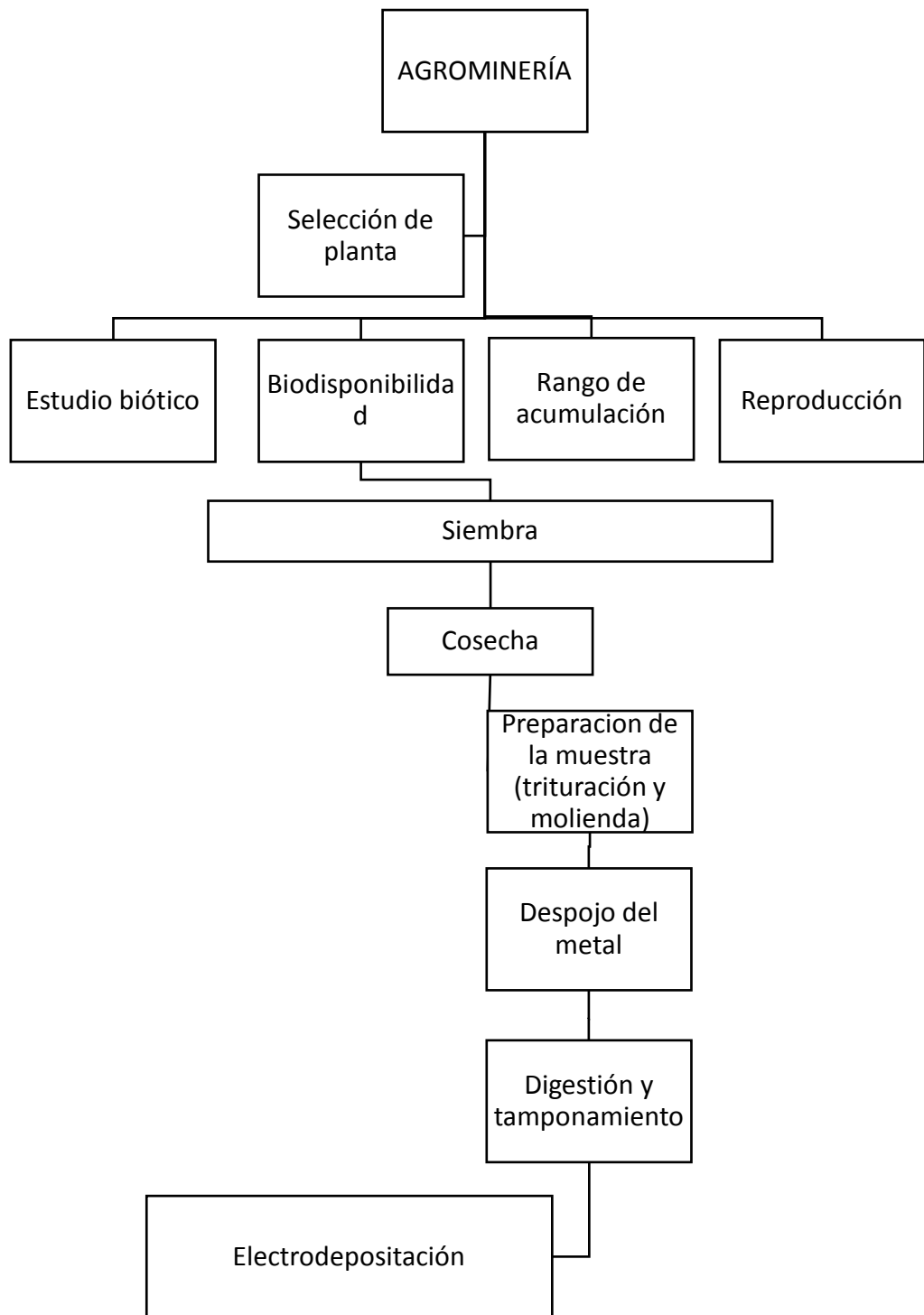


Figura 12. Diagrama de flujo, proceso de agrominería.

## **Espectroscopia de absorción y emisión atómica**

La Espectroscopia atómica está basada en la utilización de átomos al estado de vapor activados mediante energía electromagnética o energía térmica, midiendo la energía absorbida o emitida por los átomos al pasar a un estado activado o al volver del estado activado (Juárez, 2010).

### **Espectroscopía de Absorción atómica (AA)**

El término espectroscopía significa la observación y el estudio del espectro, o registro que se tiene de una especie tal como una molécula, un ion o un átomo, cuando estas especies son excitadas por alguna fuente de energía que sea apropiada para el caso. La Absorción Atómica es en la actualidad una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del Sistema Periódico. Sus campos de aplicación son, por tanto, muy diversos (Juárez, 2010).

La Absorción Atómica (AA) permite medir la concentración de un elemento de interés por analizar (analito), mediante la excitación de los átomos de una muestra en estado acuoso a partir de un proceso de atomización mediante una fuente térmica (con flama o sin flama) y la excitación propiamente dicha, dada por la incidencia de un haz de luz emitido por una fuente lumínica producida por la incandescencia de un cátodo fabricado del mismo metal que el analito por cuantificar (Juárez, 2010).

Esta técnica (AA) utiliza la absorción de la luz para medir la concentración en fase gaseosa de átomos. Dado que las muestras suelen ser líquidos o sólidos, los átomos del analito o iones deben ser vaporizados por una llama u horno de grafito. En general un equipo de Absorción Atómica está conformado por una fuente luminosa, una fuente de atomización, un amplificador, un detector y lector como se observa en la figura 13, en dicho esquema se representa la disposición de estos componentes que es la base para cualquier equipo de AA, figura 14 (Juárez, 2010).

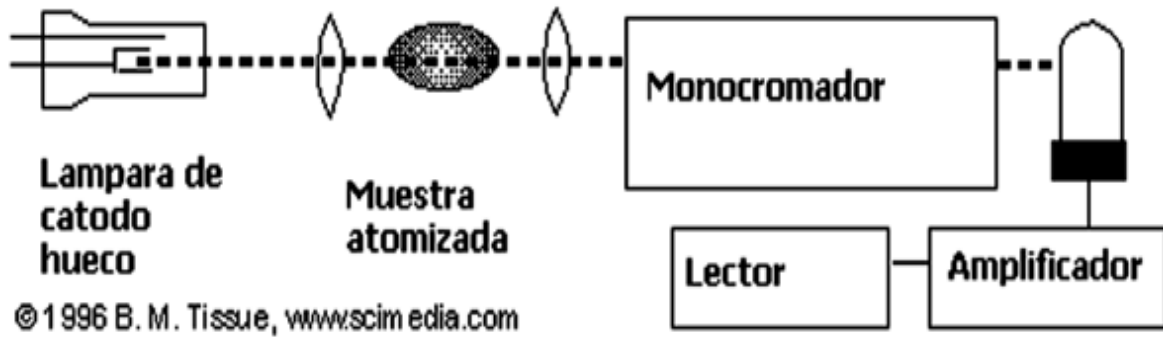


Figura 13 Equipo de absorción atómica (Juárez, 2010).

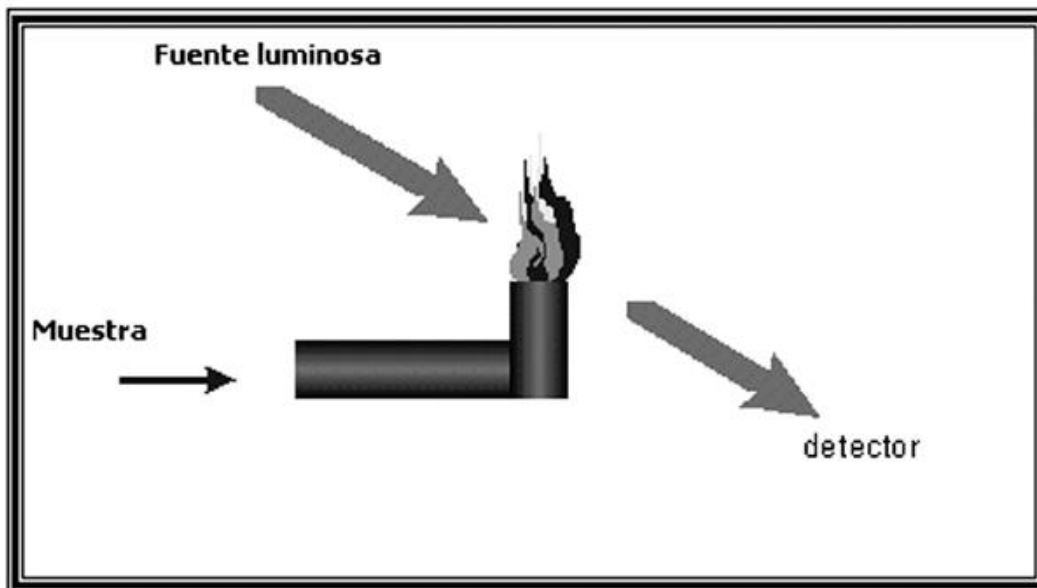


Figura 14 Funcionamiento de la producción de átomos libres en el quemador de un equipo de AA (Juárez, 2010).

### Fuente Luminosa

**Lámparas de cátodo hueco:** En su modo de funcionamiento convencional, la luz es producida por una lámpara de cátodo hueco. En el interior de la lámpara hay un cátodo cilíndrico de metal que contiene el metal de excitación, y un ánodo. Cuando un alto voltaje se aplica a través del ánodo y el cátodo, los átomos de metal en el

cátodo se excitan y producen luz con una determinada longitud de onda. El tipo de tubo catódico hueco depende del metal que se analiza.

*Lámparas multielemento:* el cátodo está constituido por una aleación de varios metales tales como Ca/Mg; Ca/Zn; Al/Cu/Fe/Ti; Cu/Fe/Mn/Zn.

*Láser de diodo:* La espectrometría de absorción atómica también puede ser llevada a cabo mediante láser, principalmente un láser de diodo, ya que sus propiedades son apropiadas para la espectrometría de absorción láser. La técnica se denomina espectrometría de absorción atómica por láser de diodo (DLAAS o DLAS), o bien, espectrometría de absorción por modulación de longitud de onda (Juárez, 2010).

En este tipo de Lámparas de alta intensidad (descarga sin electrodos EDL), el cátodo incide un haz de electrones de alta velocidad que arrancan átomos metálicos activados figura 15. Los electrones arrancan y activan más átomos que los iones del gas, es decir mayor señal.

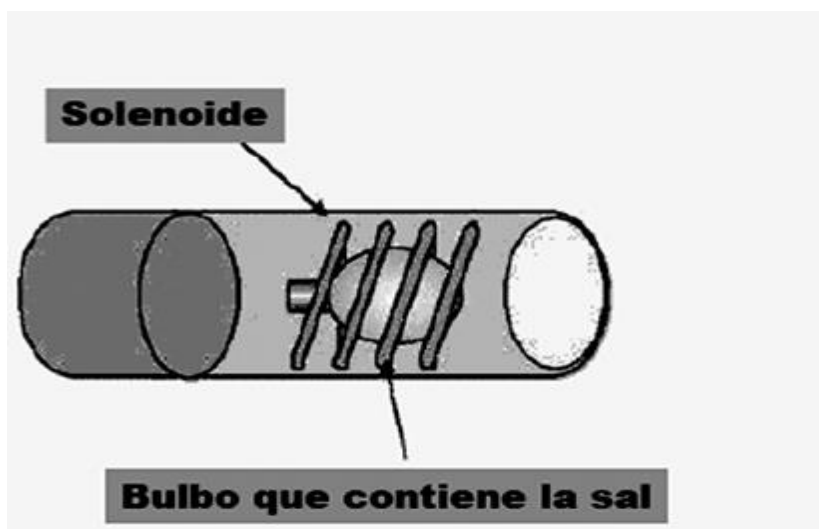


Figura 15. Lámpara de descarga sin electrodos (Juárez, 2010) .

## Espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado por inducción (ICP-OES, por sus siglas en inglés)

Los elementos presentes en una muestra se convierten en átomos o iones elementales en estado gaseoso por medio de un proceso denominado atomización. Los iones generados emiten radiación a la longitud de onda característica de cada uno de los elementos presentes en la muestra, la cual es transmitida a través del sistema óptico a un detector, donde la imagen capturada se convierte a señal de intensidad para cada elemento y consecuentemente a la concentración de dicho elemento en la muestra (Hill. S, 2007). En la figura 16 se observan los instrumentos necesarios que componen un ICP-OES convencional, para poder llevar a cabo las funciones que arrojen la composición química de lo que se requiera analizar.

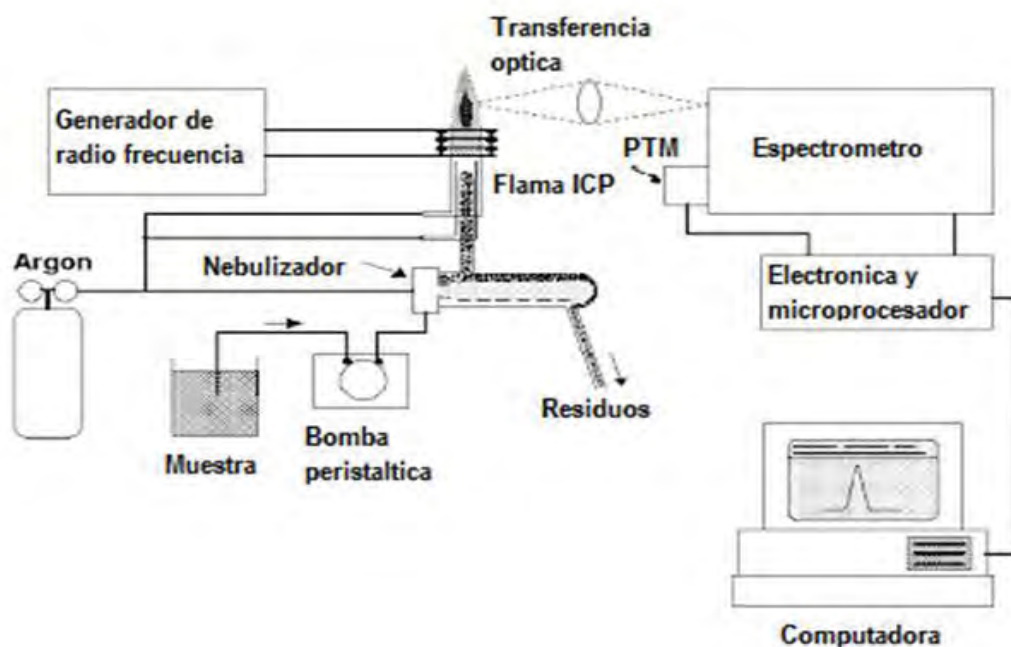


Figura 16. Representación de la disposición de un instrumento ICP-OES típico (Anon., 2013).

El proceso de funcionamiento del equipo ICP-OES inicia con la generación del plasma, que es de un gas inerte como lo es el argón, este gas es contenido dentro de una bobina de inducción de cobre en la cual circula un flujo de refrigerante (gas o agua) y una corriente eléctrica de alto voltaje, en su núcleo el plasma acoplado inductivamente sostiene una temperatura de aproximadamente 10 000 K que aumenta la energía de los elementos presentes ocasionando emisión de luz al momento de disminuir la temperatura, emisión que entra a un sistema óptico donde las longitudes de onda son separadas y medidas por materiales fotosensibles que generan señales de cuantos de luz por segundo la cual se relaciona con la concentración del analito de interés.

Un plasma es un gas altamente ionizado eléctricamente conductor que contiene una concentración importante de cationes y electrones (las concentraciones de ambos son tales que la carga neta es cero). En el plasma de argón, los iones y los electrones de argón son las especies conductoras principales, aunque los cationes provenientes de la muestra también están presentes en cantidades pequeñas. Los iones de argón, una vez formados en el plasma, son capaces de absorber suficiente potencia de una fuente externa para conservar la temperatura en un nivel en el que la ionización posterior mantiene indefinidamente el plasma (U.S. 2002)

Una fuente característica para plasma acoplado por inducción llamada “antorcha” figura 17, está formada por tres tubos concéntricos de cuarzo a través de los cuales fluyen corrientes de argón. La parte superior de este tubo está rodeada por una bobina de inducción. La ionización del argón que fluye se inicia mediante una chispa que proviene de una bobina Tesla. Los iones resultantes y los electrones asociados interactúan entonces con un campo magnético oscilante producido por una bobina de inducción. Esta interacción fuerza a los iones y los electrones dentro de la bobina a moverse en trayectorias circulares opuestas. La resistencia que manifiestan los iones y los electrones a este flujo de carga es la causa del calentamiento óhmico del plasma (Skoog, 2008).

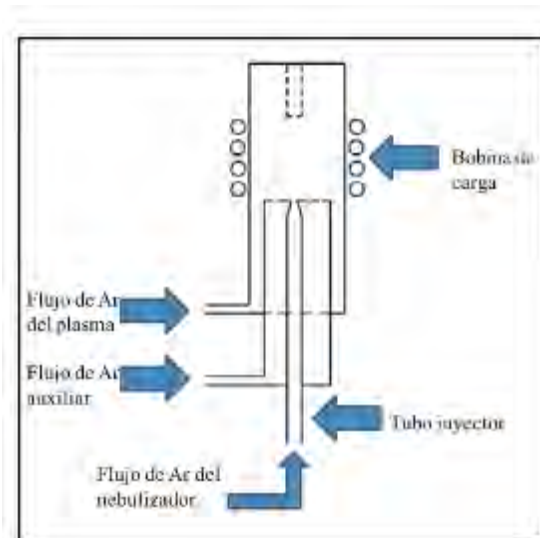


Figura 17. Esquema de la antorcha (Otero Romani, 2009).

La temperatura del plasma así formado es lo suficientemente elevada como para que el cilindro exterior de cuarzo requiera aislamiento térmico. Para lograrlo, se hace fluir argón tangencial alrededor de las paredes del tubo. Este flujo tangencial enfría las paredes interiores del tubo central y concentra radialmente el plasma.

Las muestras se introducen en el plasma acoplado por el arrastre mediante un flujo de argón por el tubo central de cuarzo, previamente la muestra debe estar en estado acuoso, introduciéndola mediante una bomba peristáltica con tubos de tygon de diámetros específicos y a un flujo constante, esta muestra líquida llega inicialmente al nebulizador concéntrico de vidrio. La muestra se transporta hasta la punta por medio del efecto Bernoulli. La alta velocidad del gas divide al líquido en gotitas finas de varios tamaños que son transportados hacia el interior del plasma. (Skoog, 2008)

La excitación dentro del plasma imparte energía adicional a los átomos, a menudo se dispone de suficiente energía para convertir los átomos en estado basal a estados excitados y posteriormente promoverlos a iones.

Tanto las especies de estado excitado atómico como iónico pueden entonces relajarse al estado basal a través de la emisión de un fotón. Estos fotones tienen



energías características que están determinadas por la estructura del nivel de energía cuantificado para los átomos o iones. La cuantificación de los átomos presentes es proporcional a la cantidad de energía absorbida y a la capacidad de cada átomo de absorber energía. Esta medición nos permite utilizar esta técnica como un análisis cuantitativo, figura 18 (Faustino Juárez, 2010).

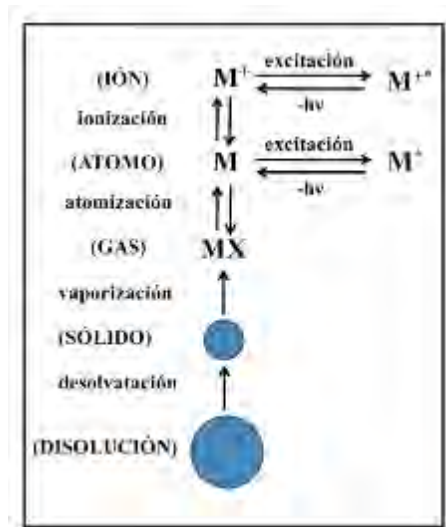


Figura 18. Proceso que tiene lugar en el plasma. (Otero Romani, 2009)

Para la medición de los analitos, se requiere de una curva de estándares de referencia con los cuales se comparan la emisión y por lo tanto la concentración del analito presente en la solución. La información cualitativa implica identificar las longitudes de onda características de cada elemento, por otro lado la información cuantitativa se adquiere cuando la emisión detectada se convierte en señales electrónicas que se convierten en señales eléctricas y estas se correlacionan a la concentración. Esto se consigue relacionando la intensidad de la emisión con la concentración en la curva de concentración.

### Curvas de calibración

Para la Calibración de un Espectrómetro de Absorción Atómica (EAA), se requieren de curvas que asocien la concentración con una propiedad que pueda medir el equipo, figura 19, en este caso la absorbancia, para hacer estas curvas se tiene el método del estándar externo.

Es el método tradicional en donde se emplean al menos 3 estándares para construir la gráfica de concentración.

Las soluciones estándares se preparan a concentraciones cercanas a la concentración esperada, como es usual esta debe prepararse lo más parecida a las muestras en su composición química.

Para que una muestra muy concentrada entre en la escala de absorbancia de nuestra curva de calibración existen las opciones:

- Diluir la muestra, lo suficiente para llevarla hasta el rango de concentración adecuado.
- Acortando la longitud de la de la trayectoria de la muestra para obtener una mayor absorbancia de la muestra (Juárez, 2010).

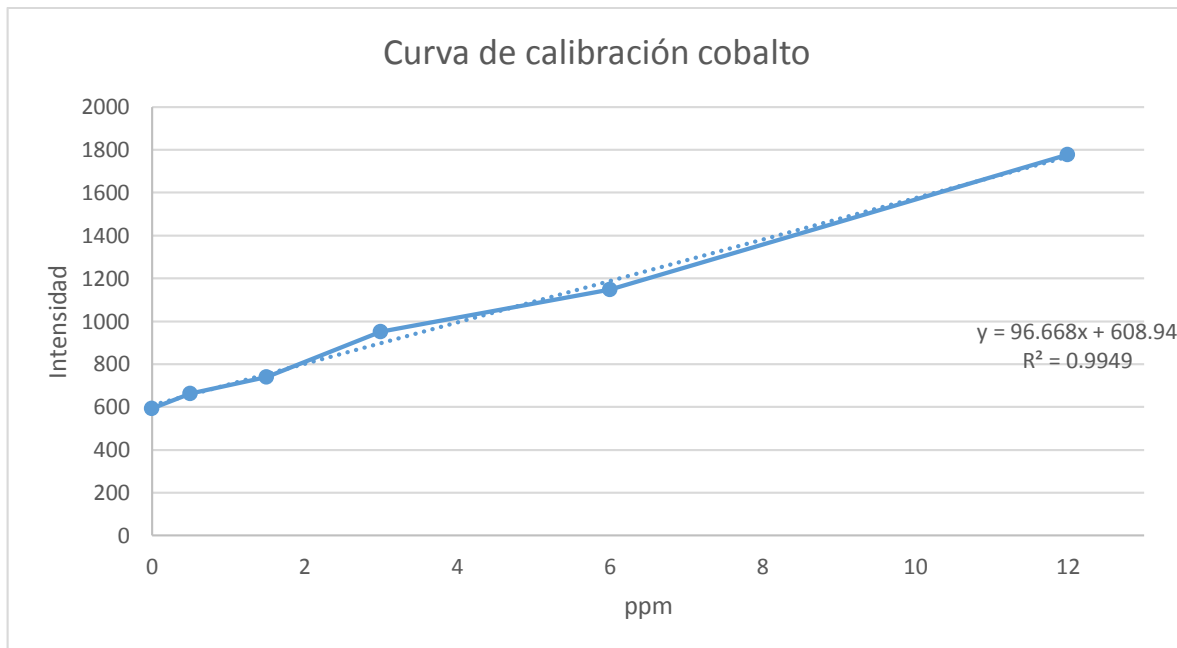


Figura 19. Curva de calibración con estándar externo.

## Límites de detección y cuantificación

- **El límite de detección** es la menor concentración de analito en una muestra determinada que puede ser positivamente identificada con un método analítico determinado (Juárez, 2010).
- **Límite de cuantificación** es la menor concentración de analito en una muestra determinada que puede proporcionar una medida cuantitativa positiva, utilizando un método analítico determinado (Juárez, 2010).
- **Sensibilidad:** Se refiere a la pendiente de la recta de calibrado resultante al representar concentración de analito frente a señal. Un método será más sensible cuanto más pronunciada es la recta de calibrado, ya que esto significa que una pequeña variación en la concentración de analito proporciona una elevada variación en la respuesta instrumental (Juárez, 2010).

## Espectrales

- Por dispersión de la radiación incidente sobre los átomos (matriz).
- Por absorción o emisión de interferentes que no es capaz de discriminar el detector (especies moleculares o atómicas que absorben cerca de la  $\lambda$  seleccionada).

## Químicas

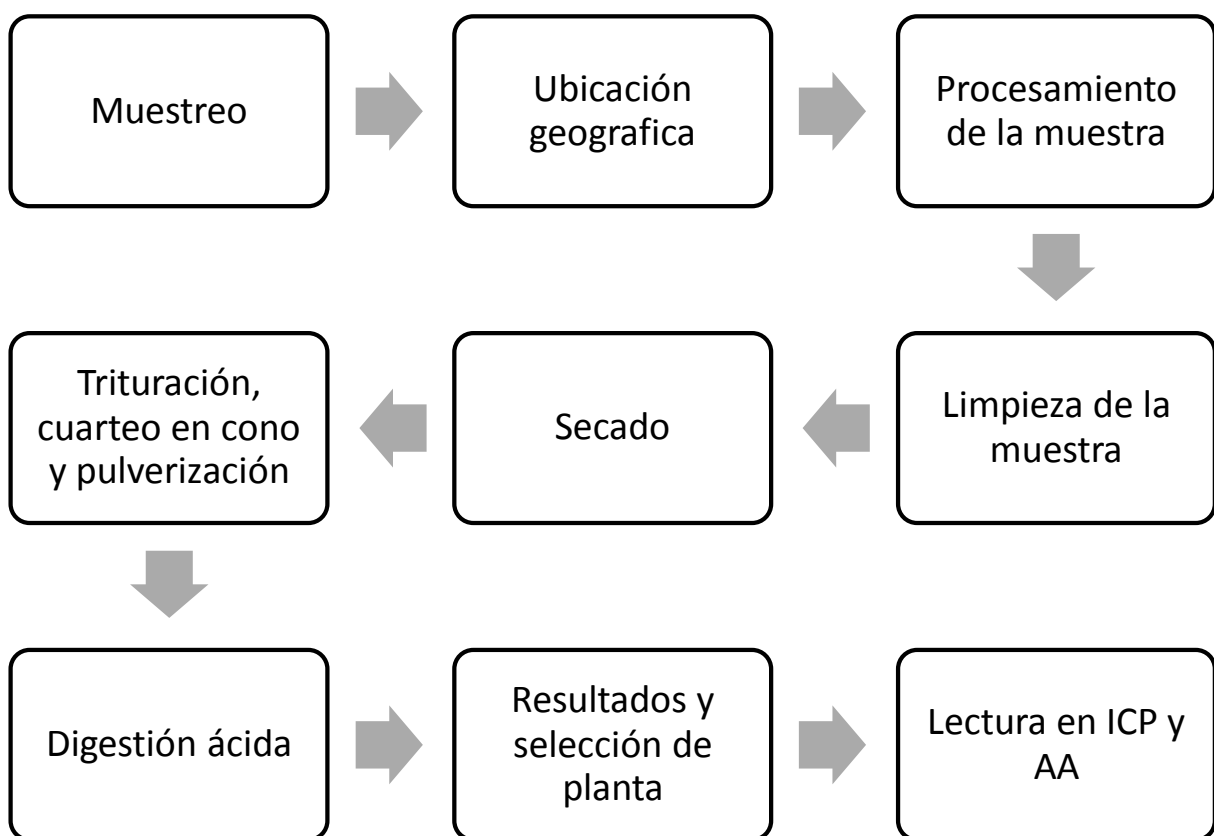
- Son consecuencia de reacciones entre el analito e interferentes presentes en la llama que dan lugar a compuestos poco volátiles.
- Las interferencias químicas se pueden subsanar mejor: cambiando la composición de la llama o adicionando supresores de la ionización (K) o protectores (EDTA) del analito (Juárez, 2010).

## Capítulo 2. Desarrollo experimental.

### Primera etapa experimental

Este proceso de agrominería se realiza en una serie de etapas, las cuales se derivan unas de otras. Por ello al llevar a cabo un estudio o investigación, no podemos omitir etapas.

La metodología establecida para determinar plantas candidatas para ser hiperacumuladoras se muestra en la figura 20, así como el material necesario para llevar a cabo estas etapas tabla 3.



*Figura 20. Diagrama de flujo de la metodología, primera parte experimental*

*Tabla 3 Material, reactivos y equipos utilizados.*

Material	Reactivos	Equipos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mortero</li> <li>• Espátula</li> <li>• Pipetas</li> <li>• Matraz aforado de 100 mL</li> <li>• Vasos de teflón</li> <li>• Botellas plásticas de 100 mL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HNO<sub>3</sub></li> <li>• H<sub>2</sub>O; DI</li> <li>• HF</li> <li>• H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estufa Fisher Scientific Isotemp.</li> <li>• Parrilla de calentamiento.</li> <li>• Balanza analítica</li> <li>• ICP-OES Perkin Elmer Modelo 400</li> </ul>

### Toma de muestras

Se realizaron dos trabajos de campo para recolectar en primera instancia plantas de la zona de estudio ubicada en Valles Centrales de Oaxaca, figura 21, concretamente en el municipio de San José del Progreso en la Cuzcatlan y alrededores de esta. Para la toma de muestras se considerando la cercanía a la mina y posibles depósitos de agua en aljibes, pozos y norias.

En la figura 22 se observan las áreas de extracción de las muestras y la cercanía de estas a los jales de la mina, se eligieron estas zonas considerando la orografía del terreno, dirección preferencial del viento y el parteaguas natural de la zona. Se seleccionaron 5 puntos principales de remoción de plantas, en los cuales se captaban de 6 a 7 especies diferentes entre ellas, por área y las mismas en cada punto distinto.

Se extrajeron 33 muestras de las cuales, frutas, hortalizas semillas y plantas endémicas de la localidad. Fueron enumeradas del 1 al 32 y la última con la nomenclatura HS (hoja santa), planta utilizada en grandes porciones por los habitantes de la zona.

La recolección de muestras como se observa en la figura 23 se realizó tomando plantas tanto cultivadas como silvestres, procurando una extracción completa de estas, desde la raíz, tallo, hojas, flor y fruto, para un análisis completo de la planta.

Se realizó un mapeo de la zona donde fueron recolectadas las muestras, con el fin de captar las coordenadas donde se hizo la extracción de las plantas.



Figura 21. Valles Centrales de Oaxaca.



Figura 22. Diferentes puntos en los que se realizó el muestreo.



*Figura 23. Toma de diferentes tipos de muestras, de los Valles centrales de Oaxaca.*

### **Determinación de elementos**

Las muestras colectadas fueron llevadas al laboratorio en donde se procedió a lavar, con el fin de eliminar metales que fueron arrastrados por vías eólicas y solo evaluar la fijación de estos elementos en la planta figura 24, para después secarlas a una temperatura constante de 80 °C durante 12 horas, evitando la calcinación y evaporando todo el líquido presente en ellas figura 25.

Se procedió a cortar cada una de las plantas desde la raíz, tallo, hojas, flor y fruto figura 26 para después pasarlas por el cono de cuarteo y lograr obtener una muestra aleatoria de todos los componentes ya antes mencionados que componen a estas especies figura 27; se pulverizó un cuarto de lo recuperado para después llevar a pulverizar en un mortero de ágata figura 28. De los especímenes pulverizados se tomó una muestra representativa de cada una de las muestras, aproximadamente 0.5g  $\pm$ 0.1g utilizando una balanza granataria figura 29.

La digestión se realizó a sequedad total en primera vez con HF ya una vez evaporado, se añadieron 5 mL de HCl y 10 mL de HNO<sub>3</sub>, hasta su completa disolución de la muestra figura 30. Esta solución se llevó a aforo de 100 mL, para después tomar la lectura de su concentración en ppm de Ag, Cu, Fe, Pb, Mn, Ni, Co y Cr, todos analizados en el espectrómetro de absorción atómica con lámpara multielemental figura 31, con excepción del Cr, debido a que es un metal refractable, en este caso se utilizó el espectrómetro de emisión (ICP-OES).

El procesamiento de datos se realizó por cada uno de los elementos leídos, en cada una de las muestras. Para la selección de una planta hiperacumuladora, con la característica de tener metales de interés en mayor concentración que las demás especies.

Con los resultados obtenidos esta última etapa se procedió a realizar otro muestreo de forma específica y ubicando con coordenadas geográficas los puntos de muestreo.



*Figura 24. Lavado de muestras, eliminación de material proveniente por vía aérea.*





*Figura 25. Secado de la muestra, en estufa Fisher Scientific.*



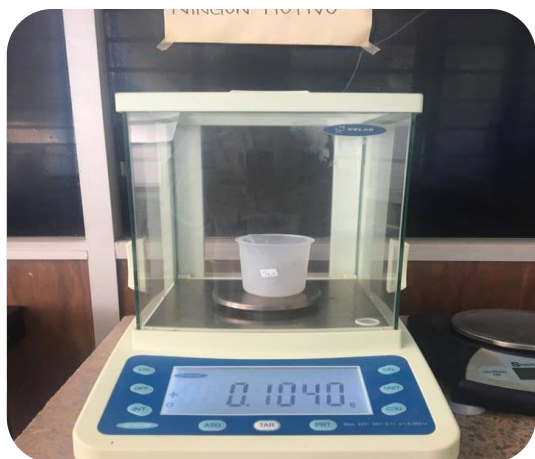
*Figura 26. Trituración completa de toda la muestra (raíz, tallo, hoja y fruto).*



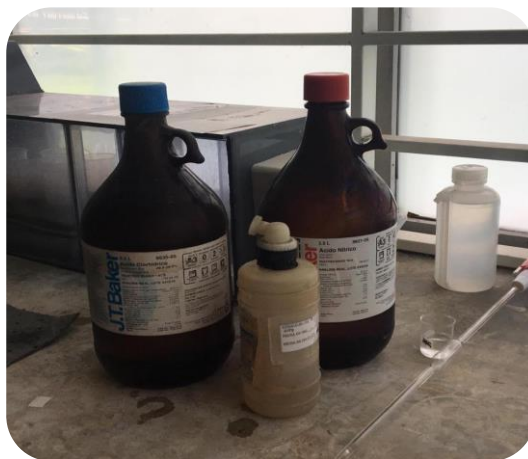
*Figura 27. Cono de cuarteo.*



*Figura 28. Mortero de ágata.*



*Figura 29. Balanza analítica Velab.*



*Figura 30. Digestión ácida, HCl, HNO<sub>3</sub> y HF de la marca MERCK alta pureza.*



*Figura 31. Equipo de Absorción Atómica Varian 50B.*

## Segunda etapa experimental

### Electrolito en plantas

Una vez localizadas las especies posibles candidatas como plantas hiperacumuladoras del Mn, se llevó a cabo una segunda secuencia de pasos, esta vez para establecer la cantidad de acumulación del metal en las plantas seleccionadas figura 32.

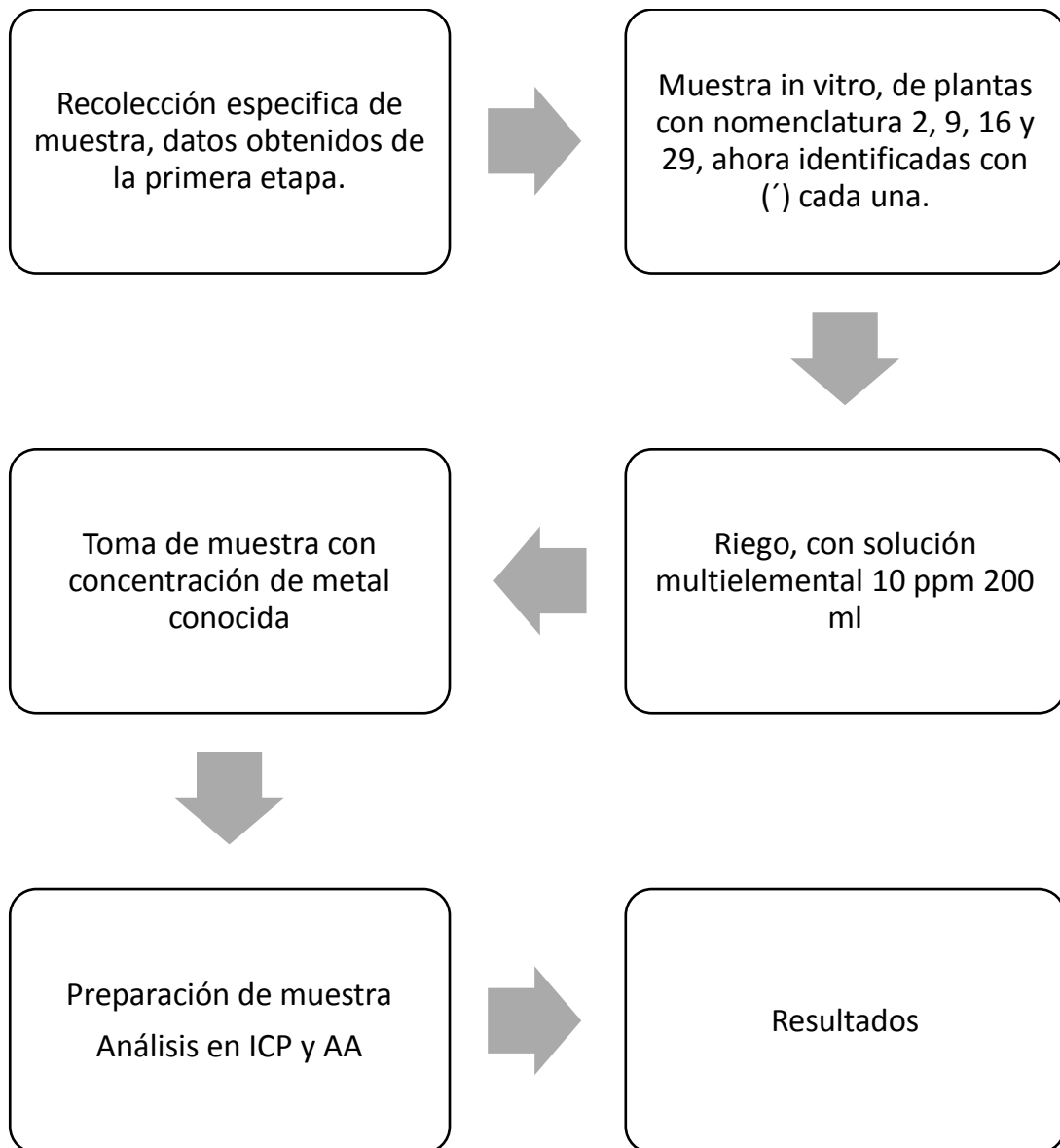


Figura 32. Metodología de segunda etapa experimental.

Todas las plantas recolectadas fueron ubicadas en la zona geolocalizaron mediante el posicionador global (GPS) figura 33.

Una vez localizadas tanto geográfica como en especie cada una de las plantas, se extrajo desde la raíz y se plantaron dentro de recipientes con el mismo suelo con en que se encontraban. Las muestras se llevaron al laboratorio, donde se les acondiciono de forma similar a su lugar de origen con el fin de no alterar a gran escala su hábitat figura 34.

A las especies vivas, se les adicionaron volúmenes de soluciones de una solución multielemental con concentraciones conocidas de 200 ppm, esta solución se empleó para la irrigación de la planta durante dos semanas, cada tercer día. Antes de cada riego, se tomaba una muestra representativa para evaluar el progreso de acumulación y asimilación de los metales en la planta.

Una vez cumplidas estas dos semanas, con un total de 75 muestras, clasificadas por planta y día de irrigación, se realizó el procesamiento de estas mediante digestiones de tipo ácida, siguiendo los mismos pasos ya mencionados en la etapa de determinación de elementos.



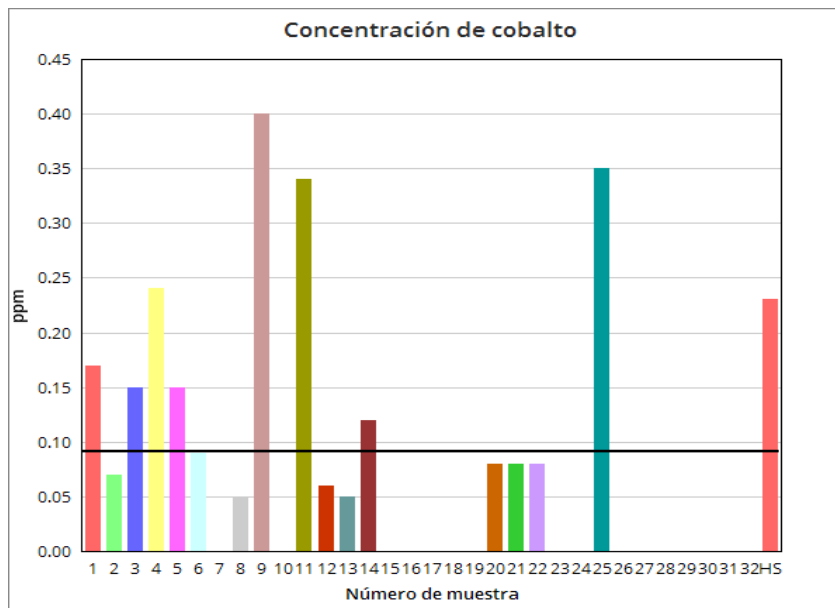
*Figura 33. Segunda recolección de muestras en Oaxaca.*



*Figura 34. Irrigación de especímenes con estándar multielemental.*

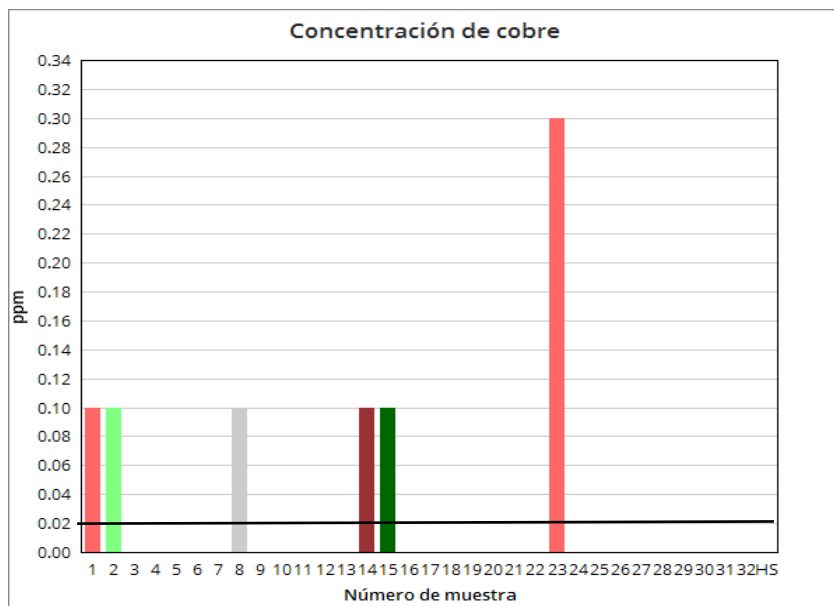
### Capítulo 3. Resultados y análisis de resultados

#### Resultados primera etapa experimental



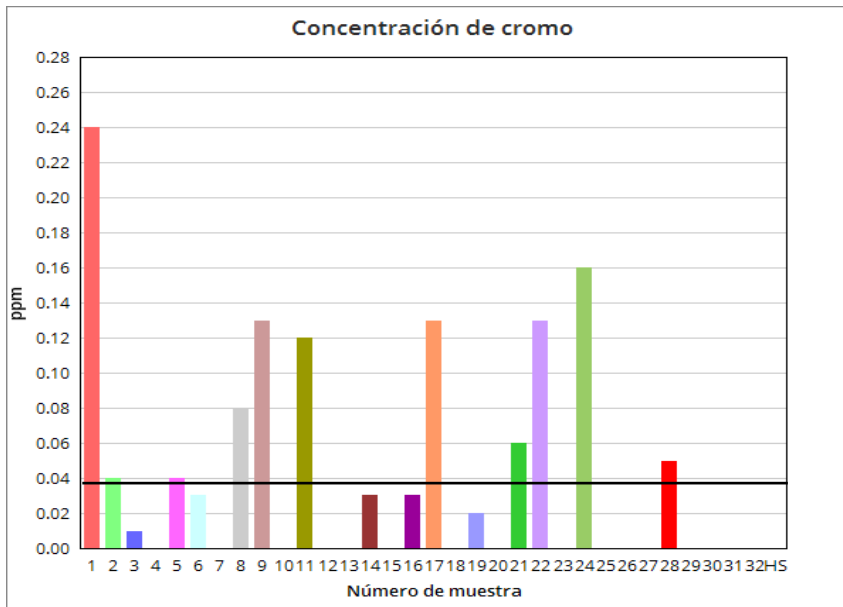
Promedio 0.082  
 Mediana 0.05  
 Moda 0

Figura 35. Concentración en ppm de cobalto que se obtuvo en cada una de las muestras.



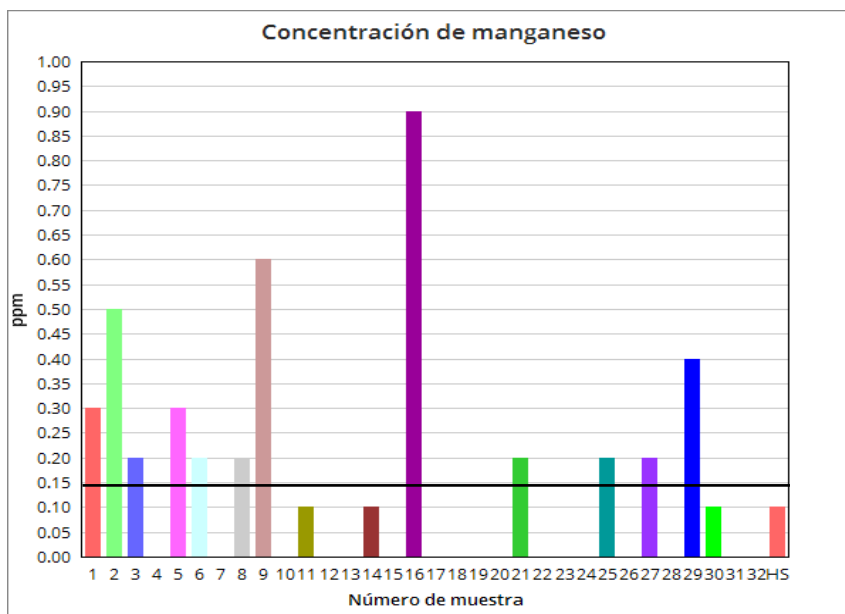
Promedio 0.024  
 Mediana 0  
 Moda 0

Figura 36. Concentración en ppm de cobre que se obtuvo en cada una de las muestras.



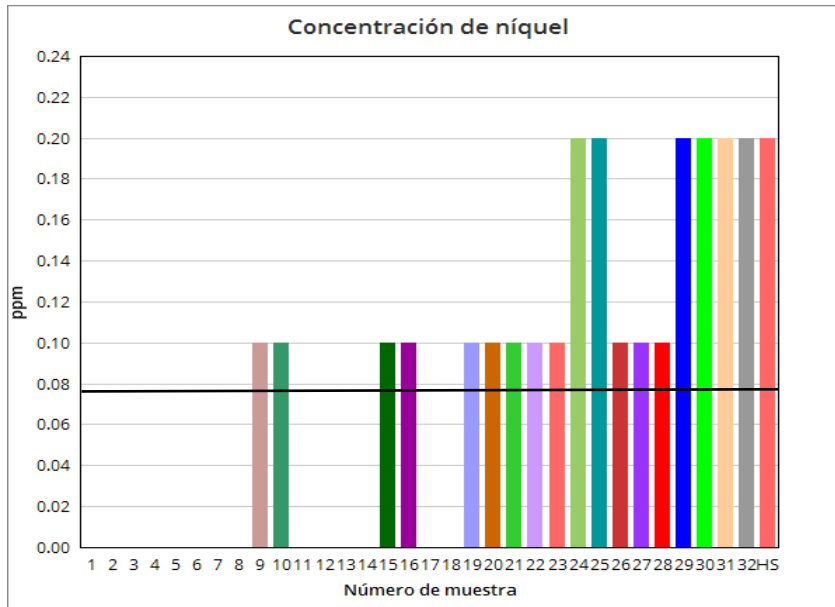
Promedio 0.039  
 Mediana 0  
 Moda 0

Figura 37. Concentración en ppm de cromo que se obtuvo en cada una de las muestras.



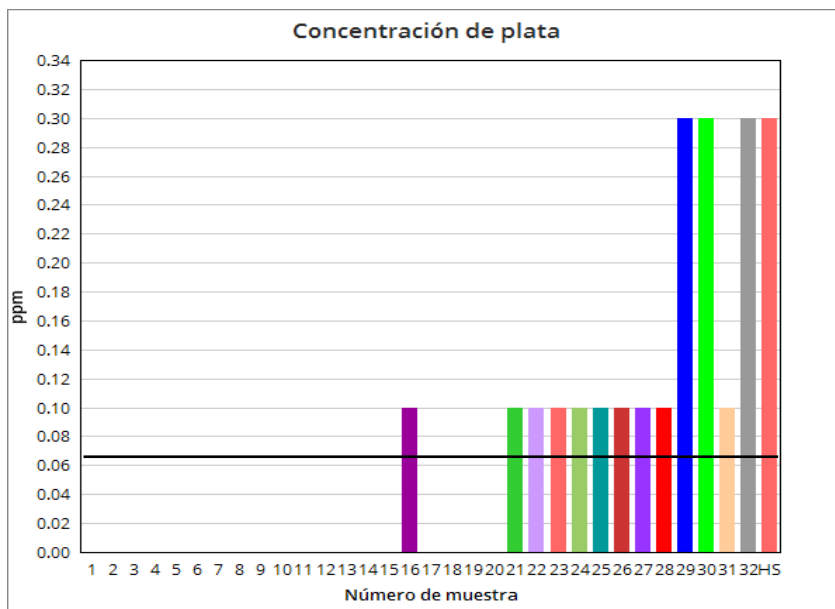
Promedio 0.141  
 Mediana 0  
 Moda 0

Figura 38. Concentración en ppm de manganeso que se obtuvo en cada una de las muestras.



Promedio 0.079  
 Mediana 0.1  
 Moda 0

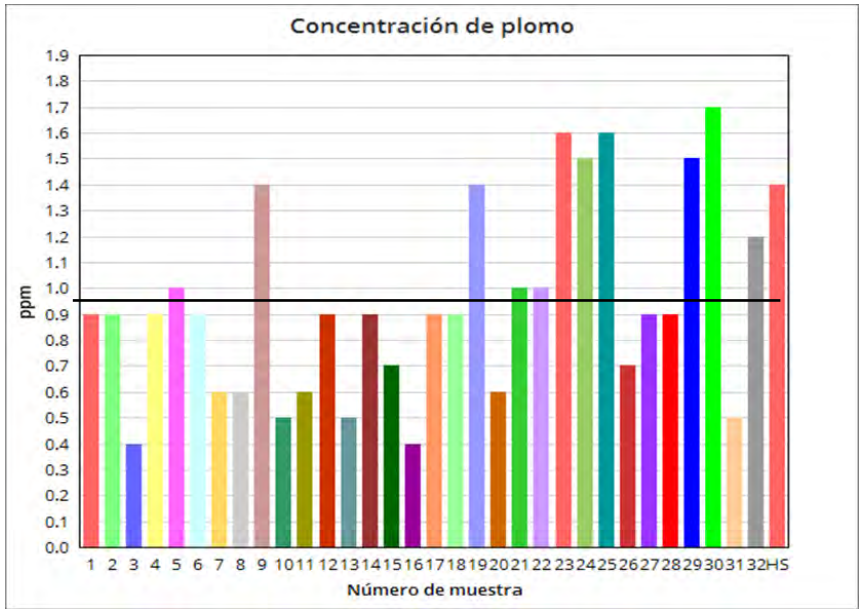
Figura 39. Concentración en ppm de níquel que se obtuvo en cada una de las muestras.



Promedio 0.067  
 Mediana 0  
 Moda 0

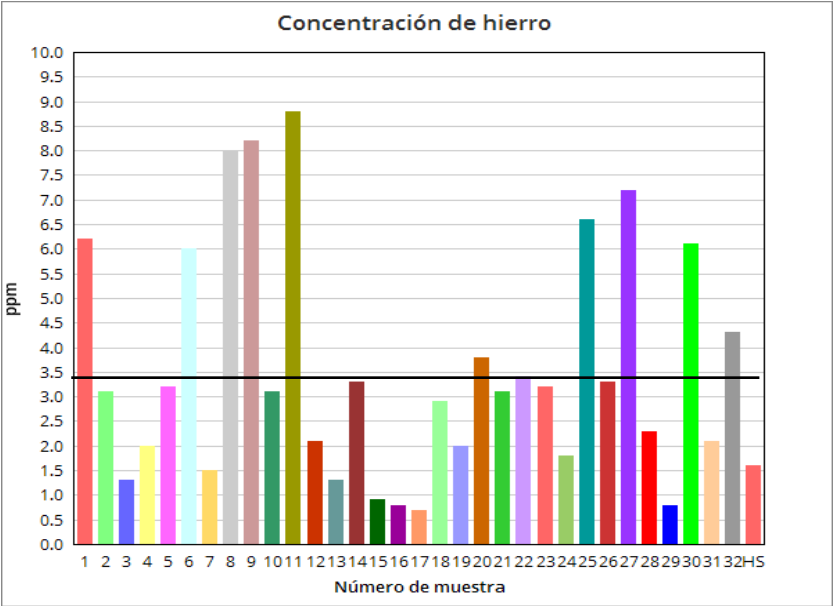
Figura 40. Concentración en ppm de plata que se obtuvo en cada una de las muestras.





Promedio 0.952  
 Mediana 0.9  
 Moda 0.9

Figura 41. Concentración en ppm de plomo que se obtuvo en cada una de las muestras.



Promedio 3.489  
 Mediana 3.1  
 Moda 1.3

Figura 42. Concentración en ppm de hierro que se obtuvo en cada una de las muestras.

## Resultados segunda etapa experimental

### Electrolito en plantas

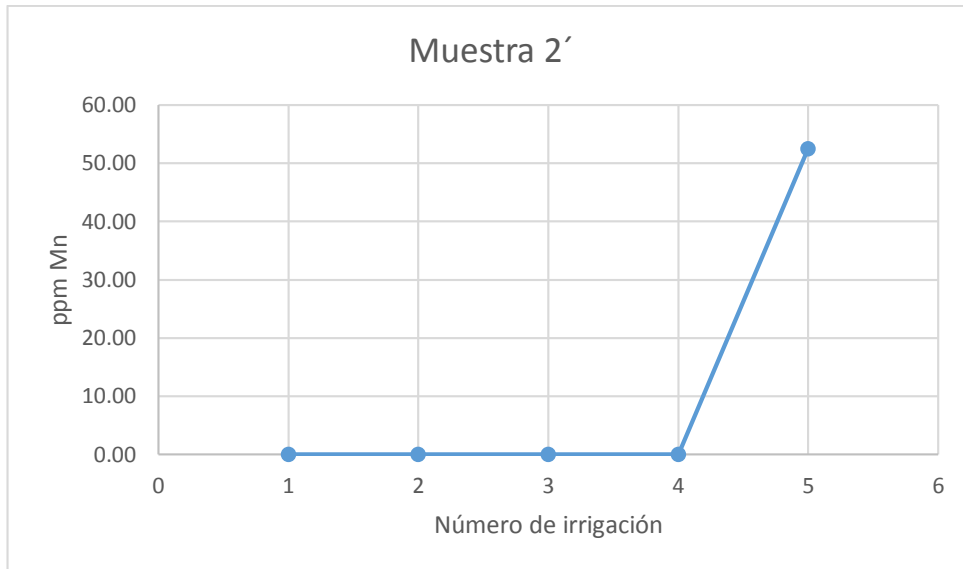


Figura 43. Captación de manganeso en el espécimen (Anexo C, Figura 58), conforme al número de irrigaciones.

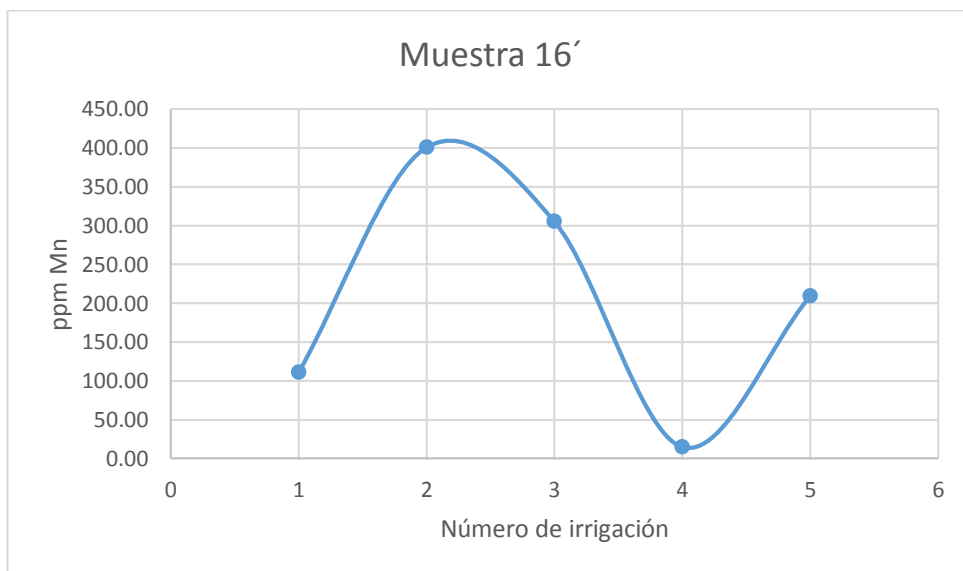
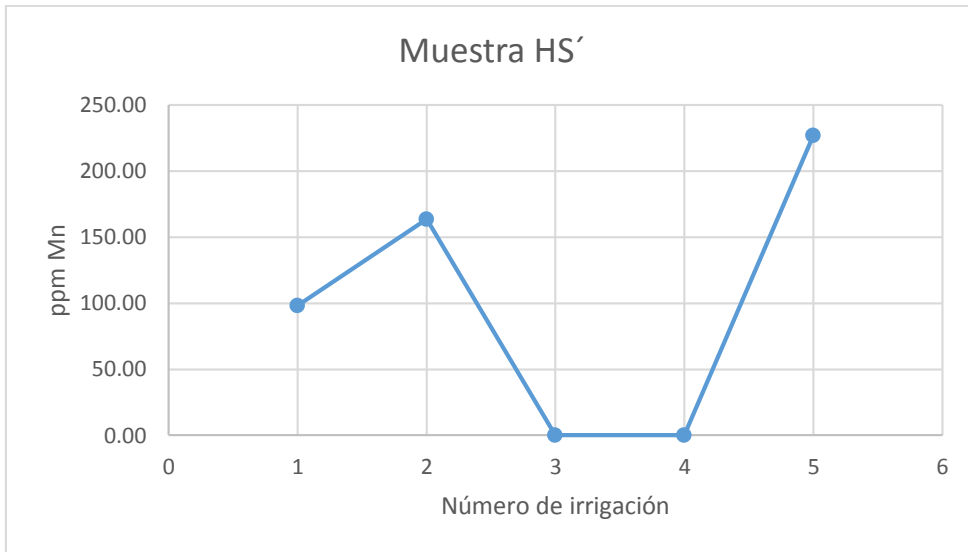
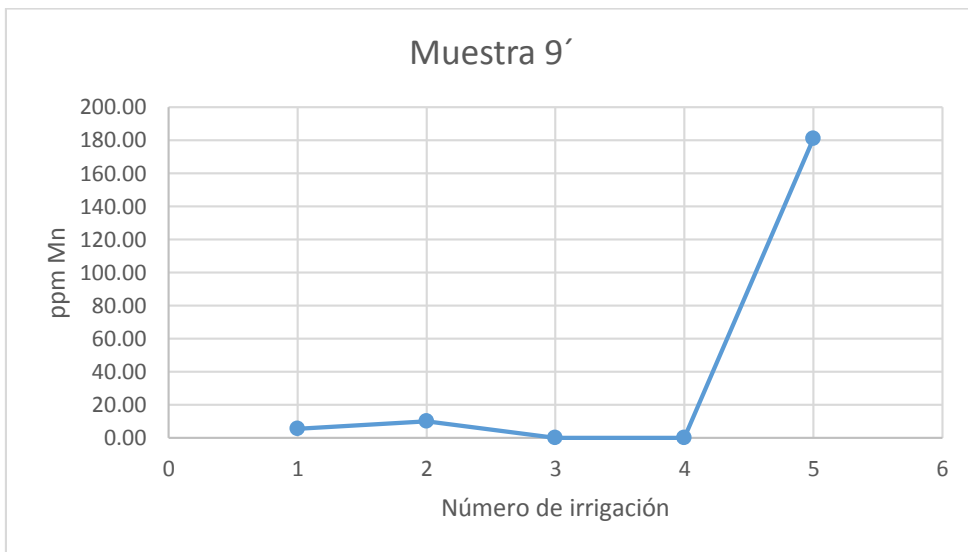


Figura 44. Captación de manganeso en el espécimen (Anexo C, Figura 59), conforme al número de irrigaciones.



*Figura 45. Captación de manganeso en el espécimen (Anexo C, Figura 60), conforme al número de irrigaciones.*



*Figura 46. Captación de manganeso en el espécimen (Anexo C, Figura 62), conforme al número de irrigaciones.*

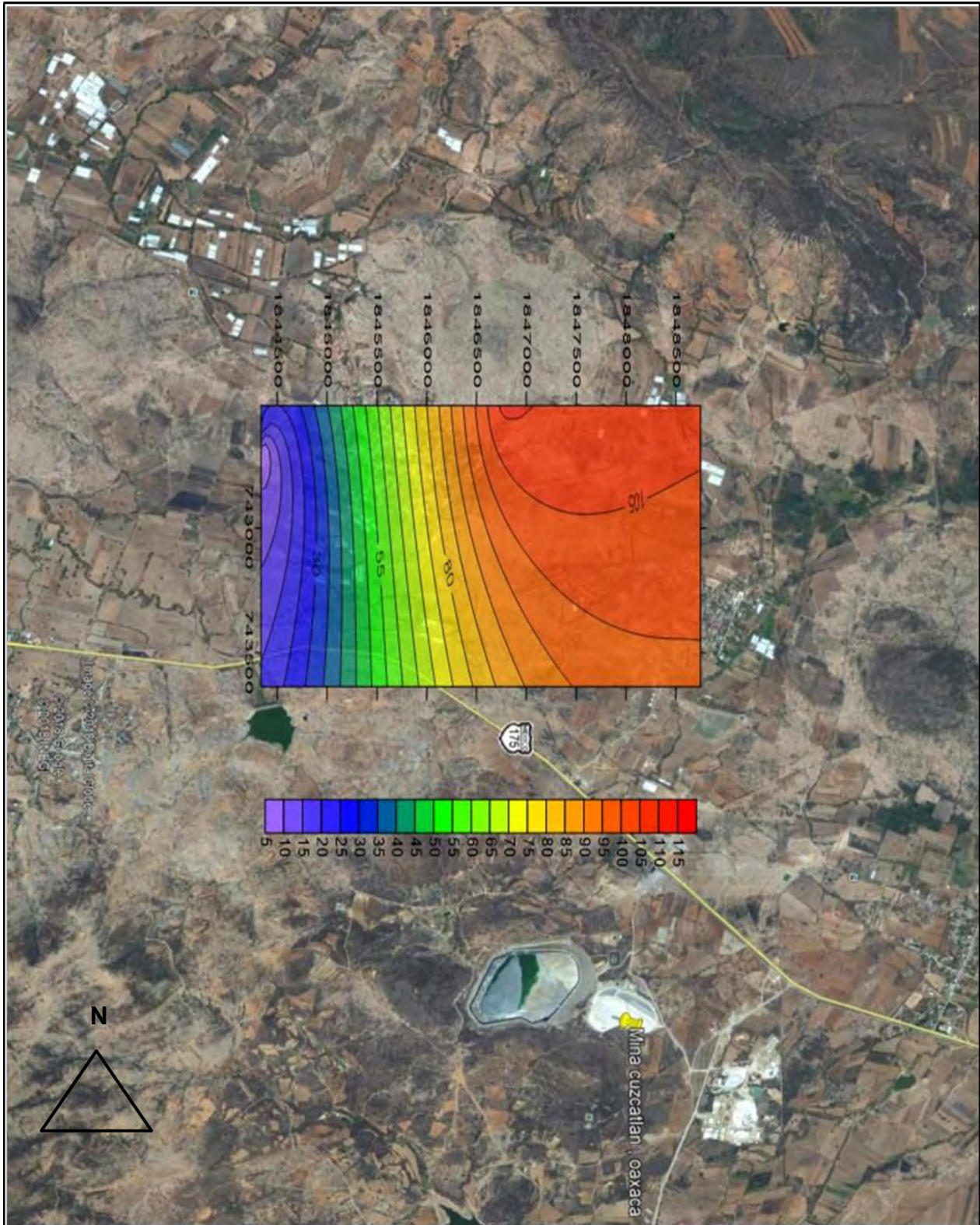


Figura 47. Mapa de distribución de la contaminación en zonas alrededor de la mina Cuzcatlán.

## **Análisis de resultados**

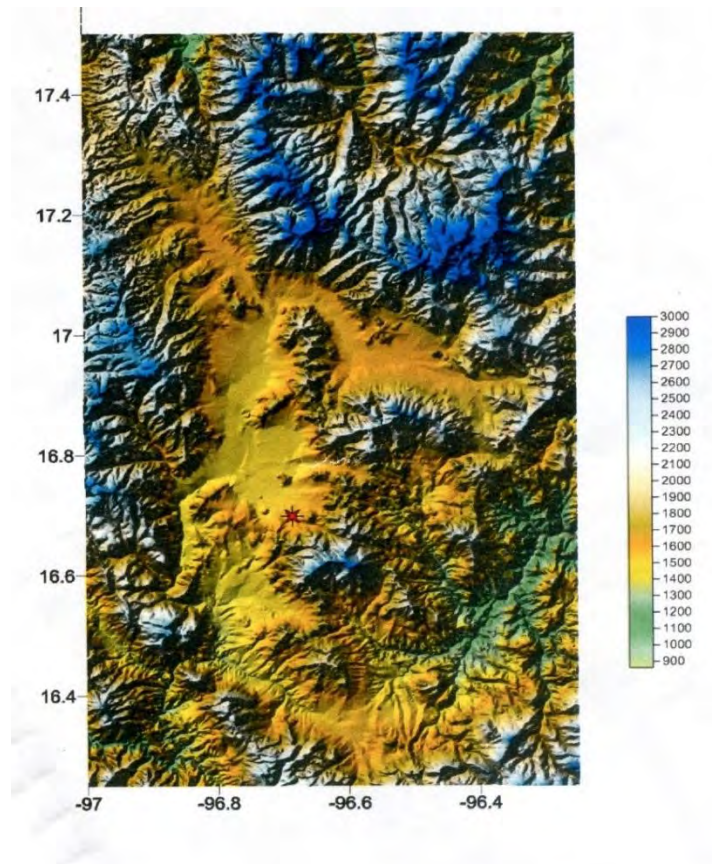
Como se puede apreciar en las figuras de 35 a la 42, se observa que cada una de las plantas, absorbe diferentes tipos de metales pesados, así como cantidades, aunque estas hayan sido recolectadas cerca una de otra, esto se debe a la bioquímica de cada individuo y sus tejidos absorben diferentes tamaños iones y cantidades de estos.

Algunos metales son micronutrientes, aunque en algunas ocasiones estos saturan a las plantas, tal es el caso del hierro y el manganeso que son nutrientes esenciales, en la figura 38, se observa que en el caso del Mn algunas especies presentan concentración mayores de este metal, la distribución se observa a lo largo de todas las áreas muestreadas, deduciendo que los suelos presentes en esta área presentan altas cantidades de Mn, el promedio de esta concentración en las 33 muestras es de 0.141 ppm, aunque existen 4 especies sobresalientes de este valor tales son las plantas con nomenclatura 2, 9,16 y 29, estas son especies genéticamente más tolerables a este elemento y se tratan como hiperacumuladoras.

En el caso de Fe todas las especies presentan cierta cantidad de este metal figura 42, aunque el promedio de estas concentraciones es de 3.489 ppm, existen 9 especies que se encuentran muy por encima del promedio, se dice que estas especies son genéticamente más tolerables y se trata como hiperacumuladoras, aunque en este caso, no es factible llevar a cabo la agrominería puesto que el Fe es uno de los metales más abundantes en la tierra y su proceso de extracción por este medio no sería costeable.

En la figura 40 se observa que las ultimas 13 especies presentan alguna concentración de plata, estas se extrajeron cercanas a la mina Cuzcatlán, exactamente en la posición 1 y 2 (figura 22), que se encuentra frente a los jales de la mina, en estas áreas de toma de muestra se tienen suelos enriquecidos con plata que es el principal metal que se extrae, la alta concentración de Ag se debe a la dispersión del parte aguas de la zona, la recuperación de plata por este medio no es factible, puesto que la máxima absorción de plata es de 0.28 ppm, sin embargo el

promedio es de 0.067 ppm, lo que indica una baja recuperación comparada con el Mn (figura 40). En la figura 48 se puede ver el alto riesgo que implica la contaminación producida por esta mina ya que las corrientes de aire y agua se dirigen hacia la parte baja que es la región conocida como los Valles Centrales de Oaxaca y que abarca no solo la región cercana a la mina si no llega, incluso a la ciudad de Oaxaca (figura 21).



*Figura 48. Niveles de contaminación, en valles centrales de Oaxaca.*

En la figura 43 y 46 se observa que estas especies, empezaron a asimilar los metales pesados hasta que se tenía una concentración de 800 ppm, en donde la planta empieza a asimilar el metal, cabe mencionar que este proceso se dio sin manipulación o adición de micorrizas lo que favorecería enormemente la fijación de este metal en la planta. De esta forma solo se lograron captar entre 52.9 y 181 ppm de Mn. Experimentalmente se pudo comprobar que la absorción de los metales en

las plantas requiere de una concentración crítica, llegando a esta hasta la 4 irrigación, en donde se presentó un cambio en su concentración de este metal en la planta, teniéndose un recobro dentro de las plantas entre el 6.62% y 22.98%.

En la figura 44 y 45 se observa que estas especies presentan un comportamiento similar de saturación y desasimilación del metal a diferentes concentraciones, empezaron a asimilar el Mn a partir de las 400 ppm, a este tiempo la primera especie tuvo un aprovechamiento del 100% y la segunda de un 41%. Para la tercera irrigación presentaron ambas una baja en la asimilación y recuperando la mayor absorción hasta el cuarto riego. Poniendo a ambas como candidatos predilectos para llevar a cabo la agrominería de Mn.

Los resultados que se obtuvieron de acuerdo con la Tabla 4 de la primera etapa, muestran la posibilidad de fijar otros metales, lo que brinda mayor número de posibilidades para la obtención de éstos mediante un proceso agrominero, a partir de fomentar la bioacumulación mediante micorrizas en este tipo de plantas.

A partir de los resultados obtenidos, se encontró que algunas plantas nativas de la zona son bioacumuladores de metales, en este caso solo se llevó a cabo para Mn debido a que es el que tuvo un comportamiento más favorable (figura 38) y aparte es factible que se aplique en él un proceso de agrominería. La planta *Bothriocloa hirtifolia* (Anexo C, Figura 59), presento mayor concentración de este elemento tanto en la planta silvestre como en la planta prueba que se trajo al laboratorio, la ventaja de emplear esta planta, es por un lado la bioacumulación que tiene, la capacidad de fijar los metales aun sin un proceso rizomatico y la facilidad de adaptación al medio ambiente. Por otra parte se observó que de forma silvestre, no requiere un cuidado excesivo para su desarrollo y que aunque la zona es de baja precipitación pluvial no tiene problema de subsistencia con poca agua.

A partir de la distribución de contaminantes que se muestran en la figura 47 (Análisis geoestadístico, Anexo E) se observa que existe una franja en la cual, la concentración de Mn está orientada hacia el valle central, lo que concuerda con los flujos de agua, así como la orografía del terreno

## Capítulo 4. Conclusiones

1. Se logró determinar el grado de asimilación de metales en plantas cercanas a la presa de jales de la mina Cuzcatlán en el municipio de San José del Progreso, Oaxaca.
2. Se llevó a cabo un análisis químico de los metales presentes por ICP y Absorción Atómica, estableciendo una metodología pertinente para procesar las muestras y evitar la pérdida de metales contenidos en ellas.
3. Se fomenta la recuperación de metales de interés, a partir de jales y/o minerales de baja ley empleando plantas perenes.
4. Se localizó una especie nativa con las características de un fácil despojo de la carga metálica y composteo.
5. Se determina que la planta llamada ***Bothriocloa hirtifolia*** (Herter, 2009), es la planta autóctona de la zona con mejores propiedades bioacumuladoras sin manipulación por exoestimulación.
6. Se establece la agrominería, logrando un reaprovechamiento ecológico de las plantas usadas en el proceso, mostrando con ello a los agricultores las ventajas y ganancias que puede generar este proceso.



## Bibliografía

(SINEM), S. I. s. E. M., 2018. *Precio Internacional de Metales (USD/Ton)*, México: GOBIERNO.

A. J. M. Baker, R. R. B., 1989. Terrestrial Higher Plants which Hyperaccumulate. *Biorecovery*, Volumen 1, pp. 81-126.

Anon., 2002. *Secretaría de gobernación, Instituto nacional para el federalismo y el desarrollo municipal*. México: s.n.

Anon., 2005. *Lenntech*. [En línea]

Available at: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/mn.htm>

[Último acceso: 21 Febrero 2018].

Anon., 2016. *naturalista*. [En línea]

Available at: <http://www.naturalista.mx/taxa/154826-Piper-auritum>

[Último acceso: 7 Febrero 2018].

Antony van der Ent, \* A. J. M. B. R. D. R. R. L. C. C. W. N. A. J. A. M. P. D. E. M.-O. S., 2015. Agromining: Farming for Metals in the Future?. *Environmental science & technology*, 8(49), p. 4773–4780.

Aura Madero G., M. J. M. N. P. D., 2011. Detección de metales pesados en bovinos, en los valles de los ríos Sinú y San Jorge, departamento de Córdoba, Colombia. *MVZ Córdoba*, 16(1), pp. 2391-2401.

CO.LTD, J. M. A. C., 1982. *METODO PARA LA PRODUCCION DE BIOXIDO DE MANGANESO ELECTROLITICO*. Japon, Patente nº C25B1/00.

Earnshaw, G. y., 1987. *Chemistry of the Elements*. s.l.:s.n.

Ecoticias, 2016. *Ecoticias*. [En línea]

Available at: <http://www.ecoticias.com/residuos-reciclaje/115317/bioacumulacion->

toxicos

[Último acceso: 8 Febrero 2018].

Emsley, J., 2001. *Nature's Building Blocks*. s.l.:s.n.

García, L. A., 2015. *Agricultura mecanizada*. [En línea] Available at: <https://agriculturamecanizada.jimdo.com/2015/10/23/mecanismo-de-absorcion-de-nutrientes-en-plantas/>

[Último acceso: 30 Enero 2018].

González Chávez, M. d. C. A., 2005. Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos.. *TERRA LATINOAMERICANA*, 23(1), pp. 29-37.

Herter, D., 2009. *Bothriochloa laguroides*, México: Conabio.

Instituto Nacional de estadística, g. e. i., 2001. *Censo general de población y vivienda*. México: s.n.

J.P. Navarro Aviñó, I. A. A. J. L. M., 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *ecosistemas revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 16(2), pp. 10-25.

Juárez, F., 2010. *Espectroscopía atómica: absorción y emisión*. s.l.:Instituto de geofísica.

Lorraine, N., 2017. *INRA SCIENCE & IMPACT*. [En línea] Available at: <http://centres.inra.fr/es/content/view/full/223035> [Último acceso: 05 ENERO 2018].

Marie-Noëlle Croteau, S. N. L. R. S., 2005. Trophic transfer of metals along freshwater food webs: Evidence of cadmium biomagnification in nature. *Limnology and oceanography*, pp. 1511-1519.

Municipal, A., 1994. *La población de los Municipios de México 1950-1990*. primera ed. México: Servicios Gráficos.

Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D. & Prieto García, F., 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), pp. 29-44.

R. O. Carpena, M. P. B., 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *ecosistemas* , 16(2), pp. 1-3.

Schltldl, C. &., 2006. *Asclepias oenotheroides*, s.l.: Conabio.

Secretaria de gobernación, C. n. d. e. m. G. d. e. d. O., 1988. *Los municipios de Oaxaca*. México: Talleres graficos de la nación.

Singh et al., A.-A. J. A., 2003. Effect of feeding transgenic cottonseed vis-à-vis non-transgenic cottonseed on haematobiochemical constituents in lactating Murrah buffaloes.. *Feedipedia*, 16(12), pp. 1732-1737.

Trabajo, O. I. d., 2004. *EL CUERPO Y EL TRABAJO*, s.l.: Oficina dde activación para los trabajadores.

Willd, (., 1806. *Acacia farnesiana*. *Species Plantarum*, 4(2), pp. 1083-1084.

Zimmermann, M. J., 2001. Adaptaciones de plantas a estrés abiótico que les permiten vivir y prosperar en diferentes condiciones ambientales. *Creces ciencia y tecnología*.

Pacheco Rivera, D. and Dávila Aranda, P. (2004). Sinopsis de las gramíneas de Oaxaca, México. *Acta Botánica Mexicana*, (69), p.83.

Rzedowski, J. and Rzedowski, G. (1990). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Pátzcuaro, Mich: Instituto de Ecología.

## Anexos

### Anexo A

#### Curvas de calibración

Curvas de calibración, para cada uno de los elementos analizados. A las concentraciones de 0.5, 1.5, 3.0, 6.0 y 12.0 ppm.

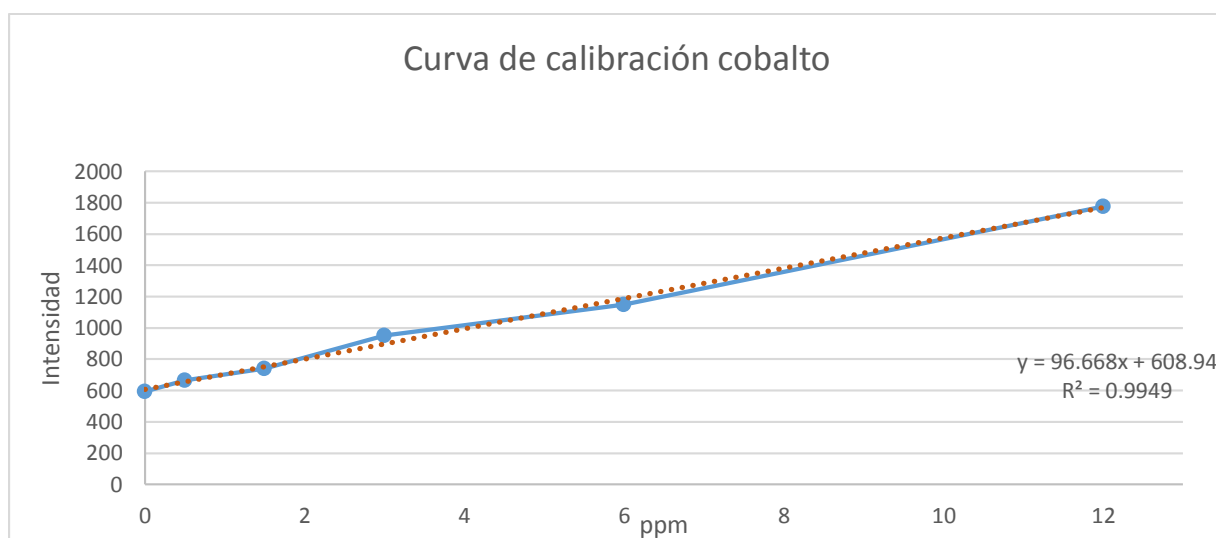


Figura 49. Curva de calibración para cobalto.

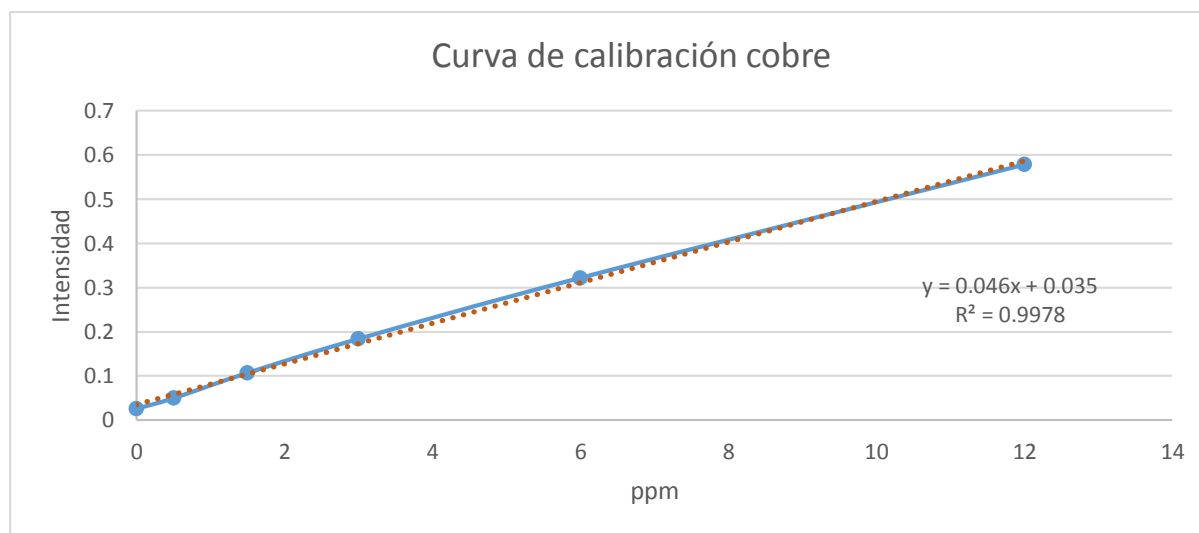


Figura 50. Curva de calibración para cobre.

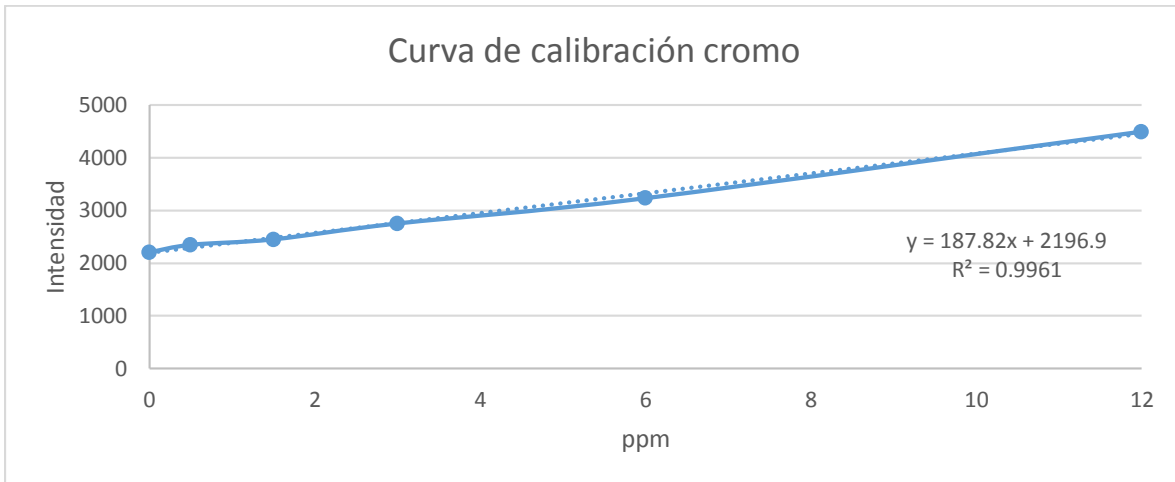


Figura 51. Curva de calibración para cromo.

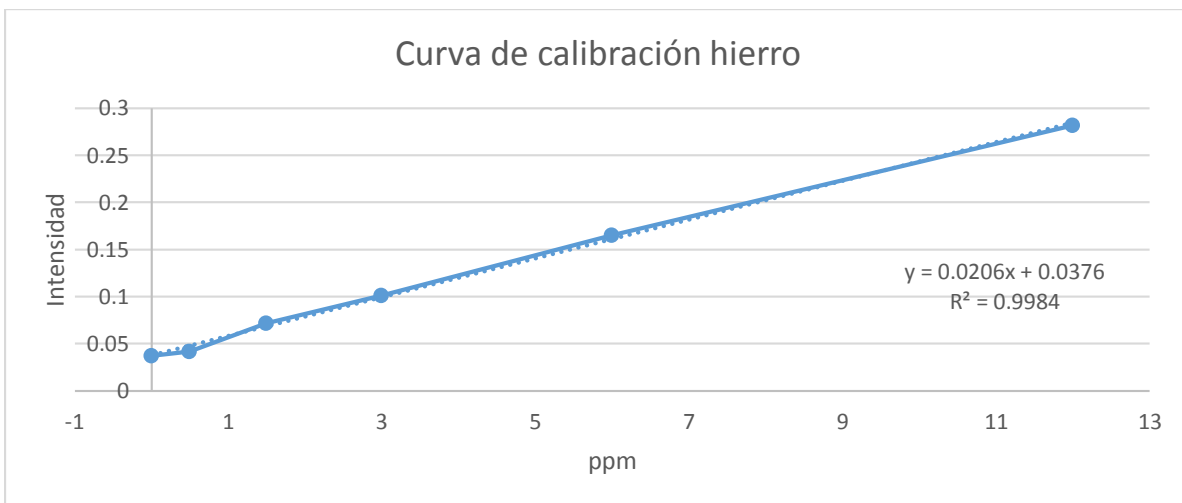


Figura 52. Curva de calibración para hierro.

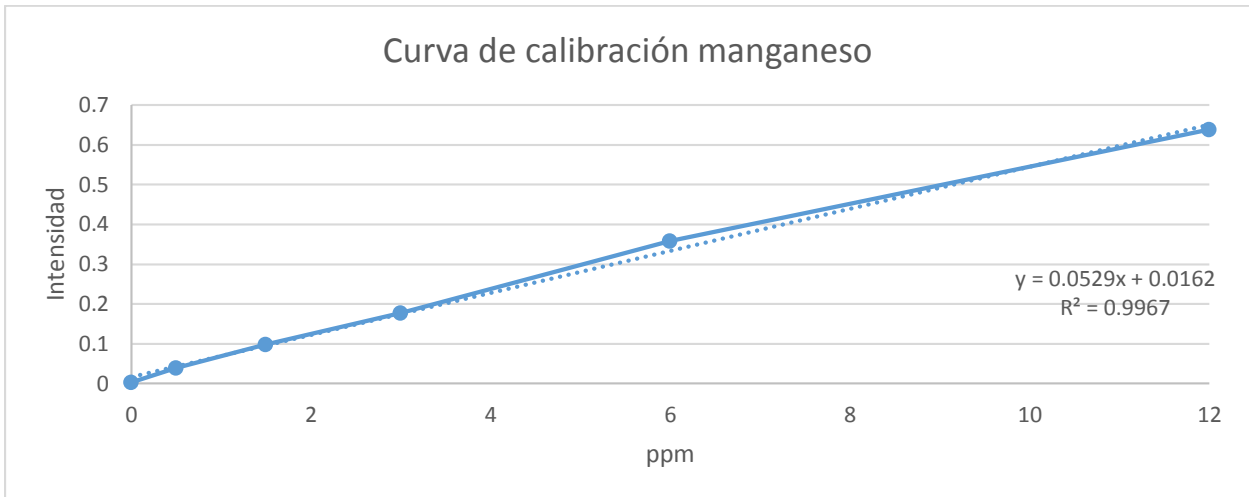


Figura 53. Curva de calibración para manganeso.

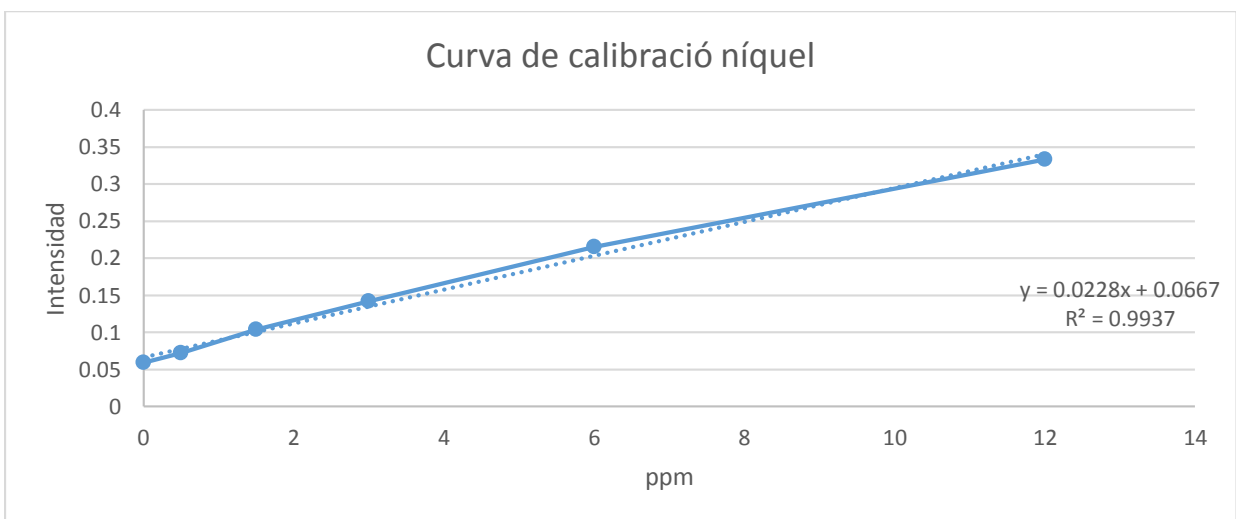


Figura 54. Curva de calibración para níquel.

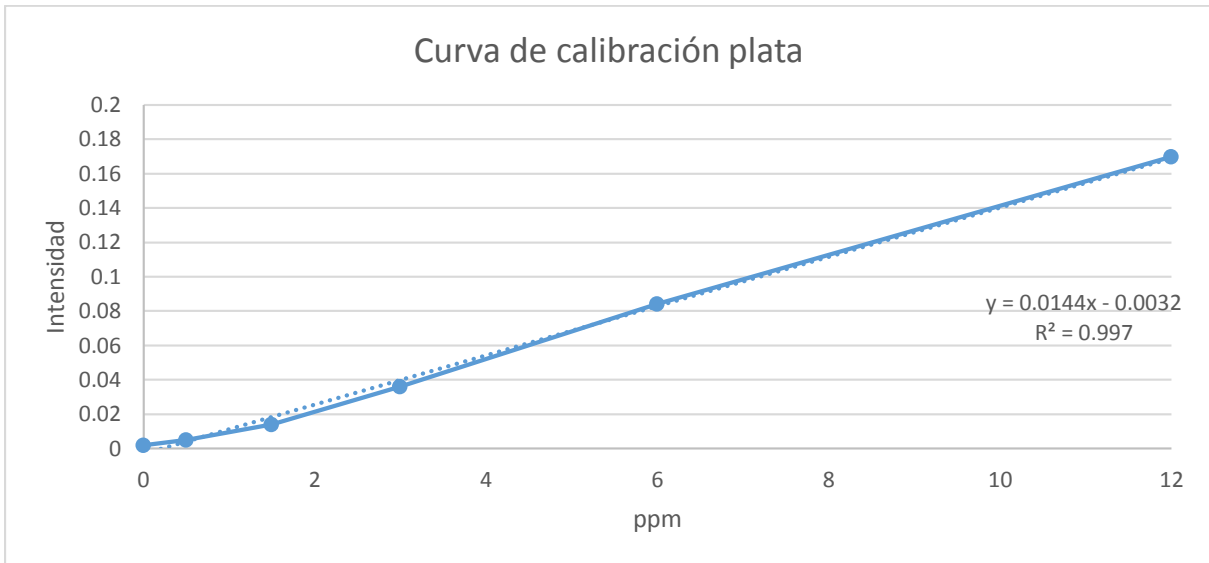


Figura 55. Curva de calibración para plata.

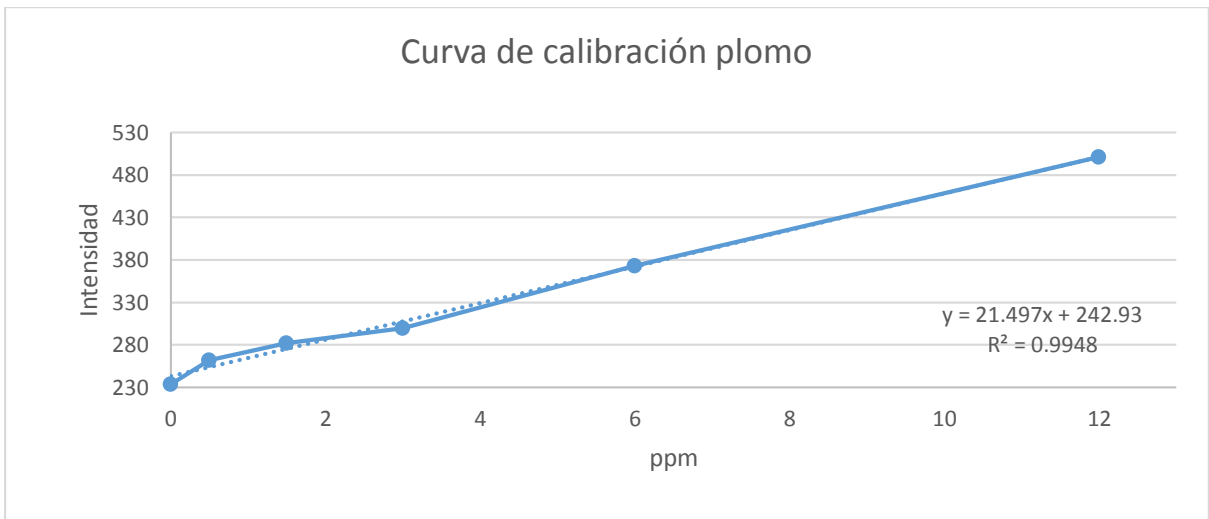


Figura 56. Curva de calibración para plomo.



Figura 57. Curva de calibración para manganeso.



## Anexo B

### Tablas de resultados

*Tabla 4 Resultados de la curva de calibración, elaborada con estándares de 0.5, 1.5, 3.0, 6.0, 12.0. De cada uno de los elementos leídos en las muestras.*

Muestra	Ag (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Co (ppm)	Pb (ppm)	Mn (ppm)
0	0,002	0,037	0,026	2210	0,059	594	234	0,003
0,5	0,005	0,042	0,05	2350	0,072	664	262	0,039
1,5	0,014	0,072	0,107	2454	0,104	741	282	0,099
3	0,036	0,101	0,184	2755	0,142	952	300	0,177
6	0,084	0,165	0,322	3235	0,215	1149	373	0,358
12	0,17	0,282	0,578	4497	0,333	1777	501	0,638

*Tabla 5 Resultados en ppm de cada uno de los elementos leídos y la especie que contiene esa concentración de ellos.*

Muestra	Ag (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Cr (ppm)	Ni (ppm)	Co (ppm)	Pb (ppm)	Mn (ppm)
1	ND	6,2	0,1	0,24	ND	0,17	0,9	0,22
2	ND	3,1	0,1	0,04	ND	0,07	0,9	0,41
3	ND	1,3	ND	0,01	ND	0,15	0,4	0,2
4	ND	2	ND	0	ND	0,24	0,9	ND
5	ND	3,2	ND	0,04	ND	0,15	1	0,38
6	ND	6	ND	0,03	ND	0,09	0,9	ND

7	ND	1,5	ND	0	ND	ND	0,6	ND
8	ND	8	0,1	0,08	ND	0,05	0,6	ND
9	ND	8,2	ND	0,13	0,1	0,4	1,4	ND
10	ND	3,1	ND	ND	0,1	ND	0,5	ND
11	ND	8,8	ND	0,12	ND	0,34	0,6	ND
12	ND	2,1	ND	ND	ND	0,06	0,9	ND
13	ND	1,3	ND	ND	ND	0,05	0,5	ND
14	ND	3,3	0,1	0,03	ND	0,12	0,9	ND
15	ND	0,9	0,1	ND	0,1	ND	0,7	ND
16	0,1	0,8	ND	0,03	0,1	ND	0,4	ND
17	ND	0,7	ND	0,13	ND	ND	0,9	ND
18	ND	2,9	ND	ND	ND	ND	0,9	ND
19	ND	2	ND	0,02	0,1	ND	1,4	ND
20	ND	3,8	ND	ND	0,1	0,08	0,6	ND
21	0,1	3,1	ND	0,06	0,1	0,08	1	ND
22	0,1	3,4	ND	0,13	0,1	0,08	1	ND
23	0,1	3,2	0,3	0	0,1	ND	1,6	ND

24	0,1	1,8	ND	0,16	0,2	ND	1,5	ND
25	0,1	6,6	ND	ND	0,2	0,35	1,6	ND
26	0,1	3,3	ND	ND	0,1	ND	0,7	ND
27	0,1	7,2	ND	ND	0,1	ND	0,9	ND
28	0,1	2,3	ND	0.05	0,1	ND	0,9	ND
29	0,3	0,8	ND	ND	0,2	ND	1,5	ND
30	0,3	6,1	ND	ND	0,2	ND	1,7	ND
31	0,1	2,1	ND	ND	0,2	ND	0,5	ND
32	0,3	4,3	ND	ND	0,2	ND	1,2	ND
HS	0,3	1,6	ND	ND	0,2	0,23	1,4	ND

ND: No detectable

Tabla 6 Resultados obtenidos después de dos semanas de irrigación con estándar multielemental de las especies.

MUESTRA	ppm	PESO	LECTURA CONCENTRACIÓN (mg/l)	% EN LA MUESTRA
s1.1	0,00	0,1702	0	0,00
2,1	110,89	0,1984	0,22	0,01
3,1	98,33	0,1017	0,1	0,01
4,1	24,91	0,2007	0,05	0,00
5,1	5,44	0,1839	0,01	0,00
s1.2	0,00	0,1751	0	0,00
2,2	400,40	0,1998	0,8	0,04
3,2	163,62	0,1039	0,17	0,02
4,2	0,00	0,1937	0	0,00
5,2	9,84	0,2032	0,02	0,00
s1.3	0,00	0,1278	0	0,00
2,3	304,88	0,0984	0,3	0,03
3,3	0,00	0,0887	0	0,00
4,3	0,00	0,2152	0	0,00
5,3	0,00	0,2182	0	0,00
s1.4	0,00	0,2	0	0,00
2,4	14,84	0,2022	0,03	0,00
3,4	0,00	0,1613	0	0,00
4,4	0,00	0,2764	0	0,00
5,4	0,00	0,2181	0	0,00
s1.5	52,49	0,2286	0,12	0,01
2,5	209,04	0,2344	0,49	0,02
3,5	226,90	0,3085	0,7	0,02
4,5	0,00	0,3081	0	0,00
5,5	180,97	0,3205	0,58	0,02
suelo	160,48	0,2991	0,48	0,02
1g pasto	164,74	1,0016	1,65	0,02

## **Anexo C**

### **Especies recolectadas como buenos candidatos hiperacumuladores de la región de los valles centrales del Estado de Oaxaca**

#### **Acacia farnesiana** (Willd, 1806)

Nombres comunes en México. Huizache, Güizache (Rep. Mex.); Bihi (l. zapoteca, Oax.); Espino, Espino blanco (Oax.)

Forma. Arbusto espinoso o árbol pequeño, perennifolio o subcaducifolio, de 1 a 2 m de altura la forma arbustiva y de 3 a 10 m la forma arbórea, con un diámetro a la altura del pecho de hasta 40 cm.

Copa y hojas. Copa redondeada. Hojas plumosas, alternas, frecuentemente aglomeradas en las axilas de cada par de espinas, bipinnadas, de 2 a 8 cm de largo incluyendo el pecíolo, con 2 a 7 pares de folíolos primarios opuestos y 10 a 25 pares de folíolos secundarios.

Semilla(s). Semillas reniformes, de 6 a 8 mm de largo, pardo-amarillentas, de olor dulzón y con una marca linear en forma de "C". La testa de la semilla es impermeable al agua.

Estados. Aguascalientes, Baja California Norte, Baja California Sur, Campeche, Chihuahua, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Zacatecas, Morelos, Nayarit, Nuevo León.

HABITAT. Por lo general se desarrolla a orilla de caminos, arroyos, parcelas abandonadas, terrenos con disturbio, terrenos sucesionales (acahuales). Se le encuentra donde predominan climas cálidos (Aw) y semicálidos A(C), en regiones que tienen hasta 900 mm de precipitación anual y temperaturas que varían de 5 a 30 °C. Suelos: rendzina, xegorendzina, vertisol, arenoso, húmedo, caliza, lutita y aluvi6n.

Efecto(s) restaurador(es). 1. Estabiliza bancos de arena. Recomendado para frenar el avance de las arenas movedizas. 2. Conservaci6n de suelo / Control de la erosi6n. 3. Recuperaci6n de terrenos degradados (suelos qu6micamente degradados). 4. Fijaci6n de nitr6geno

Tolerante a. 1. Suelos salinos. Los huizaches tienen la habilidad para germinar y establecerse en suelos salinos, aunque la semilla tiene una tolerancia media a la salinidad. 2. Sequía. Extremadamente tolerante a la sequía. 3. Suelos pobres. Se adapta bien a éstos.



*Figura 58. Acacia farnesiana, especie originaria del municipio de San José del Progreso, Oaxaca.*

***Bothriocloa hirtifolia*** (Herter, 2009).

Nombres comunes en México. Carretero, popotón, cola de caballo, popotillo, zacatón (Rzedowski y Rzedowski, 2004).

Hábito y forma de vida: Hierba, generalmente con muchos tallos creciendo a partir de una sola raíz, formando un macollo.

Tamaño: Los tallos de 0.3 a 1.3 m de largo.

Tallo: Hueco y delicado, erecto o casi erecto, a veces ramificado hacia la base, a veces con pelillos en los nudos.

Hojas: Alternas, dispuestas en 2 hileras sobre el tallo, con las venas paralelas, divididas en 2 porciones, la inferior llamada vaina que envuelve al tallo, generalmente más corta que el entrenudo, y la parte superior de la hoja llamada lámina que es larga, angosta, plana, generalmente de color verde-azuloso, raramente con pelillos; entre la vaina y la lámina, por la cara interna, se presenta una pequeña prolongación membranácea, con pelos en el margen, llamada lígula.

Inflorescencia: Una panícula plumosa, de hasta 20 cm de largo (generalmente más chica), ubicada en la punta del tallo, con las ramitas ascendentes y alternas; los ejes más pequeños de la inflorescencia, los que sostienen las espiguillas, presentan un surco medio translúcido; todos los ejes de la inflorescencia están cubiertos con abundantes pelos blancos, largos y sedosos.

Espiguilla/Flores: Las flores son muy pequeñas y se encuentran cubiertas por una serie de brácteas, de una de ellas asoma una arista delgada, retorcida, de 1 a 1.5 mm de longitud.

Frutos y semillas: Una sola semilla fusionada a la pared del fruto.

Raíz: Con pequeños tallos subterráneos (rizomas).

Estados. Chiapas, Coahuila, Distrito Federal, Durango, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala.

HABITAT. A orillas de caminos, cerca de canales de riego, a orillas de parcelas de maíz, ocasionalmente en cultivos de alfalfa.

Cultivos afectados y efectos sobre los cultivos. Se reporta como maleza en alfalfa, frijol y maíz (Villaseñor y Espinosa, 1998).

Usos. Produce buen forraje para el ganado, es resistente al pisoteo y retoña continuamente (Nicora, 1978).



*Figura 59. Bothriocloa hirtifolia. Especie originaria del municipio de San José del Progreso, Oaxaca.*



## **Piper auritum Kunth (Anon., 2016)**

Nombres comunes en México. Acuyo, tlanepa, hierba santa, alaján o momo

Arbusto o árbol pequeño, 1,5 a 5 m de altura, los tallos con nudos visibles, lisos.

Hojas. Simples, alternas, láminas de 13-35 x 12-26 cm, ovadas o ampliamente ovadas a elíptico-ovadas, el ápice agudo, la base en forma de corazón a profundamente auriculada (en forma de oreja), el lóbulo más grande, tan largo como el pecíolo y a menudo traslapándolo, el más corto hasta 1/3 de la longitud del pecíolo, el margen entero, cortamente pubescentes, pecioladas.

Tallo ramificado, las ramas jóvenes cubiertas de abundantes pelillos suaves. Inflorescencias axilares, tipo espigas, de 6 hasta 35 cm de largo y 4-5 mm de grueso, de color blanca a verde pálido, delgadas con aspecto de “cola de ratón”. Flores diminutas, densamente agrupadas en el raquis sin formar bandas alrededor de la espiga.

Frutos. Regularmente de 0,8-1 mm de largo, obovoides, glabros, verde pálido, con una semilla.

Raíces. Puede formar una raíz principal o en su caso dependiendo del tipo de suelos puede formar raíces laterales. También puede formar raíces adventicias.

Estados. Se conoce del centro y sur de México hasta Colombia, así como la. Trópicos cita ejemplares de Chiapas, Guerrero, Hidalgo, Nayarit, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Tabasco y Veracruz.

HABITAT. Característico de sitios perturbados y a lo largo de ríos y caminos, en acahuals, en plantaciones como cafetales o cultivos de cacao. Crece en el sol o a media sombra.

Estado De Conservación. Esta especie presenta una rápida proliferación desde la superficie de los rizomas y puede formar grandes poblaciones en cortos períodos de tiempo. Las flores son polinizadas por pequeños escarabajos o moscas.

Usos. Es de uso frecuente en la cocina mexicana.



*Figura 60. Piper auritum Kunth. Especie originaria del municipio de San José del progreso Oaxaca.*

**Asclepias oenotheroides** (Schltdl, 2006)

Nombres comunes en México. Leche de perro

Hábito y forma de vida: Hierba perenne, erecta, a veces con pelillos.

Tamaño: De hasta 50 cm de alto.

Tallo: A veces ramificado cerca de la base, con pelillos (más abundantes en 2 líneas).

Hojas: Opuestas, variables en forma y tamaño, de hasta 12 cm de largo, aunque generalmente más cortas, es común que se encuentren plegadas a lo largo.

Inflorescencia: De 6 a 20 flores pediceladas, agrupadas en la punta de un pedúnculo de hasta 2 cm de largo, quedando todas las flores más o menos al mismo nivel. Los pedicelos que sostienen cada flor son ligeramente más largos que el pedúnculo que sostiene a la inflorescencia. Las inflorescencias son laterales sobre el tallo (no se encuentran en la punta del tallo, ni en las axilas de las hojas). En la base de la inflorescencia pueden presentarse brácteas angostas y pequeñas.

Flores: Las flores en el género *Asclepias* son muy especializadas, en términos generales se pueden describir de la siguiente forma: los 5 sépalos y los 5 pétalos se encuentran completamente curvados hacia atrás (reflexos); enseguida se encuentran 5 lóbulos ahuecados como “copas” (llamados capuchones), cada uno presentando un pequeño “cuerno” (llamado cornículo), los capuchones con sus respectivos cornículos constituyen lo que se llama la corona. Frutos y semillas: Los frutos son secos, formados a partir de un solo carpelo, se abren por la sutura ventral (se llaman folículos), erectos sobre pedicelos curvados (deflexos), son fusiformes, algo asimétricos, de hasta 9 cm de largo y 2 cm de ancho, con la superficie lisa y a veces cubierta de pelos cortos; semillas obovadas, de 5.2 a 5.5 mm de largo, de 3.9 a 6.2 mm de ancho, de superficie lisa, café con el margen café más pálido, con un “penacho” de pelos blancos o pálidamente café amarillentos, de 2 a 3.5 cm de largo, llamado coma.

Raíz: Con tallo subterráneo (rizoma) leñoso y corchoso, las raíces carnosas.

Características especiales: Con látex blanco.

Estados. Se ha registrado en Campeche, Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Durango, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Querétaro, San Luís Potosí, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán

HABITAT. En lugares abiertos.



*Figura 61. Asclepias oenotheroides. Especie originaria del municipio de San José del Progreso, Oaxaca.*

## **Verbenaceae (Familia)**

Hierbas, arbustos o árboles; tallos y ramillas a menudo tetragonales; hojas opuestas, rara vez verticiladas, alternas o dispersas, sin estípulas, en general simples, margen entero, dentado o pinnatífido; inflorescencia axilar o terminal, en forma de cima, racimo, espiga, tirso, panícula, cabezuela o falsa umbela, algunas veces con involucre.

Flores sésiles o pediceladas, usualmente perfectas; cáliz gamosépalo, campanulado, tubular, ciatiforme, por lo común acrescente, usualmente con 5 lóbulos (rara vez 2, 3, 4 ó 7).

Fruto a menudo deshaciéndose en esquizocarpios, o bien, drupáceo, con un exocarpio delgado, seco o carnoso y endocarpio más o menos duro con varias semillas.

Esta familia está formada por unos 90 géneros y aproximadamente 3000 especies, de distribución casi cosmopolita, pero preferentemente en las regiones tropicales y subtropicales.



*Figura 62. Verbenaceae. Especie originaria del municipio de San José del Progreso, Oaxaca.*

## Anexo D

### Especies endémicas de la región

Acacia longifolia	Arenga engleri	Cydonia oblonga
Acacia saligna	Bergenia (Begonia)	Dianthus caryophyllus
Acer nigra	Butia capitata	Escallonia
Achillea millefolium	Buxus (Boj)	Eucaliptus (Eucalipto)
Ailanto (Árbol del cielo)	Campánula	Fuchsia
Acacia de Constantinopla	Catalpa bignonioides	Gingko biloba
Alcea	Ceanotbus	Gleditsia macracantha
Alheli	Cercis siliquastrom	Lavatera arbórea (Malva)
Allium	Chaenomeles	Lonicera (Madreselva)
Alyssum	Chamaesis	Magnolia glandiflora
Anemone	Clematis (Clematide)	Morus alba (Morera)
Aquilegia	Crataegus monogyna	Morus nigra (Morera negra)
Arabis	Crocsmia	Olea europaea (Olivo)

Prunus serrulata	Thuja	Viburnum opulus Roseum
Pyracantha	Tulipa (Tulipan)	Viburnum tinus
Pyrus communis (Peral)	Ulmus glabra pendula	Weigela
Quercus ilex	Verbascum	Zinnia
Robinia pseudoacacia	Viburnum lantana	
Syringa vulgaris (Lilo)		

## Anexo E

### Datos estadísticos del programa Surfer

---

# Gridding Report

---

Fri Feb 02 15:08:12 2018

Elapsed time for gridding: 0.00 seconds

## Data Source

Source Data File Name: C:\mis documentos\alumnos\Montserrat\Mn Oaxaca2.blm  
X Column: A  
Y Column: B  
Z Column: C

## Data Counts

Active Data: 4  
Original Data: 4  
Excluded Data: 0  
Deleted Duplicates: 0  
Retained Duplicates: 0  
Artificial Data: 0  
Superseded Data: 0

## Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

## Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First  
X Duplicate Tolerance: 0.00013  
Y Duplicate Tolerance: 0.00052

No duplicate data were found.

## Breakline Filtering



Breakline Filtering:

Not In Use

## Data Counts

Active Data: 4

## Univariate Statistics

5.44	5.44	
25%%-tile:	742507.5	Maximum: 5.44
	1844336.4	743635.5
	5.44	1848750.1
50%%-tile:	742632.9	110.89
	1844345.8	Mean:
X	24.91	742856.625
Y	75%%-tile:	1846046.1
Z	742650.6	59.8925
	1846752.1	Median:
	98.33	742641.75
Count:	90%%-tile:	1845548.95
4	742650.6	61.62
4	1846752.1	Geometric Mean:
4	98.33	742856.486907
1%%-tile:	95%%-tile:	1846045.17773
742507.5	742650.6	34.8648469012
1844336.4	1846752.1	Harmonic Mean:
5.44	98.33	742856.348876
5%%-tile:	99%%-tile:	1846044.2557
742507.5	742650.6	16.4503560234
1844336.4	1846752.1	Root Mean Square:
5.44	98.33	742856.763155
10%%-tile:	Minimum:	1846047.02252
742507.5	742507.5	75.1922248308
1844336.4	1844336.4	Trim Mean (10%%):
		N/A

N/A			4413.7		0.876479692052
N/A					Skewness:
Interquartile	Mean:		105.45		0.715927115146
742597			Mean	Difference:	0.263727213389
1845144.76667			566.95		-0.0256567044163
42.8933333333			2607.9		Kurtosis:
Midrange:			64.9616666667		1.29234151139
743071.5			Median	Abs.	0.855920399135
1846543.25			Deviation:		0.63328270016
58.165			71.55		
Winsorized	Mean:		1207.85		Sum:
742610.4			42.99		2971426.5
1845546.6			Average	Abs.	7384184.4
56.7525			Deviation:		239.57
TriMean:			286.425		Sum
742605.975			1705		Absolute:
1844945.025			44.7175		2971426.5
38.3975			Quartile	Dispersion:	7384184.4
Variance:			9.63533781353e-005		239.57
273677.9025			0.000654468187365		Sum
4541382.06			0.89515274164		Squares:
2755.678825			Relative Mean Diff.:		2.20734468226e+012
Standard Deviation:			0.000763202455117		1.36315584374e+013
523.142334838			0.00141269494841		22615.4827
2131.05186704			1.08463775375		Mean
52.4945599562			Standard	Error:	Square:
Interquartile Range:			261.571167419		551836170565
143.1			1065.52593352		3.40788960936e+012
2415.7			26.2472799781		5653.870675
92.89			Coef. of Variation:		_____
Range:			0.000704230557058		_____
1128			0.00115438713423		_____

**Inter-Variable  
Covariance**

---

X    Y  
          Z

X:  
273677.9  
864134.23  
10392.847

Y:  
864134.23  
4541382.1  
97444.8

Z:  
10392.847  
97444.8  
2755.6788

### Inter-Variable Correlation

X    Y  
          Z

X:  
1.000  
0.775  
0.378

Y:  
0.775  
1.000  
0.871

Z:  
0.378  
0.871  
1.000

### Inter-Variable Rank Correlation

X    Y  
          Z

X:  
1.000  
0.400  
-0.400

Y:  
0.400  
1.000  
0.600

Z:  
-0.400  
0.600  
1.000

### Principal Component Analysis

PC1    PC2  
          PC3

X:  
8602    0.97874339

0.97874339  
8602    0.07437781  
7293  
Y:    -  
0.18893415145  
-  
0.18893415145  
-  
0.0355371110618  
Z:    -  
0.0797824924929  
-  
0.0797824924929  
-  
0.0355371110618  
Lambda:  
4711738.61  
773    106020.439  
904    56.5836935  
421

### Planar Regression: Z = AX+BY+C

Fitted Parameters

A    B  
          C

Parameter Value: -  
0.0745896410772  
0.  
035649998228    -  
10342.2386632  
Standard    Error:

0228356754457 0.  
 00560582722318 0.  
 077.6771488 11

---



---



---



---



---

**Inter-Parameter Correlations**

A	B	C
A: 1.000		
0.775	-0.807	
B: -	0.775	1.000
0.775	0.253	
C: -		
0.807	0.253	1.000

**ANOVA Table**

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression:	2			
	80			
96.12463918				

48.06231959 40  
 .6850906212 23  
 Residual: 1  
 0.911835818 17  
 0.911835818 17  
 Total: 3  
 67.036475 82

Coefficient of Multiple Determination (R<sup>2</sup>): 0.  
 979326105995

**Nearest Neighbor Statistics**

Separation

|Delta Z|

1%%-tile: 20.0412075485  
 12.56  
 5%%-tile: 20.0412075485  
 12.56  
 10%%-tile:

20.0412075485  
 12.56  
 25%%-tile: 20.0412075485  
 12.56  
 50%%-tile: 20.0412075485  
 12.56  
 75%%-tile: 2294.42541827  
 19.47  
 90%%-tile: 2294.42541827  
 19.47  
 95%%-tile: 2294.42541827  
 19.47  
 99%%-tile: 2294.42541827  
 19.47  
 Minimum: 20.0412075485  
 12.56  
 Maximum: 2294.42541827  
 19.47  
 Mean: 1157.23331291  
 16.015  
 Median: 1157.23331291  
 16.015  
 Geometric Mean:

214.436601381	2274.38421072	64.06	
15.6378770938	6.91	Sum	Absolute:
Harmonic Mean:	Mean Difference:	4628.93325164	
39.7353372903	1516.25614048	64.06	
15.2696347175	4.60666666667	Sum	Squares:
Root Mean Square:	Median Abs. Deviation:	10529579.3	
1622.46566219	1137.19210536	1073.669	
16.3834443876	3.455	Mean	Square:
Trim Mean (10%%):	Average Abs. Deviation:	2632394.825	
N/A	1137.19210536	268.41725	
N/A	3.455	_____	
Interquartile Mean:	Quartile Dispersion:	_____	
778.169277789	0.982681791714	_____	
14.8633333333	0.215735248205	<b>Complete Spatial</b>	
Midrange:	Relative Mean Diff.:	<b>Randomness</b>	
1157.23331291	1.31024238895	Lambda:	
16.015	0.287646997606	8.0343006792e-007	
Winsorized Mean:	Standard Error:	Clark and Evans:	
1157.23331291	656.55816815	2.07455504765	
16.015	1.99474518005	Skellam:	
TriMean:	Coef. of Variation:	53.1543692444	
588.637260229	1.13470319395		
14.2875	0.249109607249	<b>Gridding</b>	
Variance:	Skewness:	<b>Rules</b>	
1724274.51266	0	Gridding Method:	
15.9160333333	0	Kriging	
Standard Deviation:	Kurtosis:	Kriging Type:	
1313.1163363	0.5625	Point	
3.9894903601	0.5625	Polynomial Drift Order:	
Interquartile Range:	Sum:	0	
2274.38421072	4628.93325164	Kriging std. deviation grid:	
6.91		no	
Range:		<b>Semi-Variogram</b>	

<b>Model</b>		X	102.466751726
Component	Type:	Maximum:	90%%-tile:
Linear		743635.5	106.260498436
Anisotropy	Angle:	X	95%%-tile:
0		Spacing:	107.510391675
Anisotropy	Ratio:	45.12	99%%-tile:
1		Y	109.42048417
Variogram	Slope:	Minimum:	Minimum:
1		1844336.4	7.4055887093
		Y	Maximum:
<b>Search Parameters</b>		Maximum:	110.78732559
No Search (use all data):		1848750.1	Mean:
true		Y	Mean:
		Spacing:	76.9568848856
		44.58282828283	Median:

## Output Grid

Grid	File	Name:	Univariate Statistics	Grid	
					90.5009200964
					Geometric Mean:
					68.2124332421
					Harmonic Mean:
					56.0243942201
					Root Mean Square:
					82.6539573836
					Trim Mean (10%%):
					78.5596188188
					Interquartile Mean:
					85.2310162068
					Midrange:
					59.0964571496
					Winsorized Mean:
					77.5245204979
					TriMean:
					83.8537519778
					Variance:
					909.6644108
					Standard Deviation:
					30.1606434083
					Interquartile Range:

### Grid Geometry

X		52.0022876209	
Minimum:		50%%-tile:	
742507.5		90.4729842821	
		75%%-tile:	

50.4644641052		0.326696303146	Sum:
Range:		Relative Mean Diff.:	200087.900703
103.381736881		0.429843583701	Sum Absolute:
Mean Difference:		Standard Error:	200087.900703
33.0794231897		0.591498881851	Sum Squares:
Median Abs. Deviation:		Coef. of Variation:	17762359.345
15.504344317		0.391916115798	Mean Square:
Average Abs. Deviation:		Skewness:	6831.67667117
25.01154853		-0.721332185894	_____
Quartile Dispersion:		Kurtosis:	_____
		2.08195628962	_____