

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

DEPOSICIÓN DE AGUA DE MINAS Y CONCENTRACIONES DE PLOMO
Y CADMIO EN SUELOS Y ESPECIES VEGETALES EN BERMEJILLO,
DURANGO

TESIS

Que como requisito parcial para
obtener el título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA:

ROSALES PALACIOS LIRIO VIANEY

Bermejillo, Durango
2012



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES



**DEPOSICIÓN DE AGUA DE MINAS Y CONCENTRACIONES DE
PLOMO Y CADMIO EN SUELOS Y ESPECIES VEGETALES EN
BERMEJILLO, DURANGO**

Rosales Palacios Lirio Vianey*

*Programa de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente de Zonas Áridas. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Universidad Autónoma Chapingo.

El presente trabajo de tesis titulado **"Deposición de agua de minas y concentraciones de plomo y cadmio en suelos y especies vegetales en Bermejillo, Durango"**, fue dirigido por el Dr. Ricardo Trejo Calzada y Dr. Abimbola Abiola. Ha sido aprobado y revisado por el Comité Revisor como requisito parcial para obtener el título de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

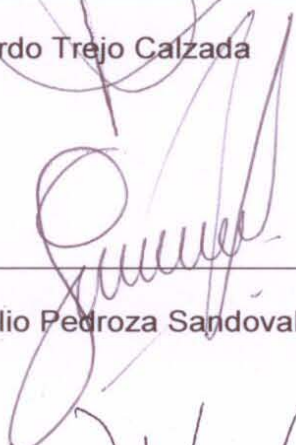
Comité Revisor:

Director de Tesis



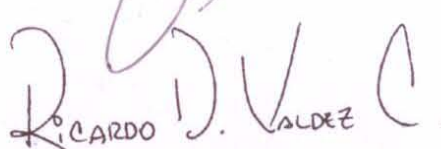
Dr. Ricardo Trejo Calzada

Co-Director



Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

Asesor



Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

DEPOSICIÓN DE AGUA DE MINAS Y CONCENTRACIONES DE PLOMO Y CADMIO EN SUELOS Y ESPECIES VEGETALES EN BERMEJILLO, DURANGO

Lirio Vianey Rosales Palacio¹
Ricardo Trejo Calzada²

RESUMEN

El desarrollo económico y tecnológico en México está beneficiado por el sector minero, ya que contribuye a la generación de empleo, inversiones e infraestructura. Sin embargo, este sector es una fuente de contaminación por metales pesados (MP) en 100 millones de hectáreas. En los últimos años, las plantas han sido una herramienta idónea para disminuir el efecto de la contaminación con MP. El objetivo del presente estudio fue determinar la concentración de Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) en suelo y plantas en el área de deposición de aguas subterráneas de minas. El área de estudio se ubica en las coordenadas 25°55'38"N y 103°39'30" O a 1117 msnm. Se hizo un muestreo sistemático en rejilla en dos sitios con distancia entre líneas de 20 m, a profundidades de 0-15, 15-30 y 30-45 cm. El muestreo de vegetación fue mediante cuadrantes de 10X10 m. Las muestras de suelo y vegetación fueron tratadas mediante digestión ácida empleando el equipo ATC-400 ETHOS, mientras que las lecturas de Cd y Pb se realizaron con un equipo ICP-MS. Se hicieron análisis de varianza de un factor. Los resultados mostraron que el sitio con mayor concentración de Cd y Pb fue el Sitio 1 con 83,3 ppm y 4 757,6 ppm respectivamente; mientras que para los estratos, el Estrato 1 presenta mayor concentración de Cd con 89,54 ppm y el Estrato 3 muestra una mayor concentración de Pb con 5 170,7 ppm. La especie con mayor acumulación de Cd fue *Tecoma stan* (707,1 ppm) y de Pb *Flourenzia cemua* (11640 ppm). Las plantas analizadas muestran el potencial para la extracción y acumulación de Cd y Pb del suelo, considerándose como plantas hiperacumuladoras.

Palabras Clave: Cadmio, Plomo, Contaminación, Fitorremediación, Hiperacumulación.

MINES GROUNDWATER DEPOSITION ON LEAD AND CADMIUM CONCENTRATION IN SOIL AND PLANT SPECIES IN BERMEJILLO, DURANGO

Lirio Vianey Rosales Palacio¹
Ricardo Trejo Calzada²

ABSTRACT

The economic and technological development in our country has been benefited by mining sector, as it contributed to employment generation, investment and infrastructure. However, the mining sector is also a source of heavy metals pollution to 100 millions hectares. In recent years, plants have been an important tool to reduce the effect of heavy metals pollution. The goal of this research was to determine the concentration of Cadmium (Cd) and Lead (Pb) in soil and plants in an area of deposition of groundwater of a mine. The study area is located at coordinates 25°55'38"NL and 103°39'30" WL to 1117 meters above sea level. Systemic soil sampling was conducted at two sites in a grid with spacing of 20 meters, at depths of 0-15, 15-30 and 30-45 cm. The vegetation was sampled using 10x10 m quadrants. The vegetation and soil samples were treated with acid digestion technique using the ATC-400 ETHOS machine, while the readings of Cd and Pb were performed by ICP-MS equipment. The statistical analysis was carried out by one-way ANOVA. The results showed that the site 1 had the highest concentration of Cd (83.3 ppm) and Pb (4757.6 ppm), while the profile 1 and 3 had the highest concentration of Cd (89.54 ppm) and Pb (5170.7 ppm), respectively. The species with the highest accumulation of Cd were *Tecoma stan* (707.1 ppm) and *Flourenzia Cemua* to Pb (11640 ppm). The test plants show potential for the extraction and accumulation of Cd and Pb from contaminated soil and they may be, considered as hyperaccumulator plants.

Key word: Cadmium, Lead, Pollution, Phytoremediation, Hiperacumulación.

¹Tesista
²Director de tesis

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	1
TABLA DE CONTENIDO	2
LISTA DE FIGURAS.....	5
LISTA DE CUADROS.....	6
INTRODUCCIÓN	9
Hipótesis	11
Objetivos.....	12
REVISIÓN DE LITERATURA.....	13
Importancia de la minería en el desarrollo de México	13
PIB del sector Minero en México.....	14
Empleo en el sector Minero en México.....	15
Ocupación de superficie por el sector Minero en México	15
La alteración de suelos por la minería	16
Los metales pesados y la minería.....	19
Interacción del cadmio con la planta.....	19
El Cadmio y su efecto en las plantas.....	21
Mecanismos de defensa de la planta a la toxicidad de Cadmio	24
El plomo	25
Absorción, transporte y localización	26
Efectos fisiológicos, bioquímicos y ultraestructurales del plomo	31
Actividades de las enzimas	32
Fotosíntesis.....	33
Plantas hiperacumuladoras de metales pesados.....	35
MATERIALES Y MÉTODOS	37
Muestreo de suelos	39
Muestreo de vegetación	40
Análisis de Plomo y Cadmio en flora.....	40
Evaluación de índice de bioacumulación.....	41
Análisis general de suelo	41
Análisis de Plomo y Cadmio en suelo	42
Modelos estadísticos.....	43
<i>Modelo: Cadmio (Cd), Plomo (Pb) para sitios de muestreo.....</i>	<i>43</i>

<i>Modelo: Cadmio (Cd), Plomo (Pb) para estratos de suelo muestreado.....</i>	<i>43</i>
<i>Modelo: Cadmio (Cd), Plomo (Pb) para plantas muestreadas.....</i>	<i>44</i>
<i>Modelo: Cadmio (Cd), Plomo (Pb) para parte de la planta muestreada</i>	<i>44</i>
RESULTADOS	46
Análisis del suelo para Cadmio.....	46
<i>Concentración general de cadmio en sitios de muestreo.....</i>	<i>46</i>
<i>Concentración general de Cadmio (Cd) para los estratos de suelo.....</i>	<i>46</i>
<i>Concentración de Cadmio (Cd) para los estratos de suelo en el Sitio 1.....</i>	<i>47</i>
<i>Concentración de Cadmio (Cd) para los estratos de suelo en el Sitio 2.....</i>	<i>48</i>
Análisis de suelo para Plomo	49
<i>Concentración general de Plomo en suelo.....</i>	<i>49</i>
<i>Concentración general de Plomo en estratos</i>	<i>49</i>
<i>Concentración de Plomo (Pb) para los estratos de suelo en el sitio 1.....</i>	<i>50</i>
<i>Concentración de Plomo (Pb) para los estratos de suelo en el sitio 2.....</i>	<i>51</i>
Análisis de plantas	52
<i>Concentración de Cadmio en plantas del sitio 1</i>	<i>52</i>
<i>Concentración de Cadmio en plantas del sitio 2</i>	<i>52</i>
<i>Concentración de Plomo en plantas del sitio 1</i>	<i>53</i>
<i>Concentración de Plomo en plantas del sitio 2</i>	<i>54</i>
<i>Concentración de Cadmio en hoja, raíz y tallo en las plantas muestreadas.....</i>	<i>54</i>
<i>Concentración de Plomo en hoja, raíz y tallo en las plantas muestreadas.....</i>	<i>55</i>
<i>Concentración de Cadmio en raíz por especie en el sitio 1</i>	<i>56</i>
<i>Concentración de Cadmio en raíz por especie en el sitio 2.....</i>	<i>57</i>
<i>Concentración de Plomo en raíz por especie en el sitio 1</i>	<i>57</i>
<i>Concentración de Plomo en raíz por especie en el sitio 2</i>	<i>58</i>
<i>Concentración de Cadmio en hoja por especie del sitio 1</i>	<i>59</i>
<i>Concentración de Cadmio en hoja por especie del sitio 2</i>	<i>60</i>
<i>Concentración de Plomo en hoja por especie en el sitio 1.....</i>	<i>60</i>
<i>Concentración de Plomo en hoja por especie en el sitio 2.....</i>	<i>61</i>
<i>Concentración de Cadmio en tallo por especie en el sitio 1</i>	<i>62</i>
<i>Concentración de Cadmio en tallo por especie en el sitio 2</i>	<i>63</i>
<i>Concentración de Plomo en tallo por especie en el sitio 1.....</i>	<i>63</i>
<i>Concentración de Plomo en tallo por especie en el sitio 2.....</i>	<i>64</i>
Correlaciones entre las concentraciones de Cadmio y Plomo	65
<i>Correlaciones de las concentraciones de Cadmio y Plomo para el Sitio 1</i>	<i>65</i>
<i>Correlaciones de las concentraciones de Cadmio y Plomo para el Sitio 2</i>	<i>68</i>

DISCUSIÓN	70
Las plantas como remediadoras de suelos contaminados por metales pesados.....	70
Concentración de cadmio y plomo en suelo	71
Concentración de cadmio y plomo en los estratos de suelo	72
Concentración de cadmio y plomo en la planta	74
Contenidos de cadmio y plomo en la Raíz, Hoja y Tallo.....	76
Interacción entre el contenido cadmio y plomo en suelo y planta.....	79
CONCLUSIONES	80
LITERATURA CITADA.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamiento de la inversión privada en el sector minero-metalúrgico, en México 2006-2010 (millones de dólares).....	13
Figura 2. Comportamiento del Producto Interno Bruto minero en México 2006-2009 (millones de pesos a pesos del 2003).....	14
Figura 3. Comportamiento del valor de la producción minero-metalúrgica en México 2006-2009.	15
Figura 4. Efecto del plomo sobre la fotosíntesis, irregularidades mitóticas, respiración, régimen de agua y consumo de nutrientes. Las flechas representan disminución e incremento de la actividad respectivamente.	35
Figura 5. Ubicación geográfica de la planta minera Excellon Resources Inc.	38
Figura 6. Ubicación geográfica del primer sitio de muestreo.	40
Figura 7. Ubicación geográfica del segundo sitio de muestreo.....	40
Figura 8. Concentración media de Pb y Cd a diferentes profundidades de suelo en dos sitios de Bermejillo, Durango con descargas de aguas subterráneas de minas.	72
Figura 9. Concentraciones medias de Pb y Cd en tres estratos de suelo de dos sitios de Bermejillo, Durango con descargas de aguas subterráneas de minas.	74
Figura 10. Concentraciones medias de Pb y Cd en las plantas colectadas en suelos de Bermejillo, Durango con descargas de aguas subterráneas de minas.	76
Figura 11. Concentraciones de Pb y Cd en raíz, tallo y hoja para las plantas muestreadas.	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Concentración media, mínima y máxima de cadmio en suelos de los sitios muestreados con descargas de agua subterráneas de minas.	46
Cuadro 2. Concentración media, mínima y máxima de cadmio en los estratos de los sitios muestreados con descargas de agua subterráneas de minas. .	47
Cuadro 3. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en diferentes profundidades de suelos con descargas de aguas subterráneas de minas del sitio 1.	48
Cuadro 4. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en diferentes profundidades de suelos con descargas de aguas subterráneas de minas en el sitio 2.....	48
Cuadro 5. Concentración media, mínima y máxima de plomo en suelo con descargas de aguas subterráneas de minas en dos sitios de Bermejillo, Durango.	49
Cuadro 6. Concentración media, mínima y máxima de plomo en diferentes profundidades de suelo con descargas de aguas subterráneas de minas en los sitios muestreados.	50
Cuadro 7. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en diferentes profundidades de suelo con descarga de aguas subterráneas de minas en el sitio 1.	51
Cuadro 8. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en diferentes profundidades de suelo con descarga de aguas subterráneas de minas en el sitio 2.	51
Cuadro 9. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en diferentes especies vegetales creciendo en el sitio 1 con descargas de aguas subterráneas de minas en Bermejillo, Durango.	52
Cuadro 10. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en diferentes especies vegetales creciendo en el sitio 2 con descargas de aguas subterráneas de minas en Bermejillo, Durango.	53

Cuadro 11. Concentración media, máxima y mínima de Pb (ppm) en especies vegetales en el sitio 1.	53
Cuadro 12. Concentración media, máxima y mínima de Pb (ppm) en especies vegetales selectas creciendo en el sitio 2.	54
Cuadro 13. Media de la concentración de Cd (ppm) para hoja, raíz y tallo en las especies muestreadas.	55
Cuadro 14. Media de la concentración de Pb (ppm) para hoja, raíz y tallo en las especies muestreadas.	56
Cuadro 15. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en raíz de especies vegetales colectadas en el sitio 1.	56
Cuadro 16. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en raíz de especies vegetales colectadas en el sitio 2.	57
Cuadro 17. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en raíz en especies vegetales colectadas en el sitio 1.	58
Cuadro 18. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en raíz en especies vegetales colectadas en el sitio 2.	59
Cuadro 19. Concentración media de Cd (ppm) en hoja de especies vegetales colectadas en el sitio 1.	59
Cuadro 20. Concentración media de Cd (ppm) en hoja de especies vegetales colectadas en el sitio 2.	60
Cuadro 21. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en hoja de especies vegetales colectadas en el sitio 1.	61
Cuadro 22. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en hoja de especies vegetales colectadas en el sitio 2.	62
Cuadro 23. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en tallo de especies vegetales colectadas el sitio 1.	62
Cuadro 24. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en tallo de especies vegetales colectadas en el sitio 2.	63
Cuadro 25. Concentración de Pb (ppm) en tallo para las especies encontradas en el sitio 1.	64

Cuadro 26. Concentración de Pb (ppm) en tallo para las especies encontradas en el sitio 2.	65
Cuadro 27. Correlaciones entre concentraciones de Pb (ppm) y Cd (ppm) en planta para el sitio 1.	67
Cuadro 28. Correlaciones entre concentraciones de Pb (ppm) y Cd (ppm) en planta para el sitio 2.	69

INTRODUCCIÓN

La actividad minera tiene un alcance social que se extiende a 24 de los 32 estados de la República Mexicana (Almazán, 2006); así mismo, es una de las actividades de mayor tradición en México, pues ha estado presente en el desarrollo del país como un factor importante de modernización y avance (Instituto Nacional de Ecología, 2008). La producción minera nacional, se basa principalmente en la producción de metales preciosos, metales industriales, minerales metálicos y no metálicos y metales obtenidos como subproductos. Tradicionalmente la explotación minera era dirigida a metales como el oro y la plata sin embargo, ésta tendencia se ha ido modificando hasta desarrollarse en metales industriales como el plomo y zinc (Pacheco y Durán, 2007).

Como casi toda actividad humana, la minería es precursora de contaminación ambiental (suelo, aire, agua, flora y fauna), a través de los desechos generados, lixiviados, descarga de aguas servidas, extracción de aguas subterráneas, incorporación de metales pesados (As, Pb, Zn, Cd, Cu) al medio ambiente (Becerril et al, 2007; Calvo et al., 2003; Monroy et al. 2002; López, 2000). Esto provoca disturbios al ecosistema y genera suelos con limitaciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento de vegetación y riesgos a la salud (Puga et al., 2006).

Las aguas subterráneas extraídas en la actividad minera son fuente de metales pesados, principalmente Arsénico (As), elemento indicador de la presencia de otros elementos a nivel de traza como Hierro (Fe), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Bismuto (Bi) y Zinc (Zn), entre otros (Blanes y Giménez, 2005).

Un caso en particular de una planta minera ubicada en las afueras de la Ciudad de Bermejillo, Durango, dedicada a la extracción de plata, plomo y zinc, la cual incorpora agua subterránea (3 875 l/seg.) extraída del complejo de túneles de la mina al suelo de su entorno, sin previos procesos de purificación. Las aguas estancadas alrededor del complejo de la planta, pueden provocar daños al suelo, flora y fauna. En la vegetación puede provocar pérdida productiva y disminución de la biodiversidad; en el suelo puede alterar y modificar la estructura física y química, mientras que la biota y fauna endémicas pueden verse afectadas debido al consumo de plantas y agua, integrando metales pesados a la cadena trófica (Wong, 2003; Becerril et al., 2007; Calvo et al., 2003). Por otro lado, el estancamiento de agua, puede representar un grave problema de salud a las comunidades aledañas a la mina, debido a la proliferación del mosquito transmisor del dengue, entre otros factores. El agua que se extrae de la mina, puede significar un daño potencial al ecosistema por la forma en que se está depositando; pero por otra parte significa un recurso potencial para su uso en actividades agrícolas y domésticas en ésta región donde es un recurso escaso.

Se han elaborado estudios sobre la contaminación con metales en suelos por la actividad de plantas metalúrgicas en Bermejillo (e.g. Trejo et al., 2007) y mineras en la región norte de México. Sin embargo, no se han elaborado estudios sobre el impacto de la actividad de la mina y, particularmente, de la deposición de aguas subterráneas en los suelos y vegetación de la localidad.

En base a lo anterior, es propósito de estudio cuantificar la concentración de metales pesados Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) en el suelo y flora de áreas donde se ha depositado agua contaminada con estos metales, que permita proponer métodos para la remediación de aguas y suelos.

Hipótesis

- o La deposición de agua en ciertas áreas provoca la acumulación de metales pesados en el suelo.
- o Existe una correlación positiva entre la deposición de agua subterránea de minas con la concentración de metales pesados (plomo y cadmio) en suelo y plantas.
- o Las especies vegetales presentan una acumulación diferencial de Plomo y Cadmio aún cuando se desarrollen en suelos con una misma concentración de los metales pesados.

Objetivos

o Determinar la concentración de elementos pesados (Plomo y Cadmio) en suelo y plantas en áreas de deposición de aguas subterráneas de minas.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia de la minería en el desarrollo de México

La importancia de la sector metalúrgico en México radica en el hecho de que contribuye al desarrollo económico y tecnológico; en el año 2008, México ocupó el primer lugar en inversión en exploración en América Latina y el cuarto a nivel mundial al captar el 6% de la inversión que se destina a la exploración en todo el mundo (794,3 millones de dólares), mientras que la inversión privada total para ese año fue de 3 656 millones de dólares, 25,3% superior a la cifra registrada en el 2009 (Figura 1). Como resultado de lo anterior, se mantuvo a mayor nivel que el de importantes países mineros como son los casos de Chile, Perú y Brasil (MEG, 2009). Esto posicionó a México en el año 2009, en el cuarto lugar mundial como mejor destino de inversión minera (Behre Dolbear, 2010).

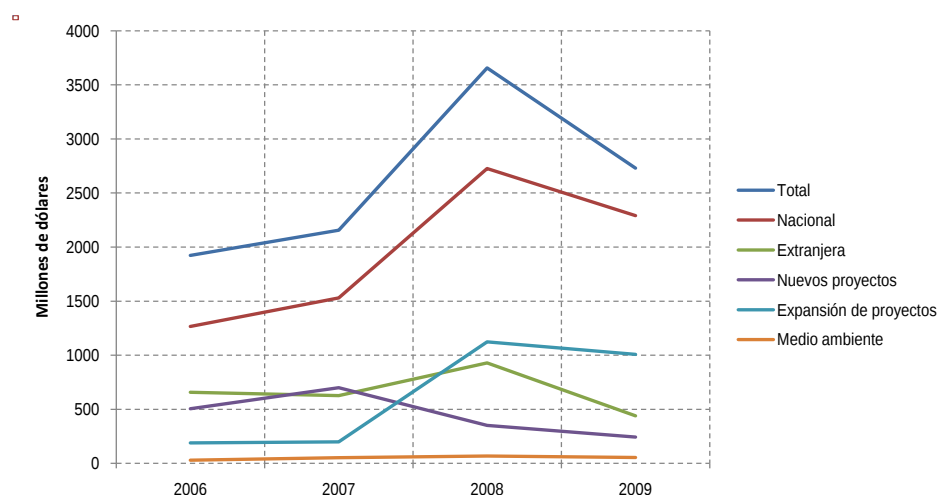


Figura 1. Comportamiento de la inversión privada en el sector minero-metalúrgico, en México 2006-2010 (millones de dólares).

PIB del sector Minero en México

Durante el año 2009, el producto interno bruto minero fue de 453 881,4 millones de pesos, e incluye la extracción de petróleo crudo y gas natural, Así pues, el aumento fue de 1% en términos reales con relación a un año antes. Mientras que el producto interno bruto de la minería no petrolera registró un crecimiento anual de 25,3% en 2009, al alcanzar un valor de 94 724,3 millones de pesos, lo cual representa el 21% del PIB del sector minero en México (Figura 2 y 3). Este comportamiento se debió principalmente a los incrementos en la producción de oro, plata, cobre, níquel, plomo, zinc y barita principalmente en la perforación de pozos petroleros y de gas, entre otros (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).

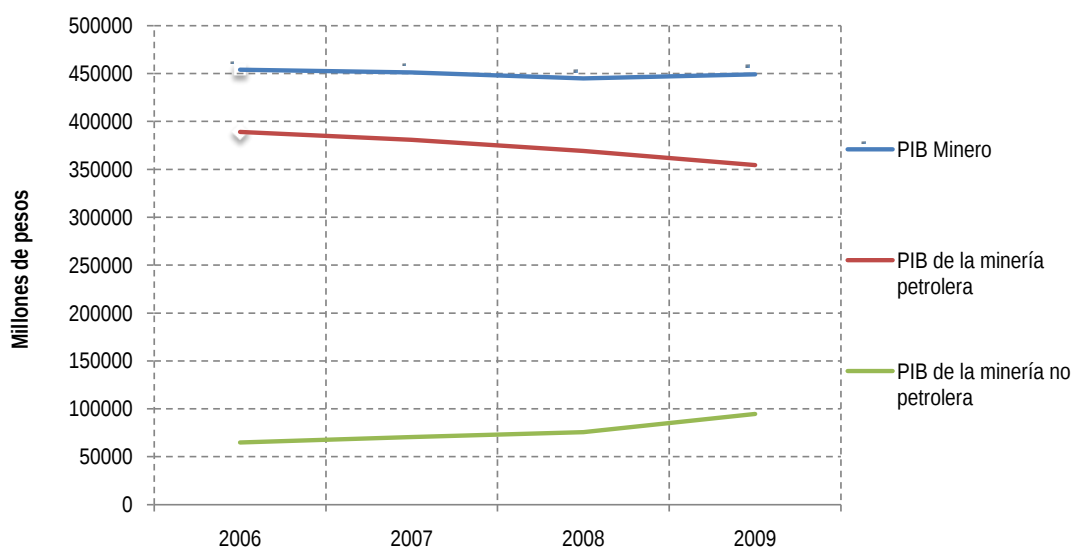


Figura 2. Comportamiento del Producto Interno Bruto minero en México 2006-2009 (millones de pesos a pesos del 2003).

Empleo en el sector Minero en México

Al cierre de 2009, el empleo de la industria minero metalúrgica registró un total de 269 501 trabajadores. La fabricación de productos de minerales no metálicos poseyó el mayor número de empleados con 119 562, seguido por las industrias metálicas con 69 573 empleos; mientras que la exploración de sal mantuvo el menor número de empleados con tan solo 2 011 empleos (Secretaría de Economía, 2010).

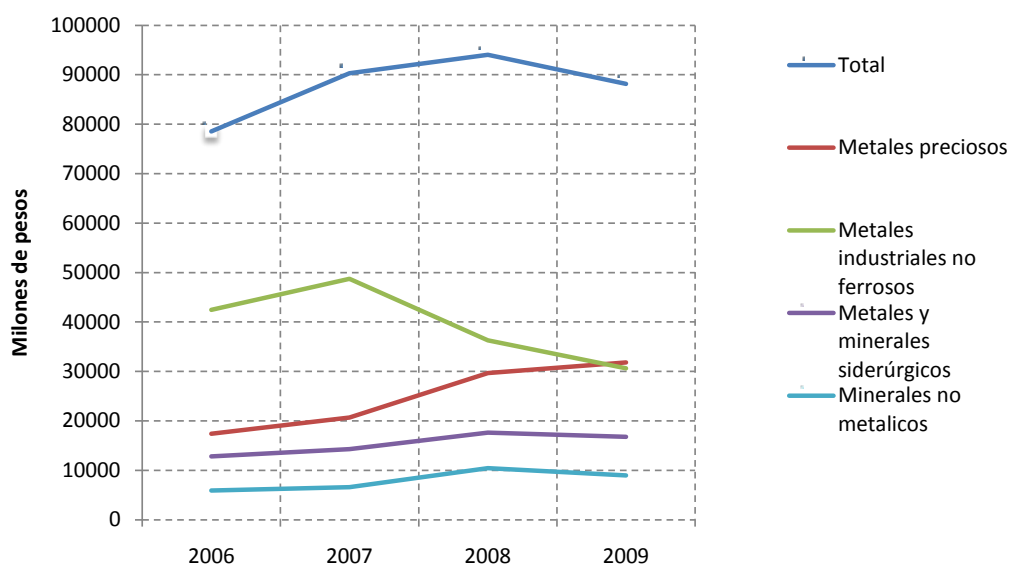


Figura 3. Comportamiento del valor de la producción minero-metalúrgica en México 2006-2009.

Ocupación de superficie por el sector Minero en México

Al cierre del año 2009 se acumularon 2 327 títulos de concesión minera que cubren un total de 7,4 millones de hectáreas; la asignación minera total abarca una superficie de 100 mil hectáreas. Con estas nuevas concesiones y asignaciones mineras, al final de 2009, existían en el país un total de 24 753

concesiones mineras vigentes, amparando un total de 25,3 millones de hectáreas y 71 asignaciones mineras por una superficie amparada de 75,6 millones de hectáreas (Tercer Informe de Ejecución del Plan Nacional de Desarrollo, 2009).

La alteración de suelos por la minería

Las actividades mineras generan una gran cantidad de rocas gastadas y desechos mineros los cuales son depositados en la superficie del suelo dañándola. Al ser los desechos mineros muy inestables se convierten en fuentes potenciales de contaminación. Los efectos indirectos incluyen la contaminación de agua y aire y el azolve de ríos. Esto llevará finalmente a la pérdida de la biodiversidad y la riqueza económica de los recursos naturales (Bradshaw, 1993). Los suelos de las minas degradados son hábitats artificiales los cuales experimentan una variedad de problemas para el establecimiento y mantenimiento de la vegetación, dependiendo de los tipos de extracción y procedimientos en las minas, tales como la extracción de metal y carbón (Lerma, 2006).

Una de las anomalías biogeoquímicas que se generan al momento de la extracción, es el aumento de la cantidad de microelementos en el suelo convirtiéndolos a niveles de los macroelementos los cuales afectan negativamente la biota y calidad de suelo; éstos afectan el número,

diversidad y actividad de los organismos del suelo, inhibiendo la descomposición de la materia orgánica del suelo (Wong, 2003). Por su parte Salomón (1995) comenta que los jales son tóxicos para los organismos vivos y son inhibidores de factores ecológicos afectando el crecimiento de las plantas.

Los suelos que quedan tras una explotación minera contienen todo tipo de materiales residuales y escombros estériles, entre otros, lo que representa graves problemas para el desarrollo de la cubierta vegetal, siendo sus características más notables las siguientes: clase textural desequilibrada, ausencia o baja presencia de la estructura edáfica, propiedades químicas anómalas, disminución o desequilibrio en el contenido de nutrientes fundamentales, ruptura de los ciclos biogeoquímicos, baja profundidad efectiva, dificultad de enraizamiento, baja capacidad de cambio, baja retención de agua y presencia de compuestos tóxicos (García y Dorronsoro, 2002).

Las características del suelo juegan un papel importante en reducir o aumentar la toxicidad de los metales en el suelo, ya que Colombo et al. (1998) comentan que la distribución de los metales pesados en los estratos del suelo, así como su disponibilidad está controlada por parámetros como propiedades intrínsecas del metal y características de los suelos. Los metales tienden a acumularse en la superficie del suelo quedando accesibles

al consumo de las raíces de las plantas (Baird, 1999). Concentraciones excesivas de metales en el suelo impactan la calidad de los alimentos, la seguridad de la producción de cultivos y la calidad del medio ambiente, ya que estos se mueven a través de la cadena alimenticia vía consumo de plantas por animales y estos a su vez por humanos (Gulson *et al.*, 1996).

Los mecanismos de retención de metales por el suelo pueden consistir en reacciones simples o complejas, siendo las principales: precipitación, acumulación en la superficie, oclusión en otros precipitados, unión a vertidos residuales e incorporación a los biosistemas. Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías: quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación; ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas; pasar a la atmósfera por volatilización; o movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas (Seoáñez, 1999a).

La toxicidad de metales en el suelo para las plantas depende de un + número de factores del suelo tales como pH, contenido de arcillas, contenido de materia orgánica, potencial redox y estatus nutricional (Ross, 1994), todos los cuales afectan la biodisponibilidad de los metales pesados. Las cantidades de metales disponibles están reguladas por el intercambio iónico. Por otra parte, el intercambio catiónico y las quelaciones de la materia

orgánica, son los procesos principales que facilitan la disponibilidad de los metales (Seoánez, 1999b).

Los metales pesados y la minería

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso mínimas. Los ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb), entre otros (Lucho et al., 2005). Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino et al., 2002).

Interacción del cadmio con la planta

Por ser un metal no esencial se asume que no existen mecanismos de entrada específicos para el cadmio. Entre las proteínas responsables de la entrada de cadmio a la célula cabe destacar al transportador específico de calcio LCT1 (Clemens et al., 1998) y la proteína IRT1, perteneciente a la familia de transportadores de Zn y Fe (ZIP) (Guerinot, 2000). Otra familia de transportadores implicados es la Nramp, localizada en la membrana de la

vacuola, por lo que probablemente tiene una función en la movilización de los metales y no en el ingreso de los mismos a la raíz (Thomine *et al.* 2000).

Una vez dentro de la célula el cadmio puede coordinarse con ligandos de S como glutathione (GSH) o fitoquelatinas (PCs) y ácidos orgánicos como el citrato (Clemens 2006; Domínguez-Solís *et al.*, 2004). Otras posibles moléculas responsables de la quelación de estos metales son pequeñas proteínas ricas en cisteína denominadas metalotioneínas (MTs). De esta forma, los complejos Cd-ligando pueden ser transportados al interior de la vacuola o a otras células (Shah y Nongkynrh, 2007).

En la planta, el cadmio se acumula preferentemente en la raíz secuestrado en la vacuola de las células, y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta concentrándose en orden decreciente en tallos, hojas, frutos y semillas (Chan y Hale, 2004). En células de levadura se ha demostrado que el cadmio ingresa en la vacuola unido a fitoquelatinas (PCs) a través de un transportador de tipo ABC (Ortiz *et al.*, 1995). Otro posible mecanismo de entrada del cadmio en la vacuola es mediante un cotransportador de $\text{Cd}^{2+}/\text{H}^{+}$ ubicado en la membrana de la misma (Salt y Kramer, 2000). Los transportadores de cationes CAX, implicados en el transporte de calcio a la vacuola, también transportan otros metales como el cadmio y plomo (Park *et al.*, 2005). Una vez en la raíz, el

cadmio puede pasar al xilema a través del apoplasto y/o a través del simplasto formando complejos (Clemens *et al.*, 2002).

El Cadmio y su efecto en las plantas

Los efectos tóxicos del cadmio sobre las plantas han sido ampliamente estudiados (Sanità di Toppi y Gabrielli, 1999; Benavides *et al.*, 2005). Sin embargo, los mecanismos de su toxicidad aun no se conocen completamente. En general el Cd interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta (Poschenrieder *et al.*, 1989; Sandalio *et al.*, 2001; Singh y Tewari, 2003). El Cd también reduce la absorción de nitratos y el transporte de los mismos de la raíz al tallo, e inhibe la actividad nitrato reductasa en tallos (Gouia *et al.*, 2000).

Las plantas expuestas a suelos contaminados con cadmio presentan modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración (Sandalio *et al.*, 2001). Uno de los síntomas más extendidos de la toxicidad por cadmio es la clorosis producida por una deficiencia en hierro (Benavides *et al.*, 2005), fosfatos o por la reducción del transporte de Mn (Goldbol y Hutterman 1985). El tratamiento con cadmio produce reducción de la actividad ATPasa de la membrana plasmática (Astolfi *et al.*, 2005), alteraciones en la funcionalidad de la membrana plasmática (Sandalio *et al.*, 2001) y desequilibrios en el metabolismo del cloroplasto, inhibiendo la

síntesis de clorofila y reduciendo la actividad de enzimas implicadas en la fijación de CO₂ (Ali *et al.*, 2000; Maksymiec *et al.*, 2007).

La toxicidad por metales pesados se debe en parte al estrés oxidativo producido por las especies de oxígeno reactivo (ROS) generadas a través de diferentes mecanismos dependiendo del metal de que se trate. Los cationes metálicos Cd²⁺ y Pb²⁺ no experimentan cambios redox y por lo tanto, a diferencia del Fe²⁺ o Cu²⁺, no actúan directamente en la generación de ROS. Sin embargo, pueden actuar como pro oxidantes a través de la reducción del contenido de GSH, necesario para la síntesis de PCs, disminuyendo así su disponibilidad para la defensa antioxidante (Pinto *et al.*, 2003).

El estrés oxidativo producido por el cadmio se manifiesta por daños oxidativos a membranas tales como peroxidación lipídica (Lozano-Rodríguez *et al.*, 1997; Sandalio *et al.* 2001; Wua *et al.*, 2003; Balestrasse *et al.*, 2004), y también se han descrito daños oxidativos a proteínas por formación de grupos carbonilo (Romero-Puertas *et al.*, 2002). Las actividades de las enzimas antioxidantes superóxido dismutasa (SOD), glutathion reductasa (GR), ascorbato peroxidasa (APX), peroxidasa (POD) y catalasa (CAT), encargadas de la defensa celular frente a las ROS, experimentan reducciones o incremento de su actividad en función de la concentración de cadmio incluida en el medio de crecimiento, la duración del tratamiento, el

tipo de tejido y la especie vegetal de que se trate (Sandalio *et al.*, 2001; Benavides *et al.*, 2005).

En los últimos años se ha incrementado el interés por el estudio de los mecanismos íntimos implicados en la producción de ROS en respuesta al Cd. Como consecuencia de ello, se ha demostrado la producción de ROS en distintos compartimentos celulares (membrana plasmática, mitocondrias y peroxisomas) siendo la NADPH oxidasa una de las principales fuentes de ROS (Olmos *et al.*, 2003; Romero-Puertas *et al.*, 2004; Garnier *et al.*, 2006). En los últimos años se ha prestado una atención especial al estudio de la regulación de la producción de ROS y la síntesis de antioxidantes, así como la implicación de hormonas como el ácido jasmónico y el etileno, y de moléculas como el NO.

Las respuestas de la planta a las concentraciones de Cd, teniendo en cuenta los resultados obtenidos por los autores Romero-Puertas *et al.*, 2004, 2007; Olmos *et al.*, 2003, entre otros, indican que este elemento induce la enzima NADPH oxidasa de membrana y contribuye a la formación de ROS (O_2^- y H_2O_2) que intervienen en la lignificación de la pared celular que actúa como barrera de entrada del metal (Sanità di Topi y Gabbrielli 1999). Las ROS pueden ser eliminadas por los sistemas antioxidantes pero cuando la intensidad y duración del tratamiento superan la barrera antioxidante, se

produce un exceso de ROS que se traduce en daños oxidativos a membranas y proteínas.

Los daños a membranas van acompañados de un incremento en la síntesis de etileno y jasmónico (JA), que junto con el H_2O_2 regulan la expresión de un gran número de proteínas de defensa (HSPs, quitinasa o antioxidantes, entre otras). Recientemente se ha demostrado un importante papel regulador del NO en distintos procesos de desarrollo en vegetales (del Río *et al.*, 2004). El papel de ésta molécula está siendo estudiado y parece ser que el Cd reduce considerablemente la acumulación de NO en tratamientos largos, si bien no se conocen los mecanismos implicados en éste proceso (Rodríguez-Serrano *et al.*, 2006).

Mecanismos de defensa de la planta a la toxicidad de Cadmio

Las plantas han desarrollado distintas estrategias para evitar la toxicidad de metales pesados. En general, la tolerancia a metales viene determinada por la reducción del transporte del mismo al interior de la célula y/o una mayor capacidad para secuestrar estos metales. La raíz constituye una de las principales barreras de defensa mediante la inmovilización del Cd por pectinas de la pared celular. Los carbohidratos extracelulares (mucílago y calosa) de la raíz también pueden intervenir en la inmovilización del metal (Benavides *et al.*, 2005). La acumulación del metal en los tricomas de la

superficie foliar también es un mecanismo de inmovilización y defensa celular (Salt y Kramer, 2000).

Otro mecanismo consiste en la reducción del transporte o aumento de la extrusión del Cd por transportadores de cationes de la membrana plasmática (Thomine *et al.*, 2000). Una vez dentro de la célula, el Cd u otros metales pueden ser secuestrados por ácidos orgánicos, aminoácidos, fitoquelatinas y metalotioneínas y posteriormente aislados en la vacuola para prevenir su toxicidad. Las fitoquelatinas constituyen uno de los principales mecanismos de defensa frente a metales pesados. Su síntesis tiene lugar a partir del glutatión y se induce en presencia de metales pesados (Clemens, 2006). Las plantas que sobreexpresan la enzima fitoquelatina sintasa muestran una mayor tolerancia frente al Cd (Pomponi *et al.*, 2006). Otras posibles moléculas responsables de la acumulación del cadmio son las metalotioneínas (MTs), pequeñas proteínas ricas en cisteína, aunque en las plantas no son las principales responsables de la detoxificación del cadmio, como ocurre en células animales (Hamer, 1986).

El plomo

En la naturaleza, el plomo (Pb) es un elemento ubicuo, pero biológicamente no esencial (Nriagu, 1978; Ewers y Schlipköter, 1991). Durante los últimos cincuenta años el plomo se ha utilizado en múltiples productos industriales, agrícolas y domésticos, causando la contaminación

generalizada del medio ambiente (Ewers y Schlipköter, 1991; Watanabe, 1997; Johnson, 1998). La toxicidad del plomo es consecuencia de la capacidad de este para interferir con varias enzimas (Ewers y Schlipköter, 1991). Dado que el plomo causa una gran variedad de tóxicos efectos, incluyendo el muscular, gastrointestinal, reproductivo, neurológico y de comportamiento y mutaciones genéticas (Johnson, 1998), su destino en el ambiente es de gran preocupación. La contaminación de suelos con plomo, influye sobre la transformación de las características ambientales, tales como el pH del suelo, contenido de materia orgánica, textura, potencial redox y la presencia de otros elementos (Van der Sloot *et al.*, 1996).

Absorción, transporte y localización

El uso de algunos aerosoles de uso agrícola, fertilizantes químicos y desechos de minas, entre otros, son fuentes de Pb, el cual se deposita en el suelo y queda disponible para las plantas. La disponibilidad de Pb y su absorción depende en gran medida de las condiciones del suelo. Entre los factores que influyen en la disponibilidad se encuentra materia orgánica, tamaño de las partículas del suelo, capacidad de intercambio catiónico, así como factores de la planta: área de la superficie radicular, exudados de las raíces, micorrización y la tasa de transpiración (Davies, 1995).

La absorción de plomo en el suelo sigue la relación de Langmuir y se incrementa con el aumento de pH entre 3,0 y 8,5 (Lee *et al.*, 1998). Sin embargo, Blaylock *et al.* (1997) informaron que en el suelo con un pH entre 5,5 y 7,5 la solubilidad de Pb está controlada por fosfatos o carbonatos, disminuyendo la disponibilidad de este para las plantas, incluso si tienen la capacidad genética para acumularlo. El Pb en el suelo se clasifica como un ácido débil de Lewis, lo que implica un fuerte carácter covalente a muchos de los enlaces iónicos que se forma en suelos y plantas.

Estudios de la absorción de plomo en las plantas han demostrado que las raíces tienen una capacidad de absorber cantidades significativas de plomo (Lane y Martin, 1977). En la superficie de la raíz el Pb se une a grupos carboxilos de los ácidos mucílagos urónicos. Los mucílagos restringen la absorción de metales en la raíz y establecen una barrera importante para proteger el sistema radicular. Algunos de los metales consolidados son liberados cuando se biodegrada el mucílago (Morel *et al.*, 1986). Los microorganismos del suelo pueden afectar la disponibilidad de metales pesados por bioabsorción, bioacumulación y solubilización.

La retención de Pb en las raíces se basa en la unión de iones de plomo a los sitios intercambiables en la pared celular y precipitación extracelular, principalmente en forma de carbonato de plomo depositado en la pared celular. La adición de quelatos sintéticos, tales como H-EDTA o EDTA, en

combinación con un pH ácido, impide eficazmente la retención de la pared celular de plomo, por lo que es disponible para el desplazamiento en los tallos (Jarvis y Leung, 2002).

Después de ser absorbido por las raíces, la localización de Pb es mayor en las raíces que en otras partes de las plantas. El Pb se une fuertemente a los grupos carboxilo de los ácidos galacturónico y glucurónico en la pared celular, lo que limita su transporte a través de apoplasto (Rudakova et al., 1988). En general las plantas dicotiledóneas acumulan cantidades significativamente mayores de Pb en las raíces que las monocotiledóneas (Huang y Cunningham, 1996).

El transporte de Pb desde el suelo a las células de la raíz se ve forzado a atravesar la membrana plasmática de las células de raíz. Huang y Cunningham (1996) encontraron que el Pb inhibe la actividad de los canales de Ca en la membrana plasmática de las raíces del trigo. La inhibición de los canales de Ca sugieren la obstrucción a la entrada de plomo, debido a un transporte competitivo entre el Pb y Ca. Durante la entrada de Pb en células aisladas, Tomsig y Suszkiw (1991) observaron la penetración de Pb a través de los canales de Ca. Estos autores también encontraron que el transporte de Pb fue bloqueado por nifedipina (un bloqueador de los canales de Ca) y mejorado por BAY K8644 (un agonista de los canales de Ca).

El Pb se mueve principalmente en el apoplasto radicular y, por lo tanto, en forma radial a través de la corteza y se acumula cerca de la endodermis. La endodermis actúa como una barrera parcial al movimiento de Pb entre la raíz y el exterior de las células de la raíz. Esto puede explicar, en parte, los informes de una mayor acumulación de plomo en las raíces en comparación con otras partes de la planta (Jones *et al.*, 1973; Verma y Dubey, 2003).

El transporte limitado de Pb de las raíces a otros órganos se debe a la barrera de la endodermis de la raíz. Al parecer, las bandas de Caspary de la endodermis son el factor principal que limita la restricción del transporte a través de la endodermis de Pb (Seregin e Ivanov, 1997). De acuerdo con Lane y Martin (1977), la endodermis parece actuar como una barrera parcial, ya que el Pb se mueve hacia la parte superior de la planta a través de los tejidos vasculares y se difunde a los tejidos circundantes.

El patrón de distribución de Pb en las raíces difiere considerablemente en función de si las concentraciones de Pb son letales o no letales (Seregin *et al.*, 2004). A bajas concentraciones, los iones Pb predominan de flujo en el apoplasto, mientras que a concentraciones más altas, la función de barrera de plasmalema está dañada y una mayor cantidad de plomo entra en las células.

En general, la aparente concentración de Pb en las partes aéreas de la planta disminuye a medida que se alejan de la raíz. Esto ocurre debido a una mayor localización de Pb en las paredes celulares de la raíz que en otras partes de la planta. Además, la unión de Pb se da más en lignificados en lugar de tejidos no lignificados. Esto sugiere que el grado de localización de Pb en diferentes tejidos de la planta depende también de las especies de plantas. En las semillas, la testa evita la entrada de Pb en los tejidos internos hasta que se rompe por la radícula en desarrollo. En los cotiledones, el Pb se mueve a través de los tejidos vasculares y tiende a acumularse en zonas discretas en las partes distales (Lane y Martin, 1977).

El contenido de Pb en diversos órganos de la planta tiende a disminuir en el siguiente orden: raíces> hojas> tallo> inflorescencia> semillas. Sin embargo, éste orden puede variar según las especies de plantas (Antosiewicz, 1992). Las hojas difieren en su capacidad para acumular Pb dependiendo de la edad (Godzik, 1993). Algunos estudios ultraestructurales han revelado que una cantidad variable de los depósitos de plomo están presentes principalmente en la pared celular del espacio intercelular y las vacuolas, mientras que los pequeños depósitos de éste metal se localizan en las vesículas de dictiosomas. La pared celular y las vacuolas, en conjunto representan alrededor del 96% de Pb absorbido (Wierzbicka y Antosiewicz, 1993). Una pequeña cantidad de plomo llega a los núcleos, mitocondrias y los cloroplastos y ejerce sus efectos tóxicos sobre estos organelos.

Efectos fisiológicos, bioquímicos y ultraestructurales del plomo

Los síntomas visuales no específicos de toxicidad por Pb son rápida inhibición de crecimiento de las raíces, retraso en el crecimiento de la planta y clorosis (Burton *et al.*, 1984). Cuando el Pb entra en las células, incluso en pequeñas cantidades, produce una amplia gama de efectos adversos en los procesos fisiológicos.

La fitotoxicidad del Pb conduce a la inhibición de la actividad de las enzimas, nutrición mineral alterada, desequilibrio de agua, cambio en el estado hormonal y alteración de la permeabilidad de la membrana. Estos trastornos afectan al estado normal de las actividades fisiológicas de la planta. Grandes concentraciones de Pb inducen muerte celular (Ernst, 1998; Seregin e Ivanov, 1997). A nivel celular, el Pb inhibe la actividad de las enzimas que contienen sulfhidrilo (-SH) necesario para su actividad (van Assche y Clijsters, 1990). La toxicidad del Pb inhibe la germinación de las semillas y retarda el crecimiento de las plántulas. El Pb disminuye el porcentaje de germinación, índice de germinación, longitudes de raíz y tallo, el índice de la tolerancia y masa seca de las raíces y brotes (Mishra y Choudhari, 1998).

Las raíces de las plantas responden rápidamente al Pb absorbido, a través de una reducción en la tasa de crecimiento y cambio en el patrón de

ramificación. Varios autores han reportado la inhibición de crecimiento de las raíces a concentraciones de 10^{-2} a 10^{-6} M Pb y con un contenido de plomo en suelo mayor a 10 mg/kg (Breckle, 1991). A bajas concentraciones de Pb, el desarrollo y extensión de la raíz principal se ven afectadas mucho más que las raíces laterales (Obroucheva *et al.*, 1998). Parece ser que la inhibición del crecimiento de las raíces por la toxicidad del Pb es el resultado de la inhibición de la división celular en las puntas de las raíces (Eun *et al.*, 2000). Las concentraciones de Pb afectan de manera directa la mitosis, produciéndose núcleos de forma irregular y contenido nuclear alterado (Wierzbicka, 1994).

Actividades de las enzimas

Al igual que diversos metales pesados, el Pb influye sobre el comportamiento de la actividad de una amplia gama de enzimas de las diferentes vías metabólicas. Las concentraciones de 10^{-5} a 2×10^{-4} de Pb M producen alrededor del 50% de inhibición de varias enzimas. Esta concentración se define como la constante de inactivación (K_i). En la mayoría de las inhibiciones enzimáticas, el Pb interactúa sobre los grupos-SH enzimáticos (Levina, 1972). El Pb interactúa con los grupos-SH libres que están presentes en el sitio activo de la enzima y esencial para la actividad enzimática, así como con los grupos-SH que son necesarios para la estabilización de la estructura terciaria de enzimas. Además de la reacción con los grupos-SH, el bloqueo de grupos-COOH con iones de plomo también

parece desempeñar un papel importante en la inhibición de la actividad de la enzima.

La actividad enzimática no solo se ve afectada de manera negativa, sino también aumenta en la presencia del Pb. Las plantas de soya cultivadas en medios de cultivo que contienen 20-100 mg/L⁻¹ Pb mostraron una mayor actividad de la fosfatasa ácida, α -amilasa y peroxidasa en las hojas (Lee *et al.*, 1976). Además se ha observado un aumento en la actividad de la enzima ARN ribonucleasa hidrólisis y proteasa en plantas angiospermas acuáticas en medios con acetato de plomo (Jana y Choudhari, 1982). Como el Pb promueve la formación de especies reactivas del oxígeno en las plantas que conduce a estrés oxidativo, se da un aumento en la actividad de ciertas enzimas antioxidantes. Las plantas de arroz cultivadas en suelo con 0,5 mM y 1 mM de Pb(NO₃)₂ mostraron aumento en la actividad de las enzimas antioxidantes superóxido dismutasa, peroxidasa de guayacol, ascorbato peroxidasa y glutathion reductasa en las raíces y las hojas (Figura 4) (Verma y Dubey, 2003).

Fotosíntesis.

El proceso de la fotosíntesis se ve afectada por la toxicidad del plomo. Las plantas expuestas a los iones de plomo muestran un descenso en la tasa de fotosíntesis, distorsión en la estructura del cloroplasto, deficiencia en la síntesis de contenido de clorofila, obstrucción de transporte de electrones,

inhibe la actividad de las enzimas del ciclo de Calvin, así como deficiencia de captación de CO₂ como resultado de los estomas cerrados. Las plantas de *Ceratophyllum demersum* creciendo en medio con Pb (NO₃)₂ muestran notables cambios en la estructura del cloroplasto (Rebechini y Hanzely, 1974). Las células de las hojas de estas plantas mostraron una reducción en las pilas de grana junto con una reducción en la cantidad de estroma en relación con el sistema laminar, así como la ausencia de granos de almidón. Además, el tratamiento con Pb también cambia la composición lipídica de las membranas tilacoides (Figura 4) (Stefanov *et al.*, 1995).

El Pb inhibe la síntesis de la clorofila, causando deterioro de la absorción de elementos esenciales como el Mg y Fe por plantas. También daña al aparato fotosintético, debido a su afinidad por la proteína N-y S-ligandos. El Pb inhibe el transporte de electrones, alterando los sitios activos de PSI, PSII y el complejo citocromo b/f (Rashid *et al.*, 1994).

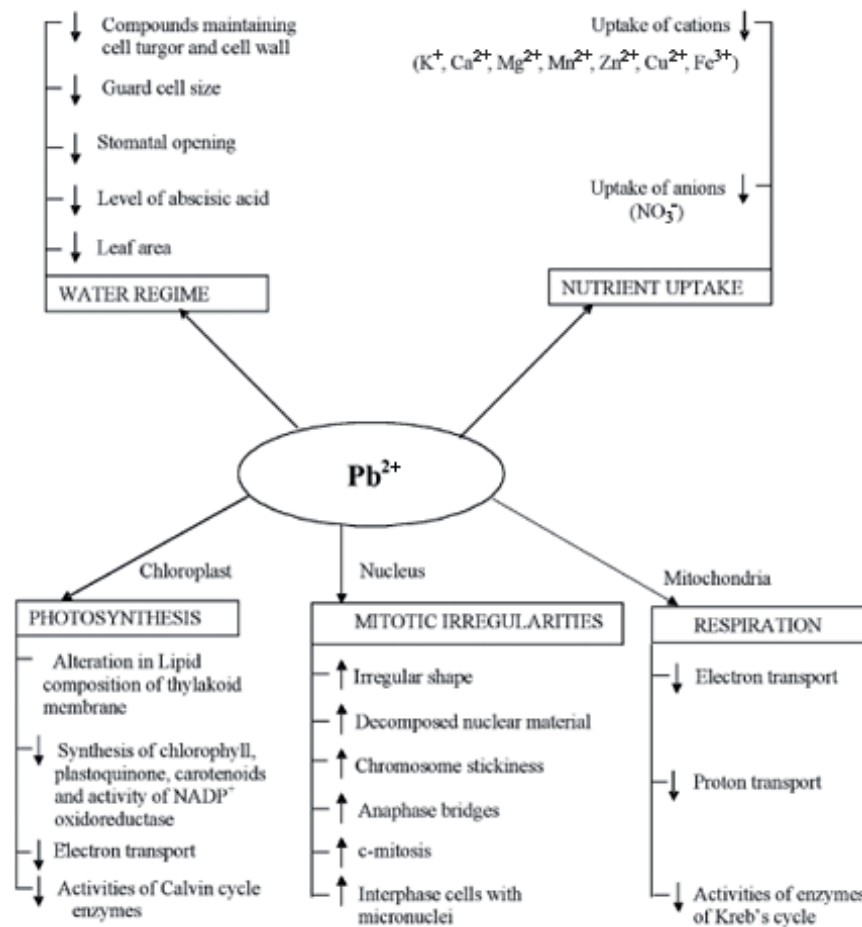


Figura 4. Efecto del plomo sobre la fotosíntesis, irregularidades mitóticas, respiración, régimen de agua y consumo de nutrientes. Las flechas ↓, ↑ representan disminución e incremento de la actividad respectivamente.

Plantas hiperacumuladoras de metales pesados

La mayoría de las plantas responden a concentraciones grandes de metales pesados en el suelo mediante la absorción excesiva de metales en su tejido foliar (Baker, 1981). La hiperacumulación es una respuesta al enriquecimiento de metales pesados en el suelo. Las plantas son capaces de desintoxicar al suelo y acumular el metal en sus partes (Baker y Brooks, 1989). Las plantas que se consideran hiperacumuladoras han sido definidas

como aquellas plantas que contienen al menos 100 mg g^{-1} (0,01% con base en peso seco.) de Cd, As o $>1000 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ (0.1% de materia seca) de Ni, Cr, Co, Cu y Pb y $>10\ 000 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ (1% de materia seca) de Mn y Zn (Baker y Brooks, 1989).

En la mayoría de los casos, la concentración de metal en los brotes es superior a la presente en las raíces y al suelo en que crece la planta (Baker y Brooks, 1989). De todas las hiperacumuladoras notificadas hasta la fecha, las más abundantes son las que acumulan Ni (Brooks, 1998). Actualmente se consideran alrededor de 400 plantas hiperacumuladoras de metales pesados. Las familias que dominan son *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Caryophyllaceae*, *Cyperaceae*, *Cunouniaceae*, *Fabaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lamiaceae*, *Poaceae*, *Violaceae* y *Euphobiaceae*. *Brassicaceae* tiene el mayor número de plantas hiperacumuladoras con 11 géneros y 87 especies. Las especies del género *Thlaspi* son hiperacumuladoras de varios metales; por ejemplo, *T. caerulescence* hiperacumula Cd, Ni, Pb, y Zn, *T. goesingense* acumula metales como Ni y Zn; y *T. rotundifolium* es hiperacumuladora de Ni, Pb y Zn (Brooks, 1998; Pasad y Freitas, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se determinó la concentración de Plomo y Cadmio a través de Espectrofotometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS), en muestras de suelo de los estratos 0 a 15 cm, 15 a 30 cm y 30 a 45 cm; y de plantas como: *Prosopis sp.* (Mezquite), *Solanum eleagnifolium* (Trompillo), *Tecoma stan* (Retama), *Papophorum sp.* (Pasto cola de zorra), *Erioneuron sp.* (Pasto borreguero), *Cenchrus ciliaris* (Pasto buffel), *Flouencia cemua* (Hojasen), *Salsola kali* (Rodadora), *Coldenia greggi* (Granjeno), *Crotalaria pumila Ort.* (Tronadora), *Amaranthus hybridus* (Quelite) y *Atriplex canescens* (Chamizo), encontradas dentro de las instalaciones de la planta minera La Platosa, Excellon Resources Inc., Minera Excellon de Mexico S.A de C.V., localizada en Bermejillo, Durango, México, geográficamente ubicada a los 25°55'38" N; 103°39'30" O a 1117 msnm. (Figura 5), específicamente en los sitios en los que se realizan las descarga de aguas extraída del interior de las minas.

Las características climáticas de la zona se clasifica como BW_{hw} (e), clima seco cálido, con temperatura media anual de 21°C y precipitación media anual de 217.1 mm. El mes más cálido es junio con temperaturas media 27.3°C, mientras que el mes más frío es enero con temperatura media de 13.3°C. La mayor incidencia de lluvias se presenta en verano (García, 1988). El tipo de suelo presente en la región es de textura limo-arcillosa, pH

ligeramente alcalino, pobre en materia orgánica y fósforo, y rico en calcio (Martínez, 1991).



Figura 5. Ubicación geográfica de la planta minera Excellon Resources Inc.

El tipo de vegetación en el área de estudio está correspondiente principalmente a vegetación halófila xerófila y matorral desértico rosetófilo. La vegetación xerófila está constituida por comunidades vegetales arbustivas o herbáceas que se caracterizan por desarrollarse sobre suelos con alto contenido de sales, en partes bajas de cuencas cerradas de las zonas áridas y semiáridas, cerca de lagunas costeras, área de marismas, etc. Las especies más abundantes corresponden estrictamente a halófitas como chamizo (*Atriplex* spp.), romerito (*Suaeda* spp.), vidrillo (*Batis maritima*), hierba reuma (*Frankenia* spp.), alfombrilla (*Abronia maritima*) y lavanda (*Limonium* spp.). Adicionalmente, se encuentran otras especies como la verdolaga (*Sesuvium* spp.), zacate toboso (*Hilaria* spp.), zacate (*Eragrostis obtusiflora*), entre otras.

Por su parte, el matorral desértico está dominado por especies con hojas en roseta, con o sin espinas, sin tallo aparente o bien desarrollado. Se le encuentra generalmente sobre suelos del tipo xerosol en laderas de cerros de origen sedimentario, en las partes altas de los abanicos aluviales o sobre conglomerados en casi todas las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noroeste del país. Aquí se desarrollan algunas de las especies de mayor importancia económica de esas regiones áridas como: *Agave lechuguilla* (Lechuguilla), *Euphorbia antisiphylitica* (Candelilla), *Parthenium argentatum* (Guayule) y *Yucca carnerosana* (Palma samandoca) (CONAFOR, 2011).

Muestreo de suelos

Se llevó a cabo un muestreo sistemático en rejilla, con distancias entre líneas de 20 m. En cada punto se tomaron muestras de los estratos del suelo (0-15, 15-30 y 30-45 cm) en dos diferentes sitios de muestreo distribuidos sistemáticamente en el área de influencia de las descargas de agua de la mina; el primero en un terreno comprendido por 10 000 m², del cual se eligieron 36 puntos a muestrear a una distancia de 20 metros entre puntos, es decir a los 0, 20, 40, 60, 80 y 100 metros, para completar un total de 108 muestras; el segundo, un terreno comprendido por 2 000 m², del cual se consideraron 20 puntos a muestrear a una distancia de 10 metros entre puntos (0, 10, 20, 30 y 40 metros), para completar un total de 60 muestras. Se georeferenciaron los dos sitios de muestreo con ayuda de un GPS (Figura 6 y 7).

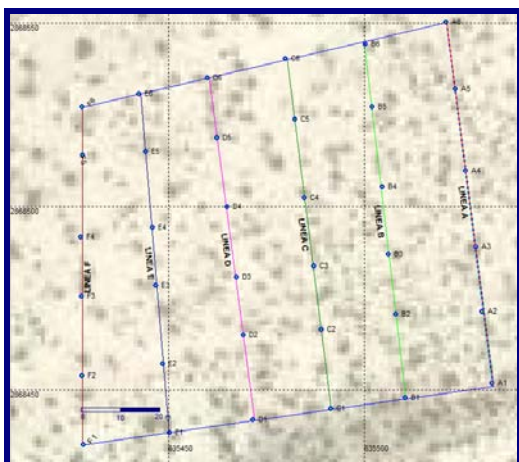


Figura 6. Ubicación geográfica del primer sitio de muestreo.

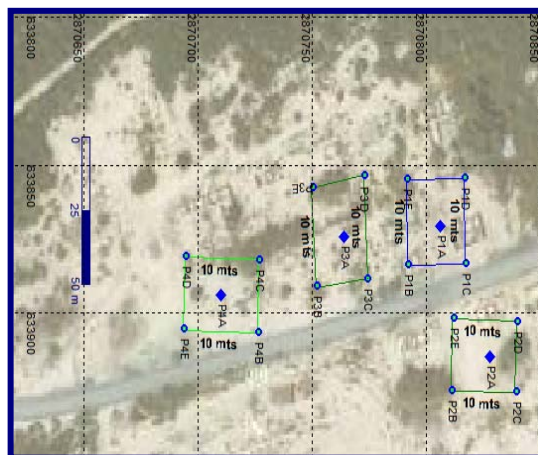


Figura 7. Ubicación geográfica del segundo sitio de muestreo.

Muestreo de vegetación

Se empleó un muestreo de cuadrantes, con cuadros de 10 x 10 m, los cuales se geo-referenciaron con GPS. En cada cuadro se identificó: número de especies vegetales, frecuencia de cada especie, cobertura. Además se tomaron muestras de tallo y raíz de plantas de cada una de las especies encontradas para determinar la concentración de metales pesados.

Análisis de Plomo y Cadmio en flora

Las muestras se secaron a una temperatura de 75°C durante 48 horas y se molieron en un mortero de porcelana. Se pesaron 0.5 g de muestra y se colocaron en recipientes de polipropileno de 150 ml; la digestión se llevó a cabo agregando 10 ml de ácido nítrico (HNO_3). Posteriormente las muestras se colocaron en un Controlador Automático de Temperatura (ATC-400

ETHOS) a 140°C de temperatura (la mayor) y 80°C como temperatura mínima durante una hora y media, para posteriormente filtrarlas con papel filtro Whatman No. 2. El filtrado se llevó a un volumen de aforación de 100 ml con agua destilada en matraces de aforación tipo A de 100 ml. Las determinaciones de Pb y Cd se efectuaron por medio de un Espectrofotómetro de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS).

Evaluación de índice de bioacumulación

Se determinó el índice de bioacumulación (IBA) de Pb y Cd para las muestras vegetales, mediante el cociente entre la concentración de metales en los tejidos vegetales y la concentración de éstos en el suelo.

Análisis general de suelo

Las muestras de suelo fueron sometidas a un análisis de variables físicas y químicas como:

- Textura (%) (Hidrómetro de Bouyoucus)
- pH (Potenciómetro)
- Conductividad Eléctrica (CE) (dSm^{-1}) (Conductímetro)
- Determinación de materia orgánica (Método de Morgan modificado)

Análisis de Plomo y Cadmio en suelo

Las muestra de suelo se secaron en papel a temperatura ambiente durante una semana; posteriormente, la muestra seca se homogenizó mediante molino con rodillo de madera, luego se obtuvo una sub-muestra de suelo seco por el método de cuarteo y esta se tamizó con un tamiz de malla de 2 mm de diámetro hasta obtener 1 Kg de muestra homogenizada. Para realizar el análisis de Pb y Cd, se agregaron 0.5 g de suelo muestra y se colocaron en recipientes de polipropileno de 150 ml; la digestión se llevó a cabo agregando 10 ml de ácido nítrico (HNO_3). Posteriormente las muestras se colocaron en un Controlador Automático de Temperatura (ATC-400 ETHOS) a 140°C de temperatura maxima y 80°C como temperatura minima durante una hora y media, para posteriormente filtrarlas con papel filtro Whatman No. 2. El filtrado se llevó a un volumen de aforación de 100 ml con agua destilada en matraces de aforación tipo A de 100 ml. La determinación de Pb y Cd se efectuó por medio de un Espectrofotómetro de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS).

El análisis estadístico para evaluar el contenido de cadmio (Cd) y plomo (Pb) en los tres estratos de suelo, y en hoja, tallo y raíz de plantas fue realizado mediante un ANOVA con un muestreo completamente al azar. Para la agrupación de las medias se realizó el ANOVA de un factor, mediante una comparación múltiple de Tukey POST HOC; tomando como factor de variación el Estrato de suelo, Sitio, planta y parte de la planta (Hoja, Tallo y

Raíz). Para observar la relación entre las concentraciones de Cd y Pb en los estratos de suelo y las partes de la planta, se realizó un análisis de correlación bivariado, mediante el coeficiente de Pearson, a un $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$.

Modelos estadísticos

Modelo: Cadmio (Cd), Plomo (Pb) para sitios de muestreo

Para evaluar el comportamiento de Cd y Pb en los sitios uno (S1) y dos (S2) se usó el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + ID_{j(i)}$$

Y_{ijk} Concentración media de Cd (ppm) o Pb (ppm) en la i-ésima muestra en el j-ésimo sitio.

μ = Media general

T_i = Efecto del i-ésimo sitio, donde $i = 1, 2$ (S1, S2)

$ID_{j(i)}$ = Efecto de la j-ésima muestra en el i-ésimo sitio (ERROR

A)

Modelo: Cadmio (Cd), Plomo (Pb) para estratos de suelo muestreado

Para evaluar el comportamiento del Cd y Pb, en los estratos uno (0-15), dos (15-30) y tres (30-45) se usó el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + ID_{j(i)}$$

Y_{ijk} Concentración media de Cd (ppm) o Pb (ppm) en la i-ésima muestra en el j-ésimo estrato.

μ = Media general

T_i = Efecto del i-ésimo estrato, donde $i = 1, 2, 3$ (0-15, 15-30, 30-45)

$ID_{j(i)}$ = Efecto de la j-ésima muestra en el i-ésimo estrato (ERROR A)

Modelo: Cadmio (Cd), Plomo (Pb) para plantas muestreadas

Para evaluar el comportamiento del Cd y Pb, en las plantas muestreadas uno (*Prosopis sp.*), dos (*Solanum eleagnifolium*), tres (*Tecoma stan*), cuatro (*Papophorum sp.*), cinco (*Erioneuron sp.*), seis (*Cenchnus ciliaris*), siete (*Flouencia cemua*), ocho (*Salsola kali*), nueve (*Coldenia greggi*), diez (*Crotalarra pumila Ort.*), once (*Amaranthus hybridus*) y doce (*Atriplex canescens*) se usó el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + ID_{j(i)}$$

Y_{ijk} Concentración media de Cd (ppm) o Pb (ppm) en la i-ésima muestra en la j-ésima planta.

μ = Media general

T_i = Efecto de la i-ésima planta, donde i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 especie de planta.

$ID_{j(i)}$ = Efecto de la j-ésima muestra en la i-ésima planta (ERROR A)

Modelo: Cadmio (Cd), Plomo (Pb) para parte de la planta muestreada

Para evaluar el comportamiento del Cd y Pb, en la parte de la planta uno (hoja), dos (raíz) y tres (tallo) se usó el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + ID_{j(i)}$$

Y_{ijk} Concentración media de Cd (ppm) o Pb (ppm) en la i-ésima muestra en la j-ésima parte de la planta.

μ = Media general

T_i = Efecto de la i-ésima parte de la planta, donde i = 1, 2, 3 (hoja, raíz, tallo)

$ID_{j(i)}$ = Efecto de la j-ésima muestra en la i-ésimo parte de la planta (ERROR A)

Se plantearon las siguientes hipótesis:

H_0 : Los dos sitios muestreados presentan las mismas concentraciones de cadmio y plomo en los tres estratos de suelo, así como las mismas concentraciones de cadmio y plomo para hoja, tallo y raíz en las diferentes

especies vegetales muestreadas; además, no difieren las concentraciones promedio de cadmio y plomo entre las especies de plantas muestreadas.

Ha: Los dos sitios muestreados tienen diferentes concentraciones de cadmio y plomo en los tres estratos de suelo, así como diferencias en las concentraciones de cadmio y plomo para hoja, tallo, y raíz en las diferentes especies vegetales muestreadas; además la concentración promedio difiere para cadmio y plomo entre las especies de plantas muestreadas.

Todos los análisis se realizaron con el programa estadístico SPSS Statistics V 17.0. Los valores reportados son valores para las medias, máximos, mínimos, así como la desviación estándar.

RESULTADOS

Análisis del suelo para Cadmio

Concentración general de cadmio en sitios de muestreo

Un análisis combinado muestra que las concentraciones de cadmio en el suelo presentan diferencias significativas de ($p \leq 0.05$). El valor promedio de la concentración de cadmio en el suelo en ambos sitios es de 72,7 ppm. Por otra parte, el Sitio 1 presentó en general significativamente mayor concentración de cadmio que el sitio 2 con un valor promedio de 83,38 ppm (Cuadro 1).

Cuadro 1. Concentración media, mínima y máxima de cadmio en suelos de los sitios muestreados con descargas de agua subterráneas de minas.

Cadmio (ppm)					
Sitio	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1	108	3,38 ^c	29,29	0,00	64,00
Sitio 2	54	1,33 ^a	9,29	5,00	4,00
Total del muestreo	162	2,70 ^b	28,78	0,00	64,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración general de Cadmio (Cd) para los estratos de suelo

Para la concentración general de Cd en los estratos evaluados en el muestreo, existe diferencia de ($p \leq 0.05$). En general, la mayor concentración de cadmio en suelo se presenta en el estrato 1 con un valores promedio, máximo y mínimo de 89,54, 164 y 59 ppm, respectivamente. Mientras que

en general el estrato 3 presenta la menor concentración de cadmio con una media, máxima y mínima de 57,3, 114 y 30 ppm, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Concentración media, mínima y máxima de cadmio en los estratos de los sitios muestreados con descargas de agua subterráneas de minas.

Cadmio (ppm)					
Sitio	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Estrato 1 (0-15 cm)	54	89,54 ^c	33,32	59,00	164,00
Estrato 2 (15-30 cm)	54	71,25 ^b	16,44	49,00	103,00
Estrato 3 (30-45)	54	57,31 ^a	24,56	30,00	114,00
Total del muestreo	162	72,70 ^b	28,78	30,00	164,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Cadmio (Cd) para los estratos de suelo en el Sitio 1

En cuanto a la concentración promedio de Cadmio en los estratos del suelo muestreado para el sitio 1, el análisis estadístico muestra diferencias significativas ($p \leq 0.05$). La mayor concentración de cadmio en el sitio 1 se presenta en el estrato 1 (0-15 cm) con un valor promedio de 103,5 ppm, con un máximo y mínimo de 164 y 61 ppm; y el estrato con menor concentración de cadmio para este mismo sitio fue el 3 (30-45 cm) con un promedio, máximo y mínimo de 66,2, 114 y 30 ppm (Cuadro 3).

Cuadro 3. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en diferentes profundidades de suelos con descargas de aguas subterráneas de minas del sitio 1.

Cadmio (ppm)					
Sitio y estratos	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar.
Sitio 1					
Estrato 1 (0-15)	36	03,53 ^a	1,00	64,00	32,80
Estrato 2 (15-30)	36	0,44 ^b	3,00	03,00	12,15
Estrato 3 (30-45)	36	6,19 ^c	0,00	14,00	25,86

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Cadmio (Cd) para los estratos de suelo en el Sitio 2

En el caso del sitio 2, la concentración de Cd para los estratos de suelo muestreado se presenta diferencia significativa ($p \leq 0.05$). El estrato que presentó mayor concentración de Cd fue el estrato 1, con un valor promedio, máximo y mínimo de 61,5, 64 y 59 ppm. Mientras que el estrato 3, al igual que en el sitio 1, presentó el menor valor en la concentración, con un promedio, máximo y mínimo de 39,5, 42 y 35 ppm (Cuadro 4).

Cuadro 4. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en diferentes profundidades de suelos con descargas de aguas subterráneas de minas en el sitio 2.

Cadmio (ppm)					
Sitio y estratos	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar.
Sitio 2					
Estrato 1 (0-15)	18	61,56 ^b	59,00	64,00	1,50
Estrato 2 (15-30)	18	52,89 ^b	49,00	56,00	1,90
Estrato 3 (30-45)	18	39,56 ^a	35,00	42,00	1,82

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Análisis de suelo para Plomo

Concentración general de Plomo en suelo

Con respecto a la concentración de plomo en suelo, el análisis estadístico muestra diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en las medias para los sitios en las muestras analizadas del estudio. La media general de concentración de plomo en el suelo es de 4 209 ppm., en tanto que el sitio que presentó mayor concentración de plomo en el estudio fue el sitio 1 con 4 757,6 ppm y un máximo y mínimo de 7 440 y 2 300 ppm (Cuadro 5).

Cuadro 5. Concentración media, mínima y máxima de plomo en suelo con descargas de aguas subterráneas de minas en dos sitios de Bermejillo, Durango.

Plomo (ppm)					
Sitio	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1	108	4 757.59 ^b	1 136.51	2 300.00	7 440.00
Sitio 2	54	3 111.85 ^a	1 345.09	900	5 320.00
Total del muestreo	162	4 209.01 ^b	1 435.39	900	7 440.00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración general de Plomo en estratos

Respecto de la concentración de plomo en suelo, el análisis estadístico muestra diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en las medias para los estratos de las muestras analizadas. La mayor concentración de plomo se encuentra en el estrato 2 con un promedio, máximo y mínimo de 5 170,7, 6 600 y 2 900

ppm, respectivamente; mientras que el estrato con menor concentración de plomo se registró en el 3 con 2 903,3 ppm. (Cuadro 6).

Cuadro 6. Concentración media, mínima y máxima de plomo en diferentes profundidades de suelo con descargas de aguas subterráneas de minas en los sitios muestreados.

Plomo (ppm) estrato					
Estrato	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Estrato 1 (0-15 cm)	54	4 552.96 ^b	1 011.60	2 440.00	6 500.00
Estrato 2 (15-30 cm)	54	5 170.74 ^c	839.21	2 900.00	6 600.00
Estrato 3 (30-45 cm)	54	2 903.33 ^a	1 315.81	900	7 440.00
Total del muestreo	162	4 209.01 ^b	1 435.39	900	7 440.00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Plomo (Pb) para los estratos de suelo en el sitio 1

El análisis realizado para las medias de los estratos en el sitio 1 muestra diferencias ($p \leq 0.05$). El estrato que presenta mayor concentración de plomo es el estrato 2 con una concentración promedio de 5 586,6 ppm, con un máximo y mínimo de 6 600 y 4 420 ppm; mientras que el estrato con menor concentración de plomo fue el estrato 3 con 3 630,5 ppm (Cuadro 7).

Cuadro 7. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en diferentes profundidades de suelo con descarga de aguas subterráneas de minas en el sitio 1.

Plomo (ppm)					
Sitio y Estratos	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Estrato 1 (0-15)	36	5 055,55 ^b	3 360,00	6 500,00	785,00
Estrato 2 (15-30)	36	5 586,66 ^c	4 420,00	6 600,00	555,63
Estrato 3 (30-45)	36	3 630,55 ^a	2 300,00	7 440,00	958,65

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Plomo (Pb) para los estratos de suelo en el sitio 2

El análisis realizado para las medias de los estratos en el sitio 2 muestra diferencias ($p \leq 0.05$). El sitio 2 presenta resultados similares al sitio 1, ya que el estrato 2 es el que presenta mayor acumulación de plomo con 4 338,8 ppm, y el estrato 3 presenta la menor concentración de plomo con 1 448,8 ppm (Cuadro 8).

Cuadro 8. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en diferentes profundidades de suelo con descarga de aguas subterráneas de minas en el sitio 2.

Plomo (ppm) sitio 2					
Estrato	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Estrato 1 (0-15)	18	3 547,77 ^b	2 440,00	4 860,00	563,02
Estrato 2 (15-30)	18	4 338,88 ^c	2 900,00	5 320,00	679,01
Estrato 3 (30-45)	18	1 448,88 ^a	900,00	2 100,00	381,95

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Análisis de plantas

Concentración de Cadmio en plantas del sitio 1

De acuerdo al análisis estadístico existe una diferencia significativa de ($p \leq 0.05$), entre la concentración media de las plantas muestreadas, de tal forma que dichas medias se agrupan en dos grupos distintos. En promedio la especie con mejor capacidad para captar Cd fue la Retama con 707,1 ppm, mientras que el Trompillo fue la especie con menor capacidad para retener Cd con 524,6 ppm (Cuadro 9).

Cuadro 9. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en diferentes especies vegetales creciendo en el sitio 1 con descargas de aguas subterráneas de minas en Bermejillo, Durango.

Concentración cadmio (ppm) en planta					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1					
Retama (<i>Tecoma stand</i>)	9	707,11 ^b	240,30	392,00	1 030,00
Mezquite (<i>Prosopis sp</i>)	18	565,33 ^a	157,86	380,00	946,00
Trompillo (<i>Solanum eleagnifolium</i>)	9	524,66 ^a	82,63	368,00	620,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Cadmio en plantas del sitio 2

De acuerdo al análisis estadístico existe una diferencia significativa de ($p \leq 0.05$), entre la concentración media de las plantas muestreadas, de tal forma que dichas medias se agrupan en tres grupos distintos. En promedio la especie que menor captación de cadmio fue el Granjeno con 398,4 ppm, así mismo, la especie con mayor acumulación de Cd fue el Hojasen con 645,1 ppm (Cuadro 10).

Cuadro 10. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en diferentes especies vegetales creciendo en el sitio 2 con descargas de aguas subterráneas de minas en Bermejillo, Durango.

Concentración cadmio (ppm) en planta					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 2					
Hojasen (<i>Flourenzia cemua</i>)	9	645,11 ^c	145,84	406,00	870,00
Tronadora (<i>Crotalaria pumila</i> Ort.)	9	473,55 ^{abc}	191,83	292,00	834,00
Quelite (<i>Amaranthus hybridus</i>)	9	500,44 ^{abc}	116,59	338,00	672,00
Granjeno (<i>Coldenia greggi</i>)	9	398,44 ^a	182,67	128,00	682,00
Pasto borreguero (<i>Erioneuron</i> sp.)	9	534,66 ^{abc}	178,08	348,00	798,00
Pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>)	13	574,00 ^{abc}	175,19	406,00	1 024,00
Chamizo (<i>Atriplex canescens</i>)	9	611,33 ^{abc}	187,75	360,00	838,00
Pasto cola de zorra (<i>Papophorum</i> sp.)	9	515,33 ^{abc}	42,54	462,00	582,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	9	452,44 ^{ab}	67,50	352,00	564,00
Rodadora (<i>Salsola kali</i>)	6	567,00 ^{abc}	49,47	496,00	632,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Plomo en plantas del sitio 1

Las medias para las concentraciones de plomo en plantas de diferentes especies muestreadas en el sitio 1 presentan diferencias significativas ($p \leq 0.05$), esto de acuerdo con el análisis estadístico. La especie muestreada con menor acumulación de Pb en el sitio 1 es el Mezquite con 2 118,7 ppm, mientras que el Trompillo es la especie con mayor concentración de Pb con un valor de 3 595,55 ppm. (Cuadro 11).

Cuadro 11. Concentración media, máxima y mínima de Pb (ppm) en especies vegetales en el sitio 1.

Concentración plomo (ppm) en planta					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1					
Retama (<i>Tecoma stand</i>)	9	2 681,33 ^{ab}	1 133,74	1 290,00	4 100,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	18	2 118,77 ^a	1 319,20	624,00	4 780,00
Trompillo (<i>Solanum eleagnifolium</i>)	9	3 595,55 ^d	2 570,16	1 478,00	7 022,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Plomo en plantas del sitio 2

Las medias para las concentraciones de plomo en plantas muestreadas en el sitio 2, presentan diferencia significativa ($p \leq 0.05$), esto de acuerdo con el análisis estadístico. Las medias son agrupadas en cuatro. La especie muestreada con mayor concentración de plomo se encontró en plantas de Hojasen con un promedio de 11640 ppm; y al igual que el Sitio 1 el Mezquite es la especie con la menor concentración de plomo en sus tejidos con un valor promedio de 1 414,8 ppm (Cuadro 12).

Cuadro 12. Concentración media, máxima y mínima de Pb (ppm) en especies vegetales selectas creciendo en el sitio 2.

Concentración plomo (ppm) en planta					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 2					
Hojasen (<i>Flourenzia cemua</i>)	9	11 640,00 ^d	7 430,12	2 816,00	20 216,00
Tronadora (<i>Crotalaria pumila</i> Ort.)	9	2 738,44 ^{ab}	735,80	1 818,00	3 596,00
Quelite (<i>Amaranthus hybridus</i>)	9	5 807,55 ^c	2 941,37	2 236,00	9 138,00
Granjeno (<i>Coldenia greggi</i>)	9	2 558,44 ^{ab}	2 346,92	594,00	5 784,00
Pasto borreguero (<i>Erioneuron</i> sp.)	9	4 200,22 ^{bc}	4 235,16	896,00	9 844,00
Pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>)	13	2 516,76 ^{ab}	910,46	1 260,00	3 970,00
Chamizo (<i>Atriplex canescens</i>)	9	5 553,11 ^{bc}	4 386,02	1 770,00	11 534,00
Pasto cola de zorra (<i>Papophorum</i> sp.)	9	1 414,88 ^a	558,57	796,00	2 168,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	9	2 166,88 ^a	999,26	1 246,00	3 586,00
Rodadora (<i>Salsola kali</i>)	6	3 577,33 ^{abc}	925,66	2 614,00	4 576,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Cadmio en hoja, raíz y tallo en las plantas muestreadas

De acuerdo a los análisis estadísticos realizados, las medias de las concentraciones de Cadmio para hoja, raíz y tallo muestran diferencias

significativas ($p \leq 0.05$). Difiriendo la media de la concentración de cadmio en tallo con las medias de hoja y raíz. La parte de la planta que mostró mayor acumulación de cadmio fue la raíz con un valor promedio de 591,6 ppm. Mientras que el tallo es la parte de la planta con menor bioacumulación de cadmio con un promedio de 449,2 ppm (Cuadro 13).

Cuadro 13. Media de la concentración de Cd (ppm) para hoja, raíz y tallo en las especies muestreadas.

Cadmio (ppm)					
Parte de la planta	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Hoja	29	539,17 ^b	171,35	332,00	1024,00
Raíz	32	591,68 ^b	129,38	352,00	870,00
Tallo	30	449,20 ^a	144,68	128,00	748,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Plomo en hoja, raíz y tallo en las plantas muestreadas

En el caso de la concentración de plomo en las partes de la planta, el análisis mostró diferencia significativas ($p \leq 0.05$). El comportamiento de la concentración de plomo en las partes de la planta fue diferente al observado en el cadmio, ya que aunque la raíz es la parte con mayor acumulación de plomo con un valor promedio de 6 261,3 ppm; la hoja es la parte con menor concentración de plomo registrando un valor promedio de 2 860 ppm (Cuadro 14).

Cuadro 14. Media de la concentración de Pb (ppm) para hoja, raíz y tallo en las especies muestreadas.

Plomo (ppm)					
Parte de la planta	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Hoja	29	2 860,06 ^a	2 376,65	594,00	9138,00
Raíz	32	6 261,37 ^b	5 414,78	1 956,00	20 216,00
Tallo	30	3 186,40 ^a	3 337,34	896,00	12 096,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Cadmio en raíz por especie en el sitio 1

Los análisis estadísticos no muestran una diferencia significativa ($p \leq 0.05$), entre las medias de las concentraciones de cadmio en las muestras de raíz de las diferentes plantas muestreadas. En el sitio 1, la especie con menor concentración de cadmio en la raíz fue el Trompillo con un valor promedio de 542,6 ppm, mientras que el Mezquite fue la especie muestreada con mayor concentración de cadmio en la raíz con un valor promedio de 723,0 ppm (Cuadro 15).

Cuadro 15. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en raíz de especies vegetales colectadas en el sitio 1.

Concentración cadmio (ppm) en raíz					
Especies	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1					
Retama (<i>Tecoma stand</i>)	3	722,66 ^a	63,57	672,00	794,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	6	723,00 ^a	161,92	526,00	946,00
Trompillo (<i>Solanum eleagnifolium</i>)	3	542,66 ^a	56,01	486,00	598,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Cadmio en raíz por especie en el sitio 2

Las concentraciones de Cd registradas en las raíces de las diferentes especies muestreadas en el sitio 2 son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). En el caso del comportamiento de la concentración de cadmio en la raíz de las plantas muestreadas en el sitio 2, la Tronadora es la especie con menor concentración con un valor promedio de 371,3 ppm, mientras que el Chamizo es la planta con mejor resultado en la acumulación de cadmio en la raíz con un promedio de 807,3 ppm (Cuadro 16).

Cuadro 16. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en raíz de especies vegetales colectadas en el sitio 2.

Concentración cadmio (ppm) en raíz					
Especies	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 2					
Hojasen (<i>Flourenzia cemua</i>)	3	484,66 ^{ab}	90,78	406,00	584,00
Tronadora (<i>Crotalaria pumila</i> Ort.)	3	371,33 ^a	41,10	332,00	414,00
Quelite (<i>Amaranthus hybridus</i>)	3	513,33 ^{ab}	48,38	476,00	568,00
Granjeno (<i>Coldenia greggi</i>)	3	394,66 ^a	42,91	366,00	444,00
Pasto borreguero (<i>Erioneuron</i> sp.)	3	379,33 ^a	29,28	348,00	406,00
Pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>)	5	733,60 ^{bc}	188,26	530,00	1024,00
Chamizo (<i>Atriplex canescens</i>)	3	807,33 ^c	28,37	782,00	838,00
Pasto cola de zorra (<i>Papophorum</i> sp.)	3	516,66 ^{ab}	45,44	468,00	558,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	3	522,00 ^{ab}	37,46	492,00	564,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales.

Concentración de Plomo en raíz por especie en el sitio 1

La concentración acumulada de Plomo (Pb) en raíz para las diferentes especies muestreadas en el sitio 2 muestra diferencias estadísticas entre sus medias ($p \leq 0.05$). El Trompillo en el sitio 1 es la especie con mayor

concentración de Plomo en la raíz con 2 259,3 ppm; mientras que el Mezquite, al igual que en la hoja es la especie con menor concentración de Plomo en la raíz con 1 721,3 ppm (Cuadro 17).

Cuadro 17. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en raíz en especies vegetales colectadas en el sitio 1.

Concentración plomo (ppm) en raíz					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1					
Retama (<i>Tecoma stand</i>)	3	1 393,33 ^a	113,00	1 290,00	1 514,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	6	1 721,33 ^b	65,92	1 610,00	1 802,00
Trompillo (<i>Solanum eleagnifolium</i>)	3	2 259,33 ^c	220,91	2 062,00	2 498,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Plomo en raíz por especie en el sitio 2

La concentración acumulada de Plomo (Pb) en raíz para las diferentes especies muestreadas en los dos sitios muestra diferencias estadística entre sus medias ($p \leq 0.05$). El Quelite colectado en el sitio 2 muestra la mayor concentración de plomo en la raíz con 9 069,3 ppm; en cambio el pasto cola de zorra presentó la menor concentración de plomo en la raíz con 827,3 ppm de plomo (Cuadro 18).

Cuadro 18. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en raíz en especies vegetales colectadas en el sitio 2.

Concentración plomo (ppm) en raíz					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 2					
Hojasen (<i>Flourenzia cemua</i>)	3	2 863,33 ^{bc}	51,39	2 816,00	2 918,00
Tronadora (<i>Crotalaria pumila</i> Ort.)	3	1 860,66 ^{ab}	42,01	1 818,00	1 902,00
Quelite (<i>Amaranthus hybridus</i>)	3	9 069,33 ^d	88,09	8 970,00	9 138,00
Granjeno (<i>Coldenia greggi</i>)	3	922,00 ^a	286,85	594,00	1 126,00
Pasto borreguero (<i>Erioneuron</i> sp.)	3	1 834,00 ^{ab}	143,68	1 674,00	1 952,00
Pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>)	5	3 262,00 ^c	723,32	2 460,00	3 970,00
Chamizo (<i>Atriplex canescens</i>)	3	3 562,66 ^c	492,56	2 994,00	3 856,00
Pasto cola de zorra (<i>Papophorum</i> sp.)	3	827,33 ^a	27,15	796,00	844,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	3	1 271,33 ^a	40,46	1 246,00	1 318,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Cadmio en hoja por especie del sitio 1

De acuerdo al análisis estadístico las medias de las concentraciones de Cd en la hoja de plantas muestreadas en el sitio 1 difieren significativamente ($p \leq 0.05$). En cuanto a las plantas muestreadas y analizadas para el sitio 1, la Retama es la especie con la mayor concentración de Cd en hojas con 971,3 ppm; mientras que el Mezquite es la especie muestreada en el sitio 1 con menor capacidad para bioacumular Cd en la hoja con un valor promedio de 508,6 ppm (Cuadro 19).

Cuadro 19. Concentración media de Cd (ppm) en hoja de especies vegetales colectadas en el sitio 1.

Concentración de cadmio (ppm) en hojas					
Especies	N	Media	Des. Estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1					
Retama (<i>Tecoma stand</i>)	3	971,33 ^b	56,19	918,00	1 030,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	3	508,66 ^a	113,39	380,00	594,00
Trompillo (<i>Solanum eleagnifolium</i>)	3	580,00 ^a	45,82	530,00	620,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Cadmio en hoja por especie del sitio 2

Los resultados muestran que la concentración de Cd en hojas de las plantas colectadas en el sitio 2 difieren ($p \leq 0.05$). En el caso de las plantas muestreadas en el sitio 2 el Mezquite también es la especie con menor acumulación de Cd en la hoja con una media de 468,6 ppm, y el Hojasen es la planta muestreada con mejor resultado ya que presentó un valor promedio de Cd de 758,0 ppm (Cuadro 20).

Cuadro 20. Concentración media de Cd (ppm) en hoja de especies vegetales colectadas en el sitio 2.

Concentración de cadmio (ppm) en hojas					
Especies	N	Media	Des. Estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 2					
Hojasen (<i>Flouencia cemua</i>)	3	758,00 ^c	115,11	640,00	870,00
Tronadora (<i>Crotalaria pumila</i> Ort.)	3	714,00 ^c	109,98	618,00	834,00
Quelite (<i>Amaranthus hybridus</i>)	3	618,66 ^{bc}	51,15	570,00	672,00
Granjeno (<i>Coldenia greggi</i>)	3	602,00 ^{bc}	73,32	538,00	682,00
Pasto borreguero (<i>Erioneuron</i> sp.)	3	746,00 ^c	54,11	690,00	798,00
Pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>)	5	508,80 ^{ab}	27,22	472,00	538,00
Chamizo (<i>Atriplex canescens</i>)	3	638,00 ^{bc}	72,77	594,00	722,00
Pasto cola de zorra (<i>Papophorum</i> sp.)	3	480,00 ^a	26,15	462,00	510,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	6	468,66 ^a	105,57	352,00	622,00
Rodadora (<i>Salsola kali</i>)	3	528,00 ^{ab}	32,00	496,00	560,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Plomo en hoja por especie en el sitio 1

Las hojas de las diferentes especies colectadas presentan diferencia ($p \leq 0.05$) para las concentraciones de Plomo. En cuanto a la concentración de Plomo (Pb) en hoja en las diferentes especies muestreadas, se observa una diferencia significativa entre las especies en los dos sitios. La especie que

mayor bioacumulación mostró en el sitio 1 fue el Trompillo con 6 993,3 ppm; mientras que el Mezquite fue la especie que acumuló plomo en menor grado en las hojas con 3 634,66 ppm (Cuadro 21).

Cuadro 21. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en hoja de especies vegetales colectadas en el sitio 1.

Concentración plomo (ppm) en hoja					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1					
Retama (<i>Tecoma stand</i>)	3	4 004,00 ^b	97,01	3 906,00	4 100,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	6	3 634,66 ^a	1 182,06	2 510,00	4 780,00
Trompillo (<i>Solanum eleagnifolium</i>)	3	6 993,33 ^c	32,51	6 958,00	7 022,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Plomo en hoja por especie en el sitio 2

Las especies vegetales muestreadas muestran diferencia de ($p \leq 0.05$) en la concentración de Plomo en las hojas. En el sitio 2 el Hojasén acumuló 20 006 ppm de Plomo en las hojas, siendo la planta con mayor acumulación; mientras que la especie que en menor grado acumuló Plomo en hoja fue el Pasto cola de zorra con 2 100 ppm (Cuadro 22).

Cuadro 22. Concentración media, mínima y máxima de Pb (ppm) en hoja de especies vegetales colectadas en el sitio 2.

Concentración plomo (ppm) en hoja					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 2					
Hojasen (<i>Flourenicia cemua</i>)	3	20 006,00 ⁿ	190,00	19 846,00	20 216,00
Tronadora (<i>Crotalaria pumila</i> Ort.)	3	3 554,66 ^c	46,70	3 504,00	3 596,00
Quelite (<i>Amaranthus hybridus</i>)	3	2 292,00 ^a	49,51	2 236,00	2 330,00
Granjeno (<i>Coldenia greggi</i>)	3	5 679,33 ^e	109,25	5 566,00	5 784,00
Pasto borreguero (<i>Erioneuron</i> sp.)	3	9 822,66 ^f	22,03	9 800,00	9 844,00
Pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>)	5	2 493,20 ^{ab}	425,45	1 956,00	2 864,00
Chamizo (<i>Atriplex canescens</i>)	3	11 300,00 ^g	235,00	11 064,00	11 534,00
Pasto cola de zorra (<i>Papophorum</i> sp.)	3	2 100,00 ^a	63,59	2 042,00	2 168,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	3	3 464,66 ^c	120,02	3 346,00	3 586,00
Rodadora (<i>Salsola kali</i>)	3	4 413,33 ^d	176,29	4 226,00	4 576,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Cadmio en tallo por especie en el sitio 1

La concentración media de Cd en tallo según los análisis estadísticos realizados, no muestran diferencias significativas ($p \leq 0.05$). En cuanto a la planta con mejor resultado en la acumulación de Cd en tallo para el sitio 1 es Trompillo con 451,3 ppm, mientras que la Retama es la especie con menor valor en la concentración de Cd en el tallo con 427,3 ppm (Cuadro 23).

Cuadro 23. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en tallo de especies vegetales colectadas el sitio 1.

Concentración cadmio (ppm) en tallo					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1					
Retama (<i>Tecoma stand</i>)	3	427,33 ^a	36,01	392,00	464,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	6	439,33 ^a	36,43	386,00	498,00
Trompillo (<i>Solanum eleagnifolium</i>)	3	451,33 ^a	94,49	368,00	554,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Cadmio en tallo por especie en el sitio 2

La concentración media de Cd en tallo según los análisis estadísticos realizados, muestran diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Para el caso de especies muestreadas en el sitio 2 el Granjeno es la planta con menor resultado siendo un valor promedio de 198,6 ppm, mientras que el Hojasen presentó un valor de 692,6 ppm siendo el valor promedio máximo para este sitio en la acumulación de Cd (Cuadro 24).

Cuadro 24. Concentración media, mínima y máxima de Cd (ppm) en tallo de especies vegetales colectadas en el sitio 2.

Concentración cadmio (ppm) en tallo					
Especie	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 2					
Hojasen (<i>Flourenzia cemua</i>)	3	692,66 ^e	49,65	652,00	748,00
Tronadora (<i>Crotalaria pumila</i> Ort.)	3	335,33 ^b	48,67	292,00	388,00
Quelite (<i>Amaranthus hybridus</i>)	3	369,33 ^d	49,16	338,00	426,00
Granjeno (<i>Coldenia greggi</i>)	3	198,66 ^a	65,03	128,00	256,00
Pasto borreguero (<i>Erioneuron</i> sp.)	3	478,66 ^c	123,22	384,00	618,00
Pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>)	3	416,66 ^{bc}	18,47	406,00	438,00
Chamizo (<i>Atriplex canescens</i>)	3	388,66 ^b	42,91	360,00	438,00
Pasto cola de zorra (<i>Papophorum</i> sp.)	3	549,33 ^d	29,68	524,00	582,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	3	456,66 ^c	28,72	424,00	478,00
Rodadora (<i>Salsola kali</i>)	3	606,00 ^d	23,06	588,00	632,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Plomo en tallo por especie en el sitio 1

Las concentraciones de plomo promedio para el tallo en las especies muestreadas en el sitio 1 muestran diferencia ($p \leq 0.05$). En el caso de las planta con mayor y menor grado de acumulación de plomo en tallo se

encuentra la Retama y el Mezquite con 2 646,6 y 1 000,3 ppm para el sitio 1 (Cuadro 25).

Cuadro 25. Concentración de Pb (ppm) en tallo para las especies encontradas en el sitio 1.

Concentración plomo (ppm) en tallo					
Especies	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 1					
Retama (<i>Tecoma stand</i>)	3	2 646,66 ^c	70,43	2 606,00	2 728,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	6	1 000,33 ^a	259,38	624,00	1 270,00
Trompillo (<i>Solanum eleagnifolium</i>)	3	1 534,00 ^b	51,06	1 478,00	1 578,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Concentración de Plomo en tallo por especie en el sitio 2

Las concentraciones de Plomo en tallo para las especies colectadas del sitio 2 muestran una diferencia significativa de ($p \leq 0.05$). El Pasto borreguero presenta una menor concentración de acumulación de Pb con 944 ppm; mientras que el Hojasen es la planta con mayor captación de plomo en tallo con 12 050,6 ppm (Cuadro 26).

Cuadro 26. Concentración de Pb (ppm) en tallo para las especies encontradas en el sitio 2.

Concentración plomo (ppm) en tallo					
Especies	N	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Sitio 2					
Hojasen (<i>Flourenzia cemua</i>)	3	12 050,66 ⁱ	75,08	11 964,00	12 096,00
Tronadora (<i>Crotalaria pumila</i> Ort.)	3	2 800,00 ^d	30,26	2 776,00	2 834,00
Quelite (<i>Amaranthus hybridus</i>)	3	6 061,33 ^e	50,21	6 014,00	6 114,00
Granjeno (<i>Coldenia greggi</i>)	3	1 074,00 ^a	76,60	1 008,00	1 158,00
Pasto borreguero (<i>Erioneuron</i> sp.)	3	944,00 ^a	66,57	896,00	1 020,00
Pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>)	3	1 314,00 ^d	73,72	1 260,00	1 398,00
Chamizo (<i>Atriplex canescens</i>)	3	1 796,66 ^c	41,10	1 770,00	1 844,00
Pasto cola de zorra (<i>Papophorum</i> sp.)	3	1 317,33 ^d	84,00	1 234,00	1 402,00
Mezquite (<i>Prosopis</i> sp)	3	1 764,66 ^c	77,46	1 716,00	1 854,00
Rodadora (<i>Salsola kali</i>)	3	2 741,33 ^d	119,87	2 614,00	2 852,00

Prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales

Correlaciones entre las concentraciones de Cadmio y Plomo

Correlaciones de las concentraciones de Cadmio y Plomo para el Sitio 1

El análisis de correlación permite identificar correlaciones significativas y altamente significativas ($p \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente). El contenido de Cd del estrato 3 está altamente correlacionado con el contenido de Cd en los estratos 2 y 3, y el contenido de Pb en el estrato 1; así mismo está relacionado significativamente con el contenido de Pb del estrato 2. El caso del contenido de Cd del estrato 2 está altamente correlacionado con el contenido de Cd del estrato 3 y con el contenido de Pb del estrato 1 y 2, así como se relaciona significativamente con el contenido de Pb de estrato 3. Mientras que el contenido de Cd del estrato 3 está altamente correlacionado con el contenido de Pb del estrato 1. El contenido de Pb en el estrato 1 está altamente correlacionado con el contenido de Pb en el estrato 2, así como el contenido de Cd en hoja.

En este mismo sentido el contenido de Pb en el estrato 2 está altamente correlacionado con el contenido de Pb del estrato 3 y se relaciona significativamente con el contenido de Cd de la hoja, el contenido de Pb en tallo y planta. El contenido de Pb en el estrato 3 tiene una alta correlación con el contenido de Pb en el tallo. Mientras que el contenido de Cd en la hoja esta correlacionado significativamente con el contenido de Pb en tallo. Finalmente, el contenido de Pb en hoja está altamente correlacionado negativamente con el contenido de Cd en la raíz y tiene una correlación significativa con el contenido de Pb en la raíz (Cuadro 27).

Cuadro 27. Correlaciones entre concentraciones de Pb (ppm) y Cd (ppm) en planta para el sitio 1.

Correlaciones Sitio 1															
		P1C	P2C	P3C	P1P	P2P	P3P	HC	HP	TC	TP	RC	RP	PC	PP
P1C	Corr. de Pearson	1	,860**	,690**	,820**	,351*	,307	-,501	,099	,239	-,372	,089	,469	-,225	,118
	Sig. (bilateral)		,000	,000	,000	,036	,069	,097	,759	,454	,234	,782	,124	,187	,495
P2C	Corr. de Pearson	,860**	1	,769**	,673**	,435**	,403*	-,524	,070	-,201	-,439	-,039	,475	-,163	,254
	Sig. (bilateral)	,000		,000	,000	,008	,015	,080	,829	,532	,154	,905	,118	,344	,135
P3C	Corr. de Pearson	,690**	,769**	1	,506**	,092	,105	-,483	,094	-,229	-,401	-,033	,505	-,238	,051
	Sig. (bilateral)	,000	,000		,002	,594	,541	,112	,772	,475	,196	,919	,094	,163	,766
P1P	Corr. de Pearson	,820**	,673**	,506**	1	,495**	,217	-,125	,597*	-,185	,080	-,421	,563	-,074	,133
	Sig. (bilateral)	,000	,000	,002		,002	,205	,698	,040	,566	,805	,173	,056	,669	,438
P2P	Corr. de Pearson	,351*	,435**	,092	,495**	1	,510**	,696*	,140	-,399	,698*	-,166	-,234	-,019	,364*
	Sig. (bilateral)	,036	,008	,594	,002		,001	,012	,665	,199	,012	,607	,464	,911	,029
P3P	Corr. de Pearson	,307	,403*	,105	,217	,510**	1	,649*	,291	,287	,733**	,020	-,028	-,191	,271
	Sig. (bilateral)	,069	,015	,541	,205	,001		,022	,359	,365	,007	,952	,931	,265	,110
HC	Corr. de Pearson	-,501	-,524	-,483	-,125	,696*	,649*	1	-,063	-,101	,926**	,161	-,517	-,045	,117
	Sig. (bilateral)	,097	,080	,112	,698	,012	,022		,847	,754	,000	,617	,085	,889	,716
HP	Corr. de Pearson	,099	,070	,094	,597*	,140	,291	-,063	1	,126	,187	-,840**	,665*	-,010	-,018
	Sig. (bilateral)	,759	,829	,772	,040	,665	,359	,847		,697	,560	,001	,018	,975	,955
TC	Corr. de Pearson	,239	-,201	-,229	-,185	-,399	,287	-,101	,126	1	-,047	-,038	,009	,135	-,373
	Sig. (bilateral)	,454	,532	,475	,566	,199	,365	,754	,697		,885	,906	,978	,675	,233
TP	Corr. de Pearson	-,372	-,439	-,401	,080	,698*	,733**	,926**	,187	-,047	1	-,121	-,417	-,146	-,035
	Sig. (bilateral)	,234	,154	,196	,805	,012	,007	,000	,560	,885		,708	,177	,650	,915
RC	Corr. de Pearson	,089	-,039	-,033	-,421	-,166	,020	,161	-,840**	-,038	-,121	1	-,343	-,049	,071
	Sig. (bilateral)	,782	,905	,919	,173	,607	,952	,617	,001	,906	,708		,275	,880	,825
RP	Corr. de Pearson	,469	,475	,505	,563	-,234	-,028	-,517	,665*	,009	-,417	-,343	1	-,076	,088
	Sig. (bilateral)	,124	,118	,094	,056	,464	,931	,085	,018	,978	,177	,275		,813	,786
PC	Corr. de Pearson	-,225	-,163	-,238	-,074	-,019	-,191	-,045	-,010	,135	-,146	-,049	-,076	1	,196
	Sig. (bilateral)	,187	,344	,163	,669	,911	,265	,889	,975	,675	,650	,880	,813		,252
PP	Corr. de Pearson	,118	,254	,051	,133	,364*	,271	,117	-,018	-,373	-,035	,071	,088	,196	1
	Sig. (bilateral)	,495	,135	,766	,438	,029	,110	,716	,955	,233	,915	,825	,786	,252	
**. La correlación es significativa al nivel 0,01. *. La correlación es significativa al nivel 0,05. P1C. Estrato 1 Cd. P2C. Estrato 2 Cd. P3C. Estrato 3 Cd. P1P. Estrato 1 Pb. P2P. Estrato 2 Pb. P3P. Estrato 3 Pb. HC. Hoja Cd. HP. Hoja Pb. TC. Tallo Cd. TP. Tallo Pb. RC. Raíz Cd. RP. Raíz Pb. PC. Planta Cd. PP. Planta Pb.															

Correlaciones de las concentraciones de Cadmio y Plomo para el Sitio 2

El análisis de correlación permite identificar correlaciones significativas y altamente significativas ($p \leq 0.05$ y 0.01 , respectivamente). El estrato 2 está altamente correlacionado con el contenido de plomo en hoja y tallo; así mismo, tiene una correlación significativa con el contenido de cadmio del estrato 3 y el contenido de cadmio de la hoja. Mientras que el contenido de cadmio del estrato 3 está altamente correlacionado con el contenido de cadmio de la hoja y se correlaciona significativamente con el contenido de plomo del estrato 2. En el caso del contenido de plomo del estrato 2 tiene una correlación significativa con el contenido de cadmio en la hoja.

El contenido de cadmio en hoja presenta una correlación significativa con el contenido de plomo en tallo y planta; así mismo, presenta una alta correlación con el contenido de plomo de la hoja. Mientras que el contenido de plomo en la hoja se correlaciona altamente con el contenido de cadmio y plomo del tallo. El contenido de cadmio del tallo se correlaciona altamente con el contenido de plomo en el tallo. La correlación entre el contenido de plomo en tallo y el contenido de plomo en planta está altamente correlacionada. Mientras que el contenido de plomo en la raíz está correlacionado con el contenido de cadmio y plomo en la planta. Y finalmente el contenido de cadmio se encuentra altamente correlacionado con el contenido de plomo de la planta (Cuadro 28)

Cuadro 28. Correlaciones entre concentraciones de Pb (ppm) y Cd (ppm) en planta para el sitio 2.

Correlaciones Sitio 2															
		P1C	P2C	P3C	P1P	P2P	P3P	HC	HP	TC	TP	RC	RP	PC	PP
P1C	Corr. de Pearson	1	,105	,095	,143	-,203	,044	,354	,037	,019	-,146	-,204	,051	,437	,315
	Sig. (bilateral)		,679	,706	,571	,418	,862	,149	,885	,939	,564	,417	,840	,070	,203
P2C	Corr. de Pearson	,105	1	,544 [*]	,049	-,453	,315	,520 [*]	,662 ^{**}	,466	,600 ^{**}	-,230	-,105	,390	,216
	Sig. (bilateral)	,679		,020	,847	,059	,203	,027	,003	,052	,009	,359	,678	,109	,390
P3C	Corr. de Pearson	,095	,544 [*]	1	,024	-,513 [*]	,099	,625 ^{**}	,332	,447	,438	-,224	,126	,405	,336
	Sig. (bilateral)	,706	,020		,924	,029	,696	,006	,179	,063	,069	,373	,619	,095	,172
P1P	Corr. de Pearson	,143	,049	,024	1	,154	,282	-,271	-,233	-,222	,114	-,145	,220	,048	,363
	Sig. (bilateral)	,571	,847	,924		,542	,256	,277	,352	,376	,653	,566	,381	,851	,139
P2P	Corr. de Pearson	-,203	-,453	-,513 [*]	,154	1	-,197	-,576 [*]	-,061	-,275	-,171	,455	-,119	-,350	-,053
	Sig. (bilateral)	,418	,059	,029	,542		,433	,012	,811	,270	,499	,058	,639	,155	,834
P3P	Corr. de Pearson	,044	,315	,099	,282	-,197	1	,242	,226	-,162	,173	-,349	-,100	-,157	-,205
	Sig. (bilateral)	,862	,203	,696	,256	,433		,333	,367	,522	,492	,156	,692	,535	,415
HC	Corr. de Pearson	,354	,520 [*]	,625 ^{**}	-,271	-,576 [*]	,242	1	,599 ^{**}	,045	,382 [*]	-,233	,125	,306	,395 [*]
	Sig. (bilateral)	,149	,027	,006	,277	,012	,333		,000	,813	,037	,224	,519	,088	,025
HP	Corr. de Pearson	,037	,662 ^{**}	,332	-,233	-,061	,226	,599 ^{**}	1	,541 ^{**}	,641 ^{**}	-,034	-,080	,136	,200
	Sig. (bilateral)	,885	,003	,179	,352	,811	,367	,000		,002	,000	,862	,679	,457	,272
TC	Correlación de Pearson	,019	,466	,447	-,222	-,275	-,162	,045	,541 ^{**}	1	,495 ^{**}	,205	-,036	,107	,142
	Sig. (bilateral)	,939	,052	,063	,376	,270	,522	,813	,002		,005	,286	,854	,573	,454
TP	Corr. de Pearson	-,146	,600 ^{**}	,438	,114	-,171	,173	,382 [*]	,641 ^{**}	,495 ^{**}	1	-,138	,361	,342	,467 ^{**}
	Sig. (bilateral)	,564	,009	,069	,653	,499	,492	,037	,000	,005		,474	,054	,065	,009
RC	Corr. de Pearson	-,204	-,230	-,224	-,145	,455	-,349	-,233	-,034	,205	-,138	1	,250	-,051	,047
	Sig. (bilateral)	,417	,359	,373	,566	,058	,156	,224	,862	,286	,474		,190	,794	,809
RP	Corr. de Pearson	,051	-,105	,126	,220	-,119	-,100	,125	-,080	-,036	,361	,250	1	,383 [*]	,382 [*]
	Sig. (bilateral)	,840	,678	,619	,381	,639	,692	,519	,679	,854	,054	,190		,041	,041
PC	Corr. de Pearson	,437	,390	,405	,048	-,350	-,157	,306	,136	,107	,342	-,051	,383 [*]	1	,479 ^{**}
	Sig. (bilateral)	,070	,109	,095	,851	,155	,535	,088	,457	,573	,065	,794	,041		,000
PP	Corr. de Pearson	,315	,216	,336	,363	-,053	-,205	,395 [*]	,200	,142	,467 ^{**}	,047	,382 [*]	,479 ^{**}	1
	Sig. (bilateral)	,203	,390	,172	,139	,834	,415	,025	,272	,454	,009	,809	,041	,000	

** La correlación es significativa al nivel 0,01. * La correlación es significativa al nivel 0,05. P1C. Estrato 1 Cd. P2C. Estrato 2 Cd. P3C. Estrato 3 Cd. P1P. Estrato 1 Pb. P2P. Estrato 2 Pb. P3P. Estrato 3 Pb. HC. Hoja Cd. HP. Hoja Pb. TC. Tallo Cd. TP. Tallo Pb. RC. Raíz Cd. RP. Raíz Pb. PC. Planta Cd. PP. Planta Pb.

DISCUSIÓN

Las plantas como remediadoras de suelos contaminados por metales pesados

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran elevadas concentraciones de Pb y Cd, los cuales son considerados como metales pesados. De acuerdo a Cunningham *et al.*, (1997), los metales pesados, junto con otros contaminantes inorgánicos son algunas de las formas más frecuentes de contaminantes ambientales y la remediación de suelos con este tipo de contaminación es una tarea difícil. La minería se considera como una de las principales fuentes de contaminación por metales pesados, como se observa en el presente estudio (Cunningham *et al.*, 1997; Blaylock y Huang, 2000).

Como parte de la investigación del presente estudio es la identificación de plantas nativas con potencial para remediar suelos contaminados por metales pesados provenientes de las aguas subterráneas descargadas por la mina La Platosa, se infiere que existen plantas para remediar dichos suelo. Los resultados permiten rechazar la hipótesis nula (H_0) planteada puesto que las concentraciones de cadmio y plomo, para los dos sitios, los tres estratos, las 12 especies de plantas muestreadas y las partes de la planta: raíz, hoja y tallo difieren en cuanto a las concentraciones medias de cadmio y plomo.

Concentración de cadmio y plomo en suelo

El suelo es alterado como resultado de la actividad minera. Una de las anomalías biogeoquímicas que se generan al momento de la extracción es el aumento de la cantidad de microelementos en el suelo convirtiéndolos a niveles de macroelementos los cuales afectan negativamente la biota y calidad de suelo; estos afectan el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo, inhibiendo la descomposición de la materia orgánica del suelo (Wong, 2003).

El suelo en el presente estudio mostró mayor concentración de cadmio y plomo en el sitio 1 con 83.3 ppm y 4 757 ppm, respectivamente; por lo tanto, la concentración de plomo se encuentra por encima de la NOM-147 SEMARNAT/SSAI-2004 que establece un máximo de 750 mg/kg de plomo en suelos con fines industriales. Mientras que el sitio dos tuvo una concentración promedio de cadmio y plomo de 51.3 y 3111.8 ppm, respectivamente. Estos resultados concuerdan con los observados por Puga et al., (2006), mediante un análisis de regresión para Pb y cadmio, mostrando un nivel altamente significativo ($P < 0.002$) con respecto a la distancia, y con tendencia negativa, de tal manera que disminuye la concentración a medida que se aleja de la fuente de contaminación. El hecho de que el sitio 1 presente mayor concentración en promedio de cadmio y plomo se atribuye a la cercanía de la mina, es decir a mayor distancia los metales pesados se van acumulando

sobre las paredes de los canales, pérdida por lixiviación y por precipitado junto con otros elementos (Figura 8). Así mismo, la concentración tan elevada de Pb y Cd en este sitio se debe también al mayor volumen de agua que es descargada en esta área, pues el mismo es prácticamente un estanque.

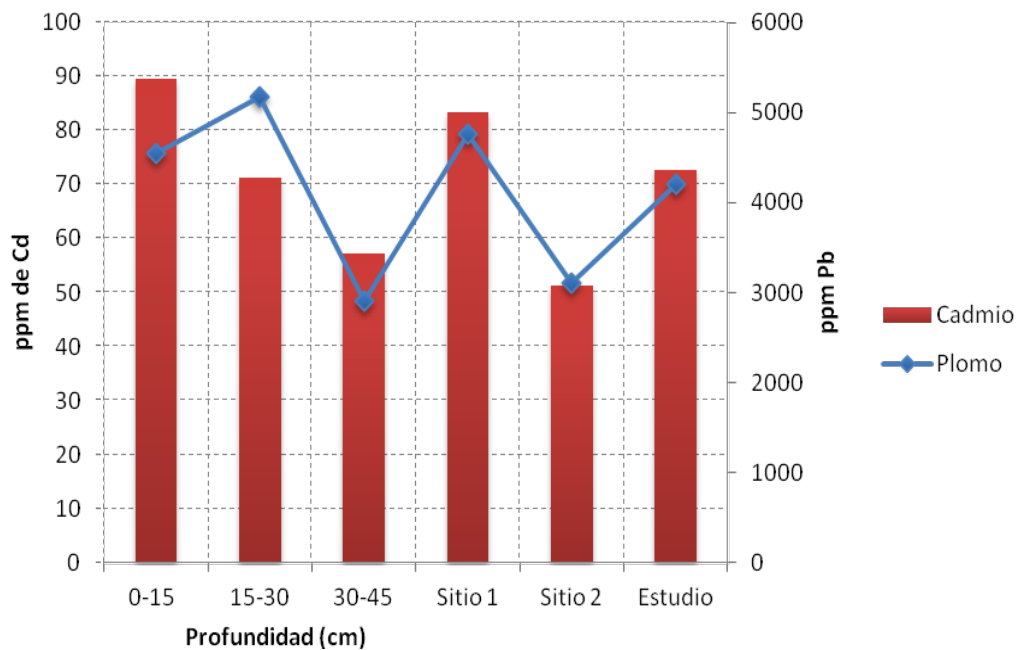


Figura 8. Concentración media de Pb y Cd a diferentes profundidades de suelo en dos sitios de Bermejillo, Durango con descargas de aguas subterráneas de minas.

Concentración de cadmio y plomo en los estratos de suelo

Para los valores encontrados en los tres estratos de suelo en el sitio 1, el cadmio se presenta en mayor concentración en el estrato uno y menor concentración en el estrato 3 con un valores de 103.5 y 66.2 ppm, respectivamente. Y de igual manera la concentración de cadmio en el sitio 2, fueron en el primer estrato la mayor y menor en el estrato 3 con valores

promedio de 61 y 39.5 ppm, respectivamente. Mientras que para las concentraciones de plomo en el sitio 1, el plomo se presenta en mayor concentración en el estrato 2 (5 586.6 ppm), y la menor concentración la tuvo el estrato 3 (3 630.5 ppm), concentraciones mayores a las establecidas por la norma. En el caso del sitio 2, la distribución del plomo en los estratos fue similar a la del sitio dos el estrato 2 con mayor concentración y el estrato 3 con la menor (4 338.8 y 1448 ppm, respectivamente) (Figura 9).

Estos resultados difieren de los encontrados por Puga *et al.* (2006), dado que sitios a 300 metros de distancia de la fuente de contaminación presentan mayor concentración de plomo en las partes más profundas; mientras que en muestras a 1 500 metros de distancia del punto de contaminación las concentraciones mayores se encuentran en la parte más superficial del suelo. Además los estratos muestreados en nuestro estudio difieren de los citados. Dado que los estratos muestreados por Puga *et al.* (2006), tienen rangos de 40 cm de profundidad; mientras que en este estudio los estratos se consideraron 15 cm. Los resultados de cadmio son similares a los encontrados por Puga *et al.* (2006), dado que muestras a 300 metros del punto de contaminación muestran mayor contenido de cadmio en el primer estrato y de igual manera en muestras a 1 500 metros, la concentración de cadmio se mantiene en el primer estrato.

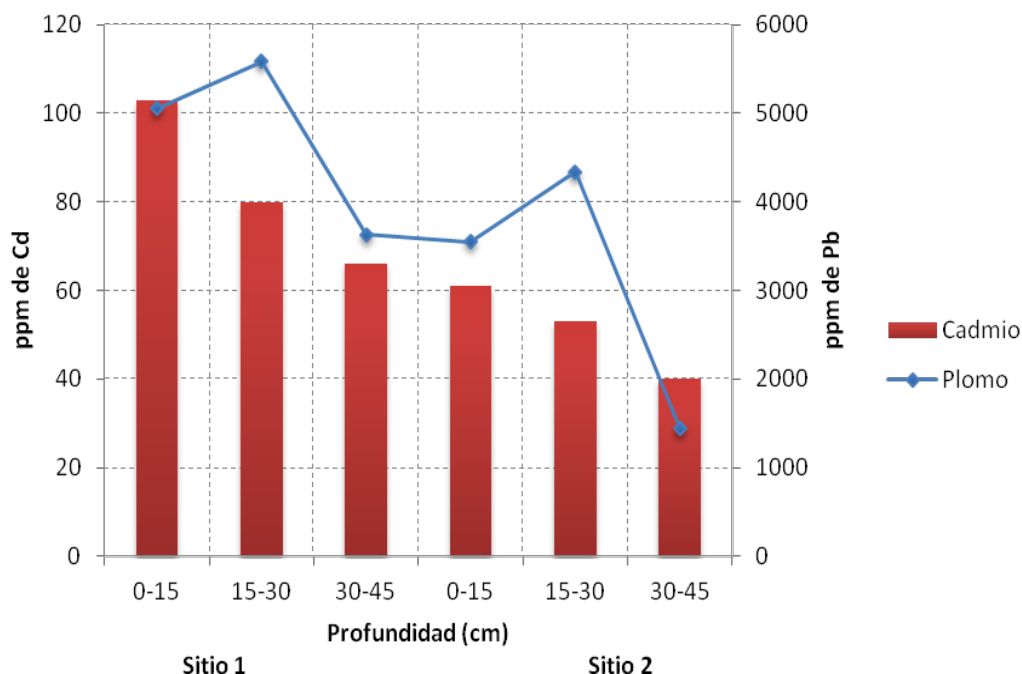


Figura 9. Concentraciones medias de Pb y Cd en tres estratos de suelo de dos sitios de Bermejillo, Durango con descargas de aguas subterráneas de minas.

Concentración de cadmio y plomo en la planta

En el mundo se han identificado aproximadamente 400 especies de plantas de 163 taxones de plantas pertenecientes a 45 familias que tienen capacidad para tolerar y crecer en condiciones de altas concentraciones de metales tóxicos (Sal y Kramer, 2000). Especies de gramíneas y Brassicaceae tienen una gran capacidad para acumular y tolerar metales pesados (Ebbs *et al.*, 1997 y Kumar *et al.*, 1995). Las plantas que se consideran hiperacumuladoras han sido definidas como aquellas plantas que contienen al menos $100 \mu\text{g g}^{-1}$ (0,01% con base en peso seco) de Cd, As o $>1000 \mu\text{g}$

g-1 (0.1% de materia seca) de Ni, Cr, Co, Cu y Pb y >10 000 µg g-1 (1% de materia seca) de Mn y Zn (Baker y Brooks, 1989).

En el presente estudio, los rangos de acumulación de cadmio estuvieron entre 701.1 ppm y 398.4 ppm, Conforme al criterio de Baker y Books (1989), pueden ser consideradas plantas hiperacumuladoras. Además las concentraciones mínimas y máximas de plomo en las plantas muestreadas fueron de 1 414.8 y 11 640 ppm, respectivamente, concentraciones que se establecen para plantas hiperacumuladoras. La especie *Flourenzia cemua* fue la de mayor bioacumulacion de plomo; mientras que la especie con menor concentración de plomo en sus tejidos fue la *Papophorum sp.* La cual pertenece a la gramíneas; mientras que la especie con mejor contenido de cadmio en su tejido fue *Tecoma stan*; mientras que la especie *Coldenia greggi*, fue la que presentó la menor bioacumulación de cadmio en sus tejidos.

Las plantas para acumular cantidades extraordinarias de metales pesados en su interior dependen de las características de la planta. Las dos características más importantes son 1) la capacidad de acumular grandes cantidades de biomasa con rapidez y 2) la capacidad de acumular grandes cantidades de metales de importancia ambiental en el tejido foliar (Blaylock *et al.*, 1997; McGrath, 1998). Otras características que deben poseer esas plantas son la capacidad de tolerar condiciones difíciles de suelo (pH del

suelo, salinidad, estructura del suelo, contenido de agua), la producción de un denso sistema de raíces, y capacidad para el establecimiento. A pesar de que algunas plantas muestran promesa para la fitoextracción, no hay ninguna planta que posea todas estas características deseables (Prasad y Freitas, 2003) (Figura 10).

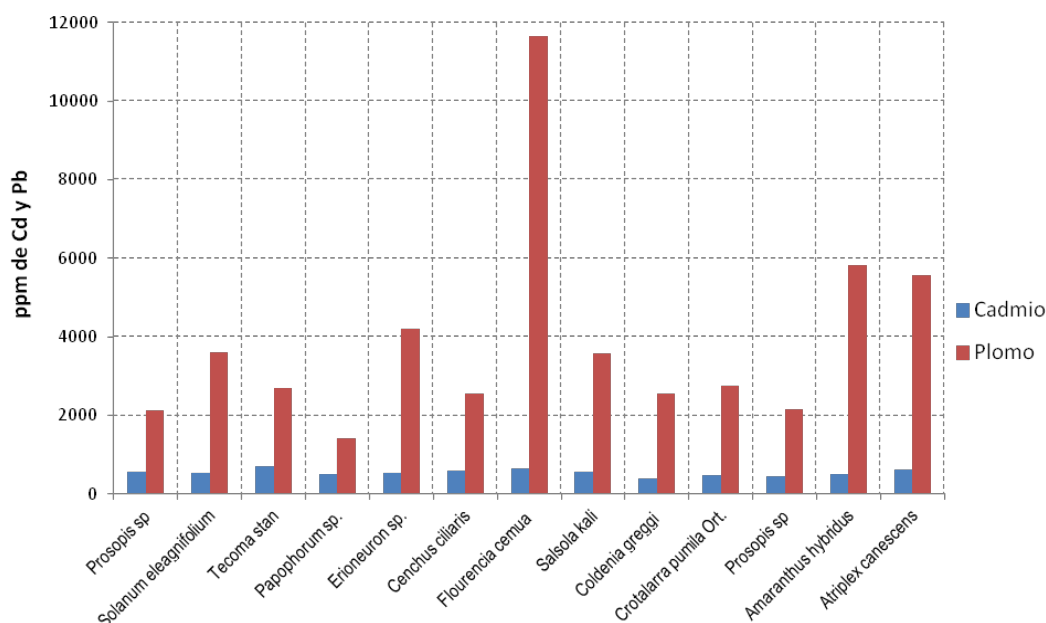


Figura 10. Concentraciones medias de Pb y Cd en las plantas colectadas en suelos de Bermejillo, Durango con descargas de aguas subterráneas de minas.

Contenidos de cadmio y plomo en la Raíz, Hoja y Tallo

Las mayores concentraciones promedio tanto de cadmio y plomo se presentaron en las raíces de la plantas muestreadas con 591,7 ppm y 6261,3 ppm, respectivamente. Mientras que en la hoja se observó mayor contenido de cadmio que en el tallo (539,17 vs 449 ppm). Las

concentraciones de plomo promedio en tallo fueron superiores a las registradas en hojas (3 186,4 vs 2 860 ppm); sin embargo estas medias no difieren estadísticamente (Figura 11).

En general, la aparente concentración de metales en las partes aéreas de la planta disminuye a medida que se alejan de la raíz. Esto ocurre debido a una mayor localización de metales en las paredes celulares de la raíz que en otras partes de la planta. Además, la unión de metales se da más en las partes lignificadas que en aquellos tejidos no lignificados (Sharma y Dubey, 2005). Esto sugiere que el grado de localización de metales en diferentes tejidos de la planta depende también entre las especies de plantas.

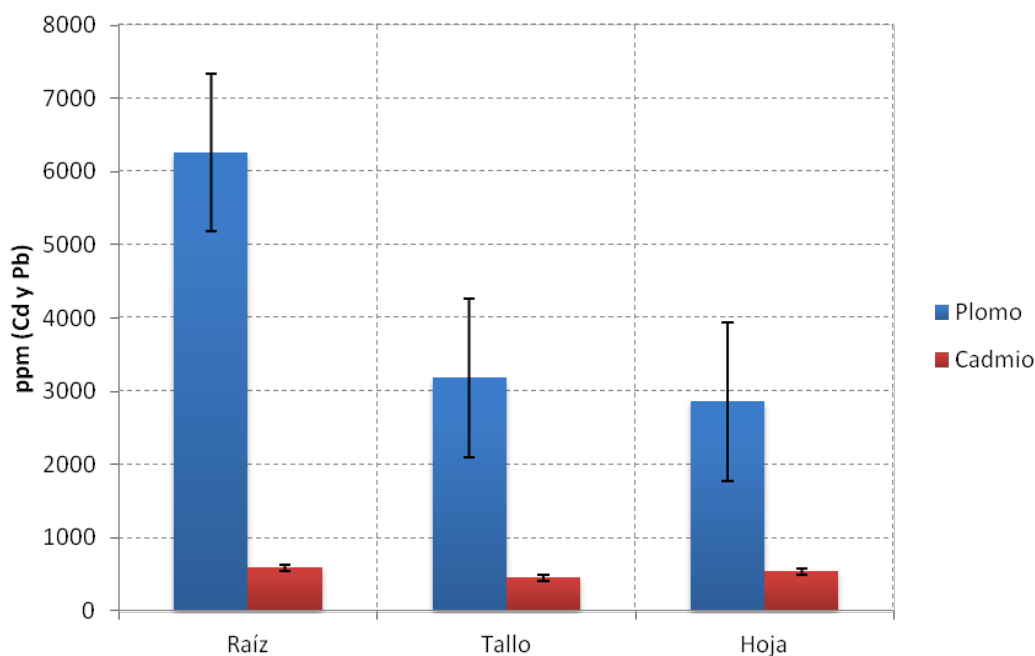


Figura 11. Concentraciones de Pb y Cd en raíz, tallo y hoja para las plantas muestreadas.

Por su parte, Antosiewicz (1992) establece que el contenido de metales en diversos órganos de la planta tiende a disminuir en el siguiente orden: raíces > hojas > tallo > inflorescencia > semillas. Sin embargo, este orden puede variar según las especies de plantas. En plantas de *Allium cepa*, se ha observado que la mayor concentración de Pb absorbido se localiza en las puntas de las raíces seguido de las partes proximales de la raíz, mientras que la menor concentración se encuentra en la base de la raíz (Michalak y Wierzbicka, 1998). Las hojas difieren en su capacidad para acumular Pb dependiendo de la edad. El contenido máximo de plomo se encuentra durante la senescencia y en menor grado en hojas jóvenes (Godzik, 1993). En la especie *Quercus ilex* la tendencia de la adsorción de la fitomasa es en el orden raíz > hoja > tallo (Prasad y Freitas, 2000). En plantas de *Oryza sativa* L. cultivadas en un medio nutritivo que contenía 500 mM y 1.000 mM de Pb (NO₃)₂, la cantidad de Pb absorbido en raíz fue de 1,7 a 3,3 veces mayor que en los brotes.

Estos resultados pueden explicarse por el hecho de que los metales se mueven principalmente en el apoplasto radicular y, por lo tanto, en forma radial a través de la corteza y se acumula cerca de la endodermis. La endodermis actúa como una barrera parcial al movimiento de metales entre las raíces y retoños (Jones *et al.*, 1973; Verma y Dubey, 2003).

Interacción entre el contenido cadmio y plomo en suelo y planta

Las mayores asociaciones se presentan entre las concentraciones de estratos y estos con las concentraciones de cadmio y plomo en hoja principalmente, estas asociaciones se dan de manera positiva, aunque con valores bajos pero $\alpha \leq P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$. Estas asociaciones entre contenidos de cadmio y plomo en los estratos con los contenidos de plomo y cadmio en la hoja y tallo pueden deberse a la disponibilidad para que sean absorbidos por la raíz, principalmente a profundidades de 15 a 30 cm, donde las raíces de las plantas muestreadas se desarrollan con mejor facilidad y donde extienden su sistema radicular. Estas asociaciones pueden ser una fuente de alteración en la acumulación de cadmio y plomo por las plantas muestreadas en el presente estudio.

CONCLUSIONES

o Como resultado de la deposición de agua subterránea extraída de la mina “La Platosa”, la concentración de cadmio y plomo en suelo y plantas es significativamente elevada (72.7 y 4 209 ppm, respectivamente).

o Las mayores concentraciones de cadmio y plomo se presentaron en el sitio con menor distancia del punto de desagüe, con concentraciones de 83.4 y 4 757.6 ppm, respectivamente. En particular la concentración de plomo supera el límite máximo permisible de contaminación propuesto por la NOM-147 SEMARNAT/SSAI-2004, en la que se establece 750 mg Pb/kg de suelo para uso industrial.

o El 100% de las plantas son hiperacumuladoras tanto de cadmio como de plomo; de hecho superando de 3 a 6 veces el valor establecido para cadmio ($100 \mu\text{g g}^{-1}$ de materia seca) y de 0.4 a 10.6 veces mas del valor establecido para plomo ($1\,000 \mu\text{g g}^{-1}$ de materia seca).

o La parte de la planta que presentó mayores concentraciones de acumulación de cadmio y plomo fue la raíz con 591.7 y 6 261 ppm, respectivamente. Este tejido vegetal se considera como el de mayor importancia para las plantas muestreadas por la excelente acumulación de cadmio y plomo en el presente trabajo.

o Posiblemente existe una fuerte conexión entre las concentraciones de cadmio y plomo en los estratos de suelo con las concentraciones de cadmio y plomo en las hojas y tallos de las plantas.

o Finalmente, el presente estudio muestra un panorama real sobre la concentración de cadmio y plomo en suelos expuestos continuamente a aguas extraídas de túneles de mina, así como una idea clara sobre las cantidades biocumuladas por plantas nativas de las zonas áridas.

LITERATURA CITADA

- Abollino O., Aceto M., Malandrino M., Mentaste E., Sarzanini C. and Barberis R. 2002. Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. *Environmental Pollution*, 119: 177.
- Ali G., Srivastava P.S., Iqbal M. 2000. Influence of cadmium and zinc on growth and photosynthesis of *Bacopa monniera* cultivated in vitro. *Biologia Plantarum* 43:599-601.
- Almazan S., 2006. La Industria Minera de México. Cámara Minera de México.
- Antosiewicz DM. 1992. Adaptation of plants to an environment polluted with heavy metals. *Acta Soc. Bot. Polon.* 61:281-299.
- Astolfi S., Zuchi S., Passera C. 2005. Effect of cadmium on H(+)ATPase activity of plasma membrane vesicles isolated from roots of different S-supplied maize (*Zea mays* L.) plants. *Plant Science* 169:361-368.
- Baird C. 1999. Environmental Chemistry. 2nd Ed. W.H. Freeman & Company.
- Baker A.J.M. y Brooks R.R. 1989. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1, 81–126.
- Baker A.J.M. 1981. Accumulators and excluders – strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* 3, 643–654.
- Balestrasse K.B., Gallego S.M., Tomaro M.L. 2004. Cadmium-induced senescence in nodules of soybean (*Glycine max* L.)plants. *Plant Soil* 262:373-381.
- Becerril J.M., Barrutia O., García Plazaola J.I., Hernández A., Olano J.M., Garbisu C. 2007. Especies Nativas de Suelos Contaminados por Metales: Aspectos Ecofisiológicos y su uso en Fitorremediación. *Ecosistemas* 16 (2): 50-55.
- Behre Dolbear Group. 2010. Mineral Industry Advisors. Disponible en: <http://www.dolbear.com/> (Visita: 09 Noviembre 2011).
- Benavides M.P., Gallego S.M., Tomaro M. 2005. Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 17:21-34.
- Blanes S. y Giménez C. 2005. Cuantificación y Correlación de Arsénico y Metales Pesados en Aguas Naturales de la Región Centro-Oeste de la

provincia del Chaco - Argentina. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Resumen: E-047.

- Blaylock MJ, Salt DE, Dushenkov S, Zakarova O, Gussman C, Kapulnik Y, Ensley BD, Raskin I. 1997. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. *Environ. Ciencia. La tecnología*. 31:860-865.
- Blaylock, M.J. y Huang, J.W. 2000. Phytoextraction of metals. In: I. Raskin and BD Ensley eds. *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean-up the environment*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2000, p. 53-70.
- Bradshaw A. D. 1993. Understanding the fundamental succession. En J. Miles and D. H. Walton, Editors, *Primary Succession on Land*, Blackwell, Oxford.
- Breckle SW. 1991. Growth under stress. Los metales pesados. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (eds), *Plant Roots: The Hidden Half*, pp. 351-373. Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- Brooks R.R. 1998. General Introduction. In: RR Brooks ed. *Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining*. New York, CAB International, p. 1.14.
- Burton KW, Morgan E, Roig A. 1984. The influence of heavy metals on the growth of sitka-spruce in South Wales forests. II green house experiments. *Plant Soil* 78:271-282.
- Calvo Revuelta C., Álvarez-Benedí J., Andrade Benítez M., Marinero Diez P.; Bolado Rodríguez S. 2003. Contaminación por Arsénico en Aguas Subterráneas en la provincia de Valladolid: Variaciones Estacionales. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI*.
- Chan D.Y. y Hale B.A. 2004. Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany* 55:2571-2579.
- Clemens S. 2006. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88:1707-1719.
- Clemens S., Antosiewicz D.M., Ward J.M., Schachtman D.P., Schroeder, J.I. 1998. The plant cDNA LCT1 mediates the uptake of calcium and cadmium in yeast. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 95:12043-12048.

- Clemens S., Palmgren M.G., Krämer U. 2002. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. *Trends in Plant Science* 7:309-315.
- Colombo L.D., Mangione S.B. & Figlioglia A. 1998. Soil profile distribution of heavy metals in soil attended with sewage sludge for eight years. *Agr. Med. Inter. J. of Agric. Sci.* 128: 273-283.
- Comision Nacional Forestal (CONAFOR). 2011. Tipos de Vegetacion Forestal y de Suelos. Sistema Nacional de Informacion Forestal. Disponible en: http://148.223.105.188:2222/gif/snif_portal/index.php?option=com_content&task=view&id=12&Itemid=7 (Visita: 09 Noviembre 2011).
- Cunningham, S.D., Shann, J.R., Crowley, D.E. y Anderson, T.A. 1997. Phytoremediation of contaminated water and soil. In: Kruger, E.L., Anderson, T.A. y Coats, J.R. eds. *Phytoremediation of soil and water contaminants*. ACS symposium series 664. Washington, DC, American Chemical Society, 1997, p. 2-19.
- Davies B.E. 1995. Lead and other heavy metals in urban areas and consequences for the health of their habitants in: Majumdar SK, Miller EW, Brenner FJ (eds), *Environmental Contaminants, Ecosystem and Human Health*. The Pennsylvania Academy of Science, Easton PA, USA.
- Del Río L.A., Corpas F.J., Barroso J.B. 2004. Nitric oxide and nitric oxide synthase activity in plants. *Phytochemistry* 65:783-792.
- Domínguez-Solís J.R., López-Martin M.C., Ager F.J., Ynsa M.D., Romero L.C., Gotor C. 2004. Increased cysteine availability is essential for cadmium tolerance and accumulation in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Biotechnology Journal* 2:469- 476.
- Ernst WHO (1998) Effects of heavy metals in plants at the cellular and organismic levels. In: Schuurmann G (ed), *Ecotoxicology: Ecological Fundamentals, Chemical Exposure and Biological Effects*, pp. 587-620. Heidelberg, Wiley.
- Ewers U. y Schlipköter H-W. 1991. Lead. In: Merian, E. (Ed.) *Metals and their compounds in the environment*. VCH, Weinheim.
- Eun SO, Youn HS, Lee Y (2000) Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*. *Physiol. De la planta*. 110:357-365.

- García E. 1988. Sistema de clasificación de Köppen Modificado para las Condiciones de México. Universidad Autónoma Nacional de México. D.F., México.
- García I. y Dorronsoro C. 2002. Contaminación por metales pesados. Departamento de edafología y química agrícola de España.
- Garnier L., Simon-Plas F., Thuleau P., Agnel JP., Blein, JP., Ranjeva R., Montillet JL. 2006. Cadmium affects tobacco cells by a series of three waves of reactive oxygen species that contribute to cytotoxicity. *Plant Cell and Environment* 29:1956-1969.
- Godzik B. 1993. Heavy metal contents in plants from zinc dumps and reference area. *Pol. Bot. Stud.* 5:113-132.
- Goldbol D.L. y Hutterman A. 1985. Effect of zinc, cadmium and mercury on root elongation on *Picea abies* (Karst.) seedlings and the significance of these metals to forest die-back. *Environmental Pollution* 38:375-381.
- Gouia H., Ghorbal M.H., Meyer C. 2000. Effects of cadmium on activity of nitrate reductase and on other enzymes of nitrate assimilation pathway in bean. *Plant Physiology and Biochemistry* 38:629-638.
- Guerinot M.L. 2000. The ZIP family of metal transporters. *Biochimica et Biophysica Acta* 1465:190-198.
- Gulson B.L., Mizon K.J., Korsch M.J. & Howarth D. 1996. Non-orebody sources are significant contributors to blood lead of some children with low to moderate lead exposure in a mayor mining community. *The science of the total environment.* 181: 223-230.
- Hamer D. 1986. Metallothionein. *Annual Review of Biochemistry* 55:913-951.
- Huang JW y Cunningham SD. 1996. Lead Phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *Nueva Phytol.* 134:75-84.
- Instituto Nacional de Ecología, 2008. Industria minera. Disponible en: http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/16/parte3_12.html (Visita: 25 Abril 2010)
- Jana S y Choudhari MA. 1982. Senescence in submerged aquatic angiosperms: effects of heavy metals. *Nueva Phytol.* 90:477- 484.
- Jarvis MD y Leung DWM. 2002. Chelated lead transport in *Pinus radiata* : an ultrastructural study. *Environ. Exp. Bot.* 48:21-32.

- Johnson F.M. 1998. The genetic effects of environmental lead. *Mutation Research* 410, 123-140.
- Jones LHP, Clement CR, Hopper MJ. 1973. Lead uptake from solution by perennial ryegrass and its transport from roots to shoots. *Plant Soil* 38:403-414.
- Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, V., Motto, H. y Raskin, I. 1995. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science and Technology* , 1995, vol. 29, no. 5, p. 1232-1238.
- Lane SD y Martin ES. 1977. A histochemical investigation of lead uptake in *Raphanus sativus* . *Nueva Phytol.* 79:281-286.
- Lee K.C., Cunningham BA, Poulsen GM, Liang JM, Moore RB. 1976. Effects of cadmium on respiration rate and activities of several enzymes in soybean seedlings. *Physiol. De la planta.* 36:4-6.
- Lee SZ, Chang L, Yang HH, Chen CM, Liu MC. 1998. Absorption characteristics of lead onto soils. *J. Haz. Mat.* 63:37-49.
- Lerma Reyes Marjorie. 2006. Tesis: Evaluación de suelos y especies vegetales con potencial de acumulación de metales pesados. Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Zootecnia. Secretaría de Investigación y Posgrado. Chihuahua, Chih. México.
- Levina E.N. 1972. *Obshchaya tosikologiya metallov* (General metal toxicology). Leningrad, Meditsyna.
- López Ascarza, F. 2000. Impacto Ambiental de la Minería en el Desarrollo Rural de las Comunidades afectadas en el Perú. Disponible en: <http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/ar/libros/rjave/mesa5/flopez.pdf> (Visita: 25 Abril 2010)
- Lozano-Rodríguez E, Hernández L.E., Bonay P., Cárpena-Ruiz R.O. 1997. Distribution of Cd in shoot, and root tissues of maize and pea plants: physiological distribution. *Journal of Experimental Botany* 48:123-128.
- Lucho C.A., Álvarez M., Beltrán R.I., Prieto F. and Poggi H. 2005. A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. *Environmental International*.
- Maksymiec W., Wojcik M., Krupa Z. 2007. Variation in oxidative stress and photochemical activity in *Arabidopsis thaliana* leaves subjected to

cadmium and excess copper in the presence or absence of jasmonate and ascorbate. *Chemosphere* 66:421-427.

Martínez R. 1991. Remojo de semillas de nogal (*Carya illinoensis* Koch) cv. Reverside en la propagación de patrones. Resumen del XI Congreso de Fitogenética. P. 98.

McGrath, S.P. 1998. Phytoextraction for soil remediation. In: Brooks, RR, ed. Plants that hyperaccumulate heavy metals: their role in phytoremediation, microbiology, archaeology, mineral exploration and phytomining. New York, CAB International, 1998, p. 261-288.

Metals Economics Group (MEG). 2009. Disponible en: <http://www.metalseconomics.com/> (Visita: 09 Noviembre 2011).

Michalak, E. y Wierzbicka, M. 1998. Differences in lead tolerance between *Allium cepa* plants developing from seeds and bulbs. *Plant Soil* 199:251-260.

Mishra A y Choudhari M. 1998. Amelioration of lead and mercury effects on germination and rice seedling growth by antioxidants. *Biol. De la planta*. 41:469-473.

Monroy M., Diaz-Barriga F., Razo I. Carrizales L. 2002. Evaluación de la Concentración por Arsénico y Metales Pesados (Pb, Cu, Zn) Análisis de Riesgo en la Salud en Villa de La Paz Matehuala S.L.P. Instituto de Metalurgia. U.A.S.L.P.

Morel J, Mench M, Guckert A. 1986. A measurement of Pb, Cu, Cd binding with mucilage exudates from maize (*Zea mays* L.) roots. *Biol. Fertil. Soils* 2:29-34.

Nriagu J.O. 1978. The biogeochemistry of Pb in the environment. Elsevier, Amsterdam.

Obroucheva NV, Bystrova EI, Ivanov VB, Anupova OV, Seregin IV. 1998. Root growth responses to lead in young maize seedlings. *Plant Soil* 200:55-61.

Olmos E., Martinez-Solano J.R., Piqueras A., Hellin E. 2003. Early steps in the oxidative burst induced by cadmium in cultured tobacco cells (BY-2 line). *Journal of Experimental Botany* 54:291-301.

- Ortiz D.F., Ruscitti T., McCue K.F., Ow D.W. 1995. Transport of metal-binding peptides by HMT1, a fission yeast ABC-type vacuolar membrane protein. *Journal of Biological Chemistry* 270:4721-4728.
- Pacheco Gutiérrez L. A. y Duran Domínguez de Bazua M. del C. 2007. Uso del Agua en la Industria Minera: Parte 2 Estudio de Opciones para Reciclar el Agua de Proceso. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)* 22(1)15 pág.
- Pinto E., Sigaud-Kutner T.C.S., Leitão M., Okamoto O.K., Morse D., Colepicolo P. 2003. Heavy metal-induced oxidative stress in algae. *Journal of Phycology* 39:1008-1018.
- Pomponi N., Censi V., Di Girolamo U., De Paolis A., Di Toppi L.S., Aromolo R., Constantino P., Cardarelli M. 2006. Overexpression of Arabidopsis phytochelatase synthase in tobacco plants enhances Cd²⁺ tolerance and accumulation but not translocation to the shoot. *Planta* 223:180-190.
- Poschenrieder C., Günsé B., Barceló J. 1989. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance, and abscisic acid content in expanding bean leaves. *Plant Physiology* 90:1365-1371.
- Prasad M.N.V. y Freitas H.M. 2003. Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology* ISSN: 0717-3458; 6(3): 285-321.
- Prasad, M.N.V. y Freitas, H. 2000. Removal of toxic metals from the aqueous solution by the leaf, stem and root phytomass of *Quercus ilex* L. (Holly Oak). *Environmental Pollution*, 2000, vol. 110, no. 2, p. 277-283.
- Puga S., Sosa M., Lebgue T., Quintana C. y Campos A. 2006. Contaminación por Metales Pesados en Suelo provocada por la Industria Minera. *Ecología Aplicada*, 5(1,2).
- Rashid A, Camm EL, Ekramoddoullah KM.1994. Molecular mechanism of action of Pb and Zn ²⁺ on water oxidizing complex of photosystem II. *FEBS Lett.*350:296-298.
- Rebechini HM y Hanzely L.1974. Lead-induced ultrastructural changes in chloroplasts of the hydrophyte *Ceratophyllum demersum*. *Z. Pflanzenphysiol.*73:377-386.
- Rodríguez-Serrano M., Romero-Puertas M.C., Zabalza A., Corpas F.J., Gómez M., del Río L.A., Sandalio L.M. 2006. Cadmium effect on the oxidative metabolism of pea roots. Imaging of ROS and NO production in vivo. *Plant Cell and Environment* 29:1532-1544.

- Romero-Puertas M.C., Palma J.M., Gómez M., del Río L.A., Sandalio L.M. 2002. Cadmium causes the oxidative modification of proteins in pea plants. *Plant Cell and Environment* 25:677-686.
- Romero-Puertas M.C., Rodríguez-Serrano M., Corpas F.J., Gómez M., del Río L.A., Sandalio L.M. 2004. Cadmium-induced subcellular accumulation of $O_2^{\bullet-}$ and H_2O_2 in pea leaves. *Plant Cell and Environment* 27:1122-1134.
- Romero-Puertas M.C., Corpas F.J., Rodríguez-Serrano M., Gómez M., del Río L.A., Sandalio L.M. 2007. Differential expression and regulation of antioxidative enzymes by cadmium in pea plants. *Journal of Plant Physiology* 164:1346-1357.
- Ross S. M. 1994. *Toxic Metal in Soil-Plant Systems*. Wiley and Sons Ltd. Chichester. P. 469.
- Rudakova EV, Karakis KD, Sidorshina ET. 1988. The role of plant cell walls in the uptake and accumulation of metal ions. *Fiziol. Biochim. Kult. Rast.* 20:3-12.
- Salomon W. 1995. Environmental impact of metals derived from mining activities: processes, predictions, prevention. *J. Geochim. Explor.* 52: 5-23.
- Salt, D.E. y Kramer, U. 2000. Mechanisms of metal hyperaccumulation in plants. In: Raskin, I. and Ensley, B.D., eds. *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean-up the environment*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 2000, p. 231-246.
- Salt D.E. y Wagner G.J. 1993. Cadmium transport across tonoplast of vesicles from oat roots. Evidence for a Cd^{2+}/H^{+} antiport activity. *Journal of Biological Chemistry* 268:12297-12302.
- Sandalio L.M., Dalurzo H.C., Gomez M., Romero-Puertas, M.C., del Río, L.A. 2001. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botany* 52:2115-2126.
- Sanità di Toppi L. y Gabbrielli R. 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany* 41:105-130.
- Secretaría de Economía. 2010. Anuario Estadístico de la Minería Mexicana. Coordinación de Afiliación y Vigencia. Disponible en: http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/AnuarioEstadisticodelaMineriaMexicanaAmpliada2009.pdf (Visita 09 Agosto 2011)

- Seoáñez C. M. 1999a. Reacción del suelo ante los metales pesados. En Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión. 1ª. Edición. Ediciones Mundi-Prensa. México. P. 169-181.
- Seoáñez C. M. 1999b. El suelo como depurador. En Ingeniería del medio ambiente: Aplicada al medio natural continental. 2ª Edición. Ediciones Mundi-Prensa. México. P. 538-543.
- Seregin IV, Ivaniov VB. 1997. Histochemical investigation of cadmium and lead distribution in plants. *Fiziol. Rast.* 44:915-921.
- Seregin IV, Shpigun LK, Ivaniov VB. 2004. Distribution and toxic effects of cadmium and lead on maize roots. *Russ. J. Plant Physiol.* 51:525-533.
- Shah K. y Nongkynrih J.M. 2007. Metal hyperaccumulator and bioremediation. *Biologia Plantarum* 51:618-634.
- Sharma P. y Dubey R.S. 2005. Lead toxicity in plants. *Braz. J. Plant Physiol.* 17(1): 35-52. <http://dx.doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004>
- Singh P.K. y Tewari R.K. 2003. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants. *Journal of Environmental Biology* 24:107-112.
- Stefanov K, Seizova K, Popova I, Petkov VL, Kimenov G, Popov S. 1995. Effects of lead ions on the phospholipid composition in leaves of *Zea mays* and *Phaseolus vulgaris*. *J. Plant Physiol.* 147:243-246.
- Tercer Informe de Ejecución del Plan Nacional de Desarrollo. 2009. Plan Nacional de Desarrollo 2007- 2012. Disponible en: <http://pnd.calderon.presidencia.gob.mx/pdf/TercerInformeEjecucion/presentacion.pdf> (Visitado 02 Agosto 2011).
- Thomine S., Wang R., Ward J., Crawford N., Schroeder J. 2000. Cadmium and iron transport by members of a plant metal transporter family in *Arabidopsis* with homology to Nramp genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 97:4991-4996.
- Tomsig JL y Suszkiw JB. 1991. Permeation of Pb through calcium channels: fura-2 measurements of voltage- and dihydropyridine-sensitive Pb entry in isolated bovine chromaffin cells. *Biochim. Biophys. Acta* 1069:197-200.
- van Assche F y Clijsters H. 1990. Effects of metal on enzyme activity in plants. *Planta de Medio Ambiente de la célula.* 13:195-206.

- Van der Sloot H.A., Coomans R.N.J., Hjelmar O. 1996. Similarities in the leaching behaviour of trace contaminants from waste, stabilized waste, construction materials and soils. *Sci Tot Environ* 178, 111-126.
- Verma S y Dubey RS (2003) Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Sci.* 164:645-655.
- Watanabe M.E. 1997. Phytoremediation on the brink of commercialization. *Environ Sci Technol* 31, 182-186.
- Wierzbicka M. 1994. Resumption of mitotic activity in *Allium cepa* root tips during treatment with lead salts. *Environ. Exp. Bot.* 34:173-180.
- Wierzbicka M y Antosiewicz D. 1993. How lead can easily enter the food chain - a study of plant roots. *Ciencia. Total Environ. Supl.* 1:423-429.
- Wong MH. 2003. Ecological Restoration of Mine Degraded Soils, with Emphasis on Metal Contaminated Soils. *Chemosphere* 50: 775-780.
- Wua F., Zhang G., Dominy P. 2003. Four barley genotypes respond differently to cadmium: lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity. *Environmenatl and Experimental Botany* 50:63-78.