



---

---

## UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**ACUMULACIÓN DE As, Cd, Pb y Fe EN PLANTA DE  
MAÍZ (*Zea mays*) ORIGINADA POR SUELOS CONTAMINADOS  
POR JALES EN TAXCO, GUERRERO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRA EN GEOLOGIA AMBIENTAL

P R E S E N T A

MARÍA FLOR SOLEDAD NAVARRETE CISNEROS

DIRECTOR DE TESIS: DRA. MARIA AURORA ARMIENTA HERNÁNDEZ.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

# *DEDICATORIA*

## *A MIS PADRES*

*Angel e Isaura*

Quienes siguen estando presentes conmigo.

Y al saber me han permitido seguir adelante en las horas difíciles.

Que como un ejemplo de dedicación, lucha incansable, pero sobre todo  
de vida y de amor.

Por toda una vida que me mostraron el camino a seguir y que continúa.

## *A MIS HERMANOS Y SOBRINOS*

*A todos ustedes por el apoyo y el compartir los momentos alegres y difíciles  
que han pasado en nuestras vidas.*

*Gracias*

## AGRADECIMIENTOS:

A mi Alma Mater

*Universidad Nacional Autónoma de México*

*“Por mi raza hablará el espíritu”*

“La raza quinta, la raza cósmica, la raza definitiva, la raza integral en la cual se fundirán las dispersas y se consumará la unidad ”

De manera muy especial al *Laboratorio de Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS)* y al *Labaratorio de Química Analítica* del Instituto de Geofísica.

A mi directora de tesis y al Jurado Examinador:

Dra. Ma. Aurora Armienta Hernández

Dra. Silke Cram Heydrich,

Dra. Ofelia Morton Bermea,

Dr. Armando Báez Pedrajo,

Dr. Oscar Talavera Mendoza.

Por la paciencia que conmigo han tenido y por las horas de trabajo que esta tesis a requerido para llegar a su término. A todos ustedes por su apoyo, dirección, comentarios y sugerencias.

A todos mis amigos:

Agradecerles su apoyo moral e incondicional, que siempre me han mostrado.

De su apreciable tiempo de escuchar y de discernir la encrucijada que es la vida diaria.

Por los amigos de aquí, de fuera y de lejos.

*Gracias*

# ÍNDICE

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
General	
Particular	
<b>3 HIPÓTESIS</b> .....	<b>4</b>
<b>4 FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
<b>4.1 METALES</b> .....	<b>5</b>
<b>4.1.1</b> Metales y metaloides en el suelo y su transferencia hacia las plantas .....	5
<b>4.1.2</b> Fuentes de metales y metaloides en suelo .....	7
<b>4.1.3</b> Suelo .....	9
<b>4.1.4</b> Funciones del suelo .....	9
<b>4.1.5</b> Relación del sistema suelo-planta con los metales pesados .....	10
<b>4.1.6</b> Distribución, características químicas, concentraciones y .....	11
minerales en suelo del As, Cd, Pb y Fe.	
<b>4.2 PLANTAS</b> .....	<b>14</b>
<b>4.2.1</b> Mecanismos de entrada de metales a las plantas .....	17
<b>4.2.2</b> Plantas con diferentes grados de tolerancia a metales .....	18
<b>4.2.3</b> Efecto del As, Cd, Pb y Fe en plantas .....	20
<b>4.3 MAÍZ (<i>Zea mays</i>)</b> .....	<b>24</b>
<b>4.3.1</b> Origen del maíz .....	24
<b>4.3.2</b> Características taxonómicas del maíz ( <i>Zea mays</i> ) .....	25
<b>4.3.3</b> La producción, importancia económica y adaptabilidad del maíz .....	25
<b>5 ANTECEDENTES</b> .....	<b>28</b>
<b>5.1</b> Metales en suelo, plantas y maíz .....	28
<b>5.2</b> Revisión bibliográfica del contenido de metales en el estado de Guerrero .....	31
<b>6 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIOS</b> .....	<b>35</b>
<b>6.1</b> Localización geográfica .....	35
<b>6.2</b> Geología .....	35
<b>6.3</b> Clima .....	37

	<b>Página</b>
6.4	Vegetación ..... 38
6.5	Fisiografía e hidrología ..... 38
6.6	Suelo ..... 38
<b>7</b>	<b>METODOLOGÍA ..... 41</b>
7.1	Muestreo ..... 41
7.2	Selección de sitio de muestreo ..... 41
7.3	Toma de muestra ..... 41
7.4	Procesamiento de las muestras ..... 42
7.5	Trabajo de laboratorio ..... 43
7.6	Análisis de laboratorio ..... 43
<b>8</b>	<b>RESULTADOS ..... 45</b>
8.1	Características químicas en suelo ..... 45
8.2	Concentración de metales en suelo ..... 47
8.3	Concentración de metales en <i>Zea mays</i> ..... 51
8.4	Coeficiente de transferencia de metales (As, Cd, Pb y Fe) en <i>Zea mays</i> ..... 56
8.5	Índice de transporte de As, Cd, Pb y Fe hacia los diferentes tejidos de <i>Zea mays</i> ..... 59
<b>9</b>	<b>DISCUSIÓN ..... 62</b>
9.1	Características químicas en suelo ..... 62
9.2	Concentración de metales en suelo ..... 62
9.3	Concentración de metales en <i>Zea mays</i> ..... 67
9.4	Coeficiente de transferencia de metales (As, Cd, Pb y Fe) en <i>Zea mays</i> ..... 74
9.5	Índice de transporte de As, Cd, Pb y Fe hacia los diferentes tejidos de <i>Zea mays</i> ..... 78
<b>10</b>	<b>CONCLUSIONES ..... 83</b>
<b>11</b>	<b>RECOMENDACIONES ..... 86</b>
<b>12</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 87</b>
<b>13</b>	<b>ANEXOS ..... 96</b>
<b>14</b>	<b>APÉNDICE ..... 99</b>

## TABLA

		Página
<b>Tabla 1</b>	Coeficiente de transferencia de metales en el sistema suelo-planta.	6
<b>Tabla 2</b>	Coeficiente de transferencia de diferentes tipos de suelos y plantas.	6
<b>Tabla 3</b>	Minerales primarios y secundarios encontrados en suelos.	9
<b>Tabla 4</b>	Principales características físicas, químicas y minerales en suelo de Arsénico.	11
<b>Tabla 5</b>	Límite permisible y concentración crítica de As, Cd y Pb en suelo.	12
<b>Tabla 6</b>	Principales características físicas, químicas y minerales en suelo de Cadmio.	12
<b>Tabla 7</b>	Principales características físicas, químicas y minerales en suelo de Plomo.	13
<b>Tabla 8</b>	Principales características físicas, químicas y minerales en suelo de Hierro.	13
<b>Tabla 9</b>	Elementos esenciales macronutrientes y micronutrientes, forma química disponible, concentración de tejido seco en plantas.	15
<b>Tabla 10</b>	Valor máximo permisible y concentración crítica de Arsénico en planta y grano.	21
<b>Tabla 11</b>	Valor mínimo y máximo de As, Cd, Pb y Fe en cereales, vegetales y plantas; y contenido normal de Fe.	22
<b>Tabla 12</b>	Taxonomía y diferentes formas de utilización del maíz.	25
<b>Tabla 13</b>	Concentración promedio de metales en suelo y maíz en los sitios de estudio de la mina de Chenzhou, China.	28
<b>Tabla 14</b>	Concentración promedio de metales en suelo y planta (parte comestible) del área de estudio de Nanning, China.	29
<b>Tabla 15</b>	Concentración total de EPT en jales en cuatro regiones mineras de México.	33
<b>Tabla 16</b>	Concentración total de EPT en jales de dos Unidades Mineras, sur y centro de México.	34
<b>Tabla 17</b>	Datos climatológicos de la estación cercana a la zona minera de estudio.	37
<b>Tabla 18</b>	Características químicas, unidad de suelo de la zona control y minera en el área de estudio de Taxco, Guerrero.	47
<b>Tabla 19</b>	Límite permisible, concentración crítica en suelo, valores de concentración de referencia totales por tipo de uso de suelo y concentración regional de fondo en suelo de cultivo para As, Cd, Pb y Fe.	48
<b>Tabla 20</b>	Orden de acumulación de As, Cd, Pb y Fe en los tejidos de <i>Zea mays</i> en el área de estudio de Taxco, Guerrero.	52

	<b>Página</b>
<b>Tabla 21</b> Valor máximo permisible en grano, concentración crítica en planta, valor límite máximo establecido por normas oficiales mexicanas para As, Cd y Pb.	53
<b>Tabla 22</b> Coeficientes de transferencia (valores máximos) de As, Cd, Pb y Fe en la planta de <i>Zea mays</i> de la zona control y minera en el área de Taxco, Guerrero.	57
<b>Tabla 23</b> Coeficientes de transferencia (valores Máximos) de As, Cd, Pb y Fe en el tejido de la hoja de <i>Zea mays</i> en la zona control y minera en el área de Taxco, Guerrero.	58
<b>Tabla 24</b> Relación del índice de transporte de raíz/tallo, raíz/hoja y raíz/grano en <i>Zea mays</i> de As, Cd, Pb y Fe en el área de estudio de Taxco, Guerrero.	60
<b>Tabla 25</b> Características generales y mineralogía de las zonas minera de San Antonio y La Concha de Taxco, Guerrero.	64
<b>Tabla 26</b> Concentración promedio de As, Cd y Pb y Fe en suelo afectado por residuos mineros en el área de estudio y en diferentes áreas mineras.	66
<b>Tabla 27</b> Concentración promedio de As, Cd y Pb en plantas afectadas por residuos mineros en diferentes áreas mineras.	70
<b>Tabla 28</b> Concentración promedio de As, Cd y Pb en diferentes especies de plantas afectadas por residuos mineros.	71
<b>Tabla 29</b> Valor máximo permisible de referencia en grano, valor límite máximo de la normatividad mexicana y normatividad internacional del Codex Alimentarius en diferentes alimentos y cereales de los MMTOX en estudio.	74
<b>Tabla 30</b> Coeficiente de Transferencia de As, Cd y Pb en la zona de estudio, en diferentes especies de plantas y áreas mineras.	76
<b>Tabla 31</b> Valores del índice de transporte de la relación raíz/hoja de la planta de maíz de As, Cd, Pb y Fe del área de Taxco, Guerrero y diferentes autores en otras áreas de estudio.	82
<b>Tabla 32</b> Características importantes de las diferentes técnicas analíticas de espectrometría.	101
<b>Tabla 33</b> Resultados obtenidos de los materiales de referencia certificados 1573a (planta), 2586 (suelo) y los valores determinados en el laboratorio de ICP-MS.	105
<b>Tabla 34</b> Parámetros instrumentales del ICP-MS marca VGEElemental modelo Plasma Quad3®.	106

## FIGURA

		Página
<b>Figura 1</b>	Los mecanismos de transferencia en los diferentes receptores ambientales y planta	8
<b>Figura 2</b>	Dinámica que presentan los diferentes componentes del sistema suelo/planta con los metales pesados	10
<b>Figura 3</b>	Absorción y acumulación de metales en las plantas.	15
<b>Figura 4</b>	Formación de los nutrimentos en suelo y su transferencia hacia la raíz de la planta.	16
<b>Figura 5</b>	Curva típica de dosis-respuesta de micronutrimentos y elementos no esenciales para plantas	17
<b>Figura 6</b>	Transporte pasivo y activo que presentan las plantas.	18
<b>Figura 7</b>	Las diferentes estrategias de absorción del metal en plantas	19
<b>Figura 8</b>	Ejemplar de <i>Pteris vittata</i> , helecho hiperacumulador de arsénico.	20
<b>Figura 9</b>	Diferentes representaciones del dios olmeca del maíz en forma de la planta del grano de maíz.	24
<b>Figura 10</b>	Diferentes productos industriales fabricados con maíz	26
<b>Figura 11</b>	Localización geológica, Formación Mexcala y sitios de muestreo de zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.	36
<b>Figura 12</b>	Unidades de suelo del área de estudio de Taxco, Guerrero.	39
<b>Figura 13</b>	Valores promedio de pH en muestras de suelo extraídas con agua en la zona control y minera en el área de estudio de Taxco, Guerrero.	45
<b>Figura 14</b>	Valores promedio de conductividad eléctrica en muestras de suelo en la zona control y minera en el área de estudio de Taxco, Guerrero.	46
<b>Figura 15</b>	Valores promedio de sulfatos en muestras de suelo en la zona control y minera en el área de estudio de Taxco, Guerrero.	46
<b>Figura 16</b>	Valores promedio de las concentraciones de As en suelo de las zonas control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.	47
<b>Figura 17</b>	Valores promedio de las concentraciones de Cd en suelo de las zonas control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.	49
<b>Figura 18</b>	Valores promedio de las concentraciones de Pb en suelo de las zonas control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.	50

	<b>Página</b>
<b>Figura 19</b>	Valores promedio de las concentraciones de Fe en suelo de las zonas control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero. 50
<b>Figura 20</b>	Valores promedio de las concentraciones de As y Cd en cuatro tejidos de <i>Zea mays</i> en la zona control de San Juan en Taxco, Guerrero. 51
<b>Figura 21</b>	Valores promedio de las concentraciones de Pb y Fe en cuatro tejidos de <i>Zea mays</i> en la zona control de San Juan en Taxco, Guerrero. 52
<b>Figura 22</b>	Valores promedio de las concentraciones de As y Cd en cuatro tejidos de <i>Zea mays</i> en la zona minera de San Antonio en Taxco, Guerrero. 53
<b>Figura 23</b>	Valores promedio de las concentraciones de Pb y Fe en cuatro tejidos de <i>Zea mays</i> en la zona control de San Antonio en Taxco, Guerrero. 54
<b>Figura 24</b>	Valores promedio de las concentraciones de As y Cd en cuatro tejidos de <i>Zea mays</i> en la zona minera de La Concha en Taxco, Guerrero. 55
<b>Figura 25</b>	Valores promedio de las concentraciones de Pb y Fe en cuatro tejidos de <i>Zea mays</i> en la zona minera de La Concha en Taxco, Guerrero. 56
<b>Figura 26</b>	Coeficiente de transferencia de As, Cd, Pb y Fe de <i>Zea mays</i> en la zona control y minera en el área de Taxco, Guerrero. 58
<b>Figura 27</b>	Coeficiente de transferencia de As, Cd, Pb y Fe de <i>Zea mays</i> (hoja) en la zona control y minera en el área de Taxco, Guerrero. 59
<b>Figura 28</b>	Índice de transporte de As y Cd en las relaciones raíz/tallo, raíz/hoja y raíz/grano de <i>Zea mays</i> de la zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero. 61
<b>Figura 29</b>	Índice de transporte de Pb y Fe en las relaciones raíz/tallo, raíz/hoja y raíz/grano de <i>Zea mays</i> de la zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero. 61

#### **CUADRO**

<b>Cuadro 1</b>	Principales fuentes antropogénicas de metales para los suelos. 7
-----------------	--

#### **ANEXO**

<b>ANEXO 1</b>	Parámetros físico-químicos y MMTOX en muestras de suelo del área de estudio de Taxco, Guerrero. 97
<b>ANEXO 2</b>	MMTOX en muestras de <i>Zea mays</i> en el área de estudio de Taxco, Guerrero. 98 - 99

## RESUMEN

Este trabajo fue realizado para evaluar la transferencia de As, Cd, Pb y Fe (MMTOX) del suelo a la planta de maíz (*Zea mays*), contaminados por jales de las minas San Antonio y La Concha, en Taxco; Guerrero. Además, se determinó el coeficiente de transferencia (CT) (la relación de concentración de suelo/planta) y el índice de transporte de estos MMTOX en los diferentes tejidos de la planta de maíz (raíz, tallo, hoja y grano), para evaluar el grado de acumulación, movilidad y biodisponibilidad de los metales en la planta.

Para realizar este trabajo se llevó a cabo la caracterización física y química de las unidades de suelo particulares de la zona de estudio, obteniendo datos relacionados al potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica y sulfatos. Se cuantificaron los contenidos totales de As, Cd, Pb, en las muestras de suelo y en los diferentes tejidos de la planta de maíz por espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS). El Fe se cuantificó, tanto en suelo como en los ejidos de la planta de maíz por espectrofotometría de absorción atómica (AAS). Todas las determinaciones se realizaron por duplicado, en suelo y planta del maíz, se utilizaron estándares internacionales del National Institute of Standards and Technology (NIST) 1573 (para la planta, hojas de tomate) y 2586 (para el suelo, contenido de Pb en pintura).

En las dos zonas de estudio, los suelos se caracterizan por tener valores de pH, Conductividad Eléctrica (CE) y sulfatos los siguientes: (Zona Control) San Juan pH de 6.4 y 6.7, ligeramente ácidos a muy ligeramente neutros, CE de 78 a 102  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  de 31 a 40  $\text{mg kg}^{-1}$ ; (Zona Minera) San Antonio pH de 4.2 y 5.4, de fuertemente a moderadamente ácidos, CE de 39 a 224  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  de 24 a 519  $\text{mg kg}^{-1}$  y La Concha pH de 6.4 a 7.3, valores considerados circum-neutrales, CE de 120 a 416  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  de 799 a 1281  $\text{mg kg}^{-1}$ . En la zona minera, San Antonio el pH ácido que presenta es el resultado del depósito de jales que se encuentran oxidados. Los valores obtenidos en suelo de pH, CE y sulfatos, podrían ser indicadores de la afectación por la dispersión de los jales.

Los resultados de la concentración total de los MMTOX en estudio de las dos zonas el suelo tiene el orden de proporción siguiente: Fe>Pb>As>Cd; (San Juan: 102, 26, 22 y 1  $\text{mg kg}^{-1}$ ), (San Antonio: 25 830, 4 760, 591 y 14  $\text{mg kg}^{-1}$ ) y (La Concha: 10 517, 2 162, 376 y 55  $\text{mg kg}^{-1}$ ). En la zona minera de San Antonio y La Concha las concentraciones de As, Cd y Pb exceden los límites permisibles para suelo, concentración crítica, los valores de concentración para la limpieza y remediación de suelos contaminados destinados a la agricultura en México y los valores de concentración de fondo en suelo de cultivo.

En relación a la planta de maíz, el orden de proporción en el contenido total de los MMTOX en estudio son los siguientes: (Zona Control) San Juan: Fe (154.88)> Pb (12.79)> As (7.70)> Cd (1.11)  $\text{mg kg}^{-1}$ . (Zona Minera) San Antonio: Pb (2 112.42)> As (399.34)> Fe (153.79)> Cd (27.44),  $\text{mg kg}^{-1}$  y La Concha: Pb (1,378.84) > Fe (192.36) > Cd (400.63) > As (227.28),  $\text{mg kg}^{-1}$ . Así también, por tejido, (Zona Control) San Juan: Fe (141.83), Pb (10.29), As (6.76), Cd (0.55)  $\text{mg kg}^{-1}$  raíz > Fe (6.23), Pb (2.00), As (0.68), Cd (0.33)

mg kg<sup>-1</sup> hoja > Fe (3.87), As (0.21), Pb (0.37), Cd (0.18) mg kg<sup>-1</sup> tallo > Fe (2.95), Pb (0.13), As (0.05)-Cd (0.05) mg kg<sup>-1</sup> grano. (Zona Minera) San Antonio: Pb (2 079.95), As (395.93), Fe (130.41), Cd (22.53) mg kg<sup>-1</sup> raíz > Pb (16.04), Fe (7.78), Cd (3.38), As (1.99) mg kg<sup>-1</sup> hoja > Pb (12.75), Fe (11.02), Cd (1.20), As (0.92) mg kg<sup>-1</sup> tallo > Fe (4.89), Pb (3.68), As (0.50), Cd (0.33) mg kg<sup>-1</sup> grano. La Concha: Pb (1 370.50), As (224.50), Fe (179.50), Cd (379.10) mg kg<sup>-1</sup> raíz > Cd (15.95), Fe (6.35), Pb (6.20), As (1.88) mg kg<sup>-1</sup> hoja > Cd (5.46), Fe (3.98), Pb (2.05), As (0.81) mg kg<sup>-1</sup> tallo > Fe (2.53), Pb (0.09), Cd (0.12), As (0.09) mg kg<sup>-1</sup> grano. En la zona minera (San Antonio, As y Pb y La Concha As, Pb y Cd) rebasan las concentraciones críticas para plantas. En San Antonio el As rebasa el valor máximo permisible en grano en (tres de las muestras), el Cd y Pb en la mayoría de las muestras. El Cd es superior al valor máximo permisible en todas las muestras de La Concha y Pb en la mayoría de sus muestras.

Respecto al coeficiente de transferencia (CT) en la planta de maíz los valores obtenidos son: (Zona Control) San Juan: As (0.4), Cd (1.1), Pb (0.5) y Fe (1.5); (Zona Minera) San Antonio: As (0.7) Cd (2.0), Pb (0.4) y Fe (0.2), La Concha: As (0.6), Cd (7.3), Pb (0.6) y Fe (0.02). Los valores para el coeficiente de transferencia en el tejido de la hoja: (Zona Control) San Juan: As (0.03), Cd (0.03), Pb (0.08) y Fe (0.06); (Zona Minera) San Antonio: As (0.003) Cd (0.24), Pb (0.003) y Fe (0.01), La Concha: As (0.01), Cd (0.29), Pb (0.003) y Fe (0.0006). En la zona minera, La Concha el Cd fue el valor más alto; para Pb, As y Fe los valores fueron menores a 1.0, para la planta de maíz. Igualmente, en el tejido de la hoja los CT más altos se obtuvieron en la misma zona minera y en Cd (aproximadamente 0.3). Estos valores indican que el Cd tiene alta biodisponibilidad en la planta de maíz.

Finalmente, el índice de transferencia se determinó para las relaciones raíz/tallo, raíz/hoja y raíz/grano y los resultados obtenidos fueron los siguientes: (Zona Control) San Juan Cd: raíz/hoja (60.0), raíz/tallo (32.73) y raíz/grano (9.10)> Pb: raíz/hoja (19.44), raíz/tallo (3.60) y raíz/grano (1.30)> As: raíz/hoja (10.00), raíz/tallo (3.11) y raíz/grano (0.74)> Fe: raíz/hoja (4.40), raíz/tallo (2.73) y raíz/grano (2.10). (Zona Minera) San Antonio Cd: raíz/hoja (15.0), raíz/tallo (5.33) y raíz/grano (0.15)> Fe: raíz/tallo (8.45), raíz/hoja (5.97) y raíz/grano (3.75)> Pb: raíz/hoja (0.80), raíz/tallo (0.61) y raíz/grano (0.18)> As: la relación raíz/hoja (0.50), raíz/tallo (0.23) y raíz/grano (0.13). La Concha Fe: raíz/tallo (2.22), raíz/hoja (3.54) y raíz/grano (1.41)> Cd: raíz/hoja (4.20), raíz/tallo (1.44), raíz/grano (0.032)> As: raíz/hoja (0.84), raíz/tallo (0.36) y raíz/grano (0.04)> Pb: raíz/tallo (0.15), raíz/grano (0.07), raíz/hoja (0.45). Las tres relaciones consideradas en este trabajo muestran altos valores >1. En la zona minera de San Antonio y La Concha, presentaron altos índices de transferencia en Fe, seguido en orden por el Cd. Indicando que la planta de maíz puede transportar al Fe y Cd hacia el tallo y hoja. Probablemente, el Fe sea dependiente del contenido en el suelo y por ello también, de los residuos mineros (contribuyan las fases portadoras de este metal), lo que se ve reflejado en su movilización y transporte hacia raíz, tallo, hoja y grano.

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería se considera una fuente potencial de metales y metaloides tóxicos (MMTOX), para los diferentes ecosistemas, agua, sedimento, suelo, y plantas tanto silvestres como de consumo humano. Desde un punto de vista biológico, nutricional, agrícola y ambiental, los MMTOX como el arsénico, plomo y cadmio, son tóxicos si se ingieren en cantidades suficientemente elevadas.

Entre los residuos sólidos que produce la minería, los de mayor importancia son los jales y terreros. Los jales y terreros pueden contener sulfuros que al estar expuestos al ambiente se oxidan y liberan MMTOX por el proceso denominado drenaje ácido de minas (DAM). El agua generada por el DAM constituye un problema de contaminación ya que incrementa la erosión, solubilidad, movilidad y lixiviación de MMTOX. La depositación de los jales que se ha realizado a través del tiempo en la superficie del suelo, va formando una colina de estos residuos sólidos, los cuales tienen una textura fina, permitiendo que el arrastre del material sea rápido. La utilización de agua de los lixiviados de jales para riego de cultivos representa un peligro latente para el hombre. Un manejo adecuado de los residuos sólidos en las inmediaciones de las zonas mineras contaminadas, a las tierras de cultivo y de manera general a los demás ecosistemas implica tomar en cuenta sus afectaciones al ambiente. Hoy día, en la República Mexicana, todavía existen minas en explotación, de las cuales se han realizado pocos estudios que evalúen el impacto ambiental provocado por la contaminación de MMTOX originada por la lixiviación de aguas de DAM asociados a la agricultura.

La ciudad de Taxco de Alarcón en el estado de Guerrero, se ha distinguido desde la época de la Colonia por su actividad minera que ha sido de importancia en la extracción de metales principalmente plata, oro, cobre, zinc, plomo. La plata es utilizada en la orfebrería por muchos artesanos de esta ciudad. Sin embargo, los beneficios económicos que genera la minería han estado asociados a efectos negativos al ambiente debido a la producción de diferentes residuos sólidos sin control adecuado. La exposición de estos residuos tiene como resultado la lixiviación de MMTOX.

En el estado de Guerrero la actividad agrícola se ha establecido básicamente sobre tres productos: maíz, café y la copra, la producción del maíz representa el 85% entre todos los municipios. El cultivo de maíz contribuye con el 4.5% del total de la producción nacional y

registra rendimientos de 2 186 ton/ha. Guerrero se ubica en el séptimo lugar a nivel nacional con una producción de 812 mil toneladas, destacando localmente como zonas productoras: Altamirano y Chilpancingo. El maíz (*Zea mays*) es uno de los cereales de mayor consumo y tiene importancia en la alimentación de los mexicanos sobre todo de aquellos de menores ingresos.

El objetivo de este trabajo consistió en: a) determinar el contenido de As, Cd, Pb y Fe en suelo y planta de maíz, b) evaluar el coeficiente de transferencia (CT) de los metales antes citados, c) determinar el índice de transporte de los metales citados en los diferentes tejidos de la planta de maíz.

## **2. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL.**

- Evaluar la transferencia de metales y metaloides tóxicos (MMTOX) del suelo a la planta de maíz –*Zea mays*– en suelos de una zona minera donde se han depositado jales mineros.

### **OBJETIVOS PARTICULARES.**

- Comparar los contenidos de As, Cd, Pb, y Fe de los suelos con límites permisibles de referencia (Zartner-Nyilas, 2002), concentraciones críticas (Kabata-Pendias, 1992), compararlas con las concentraciones de referencia totales (CRT) por tipo de uso de suelo (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) y concentraciones de fondo regionales de zonas cercanas al área de estudio, reportados para suelos (Talavera *et al.*, 2005).
- Determinar las concentraciones de As, Cd, Pb y Fe en plantas y granos de maíz de las zonas de muestreo, compararlas con los valores límites máximos y de concentraciones críticas reportados en la literatura
- Determinar los coeficientes de transferencia (CT) suelo/planta y suelo/grano de maíz de As, Cd, Pb, y Fe a partir de los contenidos totales de estos metales en suelos.
- Analizar la acumulación en raíz, tallo, hoja y grano; y evaluar el índice de transporte de la raíz hacia tallo, hoja y grano de la planta de maíz de los metales en estudio.

### **3. HIPÓTESIS**

La minería es una de las actividades que genera diferentes residuos que constituyen fuentes potenciales de contaminación y representan un problema ambiental que afecta negativamente a los diferentes ecosistemas. En las zonas mineras se depositan grandes cantidades de residuos –jales-, los que han estado expuestos a la intemperie favoreciendo los procesos de oxidación de sulfuros, lo que provoca la liberación de MMTOX al suelo. Se espera encontrar altas concentraciones de MMTOX en suelo, que se localizan en los puntos cercanos de la zona con influencia de actividad minera. Estos suelos puedan constituir una fuente de los MMTOX en la planta que es evaluada por el Coeficiente de Transferencia (CT). Así también, se espera que se acumulen principalmente en la raíz y, en consecuencia, en menor grado en los demás tejidos de la planta de maíz, evaluado por el índice de transporte de los MMTOX.

## 4. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 4.1 METALES

#### 4.1.1 METALES Y METALOIDES EN EL SUELO Y SU TRANSFERENCIA HACIA LAS PLANTAS

A los metales y metaloides tóxicos (MMTOX) se les denomina de esta manera, más por su toxicidad que por su peso específico. Los MMTOX pueden ser detectados ya sea en su estado elemental, lo que implica que no sufren modificaciones, o enlazados en diversos compuestos. Una vez en el ambiente pueden sufrir transformaciones a diferentes formas móviles y/o pueden ser inmovilizados. Todos los suelos naturalmente contienen metales y metaloides como: **(a)** parte de la estructura de minerales primarios o secundarios, **(b)** precipitados con otros compuestos del suelo, **(c)** sorbidos en sitios de intercambio: óxidos de metal o hidróxidos, minerales arcillosos y materia orgánica que puede servir como intercambiador, **(d)** disueltos en la solución del suelo, en forma de agua o complejados con ligandos orgánicos e inorgánicos y **(e)** embebidos en microorganismos, plantas o animales.

Una vez en el suelo, los contaminantes experimentan cambios e interaccionan químicamente con otros materiales naturales (sedimentos, suelo, materia orgánica, rocas, minerales, etc.) dando lugar a procesos como: adsorción, precipitación, disolución, especiación, formación de complejos, etc. La disponibilidad de los MMTOX en el suelo está determinada, principalmente por la especie química, las características del suelo (pH, potencial redox, contenido de materia orgánica, contenido y naturaleza de las arcillas, presencia de óxidos de hierro, aluminio y manganeso), así como de las condiciones climáticas. Los MMTOX del suelo contenido en la fracción biodisponible o bioasimilable pueden ser absorbidos por las plantas, siempre es más difícil de predecir en suelos contaminados con dos o más metales. La fracción biodisponible o bioasimilable está condicionada por el elemento, su concentración y grado de disponibilidad, así como por la especie vegetal, interacciones entre los nutrientes, interacciones de metal con los sitios de intercambio catiónico del suelo; así también, por la competencia con los sitios de absorción de la raíz (Davis *et al.*, 1993; Ehlken *et al.*, 2002).

Para expresar el grado de asimilación o acumulación de los MMTOX en los vegetales, se pueden utilizar parámetros tales como el coeficiente de transferencia o el factor de bioconcentración (relación entre los niveles resultantes en el vegetal y en el suelo). La relación

de concentración de suelo/planta es de gran utilidad para evaluar la bioacumulación y la capacidad bioindicadora, las cuales dan un conocimiento de la movilidad y biodisponibilidad que tiene cierto metal. El Coeficiente de Transferencia (CT) se define como:

$$(\text{CT}_{\text{metal}}) = \frac{\text{Concentración del metal o metaloide total en planta (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentración del metal o metaloide total en suelo (mg kg}^{-1}\text{)}}$$

Un valor grande del cociente indica que el elemento refleja su relativa baja sorción (se encuentra libre en la disolución del suelo), mientras que un valor pequeño denota que el elemento se encuentra unido a los coloides del suelo o enlazado a alguna molécula que lo mantienen en un forma insoluble y por lo tanto no biodisponible. Kloke *et al.*, (1984), cuantificó la diferencia relativa en la biodisponibilidad de metales en suelo y planta, determinado por el coeficiente de transferencia (Tabla 1).

**Tabla 1.** Coeficiente de transferencia de metales en el sistema suelo-planta.

Metal						
As y Pb	Cd	Be, Co, Cr y Cu	Hg y Ni	Se	Tl	Zn
<b>Coeficiente de Transferencia</b>						
0.01 - 0.1	1 - 10	0.01 - 0.1	0.1 - 1	0.1 - 10	01 - 10	01 - 10

Fuente: Kloke *et al.*, 1984.

Diferentes autores han calculado el coeficiente de transferencia (CT) (algunos le llaman factor de concentración, FC) para Cd, Pb, Ni y Zn en diferentes tipos de suelos y plantas (Tabla 2) (Ross, 1994).

**Tabla 2.** Coeficiente de transferencia de diferentes tipos de suelos y plantas.

Planta	Cd	Pb	Ni	Zn	
Vegetación natural	0.6 - 4.0	-	0.05 - 0.1	0.05 - 3.5	Thorne and Coughtrey (1983 a). Calculado de datos publicados.
Hierba para pastura	0.4 - 2.0	-	0.07 - 0.9	0.08 - 1.7	
Plantas comestibles	0.07 - 4.0	-	0.02 - 0.2	0.06 - 5.0	
Granos de cereal	0.09 - 0.45	-	0.01 - 0.65	0.20 - 7.8	
Fruto del chícharo	0.005 - 0.011	0.005 - 0.011	0.17 - 0.40	2.24 - 2.37	Harrison and Chirgawi (1989 a). Estimados de gráficas de barra en Harrison and Chirgawi (1989 a), de plantas creciendo en gabinetes con aire filtrado.
Chicharo (promedio en vainas y hojas).	0.2 - 0.6	0.002 - 0.055	0.23 - 0.43	0.8 - 1.0	
Lechuga	0.09 - 0.45	0.006 - 0.02	0.15 - 0.58	0.4 - 1.2	
Rábano: raíces	0.01 - 0.03	0.001 - 0.02	0.08 - 0.3	0.55 - 0.8	
hojas	0.03 - 1.9	0.001 - 0.03	0.11 - 0.5	0.3 - 2.1	
Fruto del chícharo	0.05	0.002 - 0.007	0.1	0.8 - 1.0	Harrison and Chirgawi (1989 b). Estimados de gráficas de barra Harrison and Chirgawi (1989 a), de plantas del campo.
Chicharo (promedio en vainas y hojas).	0.06 - 0.8	0.001 - 0.010	0.05 - 0.4	0.2 - 0.95	
Lechuga	1.1 - 2.3	0.005 - 0.2	0.5 - 1.15	0.3 - 0.7	
Rábano: raíces	0.05	0.005	0.1 - 0.22	0.3 - 0.4	
hojas	1.0 - 1.65	0.005 - 0.022	0.2 - 0.5	0.1 - 0.3	

Harrison and Chirgawi (1989 a, b) reportaron en orden los valores del CT de Zn> Cd>Ni>Pb. Los valores de CT<sub>Zn</sub> y CT<sub>Cd</sub> son altos, debido a la gran movilidad y biodisponibilidad de estos metales en el suelo. Los valores de CT fueron calculados de los datos de Chumbley y Unwin, (1982); ellos reportaron concentraciones de Cd y Pb en plantas de cultivo que crecieron en suelos tratados con lodos residuales (Tabla 2).

#### 4.1.2 FUENTES DE METALES Y METALOIDES EN SUELO

El desarrollo industrial y las diferentes actividades relacionadas con el ser humano, han incrementado la liberación de metales. En el ambiente existen diferentes fuentes de metales, los orígenes antropogénicos son numerosos y diversos e incluyen: derrames de contaminantes (hidrocarburos, solventes, industriales, etc.), combustión de aceites fósiles, los automóviles de motor, intemperismo de desechos (jales y terreros mineros, sitios de desechos tóxicos, rellenos sanitarios municipales-industriales, zonas agrícolas que utilizan productos químicos como: fertilizantes, herbicidas, fungicidas; etc.), lixiviación de residuos contaminantes (disolución e introducción al medio acuoso) (Cuadro 1).

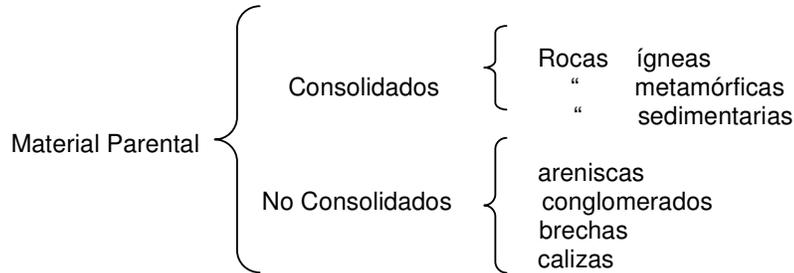
**Cuadro 1.** Principales fuentes antropogénicas de metales para los suelos.

<i>PRINCIPALES FUENTES</i>	<i>METALES LIBERADOS AL SUELO</i>
<b>ACTIVIDADES INDUSTRIALES</b>	
Industria química, suministro de gas y electricidad, de petróleo, extracción y refinación de productos (quema de combustibles fósiles, carbón y petróleo), estaciones de servicio, fundidoras, curtidoras, astilleros y depósitos residuales.	Pb, Cd, Cr, Zn, As, Sb, Se, Ba, Cu, Mn, U, y V.
<b>ACTIVIDADES MINERAS</b>	
La exploración, explotación de yacimientos minerales, remoción extracción, procesamiento, eliminación y disposición que genera grandes volúmenes de rocas y residuos (jales), que son depositados directamente en los suelos donde se acelera su intemperización. La exposición de la pirita y otros minerales de sulfuro al oxígeno y humedad atmosférica provoca su oxidación y la formación de ácidos, generando el "drenaje de ácido de mina (DAM)".	Pb, Zn, As, Cu, Fe, Ni y Co.
<b>ACTIVIDADES AGRÍCOLAS</b>	
Aplicación de fertilizantes	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V y Zn.
Aplicación de plaguicidas	Pb, As, Hg, Br, Cu, F, Mn, V y Zn.
Aplicación de lodos residuales	
<b>ACTIVIDADES URBANAS Y DOMÉSTICAS</b>	
Disposición de sólidos y sedimentos residuales, descargas de motores de vehículos, uso de productos químicos.	Pb, Cd, Cr, Zn, Cu, Co, Ni.

Fuente: Connell y Miller, 1984; Freedman, 1989; Alloway, 1990.

**Fuentes Naturales.** Sus aportaciones proceden de las emisiones volcánicas (son las principales fuentes de depositación atmosférica), erosión e intemperización de rocas y la

mineralización del material parental del suelo. La intemperización de rocas metalíferas (ígneas y metamórficas) es una de las aportaciones naturales que contienen altas concentraciones de metales (Freedman, 1989).

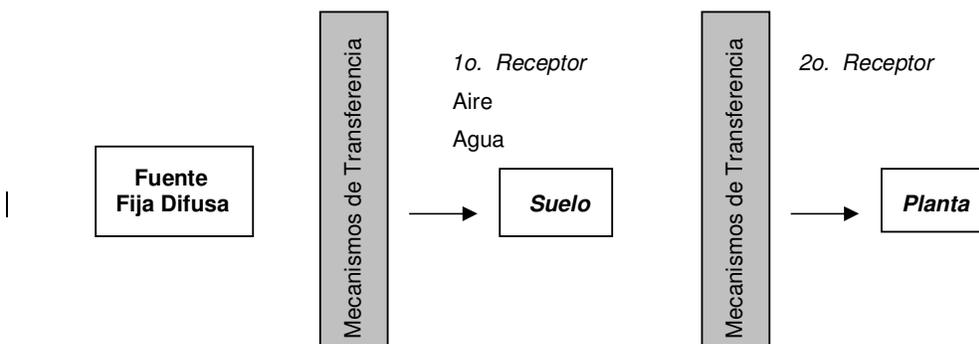


**Fuentes Antropogénicas.** Son las actividades realizadas por el hombre, es la fuente principal de aporte de metales al ambiente y puede ser 100 veces mayor que el de las fuentes naturales. Las principales fuentes antrópicas por las cuales los metales entran en los suelos son: actividades industriales, actividades mineras, actividades agrícolas, actividades urbanas y domésticas (Cuadro 1).

Las fuentes antropogénicas de contaminación de metales hacia los diferentes receptores ambientales pueden ser puntuales o difusas:

**Fuente Puntual.** Son fuentes de punto de descarga que están bien identificadas o localizadas y se señalan como un claro punto de contaminación; por ejemplo las fundidoras que causan daños a los ecosistemas acuáticos y terrestres.

**Fuente Fija Difusa.** Son muchas fuentes de punto simple de descarga dispersas o difusas, de distribución irregular no identificables. Por ejemplo, las actividades agrícolas son fuentes difusas. El movimiento del metal o de otras sustancias dentro de las células de la raíz presenta mecanismos que permiten la entrada de las mismas (Figura 1).



**Figura 1.** Los mecanismos de transferencia en los diferentes receptores ambientales y planta.

### 4.1.3 SUELO

Suelo es un cuerpo natural, no consolidado, compuesto por sólidos (material mineral y orgánico) líquidos y gases. Es un componente de la biosfera, donde se desarrollan diversos procesos físicos, químicos y biológicos. El suelo es frágil, su proceso de formación es largo, tarda desde cientos a miles de años en formarse, es de difícil y larga recuperación, por lo que es considerado un recurso natural no renovable. Además, el suelo es considerado un sistema biogeoquímico complejo, abierto, heterogéneo y dinámico que continuamente intercambia materia y energía con su entorno. (Alloway, 1993; Pierzynski, 1993 y Singer, 1992). El suelo está constituido por tres fases:

- *Sólida*. Está formada por minerales (principalmente óxidos de silicio, hierro y aluminio) y materia orgánica en diferentes estados de descomposición, sales y rocas intemperizadas (minerales primarios y secundarios) (Tabla 3). Constituye cerca del 50% del total del suelo.
- *Líquida*. Llamada solución del suelo, formada por agua, iones disueltos procedentes de otras fases y compuestos orgánicos solubles, constituye cerca del 25%.
- *Gaseosa*. Constituida por vapor de agua y gases atmosféricos ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$  y  $CH_4$ ), es una fase muy importante para la respiración de los organismos y responsable de las reacciones de oxidación, constituye el otro 25%.

**Tabla 3.** Minerales primarios y secundarios encontrados en suelos.

<b>Minerales Primarios</b>	<b>Minerales Secundarios</b>
Piroxenos	Filosilicatos
Mica	Óxidos de Aluminio
Anfiboles	Óxidos de Hierro
Olivinos	Óxidos de Manganeso

Fuente: Fergusson, 1990.

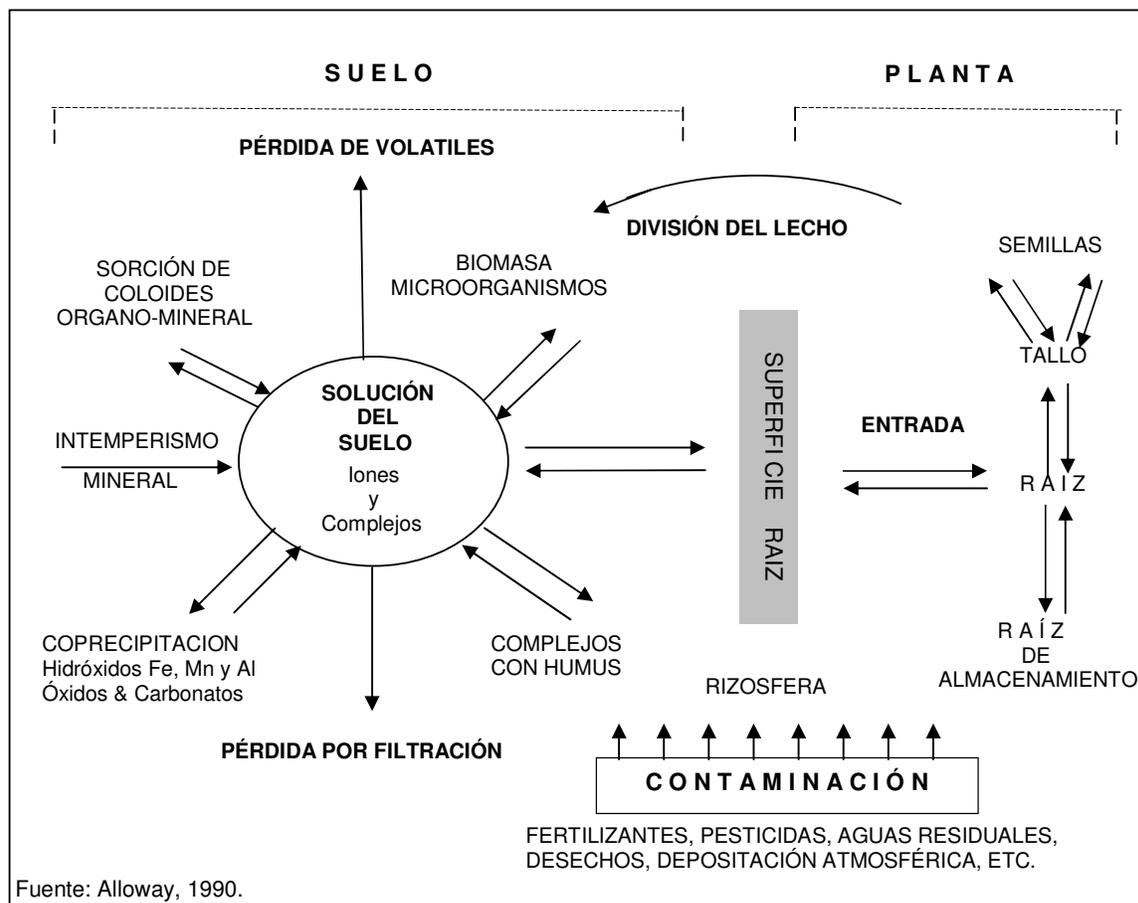
### 4.1.4 FUNCIONES DEL SUELO

El suelo forma parte de un ecosistema dinámico, actúa como barrera protectora de otros medios más sensibles, que amortigua el impacto ambiental de los contaminantes. La mayoría de los suelos presentan una capacidad de depuración que tiene un límite. El suelo tiene diferentes funciones importantes como son: (**a**) es un sistema vital, sustenta la vida vegetal, donde las plantas obtienen soporte mecánico, (**b**) proporciona los nutrimentos esenciales para el sustento de la planta, (**c**) funciona como un sumidero, filtro, amortiguador y transformador para los contaminantes orgánicos e inorgánicos, (**d**) es un importante regulador biogeoquímico

de los flujos de sustancias dentro y fuera del ecosistema, también como un regulador del balance hídrico en las cuencas hidrológicas y (e) alberga una gran biodiversidad de microorganismos localizados dentro y encima de ellos (Snakin, 1996; Alloway, 1993 y Connel y Miller, 1984).

#### 4.1.5 RELACIÓN DEL SISTEMA SUELO-PLANTA CON LOS METALES PESADOS

El sistema suelo/planta está sujeto a entradas y pérdidas de metales pesados por filtración, erosión y el pasar a la atmósfera por volatilización (Figura 2). La incorporación de los metales pesados dentro de la planta se lleva a cabo por la entrada desde el suelo hacia las raíces donde influyen muchos factores que son: temperatura, pH y aeración del suelo, condiciones de  $E_h$  y fertilización (Alloway, 1990).



**Figura 2.** Dinámica que presentan los diferentes componentes del sistema suelo/planta con los metales pesados.

Existen también factores de las plantas que afectan la entrada de metales desde los suelos, estos son: **a)** genotipo de la planta, la habilidad de las especies y variedades para absorber,

acumular y tolerar metales pesados, **b)** distribución del metal en la planta, por ejemplo el Cd, Mn, Zn, B, Mo y Se son principalmente translocados hacia las partes superiores de la planta después de ser absorbidos por la raíz (Alloway, 1990).

#### 4.1.6 DISTRIBUCIÓN, CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, CONCENTRACIONES Y MINERALES EN SUELO DEL As, Cd, Pb y Fe

**ARSÉNICO (As).** El arsénico es un metaloide que se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre, ocupa el lugar 20 en abundancia con una concentración de  $2 \text{ mg kg}^{-1}$ . Está presente en todo tipo de rocas, suelos, agua y aire. Los suelos contaminados, por ejemplo con desechos de minas, son también una fuente potencial de exposición al arsénico. La Tabla 4 muestra las principales características físicas, químicas y minerales del arsénico. Puede estar en los ambientes terrestres a partir de los diferentes orígenes natural y antropogénico. Las fuentes naturales incluyen: meteorización de rocas y minerales, emisiones volcánicas, meteoritos y actividad biológica. Las fuentes antropogénicas principales son: minería, combustión de residuos sólidos municipales, combustibles fósiles, fundidoras de metales.

**Tabla 4.** Principales características físicas, químicas y minerales en suelo de Arsénico.

<b>ARSÉNICO</b>	
Número Atómico	33
Peso Atómico	74.92
Densidad ( $\text{g/cm}^3$ )	5.73
Isótopo Estable	$^{75}\text{As}$
Estados de Oxidación	0, -3, +3, +5
Minerales	Arsenopirita, oropimente, rejalgar, enargita, conicalcita lollingita y olivinita

Fuente: Emsley, 1998; Kabata-Pendias, 1992.

El As ha sido ampliamente utilizado en medicina, cosmética, en la fabricación de pinturas, componentes eléctricos e incluso en la construcción de dispositivos láser (Cullen y Reimer, 1989). La tabla 5 cita el límite permisible y concentración crítica de arsénico en suelo. La Comunidad Europea recomienda que los niveles de arsénico en los suelos no excedan los  $20 \text{ mg kg}^{-1}$ . En suelo el As puede ser disuelto y adsorbido/absorbido por las arcillas o la materia orgánica. Muchos de estos procesos son mediados por la materia orgánica la que puede producir transformaciones de tipo: *a)* cambio en las condiciones redox que inducen la transformación arsenito-arsenato, *b)* reducción y metilación del arsénico, y *c)* biosíntesis de compuestos de arsénico.

**Tabla 5.** Límite permisible y concentración crítica de As, Cd y Pb en suelo.

Elemento	Límite Permisible <sup>a</sup>	Concentración Crítica <sup>b</sup>
(mg kg <sup>-1</sup> )		
As	10 - 20	20 - 50
Cd	1- 3	3 - 8
Pb	50 - 300	100 - 400

Fuente: <sup>a</sup>Zartner-Nyilas, 2002, <sup>b</sup>Kabata- Pendias, 1992.

**CADMI O (Cd).** Está distribuido en toda la corteza terrestre, su concentración es de 0.1 mg kg<sup>-1</sup>. Se encuentra en todos los materiales de la naturaleza y en consecuencia en todos los alimentos, al menos en cantidades traza. Geoquímicamente, el Cd está asociado con el Zn, ambos tienen estructuras iónicas y electronegatividades similares; además presenta alta afinidad con el S, normalmente ocurre en depósitos de sulfuros (McBride, 1994). El contenido de Cd en suelos puede ser incrementado por fuentes antropogénicas, las cuales incluyen: fundidoras, aplicación de fertilizantes, lodos residuales y actividades mineras. Estas últimas pueden causar las concentraciones más altas del cadmio, ya que este metal se encuentra frecuentemente incorporado en diversos minerales. La Tabla 6 muestra las principales características físicas, químicas y minerales del cadmio (Alloway, 1990; Kabata-Pendias, 1992).

**Tabla 6.** Principales características físicas, químicas y minerales en suelo de Cadmio.

C A D M I O	
Número Atómico	48
Peso Atómico	112.4
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	8.64
Isótopo Estable	<sup>108</sup> a <sup>114</sup> Cd y <sup>116</sup> Cd
Estados de Oxidación	+2
Minerales	Greenockita, hawleyita, otavita, monteponita y cadmoselita.

Fuente: Emsley, 1998; Kabata-Pendias, 1992.

En la tabla 6 se cita el límite permisible y concentración crítica en suelo de cadmio. Su amplia utilización en la industria, hace que sea uno de los más frecuentes contaminantes del ambiente, siendo las siguientes fuentes antrópicas: minas y fundidoras metálicas, industria del plástico y microelectrónica, plantas incineradoras, aguas y lodos residuales, fertilizantes fosfatados, industria pirometalúrgica, combustión de combustibles fósiles (Ross, 1994). El Cd en suelos es uno de los más peligrosos, porque puede moverse desde el suelo hacia las plantas comestibles a través de la absorción de la raíz acumularse en sus tejidos y posteriormente ser incorporado a la cadena alimenticia y afectar a la salud humana.

**P L O M O (Pb).** Elemento frecuente en la litosfera y uno de los contaminantes que se encuentra más ampliamente distribuido en la naturaleza. Su contenido en la corteza terrestre es aproximadamente de 10 mg kg<sup>-1</sup>. El plomo puede encontrarse en diferentes minerales (Tabla 7). Su elevada resistencia a la corrosión le ha hecho encontrar numerosas aplicaciones en los procesos industriales. Las fuentes de contaminación por plomo son múltiples: fabricación de acumuladores eléctricos, baterías, la loza de barro vidriado cocida a baja temperatura, reactivos químicos, pinturas para incrementar su resistencia a la corrosión y a la acción de los ácidos especialmente al ácido sulfúrico (Albert, 1990; Kabata-Pendias, 1992).

**Tabla 7.** Principales características físicas, químicas y minerales en suelo de Plomo.

<b>P L O M O</b>	
Número Atómico	82
Peso Atómico	207.19
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	11.34
Isótopos	<sup>204</sup> Pb, <sup>206</sup> Pb a <sup>208</sup> Pb
Estados de Oxidación	+2, +4
Minerales	Galena, cerusita, boulangerita, anglesita, piromorfita y bournonita

Fuente: Emsley, 1998; Kabata-Pendias, 1992.

Es un metal pesado tóxico que se encuentra naturalmente en los suelos debido a que el material parental es abundante en este elemento. La tabla 5 cita el límite permisible y concentración crítica en suelo de plomo. El plomo es el menos móvil de los metales pesados en los suelos, generalmente se acumula en la superficie. El pH influye en su disponibilidad, cuando el pH aumenta la biodisponibilidad del plomo disminuye en el suelo. El plomo es de interés no solamente por su fitotoxicidad, sino porque al ser absorbido por las plantas se mueve en la cadena alimenticia.

**H I E R R O (Fe).** El Fe es el cuarto elemento más abundante de la corteza terrestre, constituyendo el 3.8%. Se presenta en dos estados de oxidación el Fe<sup>3+</sup> o férrico y el Fe<sup>2+</sup> o ferroso (Tabla 8). En el suelo existe en forma de óxidos e hidróxidos y puede ser quelado por la materia orgánica.

**Tabla 8.** Principales características físicas, químicas y minerales en suelo de Hierro.

<b>H I E R R O</b>	
Número Atómico	26
Peso Atómico	55.8
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	7.9
Isótopos	<sup>54</sup> Fe, <sup>56</sup> Fe, <sup>57</sup> Fe y <sup>58</sup> Fe
Estados de Oxidación	+2, y +3
Minerales	Goethita, hematita, siderita, lepidocrocita y magnetita.

Fuente: Emsley, 1998; Kabata-Pendias, 1992.

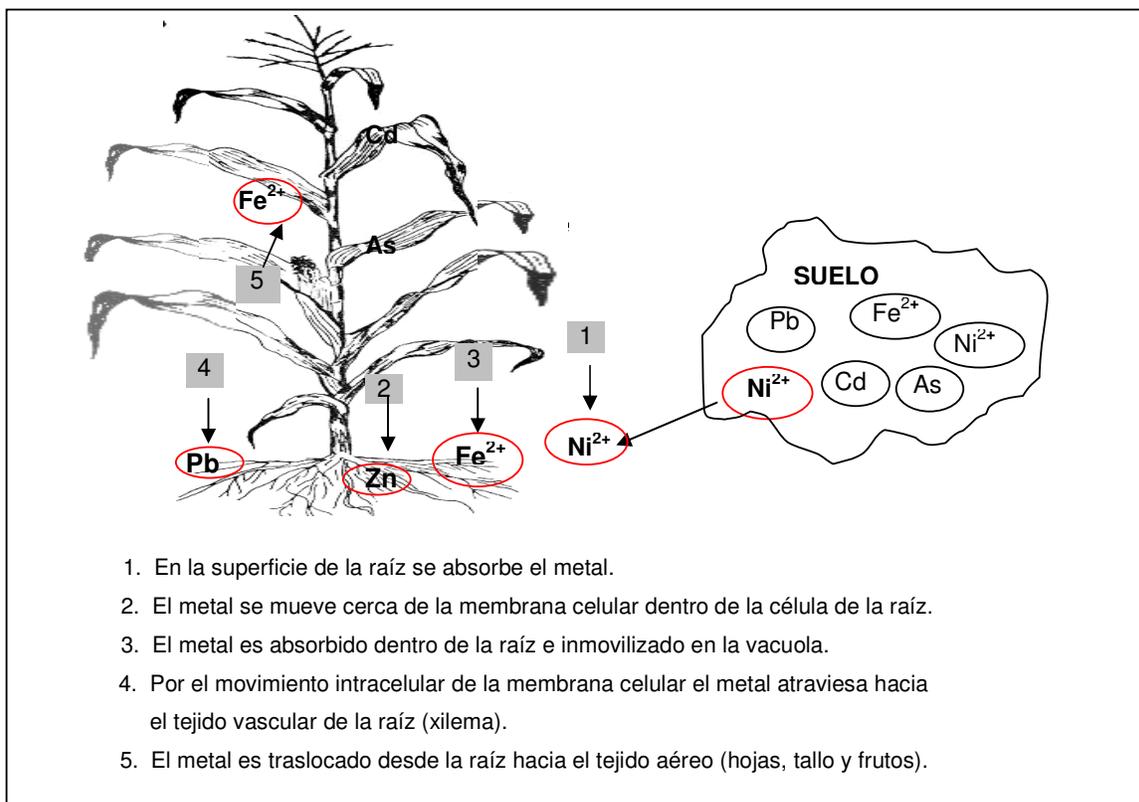
El exceso de otros minerales puede causar deficiencias de hierro por precipitación de éste en formas inaprovechables; por otra parte, también puede ocurrir toxicidad por hierro si los suelos en los que abunda se vuelven fuertemente ácidos (Kabata-Pendias, 1992). Muchos suelos cultivados tienen un bajo contenido de hierro disuelto en la solución del suelo y adsorbido en forma intercambiable.

## 4.2 PLANTAS

Las plantas se consideran sistemas abiertos a la comunicación positiva o negativa con el medio que les rodea y forman el primer eslabón de las cadenas tróficas en los ecosistemas. Su capacidad de movimiento les lleva fácilmente a encontrar el lugar de nutrición adecuado o evitar las situaciones desfavorables que les llevaría a la muerte. Una planta superior presenta órganos especializados: raíz, hoja y tallo. La *raíz* es el sistema de fijación donde se ancla al medio que la rodea, mediante su desarrollo continuo permite la exploración del suelo en busca del agua y de nutrimentos necesarios para su propia supervivencia; generalmente, en ella es donde se acumulan los contaminantes que se encuentran en el suelo. La *hoja*, es el sistema más elaborado y complejo del metabolismo vegetal, realiza las funciones de: respiración (intercambio de gases, oxígeno por dióxido de carbono), fotosíntesis (intercambio gaseoso de dióxido de carbono por oxígeno, para formar compuestos orgánicos y al mismo tiempo convierten la energía solar en energía química), y transpiración (es la pérdida de agua de la planta en forma de vapor). El *tallo* cumple la función de sostén mecánico, vía de transporte y distribución de los productos. Está constituido por el xilema, que distribuye el agua y los nutrimentos minerales; y el floema, que distribuye la materia orgánica elaborada por la fotosíntesis (Barceló, 1989).

El proceso de absorción que realiza la raíz, permite a las plantas extraer del suelo los elementos indispensables para su supervivencia, a excepción del carbono, hidrógeno y oxígeno que lo obtienen de la atmósfera (Figura 3). Para el desarrollo de las plantas, intervienen 60 elementos químicos, 16 son esenciales y se dividen en (9) macronutrimentos y (7) micronutrimentos (Tabla 9) (Buckman, 1993; Barceló, 1989).

Para cada uno de estos elementos químicos, la planta posee un mínimo, máximo y un óptimo de tolerancia. Su disponibilidad puede ser mínima y la planta no puede crecer o hay un límite de crecimiento; cuando existe un óptimo, permite el máximo de crecimiento. Los macronutrimentos y micronutrimentos de las plantas provienen de diversas fuentes, como son el aire, el agua y sólidos del suelo (Tabla 9) (Bartolini, 1990).



**Figura 3.** Absorción y acumulación de metales en las plantas (Lasat, 2000).

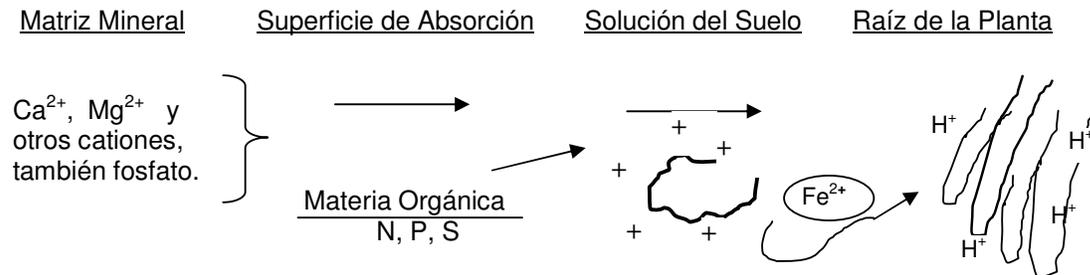
**Tabla 9.** Elementos esenciales macronutrientes y micronutrientes, forma química disponible, concentración de tejido seco en plantas.

<b>Macronutrientes</b>	Elemento químico	Forma química disponible para la planta	Concentración Tejido seco (mg kg <sup>-1</sup> )
<i>Generalmente del Aire y del agua</i>	Carbono	CO <sub>2</sub>	450,000
	Hidrógeno	H <sub>2</sub> O	60,000
<i>De los sólidos del suelo</i>	Oxígeno	O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	450,000
	Nitrógeno	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	15,000
	Fósforo	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2,000
	Potasio	K <sup>+</sup>	10,000
	Calcio	Ca <sup>2+</sup>	5,000
	Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	2,000
	Azufre	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1,000
<b>Micronutrientes</b>	Molibdeno	MoO <sub>4</sub>	0,1
<i>De los sólidos del suelo</i>	Cobre	Cu <sup>+</sup> , Cu <sup>2+</sup>	6
	Zinc	Zn <sup>2+</sup>	20
	Manganeso	Mn <sup>2+</sup>	50
	Boro	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	20
	Hierro	Fe <sup>3+</sup> , Fe <sup>2+</sup>	100
	Cloro	Cl <sup>-</sup>	100

Fuente: Bartolini, 1990; Buckman, 1993; Hopkins, 1995.

La solución del suelo se abastece por la desorción de los nutrientes retenidos sobre la superficie de las arcillas y de la materia orgánica; el abastecimiento de nitrógeno, fósforo y

azufre también se debe a la mineralización de la materia orgánica del suelo (Figura 4). En los ecosistemas hay adiciones y pérdida de nutrimentos. Los nutrimentos son depositados en el suelo y el ciclo interno de nutrimentos los conserva, pero la pérdida de los nutrimentos ocurre por lixiviación, erosión y pérdida de gases del nitrógeno y sus compuestos (Wild, 1993).



**Figura 4.** Formación de los nutrimentos en suelo y su transferencia hacia la raíz de la planta.

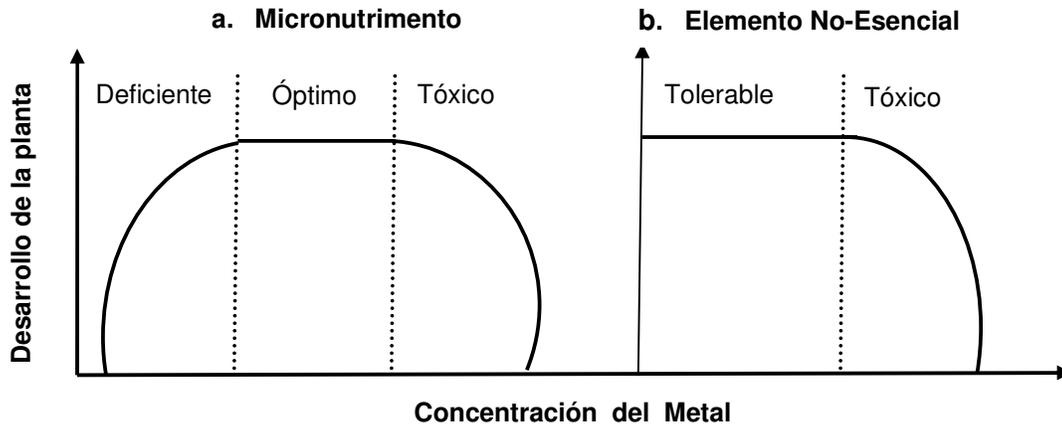
Las características de estos elementos indispensables para la planta se mencionan a continuación:

- **Esencial.** Las plantas lo requieren para sus procesos metabólicos o de regulación, sin que otro elemento pueda sustituirlo en sus funciones.
- **No-Esencial.** Cuando un elemento no presenta ninguna función biológica en la planta.
- **Macronutriente.** Son elementos que en general constituyen biomoléculas estructurales (proteínas, lípidos y carbohidratos). La planta los requiere en cantidades grandes que oscilan entre 1,000 a 450,000  $\text{mg kg}^{-1}$  en peso seco.
- **Micronutriente.** Son elementos que actúan como cofactores o forman parte de moléculas esenciales de gran importancia para la planta. Las plantas los requieren en cantidades bajas que oscilan entre 0.1 a 100  $\text{mg kg}^{-1}$  en peso seco (Tabla 9).

Se observa en la figura 5a que si la provisión de micronutrientes hacia la planta es inadecuada se presenta una **deficiencia** pero sigue desarrollándose y la producción es severamente reducida. En la región del **óptimo** hay producción adecuada en la planta. Por último, a partir de cierta concentración el micronutriente es **tóxico** y la planta muere. La figura 5b que representa la curva para un elemento no esencial en la región de **tolerable** indica que no hay efecto de la deficiencia con concentraciones bajas de los elementos; la producción no se afecta hasta cuando se ha alcanzado el límite más alto de concentración, después de lo cual los síntomas de la **toxicidad** ocurren de la misma forma que por el exceso de un micronutriente esencial y la planta muere (Alloway, 1990).

Todos los elementos disponibles del suelo que se encuentran en forma iónica soluble, o en

forma intercambiable con las partículas coloidales son absorbidos por las plantas. Las plantas presentan mecanismos de tolerancia frente a los metales. Ochaia (1987) los divide en cinco grupos: (a) la sustitución de los iones metálicos esenciales de biomoléculas y otras unidades funcionales, (b) bloqueo de biomoléculas de grupos funcionales esenciales, incluyendo enzimas y polinucleótidos, (c) modificación de la conformación activa de biomoléculas especiales como las enzimas y polinucleótidos, (d) rompimiento de la integridad de biomoléculas y (e) modificación de otros agentes biológicamente activos.

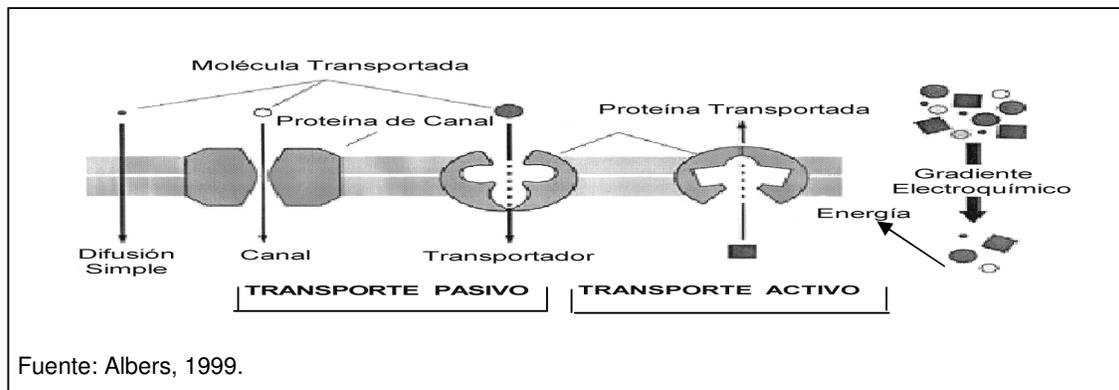


**Figura 5.** Curva típica de dosis-respuesta de micronutrientos y elementos no esenciales para plantas (Alloway, 1990).

#### 4.2.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE METALES A LAS PLANTAS

Los mecanismos de transporte de los metales a través de las células de la planta, son básicamente de dos procesos:

- **Transporte Pasivo.** No requiere ningún ingreso de energía metabólica, ya que es un proceso de difusión en el que las moléculas pasan hacia la membrana celular a favor de un gradiente de concentración (de una región de alta concentración a otra de baja concentración) o debido a un gradiente de potencial eléctrico (fuerza eléctrica). La suma de ambos gradientes constituye el gradiente electroquímico cuya fuerza determina la dirección e intensidad del flujo. Dentro del transporte pasivo intervienen dos procesos: la **difusión simple** es el movimiento cinético de moléculas que pasan a través de la bicapa lipídica de la membrana, sin que intervengan las proteínas transportadoras, de esta forma se difunden el  $O_2$ , el  $CO_2$ , el  $H_2O$ , la urea, etc. La **difusión facilitada** es el movimiento pasivo de moléculas a través de la membrana que involucra el uso de proteínas transportadoras específicas acopladas a una fuente de energía, como la hidrólisis de ATP (Adenosin Trifosfato) (Figura 6) (Fergusson, 1990).



**Figura 6.** Transporte pasivo y activo que presentan las plantas.

- Transporte Activo.** Se requiere de energía la cual es proporcionada por un gradiente iónico o por uso del ATP, el cual se hidroliza y con esa energía se bombean iones. La raíz actúa como electrodo de un ión selectivo, ya que en muchos casos la concentración del ión es más grande dentro de la raíz que por fuera. Una vez que está en contacto con ella, se fijan las cargas eléctricas de algunos transportadores químicos que le permiten acercarse hacia la epidermis externa de la raíz. La entrada de una especie de metal se realiza a través de la membrana dentro del sistema de la raíz, el metal es ayudado por proteínas que se enlazan a las especies de metales. Hay dos tipos de proteínas: de transporte y de canal. Las **proteínas de transporte** pueden actuar como traslocadores o como enzimas para facilitar la difusión de moléculas, estas proteínas se unen al soluto específico y cambian su estructura (primaria, secundaria, etc.) para desplazar el soluto en su interior, aumentando la rapidez de la reacción de modo que alcanza una velocidad máxima cuando la proteína de transporte está saturada. Las **proteínas de canal** forman poros que cuando están abiertos permiten la entrada de determinado soluto, el más indicado por tamaño o por carga (Figura 6).

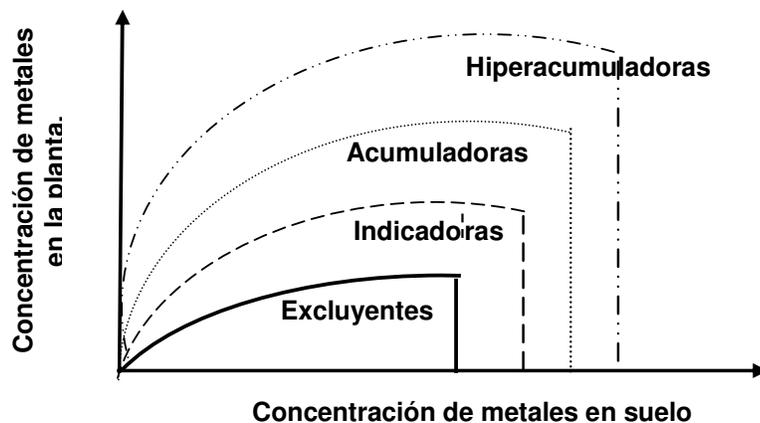
#### 4.2.2 PLANTAS CON DIFERENTES GRADOS DE TOLERANCIA A METALES

Muchas especies de plantas difieren en la sensibilidad para los metales pesados, pueden crecer y florecer en suelos ricos en metales tóxicos como el Se, Ni, Cr, Cd, Pb y otros metaloides como el As. Los metales son tomados por las raíces de las plantas debido a la selectividad normal (entrada de iones como nutrientes) de la membrana celular de la raíz. Hay muchas plantas que secuestran metales en sus raíces, previniendo la traslocación hacia el retoño/tallo. Tomsett and Thurman (1988) mencionan que los posibles mecanismos de tolerancia de metales en plantas son: **a)** enlace del metal con la pared celular, **b)** reducción del transporte a través de la membrana celular, **c)** afluencia activa, **d)** compartimentalización y

e) quelación.

Muchas de las plantas utilizan una o más de estas estrategias para evitar la toxicidad a metales. Con relación a lo anterior, Ross (1994) clasifica a las plantas en grupos, de acuerdo a sus estrategias de entrada del metal (Figura 7).

- **Bioindicadoras.** Plantas que retienen selectivamente un metal pesado y permiten así reconocer la presencia del mismo en un suelo; por ejemplo, *Polycarpaea spirostyles* y *Becium homblei* para el cobre, *Viola calaminaria* para el zinc, *Eriogonium ovalifolium* para la plata y especies de *Alyssum* para el níquel.
- **Excluyentes.** Plantas con entrada restringida de metales tóxicos o traslocación restringida dentro del retoño/tallo en un rango amplio de las concentraciones de metal en el suelo, estas plantas tienen una producción segura como alimento.
- **Indicadoras.** Plantas en las cuales la entrada y traslocación reflejan las concentraciones internas con las externas del metal en el suelo. Debido a esta propiedad, son utilizadas para la evaluación de contaminación en suelos. Ciertas plantas se desarrollan solamente en ciertos minerales específicos; por ejemplo, *Merceya latifolia* (musgo de cobre), suelos abundantes en cobre.
- **Acumuladoras.** Plantas que concentran activamente metales en sus tejidos.
- **Hiperacumuladoras.** Plantas en cuyos tejidos las concentraciones de metal pueden exceder las 1000 mg kg<sup>-1</sup>. Estas plantas son capaces de absorber a través de las raíces y transportar a sus partes aéreas concentraciones muy elevadas de metales; por ejemplo: *Thlaspi caerulescens* que según estudios de Reeves y Brooks (1983) acumula hasta 26 000 mg kg<sup>-1</sup> de Zn y 1 800 mg kg<sup>-1</sup> de Cd.



**Figura 7.** Las diferentes estrategias de absorción del metal en plantas (Adriano, 2001).

Hay plantas que son reconocidas por su capacidad para absorber y concentrar metales

tóxicos. Aproximadamente 400 especies hiperacumulan selectivamente el metal pesado y se utilizan como fitoremediadoras en zonas contaminadas. No son especies raras, la mayoría de los casos, son cultivos bien conocidos por todos, las cuales hiperacumulan metales; por ejemplo, *Heliantus annuus* que absorbe grandes cantidades de uranio, el género *Populus* (álamos) absorbe selectivamente níquel, cadmio, y zinc, la *Arabidopsis thaliana* cobre y zinc, *Thlaspi caerulescens* (Brasicáceas, coles) el cadmio y el zinc. Otras especies del género *Thlaspi* han demostrado su capacidad para acumular también plomo y cobre (Simon, 1998). El *Amaranthus*, es un hiperacumulador de plomo, uno de los contaminantes que se encuentran en mayor cantidad en suelos y además, muy difícil de absorber por los vegetales. Recientemente, fue descubierto un helecho *Pteris vittata*, planta hiperacumuladora de arsénico, la cual puede tolerar concentraciones de arsénico de 7 526 mg kg<sup>-1</sup> en suelo (Figura 8).



**Figura 8.** Ejemplar de *Pteris vittata*, helecho hiperacumulador de arsénico (Ma *et al.*, 2001).

Se sugirió que podría usarse como fitoremediador en sitios contaminados, lo más curioso es que crece mejor en suelos que contienen elevadas cantidades de arsénico que en los que carecen de él (Ma *et al.*, 2001). Se han encontrado especies tolerantes a metales tóxicos creciendo sobre suelos metalíferos, ellas poseen la variabilidad genética para la tolerancia que también se han encontrado en una pequeña proporción de individuos de poblaciones creciendo sobre suelos no contaminados (Ross, 1994).

#### **4.2.3 EFECTO DEL As, Cd, Pb y Fe EN PLANTAS**

El contenido de metales en los alimentos de origen vegetal puede acumularse en las partes comestibles de los cultivos dedicados al consumo humano. Esta concentración depende de muchos factores: condiciones ambientales, métodos de producción y procesado, lugar de origen del alimento, especialmente con relación a la composición del suelo.

**ARSÉNICO (As).** La alta afinidad del arsénico con los grupos tiol (-SH) determina serios trastornos en los procesos enzimáticos y en procesos metabólicos de las plantas. Provoca alteraciones en el crecimiento y en la concentración de calcio, potasio, fósforo y manganeso en la planta. La concentración de arsénico en cereales, vegetales y frutas está directamente relacionada con el nivel de arsénico en el suelo contaminado. En la tabla 10 se presenta el valor máximo permisible en grano (LFU, 1989), concentración crítica de Arsénico en planta (Kabata-Pendias, 1992) y límite máximo (NOM-187-SSA1/SCFI-2002). Restrepo (2007) considera que el **límite máximo permisible** es el nivel de concentración o cantidad de uno o más contaminantes, por debajo del cual no se prevé riesgo para la salud, el bienestar humano y los ecosistemas. El Codex Alimentarius (2001) considera al valor **límite máximo** a la cantidad establecida de aditivos, microorganismos, parásitos, materia extraña, plaguicidas, radionúclidos, biotoxinas, residuos de medicamentos, metales pesados y metaloides que no se deben exceder en un alimento, bebida o materia prima.

**Tabla 10.** Valor máximo permisible y concentración crítica de Arsénico en planta y grano.

Valor Máximo Permisible Grano <sup>a</sup>		Concentración Crítica Planta <sup>b</sup>
0.5	<b>As</b>	5 - 20
0.1	<b>Cd</b>	5 - 30
0.3	<b>Pb</b>	30 - 300

Fuente: <sup>a</sup>LFU, 1989; <sup>b</sup>Kabata-Pendias, 1992.

La **concentración crítica** en planta, la FAO (1995) determina que la concentración de nutrientes que se encuentren en los tejidos al 90 % debe tener un rendimiento o crecimiento máximo. Así también, Kabata-Pendias (1992) establece que es el nivel por encima del cual los efectos de toxicidad son probables. Clijsters and Van Assche (1985) señalan que la concentración tóxica en planta es el nivel por encima del cual inhibe de manera significativa la actividad metabólica, disminuye el crecimiento y desarrollo; además es probable que ocurran efectos de toxicidad en la planta sin provocar la muerte.

La toxicidad y biodisponibilidad (la facilidad con que ellos pasan dentro de la solución del suelo y así de este modo dentro de la cadena trófica) están fuertemente asociadas con sus estados de oxidación y especiación (la forma en que están presentes en el suelo). Alloway (1990) menciona que la entrada de arsénico por las plantas puede incrementarse a pH altos del suelo y en general las raíces contienen altos niveles de arsénico mayores que en tallos, hojas o frutos. Merian (1991) cita que los cereales en general acumulan concentraciones altas de arsénico, el valor máximo obtenido fue de 0.61 mg kg<sup>-1</sup>. Mientras tanto, la lechuga, col y tomate tienden a acumular pequeñas cantidades, cita un valor máximo de 0.14 mg kg<sup>-1</sup> de arsénico de

peso seco (Tabla 11).

**Tabla 11.** Valor mínimo y máximo de As, Cd, Pb y Fe en cereales, vegetales y plantas; y contenido normal de Fe.

Planta		Valor Mínimo	Valor Máximo
		(mg kg <sup>-1</sup> )	
<b>As</b>			
Cereales		0.001	0.61
Vegetales	Lechuga, col y tomate	0.01	0.14
<b>Cd</b>			
Cereales	Trigo	0.001	1.27
	Centeno	0.003	0.26
	Arroz	0.002	0.09
Vegetales	Lechuga	0.001	1.6
	Espinaca	0.019	2.76
	Apio	0.01	2
<b>Pb</b>			
Cereales	Trigo	0.004	0.42
	Centeno	0.01	1.46
	Arroz	0.01	1.0
Vegetales	Lechuga y col	0.001	6.1
	pepino y tomate	0.005	1.9
<b>Fe</b>			
Cereales	Trigo	31	35
	Centeno	35	100
	Arroz	20	31
Vegetales	Contenido Normal	50 - 300	

Fuente: Merian (1991); Zuang, (1982).

**C A D M I O (Cd).** Para las plantas, el cadmio no es esencial y es uno de los metales más tóxicos, es absorbido por ellas y tiende acumularse en sus tejidos provocando serios riesgos para el hombre. Su similitud con el Zn, le permite reemplazarlo, ser absorbido por la planta y desempeñar sus funciones. Por su alta toxicidad ocasiona serios trastornos en la actividad enzimática de la planta. Al Cd se le atribuye un marcado efecto en la reducción del crecimiento, la extensibilidad de la pared celular, la síntesis de clorofila, alteraciones en la inhibición de la fotosíntesis, en la asimilación de CO<sub>2</sub>, y en la apertura de estomas. La presencia de Cd puede interferir con la entrada, transporte y modificación en las concentraciones de Mn, Ca y K en la planta.

En suelos contaminados por Cd de origen inorgánico, tales como minas y fundidoras metalíferas, se acumula en las partes comestibles de vegetales. Existen otros factores adicionales que pueden causar su acumulación, estos son: el tipo de unidad de suelo, el valor de pH, genotipo de la planta, la capacidad de sorción del suelo, el uso de fertilizantes fosfatados que contienen Cd, el contenido de Cd en el suelo y la preexistencia de

contaminación por este metal (Merian, 1991; Kabata-Pendias, 1992; Godbold and Huttermann, 1985; Alloway, 1990). El genotipo de la planta (variedades de cultivos) difiere en su habilidad para absorber, acumular y tolerar metales pesados. Davis y Calton-Smith (1980) mostraron que la lechuga, espinaca, apio y calabaza tienden a acumular concentraciones altas de Cd en mayor medida que la papa y el maíz; mientras que los cereales acumularon pequeñas cantidades, citan que el valor máximo obtenido en trigo fue de  $1.27 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cd de peso seco (Tabla 11).

Prasad (1995) menciona que en suelos ricos en Cd, algunas plantas generalmente presentan estrategias para la acumulación y tolerancia de Cd u otros metales, muchas plantas utilizan una o más de ellas para evitar su toxicidad: **(a)** el metal es enlazado en la pared celular, (se ha encontrado evidencia en la pared del maíz); **(b)** el transporte disminuye a través de la membrana celular, los cationes para pasar a través de la membrana necesitan la ayuda de transportadores; **(c)** compartimentalización, en la vacuola de las células de la raíz de muchas especies, por ejemplo el Cd libre y complejo es secuestrado e inmovilizado en la vacuola y en el caso de moverse o pasar hacia otros compartimentos, necesita de *transportadores*, ver transporte activo; **(d)** quelación, algunos cationes libres en el citosol de la célula son muy dañinos, queladores parecidos a fitoquelatinas y metalotioninas, que son expresadas en respuesta a metales pesados ( $\text{Cd}_2^+$ ,  $\text{Pb}_4^+$ ) u oxianiones ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ), permiten a los cationes estar presentes en un estado inofensivo.

**P L O M O (Pb).** La concentración de plomo es frecuentemente alta en residuos mineros causando severos efectos fitotóxicos. Existen diferencias entre los distintos órganos para acumular metales pesados; el plomo suele tener una alta concentración en la raíz de los vegetales, baja concentración en el tallo y hojas, en flores o semillas es mucho menor. El plomo en la planta provoca inhibición del crecimiento, de la fotosíntesis y de la acción enzimática. Merian (1991) cita que los vegetales lechuga y col acumularon concentraciones altas de Pb, el valor máximo obtenido fue de  $6.10 \text{ mg kg}^{-1}$ . En tanto, el cereal del centeno tiende a acumular pequeñas cantidades comparadas con los vegetales, cita un valor máximo de  $1.46 \text{ mg kg}^{-1}$  de Pb de peso seco (Tabla 11).

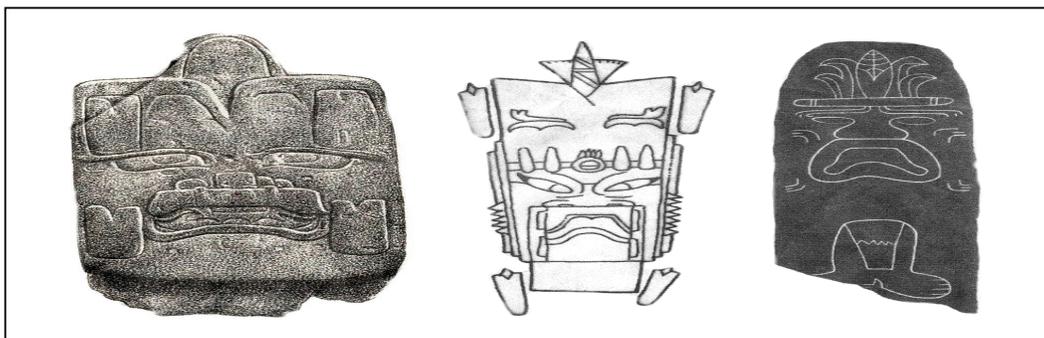
**H I E R R O (Fe).** El Fe es un metal esencial para todas las plantas, la concentración que representa toxicidad para las plantas es de 10 a 200 mg/l (Bowen, 1979). La importancia del hierro radica en que forma parte del sitio catalítico de muchas enzimas óxido-reductoras, actúa como activador enzimático en la síntesis de clorofila; es un factor necesario pero no forma parte de la molécula. El 75% del hierro está asociado a los cloroplastos. El Fe interviene en la síntesis de proteínas, acepta y dona electrones por lo que participa en reacciones redox. Los

síntomas de deficiencia de hierro son fácilmente reconocibles y muy específicos, la clorosis que se produce está restringida estrictamente a las hojas más jóvenes de la planta en crecimiento, sin evidentemente achaparramiento o necrosis. La disponibilidad de Fe hacia las raíces no se afecta solamente por el contenido en los suelos, también la influye el pH y el contenido de fosfato (Bidwell, 1979; Merian, 1991). La toxicidad de Fe es causada fundamentalmente por la elevada absorción del metal desde la solución del suelo, donde este metal se encuentra en altas concentraciones. Está relacionada con el estrés causado por la deficiencia de varios nutrientes, situación que reduce el poder de oxidación de las raíces. En plantas, gran parte del Fe se encuentra como componente estructural de las moléculas de porfirina: citocromo, leghemoglobina, hematina, ferricromo. También se encuentra en sistemas enzimáticos: catalasa, peroxidasa, nitrogenasa, síntesis de clorofila, etcétera.

### 4.3 MAIZ (*Zea mays*)

#### 4.3.1 ORIGEN DEL MAIZ

Excavaciones geológicas, arqueológicas y dataciones por el método del  $^{14}\text{C}$  realizadas sobre espigas de maíz encontradas en cuevas, indican que uno de los tipos de maíz primitivo era consumido en México, cuya fecha data entre 6 y 7 mil años. Posteriormente, ocurrió su dispersión que se llevó a cabo primero de México hacia Sudamérica, norte del continente y finalmente hacia Europa y Asia. Con base a ello, México es considerado centro de origen, dispersión, diversidad y domesticación del maíz. Constituyó el principal alimento desde mucho antes que los españoles llegaran al Nuevo Mundo. La cultura Olmeca, uno de los primeros pueblos americanos, fundó su existencia en el cultivo de la planta del maíz, creía que las fuerzas de la fertilidad se expresaban bajo la apariencia del grano, la mazorca o la planta. El dios Olmeca del maíz se representaba mediante estas partes del maíz, su imagen era una expresión de la potencia reproductora de la planta, metáfora de la germinación o la fertilidad (Figura 9).



**Figura 9.** Diferentes representaciones del dios olmeca del maíz en forma de la planta del grano de maíz.

Se observa en las dos figuras de la derecha, la parte superior de la cabeza sobresale la mazorca. Se han encontrado diversos dioses mexicas que en sus representaciones siempre llevan maíz, por lo general en la cabeza; ya sean mazorcas, granos u hojas de la planta y se mostraban en forma natural o idealizada (Castañeda, 1990; Florescano, 2003).

#### 4.3.2 CARACTERÍSTICAS TAXONÓMICAS DEL MAÍZ (*Zea mays*).

El maíz es una planta de la familia de las gramíneas, con tallo grueso y erguido, macizo y hueco, altura variable de 1.00 hasta 4.00 m, según las especies; las hojas son largas, planas y puntiagudas. El maíz es una especie monoica con inflorescencia masculina en racimos terminales (extremidad del tallo, agrupados en panículas) y las femeninas agrupadas en espigas axilares de algunas hojas, resguardadas por una vaina que se encuentran rodeada de brácteas (llamada mazorca con granos gruesos, generalmente). Las dos inflorescencias se ubican separadas dentro de una misma planta, por ello su polinización es fundamentalmente cruzada. La tabla 12 muestra la taxonomía, las diferentes formas de utilización para el consumo humano y animal y su uso industrial que es de importancia económica para la mayoría de los países que lo cultivan (Castañeda, 1990). Comparándolo con cualquier otro país, México los supera en la diversidad de razas y variedades, presencia endémica de sus parientes silvestres o *teocintles* que significa “**gran grano o grano divino**” (Salvador *et al.*, 1997).

**Tabla 12.** Taxonomía y diferentes formas de utilización del maíz.

<b>Taxonomía</b>	<b>Categoría</b>	<b>Carácter Distintivo</b>
Reino	Vegetal	Planta anual
Phylum	Tracheophyta	Sistema vascular
Subdivisión	Pterapsidae	Producción de flores
Clase	Angiosperma	Semilla cubierta
Subclase	Monocotiledónea	Cotiledón único
Orden	Graminales	Tallos con nudos prominentes
Familia	Graminae	Grano – cereal
Tribu	Maydeae	Flores unisexuales
Género	<b><i>Zea</i></b>	Único
Especie	<b><i>mays</i></b>	Maíz común
Formas de Utilización	<i>Consumo Humano:</i> Grano fresco y seco. <i>Consumo Animal:</i> El resto de la planta -tallo y hoja- como forraje.	
Uso Industrial	Extracción de maicena, sopas, aceite comestible, etc.	

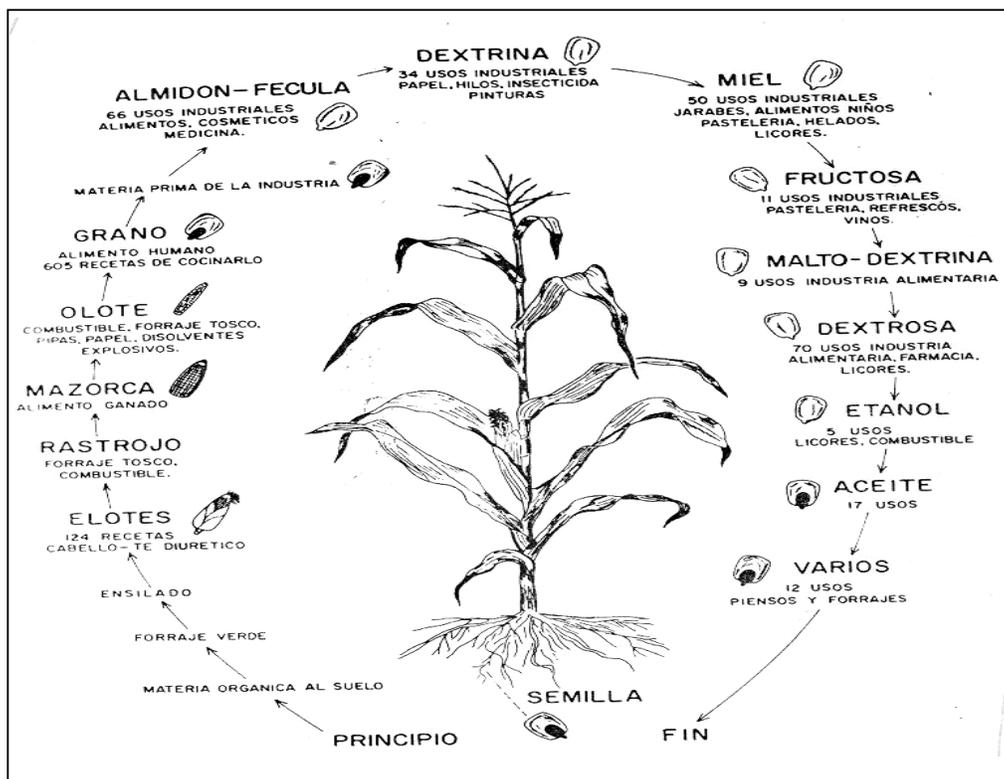
Fuente: Castañeda, 1990; Salvador *et al.*, 1997.

#### 4.3.3 LA PRODUCCIÓN, IMPORTANCIA ECONOMICA Y ADAPTABILIDAD DEL MAIZ.

Actualmente, el maíz se produce en 134 países del mundo, la mayor producción ocurre en los

Estados Unidos, la República Popular China y Brasil; México ocupa el cuarto lugar a nivel mundial. En México, el maíz es el núcleo de la economía campesina, base de la dieta popular y el cereal de mayor consumo. La mayor parte de la producción del maíz es para uso del grano como alimento humano en la fabricación de tortilla y/o la fabricación de harina de maíz nixtamalizado.

En nuestros días, el maíz es uno de los productos agrícolas más importantes, sus productos y derivados están relacionados directamente con la producción de una gran cantidad de productos como: alimento para ganado, papel, refrescos, caramelos, tintas, pegamentos, plástico biodegradable, productos de panificación, productos lácteos, salsas, sopas, pinturas, helados, alcohol, aceite comestible, cosméticos, sabores, y una lista casi interminable de productos (Figura 10). Hay más de 3,500 usos diferentes para los productos que se extraen del maíz, cada día se descubren nuevos usos. En muchas ocasiones los productos finales conseguidos son más ecológicos que otros derivados del petróleo (Castañeda, 1990; Salvador *et.al.*, 1997).



**Figura 10.** Diferentes productos industriales fabricados con maíz (Castañeda 1990).

El maíz se acerca a la cocina de miles de formas diferentes: cocido, asado, guisado, macerado, tostado, en harina, en tortilla, etcétera. Además, el maíz es un cereal que se adapta

ampliamente a diversas condiciones ecológicas y edáficas; así mismo, considerado un cultivo importante por las siguientes razones: (1) su alto rendimiento, (2) su contenido de nutrientes en forma concentrada, (3) su fácil transporte y manejo, le permite no tener muchas pérdidas de grano, (4) la mazorca está envuelta en hojas, protege los granos contra lluvia o algún depredador, (5) es fácil de cosechar, (6) existen cultivos con diferentes períodos de maduración y (7) se usa tanto en la alimentación humana y animal, como en la industria.

## 5. ANTECEDENTES

### 5.1 METALES EN SUELO, PLANTAS Y MAÍZ

Son diversos los trabajos publicados relacionados al análisis de metales pesados en suelo y plantas (e.g. Carrillo *et al.*, 2006; Haifeng Li *et al.*, 2005; Yanqun, Z *et al.*, 2004; Del Río *et al.*, 2002; Queirolo *et al.*, 2000; Shallari *et al.*, 1998). La mayoría evalúan metales como Pb, Cd, Zn, Cr y Cu; y metaloides como As. La mayoría reporta factores de transferencia y/o bioacumulación directamente de suelo a planta o de los diferentes componentes de la planta (raíz, tallo y hoja). A continuación se detallan algunos trabajos referentes al tema de interés.

En la mina de Chenzhou, China; Hongyu *et al.*, (2005) evaluaron las concentraciones de As, Cd, Zn, Pb y Cu en maíz y suelo en tres sitios donde por accidente se derramaron residuos mineros sobre tierras de cultivo: área minera Shizuyuan (SZY), área cubierta con derrames de jales mineros Guanyin Bridge (GYB), área ya limpia de los derrames de jales mineros Jintianchun (JTC) y consideraron una área control (REF). Los valores promedio de pH obtenidos en suelos de SYZ son principalmente ácidos (menores de 5.32), los del área de GYB y JTC son neutro (7.0) y el suelo del área control (REF) es ácido (4.7). Los resultados muestran que la concentración promedio de metales en suelo por área de muestreo fueron los siguientes: GYB>SZY>JTC>REF. Así también, el valor promedio de la concentración de metales en maíz y por sitio de derrame de residuos mineros, se citan en la tabla 13.

**Tabla 13.** Concentración promedio de metales en suelo y maíz en los sitios de estudio de la mina de Chenzhou, China.

Localidad	Pb	Zn	As (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu	Cd
Guanyin Bridge (GYB)	1088.3	1000.71	709.29	135.83	7.57
Shizuyuan (SZY)	751.98	855.44	459.02	174.03	6.77
Jintianchun (JTC)	321.11	416.61	192.49	72.18	2.7
Área Control (REF)	60.49	140.48	96.92	25.95	2.08
	<b>Maíz</b>				
Shizuyuan (SZY)	1.91	88.79	0.21	10.1	0.47
Guanyin Bridge (GYB)	0.29	51.57	1.48	6.71	0.03
Jintianchun (JTC)	0.18	41.73	0.12	2.43	0.05
Área Control (REF)	La concentración de metales no está disponible en el maíz				

Cui *et al.* (2004) evaluaron el contenido de metales de Cd, Pb, Zn y Fe en suelo y las plantas *Sonchus oleraceus* L., *Amaranto* L., *Brassica juncea*, *pekinensis* y *campestris*, *Ipomea batatas* y *acuática*, *Apium graveolens* y *tuberosum*, *Benincasa hispida*, *Kalanchoe laciniata*. Se calcularon los factores de transferencia (FT) del sistema suelo-planta. El área de estudio se localiza cercana a la fundidora de Nanning al sur de China, seleccionándose tres áreas de estudio: localidad 1 (a 1500 m) y localidad 2 (a 500 m) áreas contaminadas de la fundidora y la localidad 3 (a 50 km, área no contaminada). Los resultados en la concentración promedio en suelo y planta de las dos áreas (contaminadas y control) fueron: Cd 0.87, 22.06, 0.12 y 0.15, 0.24, 0.02 mg kg<sup>-1</sup>, Zn 44.88, 596.78, 29.7 y 8.40, 11.20, 3.70 mg kg<sup>-1</sup>, Pb 73.67, 991.59, 16.1 y 0.45, 3.78, 0.03 mg kg<sup>-1</sup> y Cu 4.01, 38.97, 10.35 y 0.48, 0.76, 0.38 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. De acuerdo a los resultados, los factores de transferencia (FT=concentración del metal en el tejido de la planta / concentración del metal en suelo) calculados en este estudio para Cd, Pb, Zn y Cu de las plantas en las dos áreas contaminada y control, se presentan en la tabla 14.

**Tabla 14.** Factores de Transferencia de metales en suelo y planta (parte comestible) del área de estudio de Nanning, China.

Planta	Factor de Transferencia			
	Cd	Pb	Zn	Cu
	<i>Área Contaminada</i>			
<i>Ipomoea acuática</i> Forsk	0.057	0.031	0.064	0.049
<i>Ipomoea batatas</i>	0.073	0.170	0.084	0.350
<i>Amaranto</i> L.	0.493	0.230	0.061	0.049
<i>Sonchus oleraceus</i> L.	1.825	0.008	0.507	0.082
<i>Apium graveolens</i> L.	0.439	0.011	0.162	0.097
<i>Zingiber officinale</i> .	0.099	0.006	0.150	0.132
<i>Brassica campestris</i> var. <i>parachinesis</i>	0.152	0.011	0.104	0.051
<i>Brassica juncea</i> L.	0.073	0.170	0.046	-
	<i>Área Control</i>			
<i>Benincasa hispida</i>	0.559		0.187	0.057
<i>Kalanchoe laciniata</i>	0.289	0.004	0.139	0.117
<i>Apium tuberosum</i>	0.178	0.004	0.139	0.044
<i>Brassica pekinensis</i>	0.031	0.001	0.130	0.020
<i>Brassica juncea</i> L.	0.086	0.002	0.064	0.029
<i>Brassica campestris</i> var. <i>parachinesis</i>	0.116	0.005	-	0.037

Los valores (mayor y menor del área contaminada y control) del FT para el Zn (0.507 - 0.046) (0.187 - 0.064) fueron en general ligeramente más bajos que los de Cd (1.825 - 0.057) (0.559 - 0.031), pero superiores a los de Pb (0.230 - 0.006) (0.005 - 0.001). Los valores del FT de Cu (0.350 - 0.049) (0.117- 0.020) estuvieron dentro del rango de variación y fueron similares a los de Zn (0.507 -0.046) (0.187 - 0.064).

Youn-Joo (2004) determinó la influencia en la germinación de las semillas y la biodisponibilidad

de Cd en suelos y cuatro especies de plantas cultivadas: maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*), pepino (*Cucumis sativus*) y sorgo, (*Sorghum bicolor*). Calculó la biodisponibilidad en planta utilizando el factor de bioacumulación (FBA: concentración de Cd en planta  $\text{mg kg}^{-1}$  de tejido seco / concentración de Cd en suelo  $\text{mg kg}^{-1}$  en peso seco). Las muestras de suelo fueron colectadas en Ahn (Seul, Corea). Algunas propiedades fisicoquímicas y concentración de Cd obtenidas del suelo se dan a continuación: pH 4.3, materia orgánica 0.3 a 0.08%, arena 59%, arcilla 21%, clase textural marga arenosa y la concentración total de Cd (no detectada, límite de detección de 0.028  $\text{mg/l}$ ). Se realizaron pruebas de toxicidad aguda para determinar la sensibilidad de las especies de plantas en estudio, utilizando concentraciones de Cd en suelo de 0, 40, 80, 160, 320, y 640  $\text{mg kg}^{-1}$ . Los resultados de NOAEC, (concentración del efecto adverso no observado) en sorgo fueron de 20  $\text{mg kg}^{-1}$ , 40  $\text{mg kg}^{-1}$  en pepino, <40 y 40  $\text{mg kg}^{-1}$  en trigo y maíz de 160  $\text{mg kg}^{-1}$  para tallo y raíz. La concentración eficaz (CE50) en sorgo fue de 61 y 39  $\text{mg kg}^{-1}$ , pepino de 88 y 102  $\text{mg kg}^{-1}$ , trigo de 113 y 98  $\text{mg kg}^{-1}$  y maíz de 268 y 208  $\text{mg kg}^{-1}$  para tallo y raíz, respectivamente. Los resultados fueron utilizados en la germinación de la semilla y crecimiento de la planta (tallo y raíz). Los valores de (CE50) para sorgo, pepino, trigo y maíz estuvieron en el rango de 22-35, 88-102, 98-113 y 208-265  $\text{mg kg}^{-1}$  de Cd, respectivamente. La biodisponibilidad y transporte del Cd fue observada en todas las plantas, el contenido de Cd en los tejidos de todas las plantas se incrementa con la concentración del Cd en el suelo.

En Chile (región de Antofagasta) Queirolo *et al.*, (2000) determinaron concentraciones de Pb, Cd y As en vegetales: haba (*Vicia faba*), maíz (*Zea mays*), papa (*Solanum tuberosum* L.), alfalfa (*Medicago sativa* L) y cebolla (*Allium cepa* L.) seleccionados por ser la base de la nutrición de esta región y por la importancia a la salud humana. Los sitios de muestreo fueron: Talabre, Socaire y Yerbas Buenas, Cuenca de Atacama y Caspana. Para Cd, Pb y As fueron utilizados estándares de referencia de fruta cítrica NIST 1572 y harina de arroz NIST 1568. En general, todos los vegetales en estudio en todas las localidades tuvieron una concentración alta de Pb, piel de papa en Socaire (0.094  $\text{mg kg}^{-1}$ ) seguido por haba (0.0392  $\text{mg kg}^{-1}$ ) y alfalfa (0.0254  $\text{mg kg}^{-1}$ ) en Caspana y maíz en Socaire (0.0241  $\text{mg kg}^{-1}$ ); sin embargo, en Yerbas Buenas la concentración de Cd es casi el doble que la de Pb, la tendencia del Cd y Pb es de acumularse en la piel de papa, mientras que en haba fue en las partes comestibles y en Pb la tendencia fue Caspana > Talabre > Socaire (0.0392, 0.0196 y 0.009  $\text{mg kg}^{-1}$ , respectivamente). Posiblemente la entrada del plomo se deba a condiciones anaerobias, pH bajo (6.7), niveles orgánicos bajos de 0.8% y baja concentración de fosfato 1.8  $\text{mg kg}^{-1}$ . La concentración de As en maíz de Socaire fue de 0.184  $\text{mg kg}^{-1}$  y en papa 0.864  $\text{mg kg}^{-1}$ , siendo buenos bioacumuladores de este metaloide.

## 5.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL CONTENIDO DE METALES EN EL ESTADO DE GUERRERO

Armienta *et al.* (2003) evaluaron concentraciones totales y solubles de Zn, Pb, As y Fe en los jales de El Fraile, Taxco. Los promedios en las concentraciones totales y solubles de Zn (13,062 y 37 mg kg<sup>-1</sup>), As (1,964 y 0.4 mg kg<sup>-1</sup>), Fe (13,445 mg kg<sup>-1</sup> y el soluble no detectable) y Pb (13,493 y 0.5 mg kg<sup>-1</sup>) fueron encontrados en muestras del Grupo I (se distinguen por su color blanco predominante) con valores de pH cercanos a neutrales de 6.7 y 7.0 y la conductividad más baja de 2,215 y 2,225, respectivamente. Los principales minerales identificados en el Grupo I son la calcita como la fase predominante y la pirita en un contenido bajo. Las muestras del Grupo II (se distinguen por su color rojo marrón) no presentaron estos minerales y el cuarzo era la fase predominante. Las muestras del Grupo II, presentaron promedios de concentraciones totales y solubles en Zn (1,045 y 457 mg kg<sup>-1</sup>), As (571 y 13.4 mg kg<sup>-1</sup>), Fe (9,275 y 1,843 mg kg<sup>-1</sup>) y Pb (4,089 y 2.4 mg kg<sup>-1</sup>), respectivamente. Los valores de pH se encontraron desde 2.3 hasta 2.9, y la conductividad de 2,615 hasta 5,510  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El contenido soluble más alto del metal encontrado en grupo II estaba sobre los estándares internacionales del agua potable (As = 0.01mg/L, Pb = 0,01 mg/l y Zn = 3 mg/l). Los contenidos solubles de Zn y Pb aunque menores en el Grupo I que en el Grupo II superaron los estándares internacionales del agua. La oxidación de los minerales del sulfuro se deduce de las muestras con valores de pH bajo (ácidos) del Grupo II, que alternadamente tienen las concentraciones más altas de metales disueltos.

Armienta *et al.*, (2004) evaluaron los metales de Pb, Fe, Zn, Cu y As en muestras de agua, jales y sedimento. Las muestras de agua se obtuvieron a lo largo del río Taxco a cada 70m y en dos estaciones del año, estación seca (Febrero 2000) y en la temporada de lluvias (Octubre 2000). La mineralogía de los jales presenta una composición heterogénea, abundancia de óxidos en la mayoría de las muestras. Los óxidos de Fe, presentes incluyen: hematita y goetita, jarosita, algunas magnetitas y en menor cantidad pirita y cristales de calcopirita encontrados en cristales de cuarzo. Las muestras de jales tenían un pH ácido entre 2.50-4.16, Conductividad Eléctrica de 4,080  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y altos contenidos de sulfatos hasta 25,730 mg kg<sup>-1</sup>. Altas concentraciones de Pb (hasta 2,750), Zn (hasta 690), Cu (hasta 35.5), As (hasta 3,530) y Fe (hasta 18,400) (mg kg<sup>-1</sup>). Debido a su toxicidad y alta concentración, Pb y As puede ser un peligro ambiental en esta área. Por otra parte, el peligro ambiental es relacionado con la movilidad tóxica del elemento, Pb puede ser considerado como un elemento de baja movilidad en los jales puesto que puede ser adsorbido en los óxidos del Fe y Mn. Las concentraciones obtenidas en las muestras de los sedimentos alcanzaron altos niveles en el área de estudio: Pb (716-5,280 mg kg<sup>-1</sup>), Zn (5,200-33,500 mg kg<sup>-1</sup>) y Fe (13.8-18.9%).

Talavera *et al.*, (2005) evaluaron concentraciones totales y solubles de Ag, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, V, Zn y As en jales, El Fraile, La Concha, El Solar, Guerrero I y II, Los Jales y un terrero San Antonio. La mineralogía del área de estudio, presenta una gran heterogeneidad. Las fases primarias están dominadas en gran parte por el cuarzo y los fragmentos de rocas con escasos feldespatos, barita y ferromagnesianos. La calcita solo ha sido reconocida en los jales menos oxidados. Los sulfuros primarios presentes son la pirita y esfalerita con escasa calcopirita, galena, pirrotita, sulfosales de plata y arsenopirita. Las fases secundarias incluyen la calcocita, yeso, basanita, eponita, hexahidrita, jarosita, hematita, keoheita, nimita, hetaerolita, smithsonita, bernalita, rozenita, pickeringita, escorodita; como también, precipitados amorfos y criptocristalinos y oxihidróxidos de hierro pobremente cristalizados. Todos los depósitos de jales y terreros presentan altas concentraciones totales de Ag, Cd, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn y As, todos se encuentran con algunos órdenes de magnitud por encima de los niveles regionales de fondo de los suelos de cultivo. La zona de La Concha contiene altas concentraciones totales de Ag, Cd, Cu, As, Mn, Zn y Pb de 50, 432, 763, 3 035, 4 609, 8 178 y 21 700 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. En la zona de San Antonio las concentraciones totales de Cd, Cu, As, Mn, Zn, Pb y Fe fueron 296, 451, 2 460, 2 765, 9 862, 13 098 mg kg<sup>-1</sup> y 13.5%, respectivamente. Los valores obtenidos de pH son muy variables de 1.5 (altamente ácidos) a 8.4 (básicos).

Talavera *et al.*, (2006) evaluaron lixiviados en relaves de la mina El Fraile en Taxco, Guerrero. Los lixiviados se utilizan como agua de uso doméstico. Seleccionaron ocho muestras de los sitios representativos (JF-01-JF-8), fueron elegidos en función a su volumen de descarga y su uso. De ellas, evaluaron parámetros físico-químicos, iones mayores y concentraciones de metales. Los parámetros físico-químicos son: pH 6.3-7.7 (2.4-2.5), Eh 76-348, (655-740) (mV), Conductividad Eléctrica 1.0-4.9 (6.5-21.0) (mS/cm), TDS (Sólidos Disueltos Totales) 537-7653, (12628-59185) mg l<sup>-1</sup>; y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 164-598 mg l<sup>-1</sup>, (no hubo valor de la muestra JF-05). Los iones mayores son: SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 280-5404, (8411-29500) mg l<sup>-1</sup>; Cl<sup>-</sup> 6.7-18.5, (19.0-23.0) mg l<sup>-1</sup>; Ca<sup>2+</sup> 152-562, (388-441) mg l<sup>-1</sup>; Mg<sup>2+</sup> 36-764, (420-2733) mg l<sup>-1</sup>; Na<sup>+</sup> 9.2-36.1, (23.4-26.1) mg l<sup>-1</sup> y K<sup>+</sup> 3.0-40.5, (3.6-8.0) mg l<sup>-1</sup>. Las concentraciones de Pb fueron de <0.01-<0.09, (0.12-0.35); Fe 0.02-17.5, (402-2352); Mn 0.1-2.4, (100-732); Zn <0.025-4.5, (104-1465) y As <0.010-1.3, (10.0-12.0) mg l<sup>-1</sup>. Todos los valores entre paréntesis son de la muestra ácida JF-05 (se forma por una acumulación superficial y esta dada por la interacción de agua meteórica con residuos durante la época de lluvias).

Romero *et al.*, (2008) realizaron un estudio geoquímico comparativo en jales ubicados en cuatro regiones mineras de México. Nacozari-Sonora (Jales Depósito III) (depósito de sulfuros de Cu tipo pórfido cuprífero), con valores de pH 3.0, Conductividad Eléctrica 2490-12025 μS/cm (intervalo de valores); Santa Bárbara-Chihuahua (Jales Colorados) (vetas hidrotermales

con sulfuros de Pb-Zn- Cu), con valores de pH 8.4, CE 55-1592  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (intervalo de valores); Zimapán-Hidalgo (Jales La Compañía) (“skarn” con sulfuros de Pb-Zn-Ag) con valores de pH 2.6, Conductividad Eléctrica 2570-4130  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (intervalo de valores); y Taxco, Guerrero (Jales Guerrero) (vetas hidrotermales con sulfuros de Pb-Zn), con valores de pH 2.8, CE 2210-7310  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (intervalo de valores). Los principales sulfuros metálicos de la mena presentes en Zimapán y Santa Bárbara son: la galena, la esfalerita, la arsenopirita y calcopirita, en Taxco los tres primeros sulfuros citados anteriormente (no se reportaron los sulfuros del cobre). Por último, los de Nacozari son la calcopirita, calcosita y en menor contenido la esfalerita, hay ausencia de galena y minerales de arsénico. La tabla 15 presenta las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) analizados (As, Pb, Fe, Cu y Zn).

**Tabla 15.** Concentración total de EPT en jales en cuatro regiones mineras de México.

Regiones Mineras	<i>Elementos Potencialmente Tóxicos</i>				
	<b>As</b>	<b>Pb</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>
		<i>(mg kg<sup>-1</sup>)</i>			<i>(%)</i>
Nacozari, Sonora	8.9	<20	91	535	6.8
Santa Bárbara, Chihuahua	1140	6669	12531	851	3.4
Zimapán, Hidalgo	12735	2034	2982	600	16.5
Taxco, Guerrero	585	1479	460	72	9.4

Romero y Gutiérrez (2010) realizaron un estudio geoquímico y mineralógico en jales de dos zonas mineras, sur y centro de México. Los yacimientos minerales importantes en esta Unidad Minera del Sur, son vetas epitermales con sulfuros de Pb y Zn. Los sulfuros metálicos reportados son pirita, esfalerita, galena y arsenopirita. Los minerales transparentes más abundantes son cuarzo, calcita y feldespastos potásico. Los valores de pH son de 2.4-7.8 (ácidos a neutros). En la Unidad Minera del Centro de México los sulfuros metálicos reportados son pirita, esfalerita, galena, calcopirita, argentita y arsenopirita. Los minerales de ganga se reportan calcita, cuarzo, wollastonita, grosularita y damburita. En esta unidad los valores de pH son de 6.5-8.2 (neutros y ligeramente básicos). Las concentraciones totales de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) que caracterizan a las muestras de jales de las dos Unidades Mineras, Sur y Centro; se presentan en la tabla 16.

**Tabla 16.** Concentración total de EPT en jales de dos Unidades Mineras, sur y centro de México.

Elemento	Unidades Mineras	
	Sur	Centro
	<i>(mg kg<sup>-1</sup>)</i>	
As	140 - 3627	160 - 643
Ba	0.2 - 43	7.7 - 29
Cd	0.5 - 338	25 - 434
Cr	9.3 - 46	<5.0 - 16
Hg	<5.0 - <5.0	<5.0 - <5.0
Ag	4.8 - 48	<4.0 - 109
Pb	148 - 1931	300 - 10900
Se	<4.5 - 16	<4.5 - 68
Be	<6.0 - 8.9	<6.0 - <6.0
Ni	Oct-29	<4.2 - 8.8
Tl	<1.5 - <1.5	<1.5 - <1.5
V	Oct-40	7.2 - 30
Cu	0.002 - 0.031	0.02- 1.553
Zn	0.15 - 3.109	0.021 - 3.86
Fe	6.727 - 35.71	2.36 - 5.16

## **6. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

### **6.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA**

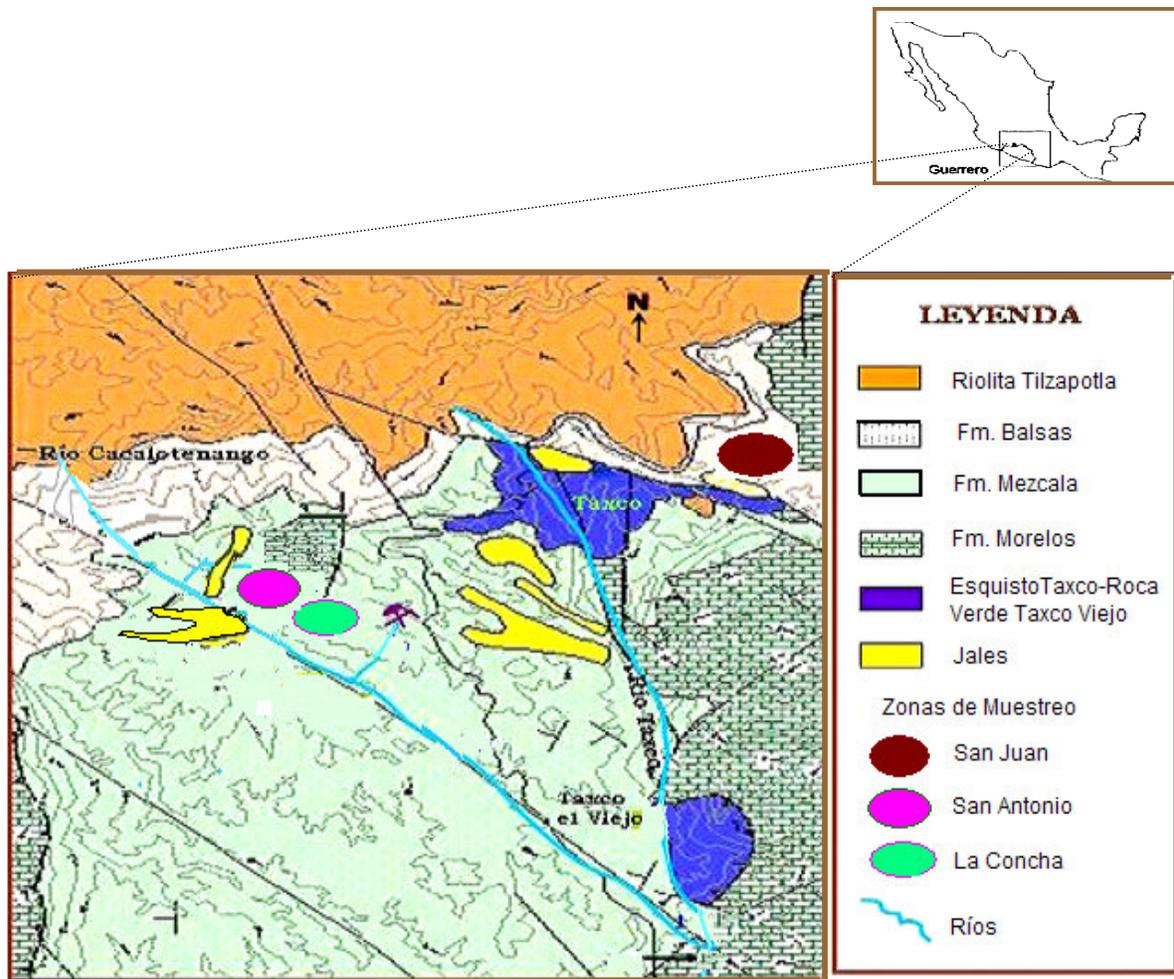
En la parte meridional de la República Mexicana se localiza el estado de Guerrero, entre los paralelos 16°17' y 18°59' de latitud norte y 98°04' y 102°10' de longitud oeste respecto al meridiano de Greenwich. Tiene una superficie de 63,796 km<sup>2</sup> y ocupa el 14° lugar en relación con las demás entidades federativas, abarca el 3.3% del territorio nacional. Colinda con cinco estados: al norte con México y Morelos, al noroeste con Puebla, al este con Oaxaca, al noroeste con Michoacán y al sur con el Océano Pacífico. La región de Taxco de Alarcón, se localiza en la parte norte del estado, la extensión territorial que ocupa es de 752.61 km<sup>2</sup>, sus poblaciones más importantes son: Taxco, Xochula, Hueymatla, Cacalotenango, El Fraile, Santa Rosa, Taxco El Viejo, Puente Campuzano y Huahuaxtla (Consejo de Recursos Minerales, 1999; Figueroa, 1980).

El Distrito minero de Taxco se localiza en la parte norte de estado de Guerrero y al suroeste de la Ciudad de México. Taxco se caracteriza por una gran tradición minera y que ha sido una de sus principales actividades productivas que data desde la época de la conquista. Además, es considerado uno de los distritos mineros más antiguos de la República Mexicana, y es uno de los más importantes productores de metales preciosos, plata y oro; como lo es para los metales base (Pb, Zn, y Cu).

### **6.2 GEOLOGÍA**

La zona de estudio forma parte del Terreno Mixteco y se ubica dentro de la plataforma Guerrero Morelos. En el área se reconocen las siguientes formaciones geológicas: Esquisto Taxco y Roca Verde Taxco Viejo, Formación Morelos, Formación Acuitlapán, Formación Mexcala, Formación Balsas y Formación Riolita Tilzapotla (de Cserna, Z. y Fries, C. 1981).

El área de estudio, zona control (San Juan) y minera (San Antonio y La Concha) se localizan dentro de la Formación Balsas y la Formación Mexcala, respectivamente (Figura 11).



**Figura 11.** Localización geológica, Formación Mexcala y sitios de muestreo de zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.

**Formación Balsas.** Fries (1960) propuso el nombre de “Grupo Balsas” y Cserna (1965) denominó Formación Balsas a un grupo de rocas que comprende a varios tipos litológicos locales de espesor variable, que se presentan en la cuenca hidrológica del Río Mexcala-Balsas en el centro austral y el suroeste de México. Está constituida dentro de la región de la Hoja Taxco principalmente por conglomerado, arcosas, tobas, limonitas y, en menor grado, derrames de andesita y basalto de olivino y caliza de agua dulce. Se encuentra ampliamente distribuida en la mayor parte de la región, excepto en la parte suroccidental de la Hoja Taxco.

La litología característica del Grupo Balsas está constituida por rocas como evaporitas, sedimentos terrígenos continentales, conglomerados de grano grueso, tobas y corrientes lávicas en estratos que varían en espesor desde algunos centímetros (principalmente limonitas) hasta algunos metros (principalmente conglomerados) (Campa y Ramírez, 1979).

Por otro lado, Alaniz-Álvarez et al. (2002), en el área de Taxco, reconocen las diferentes unidades sedimentarias (previamente incluidos por Fries), separados por andesitas e ignimbritas de edades comprendidas entre 33 a 38 Ma. También, estos autores describieron el mencionado "conglomerado rojo" (mencionado anteriormente por Edwards (1955) y Fries (1960)) en el sector de Acamixtla-Taxco. En el área de Taxco, la unidad geológica del Grupo Balsas, tiene una edad comprendida entre Cretácico inferior al Oligoceno (Morán-Zenteno et al, 1999).

**Formación Mexcala.** Fries (1960) propuso el nombre de esta formación, para describir una secuencia rítmica de lutitas y areniscas que afloran en los alrededores del poblado de Mexcala. La formación se compone de una alternancia de lutitas y areniscas. En su base, son comunes las intercalaciones de calizas arcillosas, margas y lutitas calcáreas. La edad de la Formación Mexcala, fue establecida por Fries (1960) como Turoniano-Senoniano basado en dataciones paleontológica, entre ellos amonitas y pelecípodo. Estudios más recientes de la zona de estudio han sugerido que la edad de esta formación pudiera ser más antigua (Cenomaniano Temprano). Garibay et al., (1998), determina una edad del Turoniano con base a datos paleontológicos, inoceramidos (*Mollusca Bivalvia*).

### 6.3 CLIMA

La zona de estudio, por su ubicación geográfica dentro del estado de Guerrero, se localiza bajo la influencia del tipo de clima dominante **Acw**, que pertenece al grupo de semicálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 21.2 °C con máximas de 27°C y mínimas de 14°C, en los meses de marzo a junio y de diciembre a febrero, respectivamente. La precipitación media anual varía entre 1000 y 1200 mm, la época de lluvias aparece en los meses de junio a octubre (SSP, 1981). La tabla 17 presenta algunos datos de las estaciones climatológicas más cercanas a la zona de estudio.

**Tabla 17.** Datos climatológicos de la estación cercana a la zona minera de estudio.

Estación Climatológica	Teloloapan		Taxco	
	Latitud N	Longitud O	Latitud N	Longitud O
Coordenadas	18° 22' 11"	99° 52' 05"	18° 32' 00"	99° 37' 00"
Altitud (msnm)	1 558		1 654	
Temperatura Máxima Anual (°C)	28.2		26.8	
Temperatura Media Anual (°C)	21.8		20.9	
Temperatura Mínima Anual (°C)	15.3		15	
Precipitación Máxima Anual (mm)	1 164.8		1 220.9	
Número de Días con Lluvia Anual	96.4		108.1	

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (2000).

## 6.4 VEGETACIÓN

En el área de estudio, el tipo de vegetación predominante es la Selva Baja Caducifolia, caracterizada por el cambio de follaje en la temporada de secas. Siendo presente la Familia Leguminosae, cuyas especies características son lysiloma, bahamensis y xotermani. En las zonas altas o templadas la vegetación está representada por bosque de coníferas, un tanto mixto y que son los más extendidos: pino, pino-encino (compuestos por diferentes especies), pino-oyamel, encino, juníperos; con una altura de 5 a 20 m o un poco más (SECOFI, 1999).

## 6.5 FISIOGRAFÍA E HIDROLOGÍA

En el estado de Guerrero se presentan dos sistemas de topofomas: Septentrional derivado de la cordillera Neovolcánica y el Meridional compuesto por la Sierra Madre del Sur. En este último sistema se localiza la zona de estudio.

**Sierra Madre del Sur.** Las elevaciones más pronunciadas se encuentran en la parte norte de Taxco alcanzando los 2400 msnm y las de menor elevación se localizan en la parte sur del estado, estando a nivel del mar. En el área de estudio se localizan dos ríos importantes, Taxco y Cacalotenango, los cuales tienden a drenar de Norte a Sur y de Noroeste a Sureste, respectivamente (Figura 11).

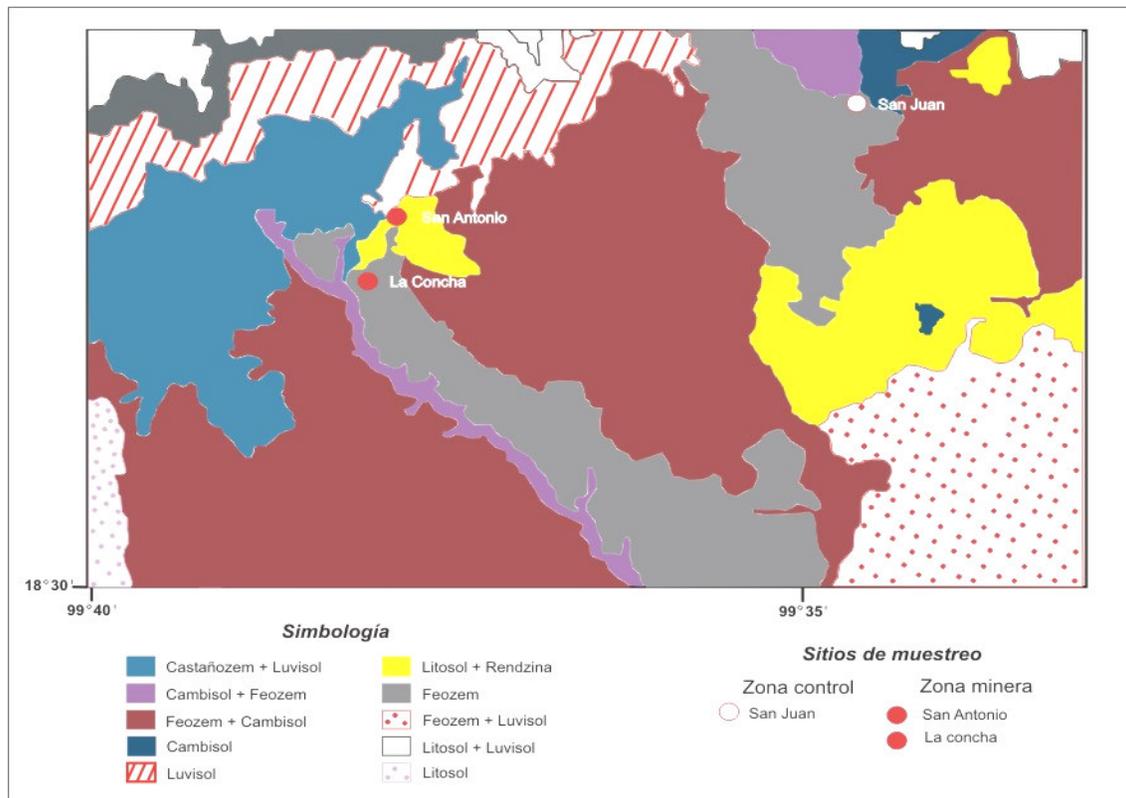
## 6.6 SUELO

Las unidades de suelo características de cada una de las zonas de estudio se determinaron con la carta edafológica (escala 1:50 000) (INEGI, 1990) (Figura 12).

- **Feozems.** Suelos profundos, presentan un color oscuro, ricos en materia orgánica y nutrimentos; la textura es media y gran capacidad para almacenar agua. Presentan un horizonte A mólico, concentraciones de cal suave, dentro de los primeros 25 cm de profundidad y carecen de propiedades hidromórficas. Se desarrollan en condiciones aeróbicas en donde hay movimiento libre de agua (a través del suelo); además, integran superficies amorfas, que son de textura fina. La humedad no llega a ser excesiva, evitándose el arrastre y la pérdida de nutrimentos debido al drenaje, por lo que su potencial agrícola es alto (los feozems y vertisoles son los suelos más fértiles y más explotados). Las presiones a las que se les somete debido a una explotación agrícola intensiva, representan un riesgo para su potencial productivo. Se utilizan intensivamente para la producción de granos y hortalizas, en muchas ocasiones con el auxilio del riego.

En condiciones naturales, pueden ser susceptibles a la erosión según el relieve particular en que se presenten; sin embargo, la principal amenaza son las técnicas agrícolas intensivas:

compactación por el uso de maquinaria pesada y el uso indiscriminado de agroquímicos. Son suelos confinados de manera casi exclusiva de superficies planas a ligeramente onduladas. Presentan fases líticas, dúrica, pedregosa y petrocálcica. Se desarrollan sobre todo en climas templados y húmedos, por lo que se encuentran recubriendo el Eje Neovolcánico Transversal y porciones de la Sierra Madre Occidental. Dentro del estado de Guerrero ocupan 1,653 km<sup>2</sup> y 2.56% del total del estado. Los Feozem pueden ser divididos en: calcárico, háplico, lúvico y crómico (Instituto Mexicano del Transporte, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 1998; Carta de Suelos, 1988) (Figura 12).



**Figura 12.** Unidades de suelo del área de estudio de Taxco, Guerrero (INEGI, 1990).

- **Litosol.** Suelos poco profundos, su espesor es menor de 10 cm, expuestos sobre roca dura, presentan poco desarrollo, sus características varían de acuerdo al origen de la roca, se encuentran en una gran diversidad de climas (Figura 12).
- **Rendzina.** Suelos con menos de 50 cm de espesor, con un horizonte A mólico (capa superficial blanda de color oscuro rica en materia orgánica y nutrientes). No presenta horizonte B y C, es de color café oscuro. Descansa sobre roca caliza y tienen una susceptibilidad a la erosión que se puede considerar como moderada. De fertilidad alta en actividades agropecuarias, con cultivos de raíces someras. El tipo de suelo agrícola tiene una textura

arcillosa, apropiado especialmente para cultivos que necesitan un control adecuado de agua, tales como arroz, maíz, frijol, caña de azúcar, etc. (Figura 12).

## 7. METODOLOGÍA

### 7.1 MUESTREO

El muestreo se llevó a cabo a finales del mes de Octubre del año 2000 en la zona minera de Taxco, Guerrero. Involucró la toma de muestra de suelo y planta de la especie *Zea mays*, en las áreas mineras de San Antonio, La Concha y la zona control de San Juan. La colecta se realizó de cada parcela de cultivo que se dividió en tres secciones, frente, centro y final. De cada sección se seleccionó al azar un punto de muestreo que debía coincidir planta y suelo. Las muestras de plantas se colocaron en bolsas de papel y las de suelo en bolsas de polietileno, para evitar contaminación.

### 7.2 SELECCIÓN DE SITIO DE MUESTREO

#### **Suelo**

El muestreo de suelo dentro del área minera se llevó a cabo en zona de evidente contaminación por los residuos de las minas San Antonio y La Concha. Los dos sitios se eligieron muy cercanos a los jales (en la parte baja), distancia aproximada de 40 a 50 m. Esta zona se localiza en el norte-oeste del área de estudio, las unidades de suelo predominantes Litosol-Rendzina y Feozems, respectivamente. La zona control de San Juan, fue elegida con base a su ubicación dentro del mismo valle así como a la ausencia de contaminación visible o presencia de actividad minera. Esta zona se ubica en la parte norte-este del área de estudio, y presenta como unidad de suelo predominante Feozems (Figura 12).

#### **Planta**

Con relación al muestreo de plantas en el área minera, también se realizó en la zona cercana a los residuos de minas, en la parte baja y a la misma distancia a la de los suelos. En cada una de estas áreas se eligieron sitios de muestreo al frente, centro y a los extremos (final) de las parcelas de cultivo. En la zona de San Juan, la selección de los sitios de muestreo fue en tres áreas de cultivo cercanas entre sí.

### 7.3 TOMA DE MUESTRA

#### **Suelo**

Para la zona de evidente contaminación, área de los jales de la mina San Antonio y La Concha, se abarcaron seis y tres sitios de muestreo, respectivamente. En la zona control de San Juan se eligieron tres sitios de muestreo. En las tres áreas la toma de muestra se

realizó en la capa superficial del suelo a una profundidad de 15 cm. Las muestras de suelos fueron colectadas en el mismo sitio de obtención de las muestras de la planta de maíz, aunque no fue el número igual de muestras de planta que de suelo. Para las muestras de suelo se tomaron aproximadamente 1 kg, se vertieron en bolsas de polietileno y se etiquetaron con los datos correspondientes a cada una de las zonas de muestreo.

### ***Planta***

La colecta de las muestras de plantas se realizó en el mismo sitio de los suelos, para las plantas de maíz se extrajeron completamente y cada parte de ella (raíz, tallo, hoja y grano) se separó y se introdujeron en bolsas de papel y se etiquetaron con los datos correspondientes a cada una de las zonas de muestreo.

## **7.4 PROCESAMIENTO DE LAS MUESTRAS**

### ***Suelo***

Las muestras de suelo se extendieron sobre papel para secarlos a temperatura ambiente. Se procedió a tamizarlas por malla de 2 mm y posteriormente se molió la muestra. A ello, las muestras se guardaron en bolsas de polietileno para utilizarlas en el laboratorio y realizar los análisis químicos. Para la determinación del contenido de metales pesados los suelos fueron molidos con mortero de ágata, tamizados con malla de 2 mm de abertura y cuarteados. La digestión de las muestras se realizó en horno de microondas y abierta (Ver Apéndice, página 102). Todas las determinaciones se realizaron por duplicado; así mismo, se trabajó con un estándar internacional para suelo NIST 2586. Las concentraciones de As, Pb y Cd, se determinaron por Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP- MS) y el Fe por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).

### ***Plantas.***

Las diferentes partes constituyentes de la planta de *Zea mays* fueron separadas y cortadas; por ejemplo, en las mazorcas se quitaron las hojas y se desgranaron los granos para facilitar el lavado y molienda de los mismos. Para eliminar la contaminación superficial de cada una de las partes del material vegetal se lavaron tres veces con agua corriente a chorro y dos veces con agua desionizada, por algunos minutos se dejaron escurrir para quitar el exceso de agua y después se colocaron en bolsas de papel para secarlas en estufa de 50 a 65 °C. El secado tuvo por objeto detener la descomposición y acondicionar el material vegetal para la molienda. Posteriormente, el material vegetal seco se molió para reducir el tamaño y homogenizarlo, se utilizó un molino con cuchillas para fraccionar el tejido vegetal (finura de molienda). Todas las superficies de molienda son de acero inoxidable, para minimizar la posible contaminación.

Finalmente, el secado del material vegetal se efectuó para lograr un peso constante y tener una base estándar de valoración y almacenamiento de este material antes del análisis. El molino utilizado fue marca Thomas Willey modelo 4, sus cuchillas están montadas sobre un rotor central contra otro fijo alrededor de la cámara circular, su alimentación es por la parte superior. En cada molienda realizada se limpió toda la cámara y las cuchillas para eliminar algún residuo del material, cuidando que brocha y franela estuvieran limpias.

También, se les práctico digestión ácida en horno de microondas y abierta (Ver Apéndice, página 102), todas las determinaciones se realizaron por duplicado y se utilizó un estándar internacional del National Institute of Standards and Technology (NIST) 1573 (hojas de tomate). En cada una de las partes de la planta de *Zea mays* se analizaron As, Pb y Cd por Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) y Fe por Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA).

## 7.5 TRABAJO DE LABORATORIO

Los contenidos totales de los metales As, Pb y Cd en suelos y plantas se analizaron en el laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM. El Fe en las muestras de suelo y planta de *Zea mays* se analizaron en el laboratorio de Química Analítica del mismo Instituto; en este último se realizó la determinación de pH, conductividad eléctrica y sulfatos en suelo.

## 7.6 ANALISIS DE LABORATORIO

### **Suelo**

**Potencial de hidrógeno (pH).** Se midió en una suspensión de suelo:agua destilada en relación suelo:suspensión de 1:2.5 (masa:volumen). La determinación se realizó con un potenciómetro marca Orion modelo EA940 calibrado con soluciones buffer de pH de 4 y 7.

**Conductancia.** Se midió en una suspensión de suelo:agua destilada en relación de 1:10 (masa:volumen). La conductancia se midió en un conductímetro digital marca Conductronic PC18.

**Sulfatos ( $SO_4^{-2}$ ).** Se determinó en la suspensión utilizada para medir la conductancia por el método turbidimétrico al precipitar con  $BaCl_2$  (Cloruro de Bario). La absorbancia se leyó en espectrofotómetro.

**Metales Pesados Totales.** Se llevó a cabo una digestión ácida con agua regia ( $\text{HNO}_3$  y  $\text{HCl}$ ) en horno de microondas y digestión abierta sobre parrilla de calentamiento con ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HClO}_4$  y  $\text{HF}$ ) (Ver Apéndice, página 100 -101). Se determinaron los metales As, Pb y Cd por ICP-MS y el Fe por EAA.

### ***Planta***

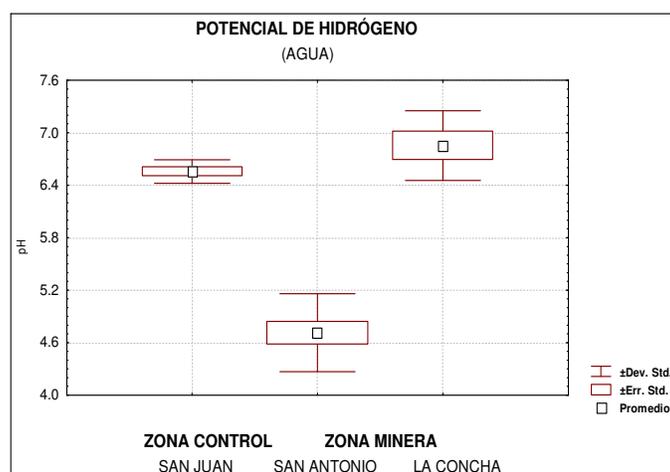
**Metales Pesados Totales.** Se llevó a cabo una digestión ácida con  $\text{HNO}_3$  y  $\text{HCl}$  en horno de microondas (Ver Apéndice, página 100 -101). Se determinaron los metales As, Pb y Cd por ICP-MS y el Fe por Espectrometría de Absorción Atómica.

## 8. RESULTADOS

Todos los datos obtenidos se presentan en el Anexo 1. Se trabajó con los promedios y rangos de los valores por localidad y se evaluaron diferencias entre zonas con influencia de actividad minera y la zona control. A continuación se presentan los resultados de cada variable determinada.

### 8.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS EN SUELOS

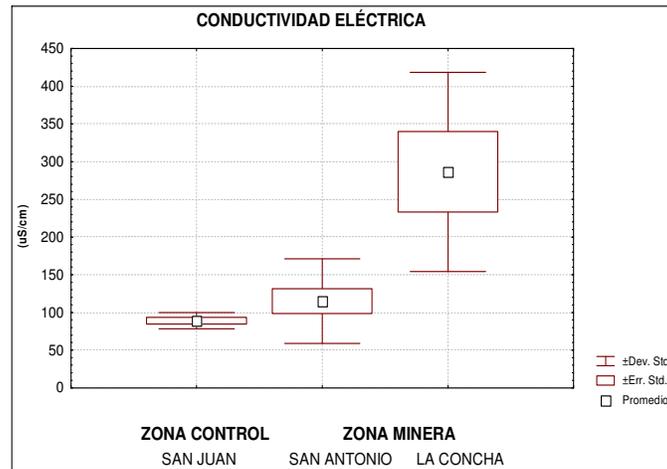
**POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH).** En el área de estudio los valores obtenidos muestran una distribución heterogénea, variaron de 4.2 a 7.3 (Figura 13). Las muestras de suelo analizadas en San Juan (zona control), presentaron valores entre 6.4 y 6.7. Estos valores son considerados de ligeramente ácidos a muy ligeramente neutros, respectivamente. En la zona minera, San Antonio se determinaron valores de 4.2 y 5.4, que son los valores menores de toda el área de estudio y son considerados de fuertemente a moderadamente ácidos, respectivamente. Mientras tanto, en La Concha, se obtuvieron los valores más altos de 6.4 a 7.3, considerados circum-neutrales (Tabla 18, Figura13, Anexo 1).



**Figura 13.** Valores promedio de pH en muestras de suelo extraídas con agua en la zona control y minera en el área de estudio de Taxco, Guerrero.

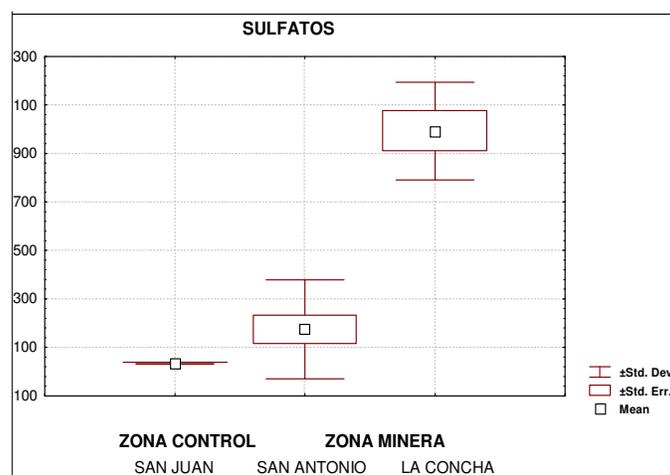
**CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.** En las dos zonas de muestreo, los valores obtenidos presentan una distribución heterogénea, variaron de 39 a 416  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 14). En San Juan (zona control), las muestras de suelo analizadas presentaron valores entre 102 y 78  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En la zona minera de San Antonio el intervalo de valores fue de 39 a 224  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los

valores más altos de toda el área de estudio se obtuvieron en La Concha, de 120 a 416  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , (Tabla 18, Figura 14, Anexo1).



**Figura 14.** Valores promedio de conductividad eléctrica en muestras de suelo en la zona control y minera en el área de estudio de Taxco, Guerrero.

**SULFATOS.** Se observa que las muestras analizadas de suelo en la zona de estudio presentan una distribución heterogénea variando de 24 a 1281  $\text{mg kg}^{-1}$  (Figura 15). En el área de San Juan (zona control), las concentraciones variaron entre 32 y 40  $\text{mg kg}^{-1}$ , que corresponden a los valores menores de toda el área de estudio. En la zona minera de San Antonio los contenidos variaron de 24 a 519  $\text{mg kg}^{-1}$ . Los valores obtenidos en La Concha fueron de 799 a 1281  $\text{mg kg}^{-1}$ , los más altos en toda el área de estudio (Tabla 18, Figura 15, Anexo 1).



**Figura 15.** Valores promedio de sulfatos en muestras de suelo en la zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.

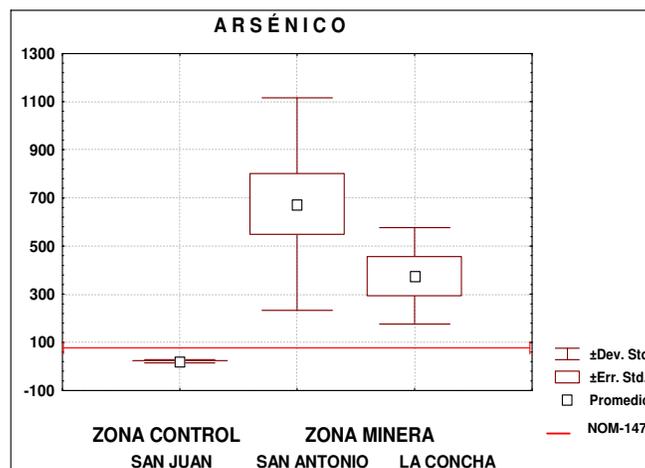
**Tabla 18.** Características químicas, unidad de suelo de la zona control y minera en el área de estudio de Taxco, Guerrero

	Zona Control	Zona Minera	
	<i>San Juan</i>	<i>San Antonio</i>	<i>La Concha</i>
<b>Unidad de Suelo</b>	Feozem	Litosol-Rendzina	Feozem
<b>Características Químicas</b>			
<i>pH</i>	6.4 a 6.7	4.2 a 5.4	6.4 a 7.3
<i>Clasificación del Suelo</i>	Circum-neutrales a muy ligeramente neutros	Fuertemente a moderadamente ácidos	Circum-neutrales
<i>Textura</i>	Fina (<0.002 mm de diámetro)	Fina (<0.002 mm de diámetro)	Fina (<0.002 mm de diámetro)
<i>Conductividad Eléctrica (μS/cm)</i>	102 a 78	39 a 224	102 a 416
<i>Sulfatos (mg kg<sup>-1</sup>)</i>	31 a 40	24 a 519	799 a 1281

## 8.2 CONCENTRACIÓN DE METALES EN SUELO

### ARSÉNICO

En el área de estudio los valores en las concentraciones obtenidas muestran un comportamiento heterogéneo y variaron de 13 a 1047 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 16, Anexo 1). Se observa que las más altas concentraciones de As se encuentran en la zona minera de San Antonio de 163 a 1047 mg kg<sup>-1</sup>. En la zona de la Concha, las concentraciones variaron entre 123 y 578 mg kg<sup>-1</sup>. En la zona control de San Juan se obtuvieron los valores menores de toda el área de estudio entre 13 y 27 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 16, Anexo 1).



**Figura 16.** Valores promedio de las concentraciones de As en suelo de las zonas control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.

En la zona minera, San Antonio y La Concha los valores de las muestras de As se encuentran muy por encima de los límites permisibles para suelo establecidos por la Comunidad Europea (Zartner-Nyilas, 2002), concentración crítica (Kabata-Pendias, 1992), y de la Norma Oficial

Mexicana NOM-147 (2004) que establece para el As un valor máximo de 22 mg kg<sup>-1</sup>, a partir del cual se establece la limpieza y remediación de suelos contaminados destinados a la agricultura en México. Con el rango obtenido en este estudio todos los sitios estarían por arriba de la normatividad (excepto, la muestra 3 de la zona control, donde se obtuvieron concentraciones de 13 y 14 mg kg<sup>-1</sup>). Así también, todos los valores de los sitios de estudio de la zona minera se encuentran por arriba de las concentraciones regionales de fondo en suelos de cultivo determinadas por Talavera *et al.*, (2005) quien establece un valor de 30 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla 19). Además, la EPA (1992) considera excesivamente fitotóxicos suelos superficiales con concentraciones entre 100 y 1000 mg kg<sup>-1</sup>, que comprende los valores obtenidos en las zonas mineras estudiadas en este trabajo.

**Tabla 19.** Límite permisible, concentración crítica en suelo, valores de concentración de referencia totales por tipo de uso de suelo y concentración regionales de fondo en suelo de cultivo para As, Cd, Pb y Fe.

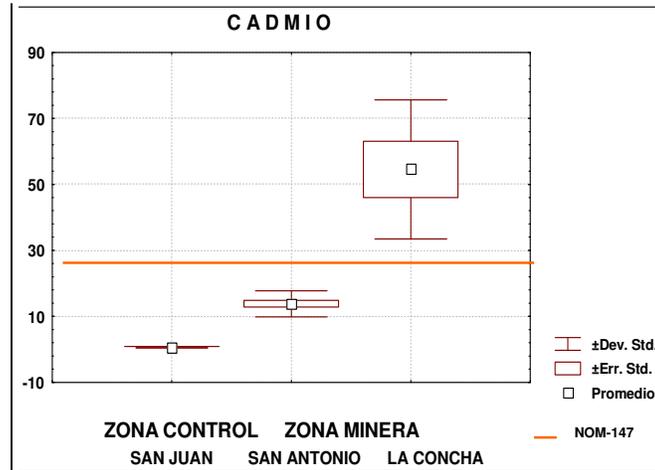
	As	Cd	Pb	Fe
	(mg kg <sup>-1</sup> )			(%)
<b>Límite Permisible</b> LFU, 1989 <sup>a</sup> ; Zartner Nyilas, 2002 <sup>b</sup>	10 - 20 <sup>a</sup>	1 - 3 <sup>b</sup>	50 - 300 <sup>b</sup>	-
<b>Concentración Crítica</b> Kabata-Pendias, 1992	20 - 50	3 - 8	100 - 400	-
<b>Concentraciones de Referencia Totales (CRT) por tipo de uso de suelo (Uso Agrícola/Residencial)</b> NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	22	37	400	-
<b>Concentraciones regionales de fondo en suelo de cultivo</b> Talavera <i>et al.</i> , (2005)	30	1	26	2.7

## CADMIO

En el área de estudio los valores obtenidos muestran una distribución heterogénea y variaron entre 0.41 y 80 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 17, Anexo 1). En la zona control de San Juan las concentraciones de Cd fueron las menores de toda el área de estudio, entre 0.41 y 0.69 mg kg<sup>-1</sup>. Los valores más altos, de 32 a 80 mg kg<sup>-1</sup>, se obtuvieron en la zona minera de La Concha, y presentaron la mayor dispersión. En la zona de San Antonio el intervalo se encontró entre 6 y 17 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 17, Anexo 1).

Los valores de las muestras obtenidas para el Cd en la zona minera, San Antonio y La Concha rebasan las concentraciones de los límites permisibles para suelo establecidos por la Comunidad Europea (Zartner-Nyilas, 2002), concentración crítica (Kabata-Pendias, 1992). La norma mexicana NOM-147 (2004) establece 37 mg kg<sup>-1</sup> para la limpieza y remediación de suelos contaminados destinados a la agricultura; con base en este valor solamente dos de los sitios del área de estudio en La Concha, estarían por arriba de los valores de la normatividad. Por otro lado, las concentraciones de Cd obtenidas en la zona minera San Antonio y en La

Concha sobrepasan las concentraciones regionales de fondo en suelos de cultivo de Talavera *et al.*, (2005) quien establece un valor de 1 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla 19). Sin embargo, la EPA (1992) establece un rango de 3-10 mg kg<sup>-1</sup> de Cd en suelo superficial, considerando sitios excesivamente fitotóxicos aquellos que lo rebasan.

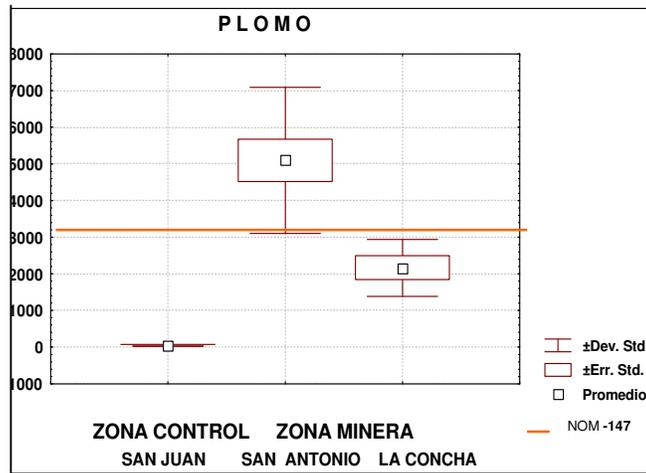


**Figura 17.** Valores promedio de las concentraciones de Cd en suelo de la zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.

## P L O M O

En el área de estudio los valores obtenidos muestran una distribución heterogénea y variaron de 23 a 7 125 mg kg<sup>-1</sup> (Figura18, Anexo 1). En la zona de San Juan (control) las concentraciones de Pb son las menores de toda el área de estudio, variaron de 23 a 32 mg kg<sup>-1</sup>. En la zona minera de San Antonio se obtuvieron las concentraciones más altas y presentaron la mayor dispersión de 3 001 a 7 125 mg kg<sup>-1</sup>. En el área de La Concha, los valores en las concentraciones de las muestras de suelos variaron de 1 281 a 3 077 mg kg<sup>-1</sup> (Figura18, Anexo 1).

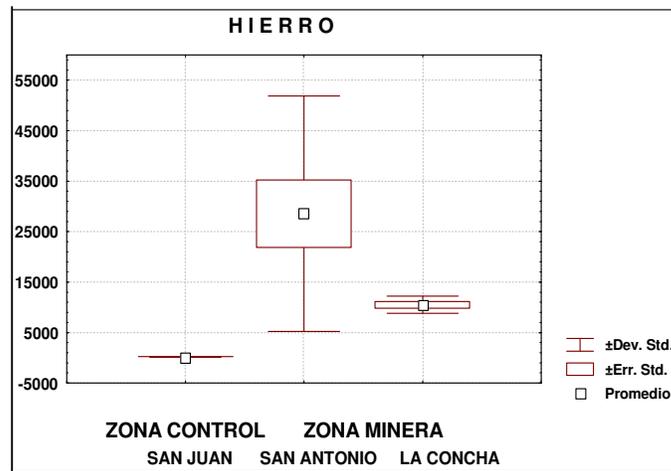
Los valores de las muestras obtenidas de Pb de la zona minera, San Antonio y La Concha rebasan muy por encima las concentraciones de los límites permisibles para suelo establecidos por la Comunidad Europea (Zartner-Nyilas, 2002), concentración crítica (Kabata-Pendias, 1992), y la norma mexicana NOM-147 (2004) que da un valor máximo de 400 mg kg<sup>-1</sup> para la limpieza y remediación de suelos contaminados destinados a la agricultura. Las concentraciones de Pb obtenidas en la zona minera de San Antonio y La Concha se encuentran también por arriba de las concentraciones regionales de fondo en suelos de cultivo de 26 mg kg<sup>-1</sup> (Talavera *et al.*, 2005) (Tabla 19). En relación al rango señalado por la EPA (1992) entre 50 y 100 mg kg<sup>-1</sup> para suelo superficial, las concentraciones medidas los ubican como sitios excesivamente fitotóxicos.



**Figura 18.** Valores promedio de las concentraciones de Pb en suelo de la zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.

## HIERRO

En la zona de San Juan (control) las concentraciones de Fe obtenidas en todas las muestras de suelo variaron de 98 a 105 mg kg<sup>-1</sup>. De los tres sitios de muestreo, en la zona de San Antonio se obtuvieron las más altas concentraciones y presentaron la mayor dispersión con valores entre 10 600 y 53 200 mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 19.** Valores promedio de las concentraciones de Fe en suelo de la zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.

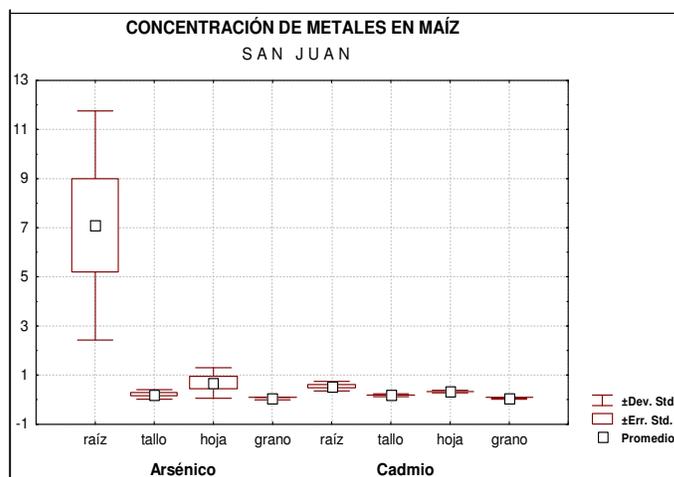
En las muestras correspondientes a la zona de La Concha los valores obtenidos variaron de 9 280 a 13 620 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 19, Anexo 1). Para el Fe, no existen criterios sobre límites permisibles para suelo establecidos por la Comunidad Europea (Zartner-Nyilas, 2002), concentración crítica (Kabata-Pendias, 1992), ni la norma mexicana NOM-147 (2004) para la limpieza y remediación de suelos contaminados destinados a la agricultura. Solo se tienen

concentraciones regionales de fondo en suelos de cultivo; en la zona minera de San Antonio se encuentran por arriba de las establecidas por Talavera *et al.*, (2005) con un valor de 2.7 % (Tabla 19).

### 8.3 CONCENTRACIÓN DE METALES EN *Zea mays*

#### ZONA CONTROL

**SAN JUAN.** En el área de estudio las concentraciones de As, Cd, Pb y Fe, determinadas en raíz, tallo, hoja y grano muestran una distribución heterogénea (Figuras 20 y 21). La suma promedio de las plantas para As, Cd, Pb y Fe fue de 7.70, 1.11, 12.79 y 154.88 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Anexo 2). Las concentraciones de As encontradas en las muestras analizadas de los diferentes tejidos de *Zea mays*, varían significativamente de <LD a 11.90 mg kg<sup>-1</sup>, los valores más altos se obtuvieron en raíz y hoja, variaron de 2.52 a 11.90 y 0.11 a 1.67 mg kg<sup>-1</sup>, y en tallo y grano de 0.014 a 0.47 y <LD a 0.09 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente (Figura 20, Anexo 2).



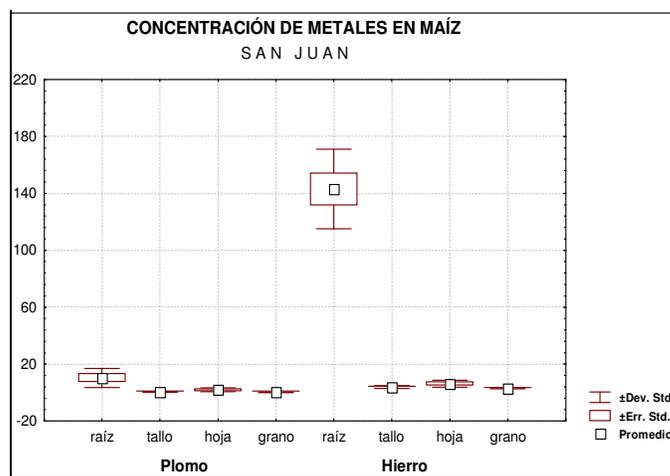
**Figura 20.** Valores promedio de las concentraciones de As y Cd en cuatro tejidos de *Zea mays* en la zona control de San Juan en Taxco, Guerrero.

Los valores más altos de Cd fueron para raíz y hoja y variaron de 0.31 a 0.76 mg kg<sup>-1</sup> y de 0.24 a 0.38 mg kg<sup>-1</sup>, los valores menores se obtuvieron en grano y tallo fueron de 0.01 a 0.07 y 0.11 a 0.27 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 20, Anexo 2). Los valores en las concentraciones de Pb obtenidas en raíz y hoja fueron altos, variaron de 1.98 a 18.02 y de 0.68 a 3.88 mg kg<sup>-1</sup>, los valores menores se obtuvieron en grano y tallo fueron de 0.02 a 0.30 y 0.11 a 0.70 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 21, Anexo 2). En la zona control de San Juan, comparándolos con los otros metales en estudio el Fe presentó valores relativamente elevados en raíz, el tejido de mayor acumulación, donde los valores variaron de 108.00 a 161.50 mg kg<sup>-1</sup>. Las hojas, tallos y

granos también concentraron Fe con valores de 3.40 a 9.05, 2.80 a 5.15 y 2.60 a 3.33 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 21, Anexo 2). La tabla 20 muestra el orden de acumulación por tejido y zona de estudio.

**Tabla 20.** Orden de acumulación de As, Cd, Pb y Fe en los tejidos de *Zea mays* en el área de estudio de Taxco, Guerrero.

Zona Control			
San Juan			
Fe, Pb, As, Cd <sub>raiz</sub> >	Fe, Pb, As, Cd <sub>hoja</sub> >	Fe, As, Pb, Cd <sub>tallo</sub> >	Fe, Pb, As-Cd <sub>grano</sub>
Zona Minera			
San Antonio			
Pb, As, Fe, Cd <sub>raiz</sub> >	Pb, Fe, Cd, As <sub>hoja</sub> >	Pb, Fe, Cd, As <sub>tallo</sub> >	Fe, Pb, As, Cd <sub>grano</sub>
La Concha			
Pb, As, Fe, Cd <sub>raiz</sub> >	Cd, Fe, Pb, As <sub>hoja</sub> >	Cd, Fe, Pb, As <sub>tallo</sub> >	Fe, Pb, Cd, As <sub>grano</sub>



**Figura 21.** Valores promedio de las concentraciones de Pb y Fe en cuatro tejidos de *Zea mays* en la zona control de San Juan en Taxco, Guerrero.

De acuerdo con Kabata-Pendias (1992) las muestras de la zona control San Juan no rebasan los valores considerados como concentración crítica de As, Cd y Pb en la planta de maíz. Para el Fe, no existen valores considerados como concentración crítica en planta. El valor máximo permisible en grano no rebasa las concentraciones establecidas por LFU (1989) en As, Cd y Pb (excepto una muestra que está en el valor límite). Así también, para el Fe, no existe valor máximo permisible en grano. La norma mexicana NOM-187 (2002) establece un valor límite máximo para As y Pb de 3 y 8 mg kg<sup>-1</sup> en masa, tortillas, tostadas y harinas preparadas para su elaboración. La norma oficial mexicana NOM-247 (2008) establece un valor límite máximo para Cd de 0.1 mg kg<sup>-1</sup> en cereales y sus productos, semillas comestibles, harinas, sémolas o

sus mezclas, productos de panificación (Tabla 21). En referencia al tejido del grano de maíz, en la zona control, todas las muestras no rebasan el valor del límite máximo de Cd.

**Tabla 21.** Valor máximo permisible en grano, concentración crítica en planta, valor límite máximo establecido por normas oficiales mexicanas para As, Cd y Pb.

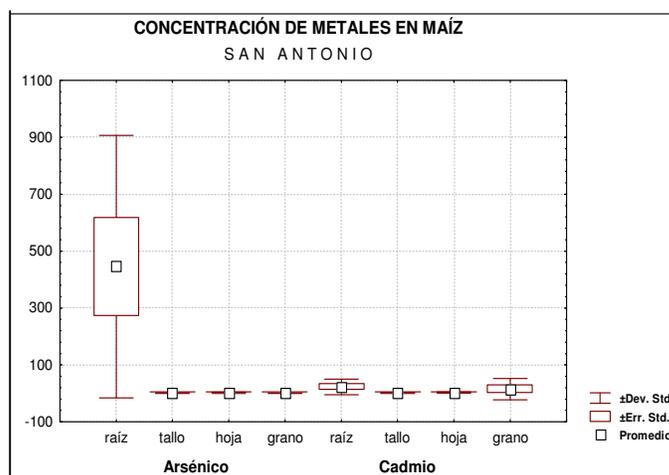
Valor Máximo Permisible Grano LFU, 1989	As	Cd	Pb
		0.5	0.1
Concentración Crítica Planta Kabata-Pendias, 1992	5 - 20	5 - 30	30 - 300
Valor Límite Máximo *NM-187-SSA1/SCFI-2002	3		8
*NOM-247-SSA1-2008		0.1	

\*NM-187-SSA1/SCFI-2002; en masa, tortillas, tostadas y harinas preparadas para su elaboración.

\*NOM-247-SSA1-2008; en cereales y sus productos, semillas comestibles, de harinas, sémolas o sus mezclas, productos de panificación.

## ZONA MINERA

**SAN ANTONIO.** En el área de estudio las concentraciones de As, Cd, Pb y Fe, en raíz, tallo, hoja, y grano muestran una distribución heterogénea (Figuras 22 y 23). Las sumas promedio de As, Cd, Pb y Fe fueron 399.34, 27.44, 2112.42 y 153.79 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Anexo 2). Los intervalos de valores de As obtenidos en las muestras de los diferentes tejidos analizados de *Zea mays* variaron de <LD a 904.00 mg kg<sup>-1</sup>, los valores más altos se obtuvieron en raíz y hoja, fueron de 3.9 a 904.00 mg kg<sup>-1</sup> y de 0.52 a 4.60 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

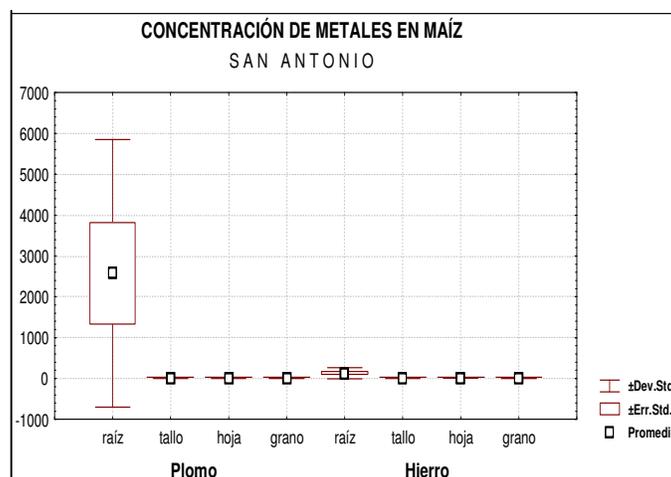


**Figura 22.** Valores promedio de las concentraciones de As y Cd en cuatro tejidos de *Zea mays* en la zona minera de San Antonio en Taxco, Guerrero.

Los valores menores se obtuvieron en tallo y grano fueron de 0.22 a 3.51 y de < LD a 1.92, mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Los intervalos de valores de Cd obtenidos en las muestras de los

diferentes tejidos analizados de *Zea mays* variaron de <LD a 76.83 mg kg<sup>-1</sup>. Las más altas concentraciones de Cd fueron obtenidas en raíz y hoja, variaron de 1.02 a 76.83 mg kg<sup>-1</sup> y de 0.67 a 7.50 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Los valores menores se obtuvieron en grano y tallo fueron de <LD a 0.42 y 0.48 a 4.11, mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 22, Anexo 2). En la zona de San Antonio las concentraciones de Pb, variaron de 0.25 a 5797.00 mg kg<sup>-1</sup>. Las más altas concentraciones se obtuvieron en las muestras del tejido de la raíz, los intervalos de valores fueron de 33.50 a 5797.00 mg kg<sup>-1</sup>. Así también, los otros tres tejidos de la planta presentaron relativamente altas concentraciones; en tallo, hoja y grano los valores variaron de 5.38 a 40.99, 5.98 a 33.00 y 2.81 a 9.67 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Asimismo, se obtuvieron relativamente altas concentraciones de Fe en los cuatro tejidos de la planta, variaron de 1.30 a 320.00 mg kg<sup>-1</sup>, los valores más altos fueron en raíz de 15.54 a 320.00 mg kg<sup>-1</sup>. Para los otros tres tejidos de la planta tallo, hoja y grano los valores variaron de 2.95 a 26.70, 5.15 a 9.85 y 1.30 a 7.45 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 23, Anexo 2).

Las muestras de la zona minera de San Antonio, de acuerdo con Kabata-Pendias (1992) rebasan los valores considerados como concentración crítica en plantas de As y Pb. Las concentraciones de Cd no rebasan el valor establecido y para el Fe no existen valores como concentración crítica en plantas de maíz. La LFU (1989) establece un valor máximo permisible en grano de Pb (0.3 mg kg<sup>-1</sup>) que es superado por las concentraciones medidas en los granos de esta zona (Tabla 21). Las concentraciones máximas permisibles de As y Cd (0.5 y 0.1 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) son también rebasadas en tres muestras y para el Fe no existe valor máximo permisible en grano.

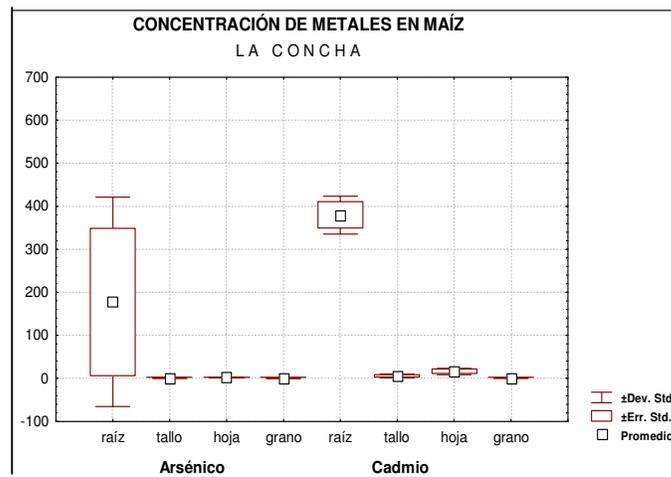


**Figura 23.** Valores promedio de las concentraciones de Pb y Fe en cuatro tejidos de *Zea mays* en la zona minera de San Antonio en Taxco, Guerrero.

En referencia al tejido del grano, en la zona minera de San Antonio tres de las muestras presentan concentraciones mayores al valor del límite máximo para Cd dado por la NOM-247

(2008) y solo una muestra rebasa el valor del límite máximo de Pb establecido por la norma mexicana NOM-187 (2002) (Tabla 21).

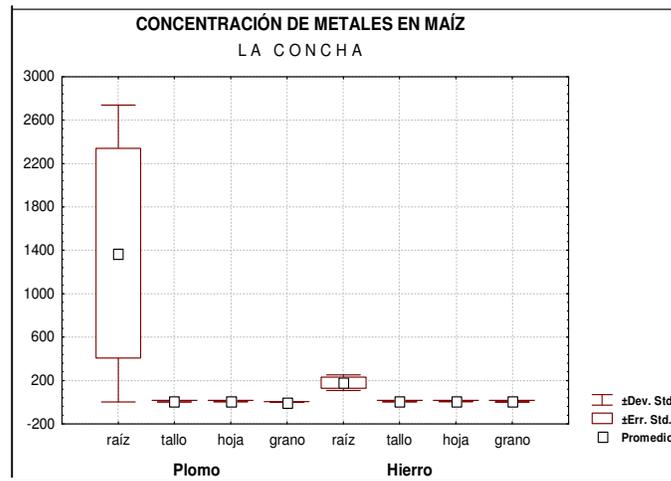
**LA CONCHA.** Las concentraciones de As, Cd, Pb y Fe en raíz, tallo, hoja y grano muestran una distribución heterogénea (Figuras 24 y 25). La suma promedio de As, Cd, Pb y Fe para la planta fue de 227.28, 400.83, 1378.84 y 192.36 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Anexo 2). Las concentraciones de As en todas las muestras de los diferentes tejidos analizados de *Zea mays* variaron de 0.03 a 443.00 mg kg<sup>-1</sup>, los valores más altos se obtuvieron en raíz y hoja, variaron de 6.00 a 443.00 mg kg<sup>-1</sup> y de 1.35 a 2.40 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Los valores menores se obtuvieron en tallo y grano fueron de 0.11 a 1.50 y de 0.03 a 0.16 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 24, Anexo 2). Los intervalos de valores de Cd obtenidos en las muestras de los diferentes tejidos analizados de *Zea mays* variaron de 0.10 a 410.20 mg kg<sup>-1</sup>. Así también, se obtuvieron altas concentraciones en raíz y hoja, los intervalos de valores fueron de 348.00 a 410.20 mg kg<sup>-1</sup> y de 10.90 a 21.00 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Los valores menores se obtuvieron en tallo y grano fueron de 2.42 a 8.50 y de 0.10 a 0.13 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 24, Anexo 2).



**Figura 24.** Valores promedio de las concentraciones de As y Cd en cuatro tejidos de *Zea mays* en la zona minera de La Concha en Taxco, Guerrero.

Los valores de las concentraciones de Pb obtenidas en las muestras de los diferentes tejidos de la planta, variaron de 0.09 a 2 337.00 mg kg<sup>-1</sup>, obteniéndose los valores más altos en el tejido de la raíz de 404.00 a 2 337.00 mg kg<sup>-1</sup> y relativamente altos en hoja de 4.05 a 8.34 mg kg<sup>-1</sup>. Los valores menores se obtuvieron en tallo y grano fueron de 2.02 a 2.07 y de 0.09 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 25, Anexo 2). Con relación al Fe, las concentraciones en los diferentes tejidos de la planta de maíz variaron de 1.25 a 230.00 mg kg<sup>-1</sup>. También, de igual orden en raíz y hoja se obtuvieron concentraciones con intervalos de valores de 129.00 a 230.00 mg kg<sup>-1</sup> y 6.25 a 6.45 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Los valores menores se obtuvieron en

tallo y grano fueron de 3.60 a 4.35 y de 1.25 a 3.80 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 25, Anexo 2).



**Figura 25.** Valores promedio de las concentraciones de Pb y Fe en cuatro tejidos de *Zea mays* en la zona minera de La Concha en Taxco, Guerrero.

De acuerdo con Kabata-Pendias (1992) las muestras de la zona minera La Concha superan los valores considerados como concentración crítica en plantas de As, Cd y Pb, para el Fe no existe valor máximo permisible en planta. Las concentraciones de Cd rebasan el valor máximo permisible establecido por LFU (1989) para grano, mientras que los contenidos de As y Pb no superan estos valores, para el Fe no existe valor máximo permisible en grano. En relación al tejido del grano, la zona minera de La Concha, en dos de las muestras rebasa el valor del límite máximo en Cd dado por la NOM-247 (2008) (Tabla 21). Se toma como referencia a las dos normas mexicanas debido a que estamos considerando, básicamente al grano de maíz (*Zea mays*), en su elaboración de harina como masa y tortilla (considerada de maíz nixtamalizado, al producto deshidratado que se obtiene de la molienda de los granos de maíz nixtamalizado), por su mayor consumo y su importancia en la alimentación de los mexicanos.

#### 8.4 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE METALES (As, Cd, Pb y Fe) EN *Zea mays*.

A partir de los datos del Anexo 1 y 2, se calcularon los valores para el coeficiente de transferencia en planta y en el tejido de la hoja de los metales en estudio. Los coeficientes de transferencia se calcularon mediante las expresiones siguientes:

$$(CT_{\text{metal}}) = \frac{\text{Concentración del metal o metaloide total en planta (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentración del metal o metaloide total en suelo (mg kg}^{-1}\text{)}}$$

$$(CT_{\text{metal}}) = \frac{\text{Concentración del metal o metaloide total en hoja (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentración del metal o metaloide total en suelo (mg kg}^{-1}\text{)}}$$

## PLANTA

### ARSÉNICO

Los valores del coeficiente de transferencia variaron de 0.4 a 0.7 (Figura 26). En la zona de San Antonio y La Concha se obtuvieron los valores más altos (0.7 y 0.6), respectivamente. En la zona control, San Juan el valor obtenido fue de 0.4. Los coeficientes de transferencia reportados por Kloke *et al.*, (1984) para As estuvieron en el rango de 0.01 a 0.1, mientras que el rango para  $CT_{As}$  obtenido en este trabajo es del orden de 0.4 a 0.7 (Tabla 22). Sin embargo, un valor menor a uno se considera que el As no experimenta bioconcentración en la planta (Repetto, 1995).

### CADMIO

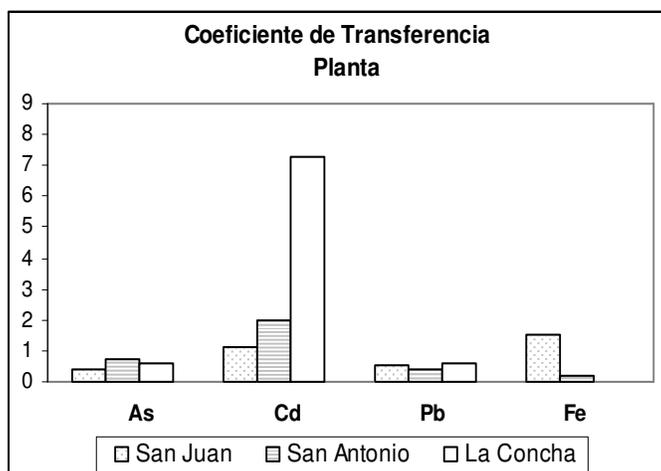
De toda el área de estudio el Cd fue uno de los metales que obtuvo valores altos de CT, variaron de 1.1 a 7.3 (Figura 26). En la zona de San Juan el valor del coeficiente de transferencia fue de 1.1. En la zona minera de San Antonio y La Concha los valores obtenidos fueron de 2.0 y 7.3 (valor más alto en toda el área de estudio), respectivamente. Los coeficientes de transferencia reportados por Kloke *et al.*, (1984) para Cd fueron de 1.0 a 10.0, mientras que el obtenido para  $CT_{Cd}$  en este trabajo fue de 1.1 a 7.3 (Tabla 22). Con un valor inferior a 10 se considera que la bioconcentración de Cd en la planta es baja (Repetto, 1995).

**Tabla 22.** Coeficientes de transferencia (valores máximos) de As, Cd, Pb y Fe en la planta de *Zea mays* de la zona control y minera en el área de Taxco, Guerrero.

		Coeficiente de Transferencia			
		Planta			
		As	Cd	Pb	Fe
<b>Zona Control</b>	San Juan	0.4	1.1	0.5	1.5
<b>Zona Minera</b>	San Antonio	0.7	2.0	0.4	0.2
	La Concha	0.6	7.3	0.6	0.02

### PLOMO

Los valores del coeficiente de transferencia, variaron de 0.4 a 0.6 (Figura 26). En la zona control de San Juan el  $CT_{Pb}$  obtuvo el valor de 0.5. En la zona minera de San Antonio se obtuvo el valor más bajo de 0.4 y en La Concha con 0.6, valor más alto de toda el área de estudio (Figura 26). Los coeficientes de transferencia reportados por Kloke *et al.*, (1984) para Pb fueron de 0.01 a 0.1, mientras que los obtenidos en este trabajo fueron de 0.4 a 0.6 (Tabla 22). Se considera que un valor menor a uno indica que el Pb no experimenta bioconcentración en la planta (Repetto, 1995).



**Figura 26.** Coeficiente de transferencia de As, Cd, Pb y Fe de *Zea mays* en la zona control y minera en el área de Taxco, Guerrero.

## HIERRO

Los coeficientes de transferencia del Fe variaron de 0.02 a 1.5. En la zona minera las dos áreas de muestreo, San Antonio y La Concha, tuvieron valores bajos de 0.2 y 0.02, respectivamente (Tabla 22). En la zona control de San Juan, el valor del coeficiente de transferencia fue de 1.5, valor más alto de la zona de estudio (Figura 26). No se encontraron reportes de coeficiente de transferencia para Fe. Sin embargo, un valor inferior a 10 se considera que la bioconcentración de Fe en la planta es baja (Repetto, 1995).

## TEJIDO DE LA HOJA

### ARSÉNICO

Los valores en el coeficiente de transferencia, variaron de 0.003 a 0.3 (Figura 27). En la zona de San Antonio y La Concha se obtuvieron los valores más bajos (0.003 y 0.01), respectivamente. En la zona control, San Juan el valor obtenido fue de 0.03 (Tabla 23).

**Tabla 23.** Coeficientes de transferencia (valores Máximos) de As, Cd, Pb y Fe en el tejido de la hoja de *Zea mays* en la zona control y minera en el área de Taxco, Guerrero.

		Coeficiente de Transferencia			
		Hoja			
		As	Cd	Pb	Fe
<b>Zona Control</b>	San Juan	0.03	0.03	0.08	0.06
<b>Zona Minera</b>	San Antonio	0.003	0.24	0.003	0.01
	La Concha	0.01	0.29	0.003	0.0006

## CADMIO

De toda el área de estudio el Cd es uno de los metales que obtuvo valores altos de CT,

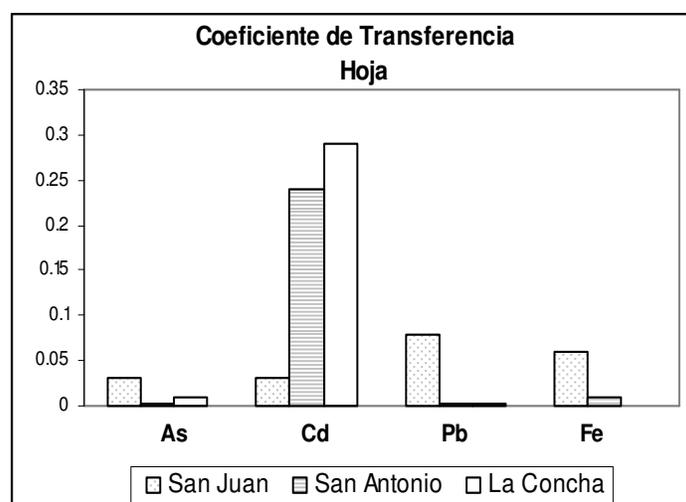
variaron de 0.03 a 0.29 (Figura 27). En la zona de San Juan el valor del coeficiente de transferencia fue de 0.03, valor más bajo. En la zona minera de San Antonio y La Concha los valores obtenidos fueron de 0.24 y 0.29 (valor más alto en toda el área de estudio), respectivamente (Tabla 23).

### PLOMO

Los valores en el coeficiente de transferencia, variaron de 0.4 a 0.6 (Figura 27). En la zona control de San Juan el CT de Pb obtuvo el valor de 0.5. En la zona minera de San Antonio se obtuvo el valor más bajo de 0.4 y en La Concha con 0.6, valor más alto de toda el área de estudio (Tabla 23).

### HIERRO

El Fe obtuvo valores del CT que variaron de 0.01 a 0.0006 (Figura 27). En la zona minera los dos sitios de muestreo, San Antonio y La Concha, obtuvieron valores que variaron de 0.01 a 0.0006, respectivamente. En la zona control de San Juan, el valor del coeficiente de transferencia fue de 0.06, valor más alto de la zona de estudio (Tabla 23).



**Figura 27.** Coeficiente de transferencia de As, Cd, Pb y Fe de *Zea mays* (hoja) en la zona control y minera en el área de Taxco, Guerrero.

### 8.5 ÍNDICE DE TRANSPORTE DE As, Cd, Pb y Fe HACIA LOS DIFERENTES TEJIDOS DE *Zea mays*.

A partir de los datos del Anexo 2, se tomaron los valores promedio de As, Cd, Pb y Fe de raíz, tallo, hoja y grano de maíz. El Índice de transporte ( $I_t$ ) se cálculo mediante la expresión siguiente:

$$I_t = \frac{\text{Concentración del metal}_{\text{total}} \text{ en tejido (mg kg}^{-1}\text{)}}{\text{Concentración del metal}_{\text{total}} \text{ en raíz (mg kg}^{-1}\text{)}} \times 100$$

Para realizar las gráficas del Índice de transporte se consideraron los datos de la Tabla 24 de cada zona de muestreo y para cada uno de los metales en estudio (Figuras 28 y 29).

#### ZONA CONTROL

**SAN JUAN.** El área de estudio, presentó valores significativos en el índice de transporte de Cd en la relación raíz/hoja (60.0), raíz/tallo (32.73) y el más bajo se obtuvo en la relación raíz/grano (9.10). Los valores del índice de transporte de Pb en las relaciones fueron raíz/hoja (19.44), seguido de raíz/tallo (3.60) y en raíz/grano (1.30). En As, se obtuvo una relación alta en raíz/hoja (10.00), seguida en raíz/tallo (3.11) y la más baja fue en la relación raíz/grano (0.74). Los valores de Fe en la relación raíz/hoja (4.40), seguido de los más bajos raíz/tallo y raíz/grano (2.73) y (2.10), respectivamente (Tabla 24) (Figura 28 y 29).

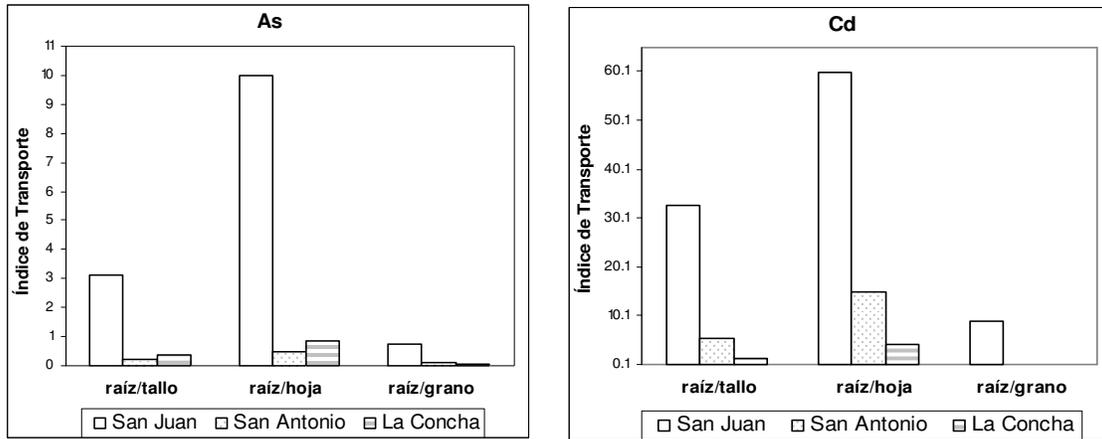
**Tabla 24.** Relación del índice de transporte de raíz/tallo, raíz/hoja y raíz/grano en *Zea mays* de As, Cd, Pb y Fe en el área de estudio de Taxco, Guerrero.

As			Cd			Pb			Fe		
◇	∂	Δ	◇	∂	Δ	◇	∂	Δ	◇	∂	Δ
<b>Zona Control</b>											
<i>San Juan</i>											
3.11	10.0	0.74	32.73	60.0	9.10	3.60	19.44	1.30	2.73	4.40	2.10
<b>Zona Minera</b>											
<i>San Antonio</i>											
0.23	0.50	0.13	5.33	15.0	0.15	0.61	0.80	0.18	8.45	5.97	3.75
<i>La Concha</i>											
0.36	0.84	0.04	1.44	4.20	0.032	0.15	0.45	0.07	2.22	3.54	1.41

**Nota:** ◇ raíz/tallo, ∂ raíz/hoja y Δ raíz/grano.

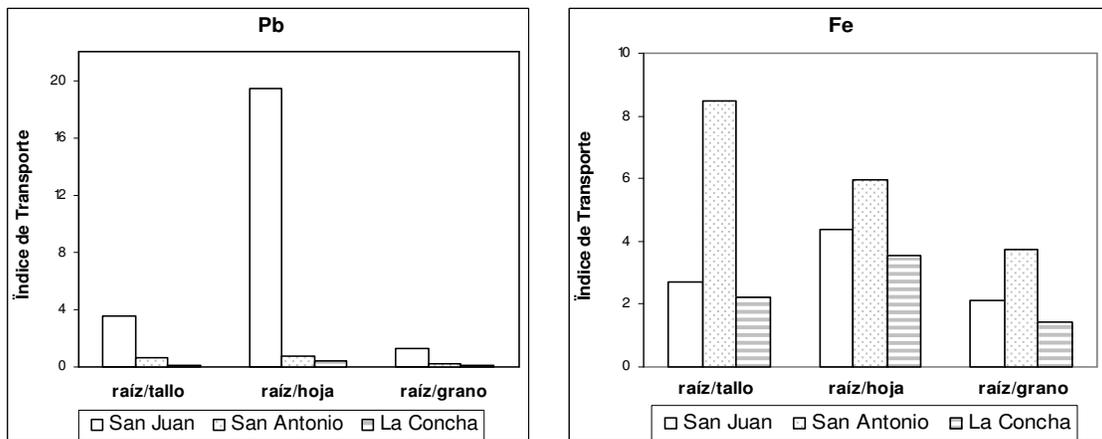
#### ZONA MINERA

**SAN ANTONIO.** Del área de San Antonio el valor más significativo del índice de transporte se obtuvo en Cd de la relación raíz/hoja (15.0), seguido de raíz/tallo (5.33) y el más bajo fue en la relación raíz/grano (0.15). El Fe obtuvo valores altos en la relación de raíz/tallo (8.45) y en raíz/hoja (5.97) y la relación raíz/grano (3.75) la más alta de esta área de estudio. Para el Pb la relación raíz/hoja (0.80) fue alta, la relación de raíz/tallo obtuvo un valor de (0.61) y la más baja fue la relación raíz/grano (0.18). Finalmente, en As la relación raíz/hoja obtuvo el valor de (0.50), seguido la relación raíz/tallo (0.23) y raíz/grano (0.13), la más baja (Tabla 24) (Figura 28 y 29).



**Figura 28.** Índice de transporte de As y Cd en las relaciones raíz/tallo, raíz/hoja y raíz/grano de *Zea mays* de la zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.

**LA CONCHA.** En esta área minera, los valores del índice de transporte de Fe en las tres relaciones fueron de raíz/tallo (2.22), raíz/hoja (3.54) y raíz/grano (1.41), los valores obtenidos estuvieron por arriba de 1 (Tabla 24). El Cd obtuvo el valor más significativo de la relación raíz/hoja (4.20), seguido de raíz/tallo (1.44) y el más bajo de toda el área de estudio fue la relación raíz/grano (0.032). El As, la relación más alta de las tres fue raíz/hoja (0.84) y las relaciones de menor valor raíz/tallo (0.36) y raíz/grano (0.04). Por último, el Pb presentó valores menores en las relaciones raíz/tallo (0.15) y raíz/grano (0.07), la más alta de las tres fue raíz/hoja (0.45) (Tabla 24) (Figura 28 y 29).



**Figura 29.** Índice de transporte de Pb y Fe en las relaciones raíz/tallo, raíz/hoja y raíz/grano de *Zea mays* de la zona control y minera del área de estudio de Taxco, Guerrero.

## 9. DISCUSIÓN

### 9.1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUELO

En el área de estudio las características químicas como el pH, la conductancia y los sulfatos fueron diferentes para las zonas de muestreo y entre las dos unidades de suelo predominantes. El pH ejerce una variación importante en la especiación de los metales, por lo que se clasifican de acuerdo a cada área de muestreo.

El pH ácido que presenta el área de San Antonio es el resultado del depósito de jales que se encuentran oxidados. Los valores promedio de pH (4.7) que se presentan en esta área, no son similares a los de la zona control. De igual manera, las concentraciones de sulfatos y conductividad eléctrica (CE) son relativamente altas, comparándolas con los de la zona control (Anexo 1). Los valores obtenidos en suelo de pH, CE y sulfatos, podrían ser indicadores de la afectación por la dispersión de los jales. Los procesos de oxidación de los sulfuros e hidrólisis mineral han provocado la movilización de MMTOX, lo que justifica las concentraciones elevadas de los metales en estudio encontrados en esta zona. Los suelos de La Concha tienen un pH ligeramente ácido a neutro, la conductividad eléctrica y concentración de sulfatos son relativamente altas y en la mayoría de las muestras el Pb, Cd y As presentan altas concentraciones. El pH del suelo tiene un efecto en la movilidad del Pb y As dentro del suelo. Bajo condiciones ácidas los metales son más móviles y por lo tanto más disponibles para la planta (Henry, 2000; Jarvis et al., 2002; Zhi-ting y Ping, 2002). Los resultados obtenidos de pH del suelo ligeramente ácidos a neutros, pueden resultar en una baja biodisponibilidad de los metales para la planta de maíz.

### 9.2 CONCENTRACIONES DE METALES EN SUELO

En el área de estudio de la zona control y minera las concentraciones en suelo de todos los metales en estudio presentan el orden de proporción siguiente: Fe>Pb>As>Cd. Las concentraciones de As, Cd y Pb en la zona minera (San Antonio y La Concha), superan en al menos un orden de magnitud los valores de la zona control y exceden los límites permisibles para suelos establecidos por la Comunidad Europea (Zartner-Nyilas, 2002), concentración crítica (Kabata-Pendias, 1992), concentraciones de referencia totales (NOM-147) y concentraciones regionales de fondo en suelo de cultivo (Talavera *et al.*, 2005) (Tabla 19).

Los suelos de la zona minera (San Antonio y La Concha) son los sitios de mayor concentración

de Pb, As y Cd, rebasan los máximos permisibles, por lo que esta zona constituye un reto ambiental en la región, de acuerdo con la NOM-147 (2004), que establece que los suelos contaminados destinados a la agricultura deben someterse a una limpieza y remediación (Tabla 19). En general, se puede decir que la concentración total de los MMTOX en suelo rebasan en varios órdenes de magnitud los valores de fondo determinados para el área de estudio, lo que sugiere que en las dos áreas de la zona minera hay afectación debido a la dispersión de las partículas que constituyen a los jales y que son transportados por la acción del agua y del viento. El aporte del material de los jales se deposita en el suelo de las parcelas de cultivo y su acumulación significa un riesgo potencial para el ser humano, por tanto a los cultivos y plantas comestibles, en este caso el maíz. Sin embargo, al no tener la información y conocimiento de los efectos o consecuencias en la salud por la exposición a estos metales, muchos de los pobladores de áreas cercanas a sitios contaminados las utilizan para realizar actividades agrícolas. Además, los MMTOX en suelo pueden tardar mucho tiempo en reducir su concentración, ya que no pueden ser degradados, sólo se transforman a otros estados de oxidación y/o especies que podrían reducir su movilidad.

Las altas concentraciones de Fe, Pb y As que fueron encontradas en la zona de San Antonio, indican que su liberación se produce a valores de pH ácido, lo que facilita la movilización de los metales, haciéndolos más disponibles para la planta. A diferencia de la zona de La Concha que presenta alta concentración de Cd y valores de pH ligeramente alcalinos, en esta zona hay una disminución en la concentración de Fe, Pb y As que probablemente se deba a que se ha minimizado el proceso de oxidación de minerales sulfurosos. En esta área minera se ha identificado la calcita, la cual reacciona con las soluciones ácidas impidiendo el transporte de  $H^+$  y sulfatos generado por la oxidación de los minerales como la pirita y otros sulfuros presentes. Así mismo, la calcita es el principal mineral con capacidad de neutralización y además está presente en las rocas de la Formación Mexcala, donde se encuentran localizados los suelos estudiados (Talavera *et al.*, 2005; Romero, 2000) (Figura 11).

Las altas concentraciones totales de los MMTOX en las muestras de suelo de la zona minera, presentan resultados congruentes con la mineralogía que se ha identificado para los yacimientos minerales del área de estudio (Tabla 25) (Talavera *et al.*, 2005). En el área de San Antonio, los contenidos de Pb se encuentran relacionados con la galena ( $PbS$ ), que fue identificada como la principal fase portadora de este metal. Con relación al área de La Concha los contenidos de As se encuentran relacionados con la arsenopirita ( $FeAsS$ ), identificada como la principal fase portadora de este elemento. En la zona minera (San Antonio y La Concha), los contenidos de Fe se encuentran relacionados con la pirita y la calcopirita ( $CuFeS_2$ ) que fueron identificadas como fases portadoras de este metal, sólo en La Concha se

identificaron variedades de minerales secundarios de Fe como son la jarosita ( $KFe_3^{3+}(SO_4)_2(OH)_6$ ), escorodita ( $Fe^{2+}AsO_4 \cdot 2H_2O$ ) y goetita  $FeO(OH)$  (Tabla 25) (Talavera *et al.*, 2005).

**Tabla 25.** Características generales y mineralogía de las zonas minera de San Antonio y La Concha de Taxco, Guerrero (Talavera *et al.*, 2005).

Características generales	San Antonio	La Concha
Tipo de Residuos	Residuos de Rocas	Jales
Inicio de Operaciones	-	1940 – 1950
Volumen Aproximado (millones de toneladas)	0.3	0.6
Calcita	X	XX
Cuarzo	XXXX	XXXX
Pirita	XXXX	XXXX
Galena	XXXX	X
Calcopirita	XXXX	XX
Esfalerita	XXXX	XXXX
Arsenopirita		X
Yeso		XXXX
Jarosita		XXXX

El suelo presenta una alta concentración de Fe (metal de mayor concentración en toda el área de estudio) asumiendo que una proporción importante de este Fe estuviera asociado a la pirita, su presencia sugiere su abundancia relativa, probablemente por la contaminación de los jales hacia el suelo e indica que todavía podría tener potencial para seguir oxidándose; principalmente en el área minera de San Antonio. Además, el Fe es uno de los metales más abundantes de la corteza terrestre (en suelo se estima en un 3.8%), se encuentra formando distintos compuestos, principalmente óxidos e hidróxidos de distinta composición y grados de cristalización, que serán los que controlen principalmente la solubilidad de Fe en suelo (Murad y Fischer, 1988; Lindsay, 1979). Así mismo, para las plantas, el Fe es un elemento esencial cuya solubilidad resulta afectada por la acidificación del suelo, al incrementarla y así su disponibilidad para la planta de maíz, tal es el caso que presenta el área de San Antonio (promedio de pH 4.7), como se observa en nuestros resultados.

De las dos áreas mineras, los jales de La Concha son los más antiguos (inicio de operaciones en los años 40-50s) (Talavera *et al.*, 2005) (Tabla 25). El suelo de esta área, presenta medianas concentraciones de hierro (comparándolo con los de San Antonio). Generalmente, se reconoce que la pirita ( $FeS_2$ ), es la principal fuente generadora de ácido y de Fe. Sin embargo, la oxidación de minerales sulfurados, tales como la galena ( $PbS$ ) y calcopirita ( $CuFeS_2$ ), puede liberar iones metálicos ( $Pb$  y  $Fe$ ), pero no generar acidez (Balistrieri *et al.*, 1999). La intemperización de los jales, en condiciones oxidantes favorece la transformación de los sulfuros como la arsenopirita a sulfatos y la consecuente solubilización de los MMTOX, lo

que facilita la lixiviación hacia el suelo. En relación al Cd, en las dos áreas mineras, no se han reportado fases sólidas portadoras para este metal, aunque su presencia puede estar relacionada con la esfalerita (ZnS), ya que impurezas de Cd en sulfuros metálicos han sido reportadas en otros estudios (Romero *et al.*, 2007). Además, por su elevada disponibilidad, podría encontrarse adsorbido en partículas del suelo e incluso absorbido en la biomasa de la planta de maíz.

En el área de San Antonio, particularmente se presentan mayores concentraciones de Pb que As y Cd. Las concentraciones totales de Pb reportadas por otros autores en otras áreas mineras son mayores que las obtenidas en este trabajo (Reséndiz, 2007) (Jal Rojo; Zimapán, Hidalgo), (Conesa *et al.*, 2007) (Belleza, 2007), (Conesa *et al.*, 2006) (Belleza y Gorguel, 2006). Otros autores reportan concentraciones menores (Carrillo *et al.*, 2006), como las otras dos áreas de estudio de Reséndiz (2007) y las estudiadas por Gutiérrez-Ruiz *et al.*, (2007), Salas *et al.*, (2009), Conesa *et al.*, (2006) (El Lirio), Hongyu *et al.*, (2005), Yankun *et al.*, (2004, 2005), Del Río *et al.*, (2002) y Simón *et al.*, (2001) (Tabla 26). Para As y Cd, las concentraciones reportadas por diferentes autores son mayores a las obtenidas en este trabajo, Reséndiz (2007), y para Cd por Gutiérrez-Ruiz *et al.*, (2007). El intervalo de concentración de As reportado por Armienta *et al.*, (2008) fluctúa de menor a mayor a la obtenida en este trabajo, al igual para Carrillo *et al.*, (2006) en Cd. Para Franco *et al.*, (2010), Moreno *et al.*, (2009) las concentraciones son mayores a las obtenidas en este trabajo en Cd y As, excepto para Cd por Conesa *et al.*, (2007). De otras áreas mineras se reportaron concentraciones menores de As y Cd (Del Río *et al.*, 2002 y Simón *et al.*, 2001) (Tabla 26). Finalmente, las concentraciones totales de Fe reportadas por otros autores en otras áreas mineras son mayores que las obtenidas en este trabajo (Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2007, Franco *et al.*, 2010) y las tres áreas estudiadas por Reséndiz (2007) (Jal Rojo, San Miguel Nuevo y San Miguel Viejo; Zimapán, Hidalgo) (Tabla 26).

Por otra parte, en el área de La Concha, las concentraciones totales obtenidas de Pb en este trabajo son superiores a las de otras áreas mineras (Carrillo *et al.*, 2006, Reséndiz, 2007, excepto en Jal Rojo, Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2007, Salas *et al.*, 2009, Franco *et al.*, 2010, Hongyu *et al.*, 2005, Yankun *et al.*, 2004; 2005, Del Río *et al.*, 2002 y Simón *et al.*, 2001) (Tabla 26). Así también, para Cd, las concentraciones obtenidas en este trabajo son superiores a las de otras áreas mineras (Carrillo *et al.*, 2006, Gutiérrez-Ruiz *et al.*, 2007, Moreno *et al.*, 2009, Conesa *et al.*, 2007, Hongyu *et al.*, 2005, Del Río *et al.*, 2002 y Simón *et al.*, 2001). Igualmente, para el As (Del Río *et al.*, 2002 y Simón *et al.*, 2001). Por último respecto al Fe son mayores a las reportadas por Yankun *et al.* (2004; 2005) (Tabla 26).

**Tabla 26.** Concentración promedio de As, Cd y Pb y Fe en suelo afectado por residuos mineros en el área de estudio y en diferentes áreas mineras.

As	Metal			Área Minera	Referencia
	Cd	Pb	Fe		
	mg/kg <sup>-1</sup>			Taxco; Guerrero	<i>Datos obtenidos</i>
591	14	4 760	25 830	<i>San Antonio</i>	en este trabajo
376	55	2 162	10 517	<i>La Concha</i>	
				Zacatecas	Carrillo <i>et al.</i> , 2006
	22.6	1 489.4		<i>El Bote</i>	
	3	16.3		<i>Fresnillo</i>	
	9.3 - 93	126 - 702		<i>Sombrerete</i>	
	3.3	36.3		<i>Noria de los Ángeles</i>	
				Zimapán; Hidalgo	Reséndiz, 2007
2 718	260	1 719	125 593	<i>San Miguel Nuevo</i>	(Época Secas, superficial)
13 462	546	1 749	192 181	<i>San Miguel Viejo</i>	
7 219	114	5 029	472 659	<i>Jal Rojo</i>	
				Chihuahua	Gutiérrez-Ruiz <i>et al.</i> , 2007
401	22	1 414	37 000	<i>Santa Bárbara</i>	
				Zimapán; Hidalgo	Armienta <i>et al.</i> , 2008
294 - 2579					
				Zacatecas	Salas <i>et al.</i> , 2009
		1 484.5		<i>Francisco I Madero</i>	
				San Luis Potosí	Franco <i>et al.</i> , 2010
8 420	80.9	754	46 645	<i>Villa de la Paz</i>	
				Madrid, España	Moreno <i>et al.</i> , 2009
	16.35			<i>Mónica</i>	
				Cartagena, España	Conesa <i>et al.</i> , 2007
1 900	9	7 000		<i>Belleza</i>	
				Cartagena, España	Conesa <i>et al.</i> , 2006
		17 500		<i>Belleza</i>	
		5 433		<i>El Gorguel</i>	
		4 675		<i>El Lirio</i>	
				Chenzhou, China	Hongyu <i>et al.</i> , 2005
459.02	6.77	751.98		<i>Shizuyuan</i>	
709.29	7.57	1 088.3		<i>Guanyin Bridge</i>	
192.49	2.7	321.11		<i>Jintianchun</i>	
		1 896.0	13 267.7	Yunnan, China	Yankun <i>et al.</i> , 2005
		1 183.4	13 231.2		
			9 166.7		
			8 755.3		
		428.3	12 139.50	Lanping, China	Yankun <i>et al.</i> , 2004
		84.31	5 211.32		
		84.3	1 914.62		
				Sevilla, España	Del Río <i>et al.</i> , 2002
78	0.3	453		<i>Soberbina</i>	
163	1.0	203		<i>Vicario</i>	
224	4.9	826		<i>P241</i>	
68	3.2	382		<i>Quema</i>	
				Aznalcóllar, España	Simón <i>et al.</i> , 2001
50.2	2.7	156.2		<i>Mina</i>	Fecha de muestreo 28 de
82.5	2.2	196.1		<i>Soberbina</i>	Julio del 2008.

### 9.3 CONCENTRACIÓN DE METALES EN *Zea mays*

De manera general, en las tres áreas de estudio la planta de maíz presenta concentraciones significativas de Fe (zona control), Pb, Cd y Fe (zona minera) (ver Tabla 20, por zona, metal y tejido). En las dos áreas de la zona minera (San Antonio y La Concha), las concentraciones promedio de As, Pb y Cd (excepto el área de San Antonio) en las plantas de maíz rebasan las concentraciones críticas para plantas establecidas por Kabata-Pendias (1992) (Tabla 21). En relación al Fe, no existe criterio de concentración crítica para plantas.

Las concentraciones de As en maíz de las zonas con residuos mineros (San Antonio y La Concha), superan al menos en 1 orden de magnitud los valores de la zona control y exceden los criterios de concentración crítica para plantas. La mayoría de los metales pesados ingresan a la planta vía raíz, a través de intercambio iónico celular y absorción, y posteriormente son transportados hacia los demás tejidos de la planta (Taiz *et al.*, 2002). De otros trabajos, se han identificado plantas que crecen en suelo contaminado por residuos mineros, que presentan la capacidad para desarrollar tolerancia a As, como lo son *Agrostis capillaris* (3 470 mg kg<sup>-1</sup>) y *Cynodon dactylon* (12 450 mg kg<sup>-1</sup>), *Pityrogramma calomelanos* (8 000 hojas y 800 en raíz mg kg<sup>-1</sup>) (Fitz y Wenzel, 2002) y *Pteris vittata* (22 630 mg kg<sup>-1</sup>) (Ma *et al.*, 2001). En México, en la zona minera de Zimapán, Hidalgo; Armienta *et al.*, (2008) evaluaron concentraciones de As en hojas de mezquite (*Prosopis laevigata*) y huizache (*Acacia farnesiana*) con 82.7 mg kg<sup>-1</sup> y 67.0 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Basado en la definición de planta hiperacumuladora establecida por Ma *et al.*, (2001) para As de 1000 mg kg<sup>-1</sup>, en plantas que concentran metales en sus tejidos (biomasa), la planta de maíz no puede considerarse hiperacumuladora de As.

El Cd en plantas es un metal no esencial y es considerado el más fitotóxico aún en concentraciones bajas, es uno de los metales más fáciles de absorber y tiende a acumularse en los tejidos de la raíz y sólo pequeñas cantidades son transportadas a los demás tejidos (Bingham, 1980; Rauser, 1986 y Szalai *et al.*, 2002). Florijn *et al.*, (1993) mencionan que la planta de maíz en varias líneas puras, tiene la habilidad de retenerlo. La planta de maíz muestra la capacidad para tolerar, acumular y también, la estrategia fisiológica de exclusión como la compartimentalización, inmovilización en la pared celular y la membrana plasmática (Florijn *et al.*, 1993; Lasat, 2000; Nikolic *et al.*, 2008). La capacidad de soportar estas concentraciones altas, probablemente se deba a la presencia de mecanismos de protección celular al Cd por fitoquelatinas. De acuerdo con Baker *et al.*, (1989) para considerar a una planta hiperacumuladora debe de concentrar 100 mg kg<sup>-1</sup> de Cd (biomasa), comparando con los resultados obtenidos en Taxco, se concluye que la planta de maíz no puede considerarse planta hiperacumuladora de Cd.

En relación al Pb, en la zona minera la concentración es la más alta de todos los MMTOX considerados en este estudio, principalmente en el área de San Antonio, lo que indica que el maíz tiene la capacidad preferente de absorber Pb del suelo y translocarlo hacia los demás tejidos. Probablemente se deba a que el Pb se encuentra en una forma activa en los suelos. El Pb es un metal que no tiene función fisiológica en el hombre, para el cual también representa un riesgo para la salud. La elevada concentración de plomo en los suelos de la zona minera, puede generar efectos negativos o causar severos efectos fitotóxicos, entre ellos el incremento de la permeabilidad de las raíces, que las hace menos selectivas para la absorción de elementos desde el medio. Además, a nivel fisiológico podrían inhibir la fotosíntesis y respiración. Sin embargo, como muchas de las plantas, el maíz tiene la capacidad de absorber concentraciones de metales pesados, siempre que se encuentren en formas solubles o asociados a nutrientes esenciales para su metabolismo. Basado en la definición de planta hiperacumuladora establecida por Baker *et al.*, (1989); Baker *et al.*, (2000) para el Pb de 1000 mg kg<sup>-1</sup>, en plantas que concentran metales en sus tejidos (biomasa), la planta de maíz no puede considerarse planta hiperacumuladora en Pb. La comparación de nuestros resultados con el criterio utilizado para clasificar a las plantas hiperacumuladoras indica que la planta de maíz recolectada en las cercanías a los residuos mineros solo es hipertolerante para este metal. Los valores obtenidos de Fe en plantas de la zona control y minera superan las concentraciones que como micronutriente requieren las plantas (100 mg kg<sup>-1</sup>) (Bartolini, 1990; Buckman, 1993 y Hopkins, 1995), no existen criterios sobre límites de fitotoxicidad, sólo contenido normal (Zuang, 1982).

La planta de *Zea mays* presenta niveles de metales considerados como fitotóxicos; sin embargo, no se observaron daños físicos evidentes a simple vista como necrosis, ni interrumpió su crecimiento. Posiblemente, desarrolló ciertos mecanismos bioquímicos que le permiten evadir en cierto grado la acción tóxica de estos MMTOX. La planta de maíz, siendo de ambientes terrestres y al estar sujeta a constantes cambios (geoquímicos, biológicos, edafoclimáticos y adaptaciones fisiológicas) es obligada a desarrollar mecanismos o estrategias muy precisas para resistir, tolerar y sobrevivir en suelos con altos niveles de MMTOX. Además de tolerar estas altas concentraciones de los metales en estudio, también es capaz de tolerar factores adversos en su entorno ambiental natural; el presentar estos cambios y/o estrategias, en presencia de las diferentes unidades de suelo con las características físicas determinadas, constituye una ventaja para la sobrevivencia de la planta. Igualmente contribuyen a que las fuerzas de selección natural produzcan modificaciones en ella debido a los procesos de micro-macroevolución, que se han dado a través de los años, uno de ellos originado por actividades antropogénicas (Bondada et al., 2002).

El maíz se puede considerar como una planta acumuladora de As, Cd y Pb, lo que muestra su extraordinaria y compleja adaptación fisiológica en suelo contaminado por residuos mineros. Sin embargo, son pocos los estudios realizados en suelo agrícola y donde se cultiven especies de plantas para consumo humano básico en zonas impactadas con dichos residuos. Por otra parte, los campesinos utilizan depresiones cercanas a los residuos mineros (no hay ninguna precaución en la distancia para ubicar la parcela del cultivo a cosechar), probablemente los seleccionan como fuente de suministro de agua (escurrimientos) para satisfacer la demanda fisiológica del cultivo y además como abastecimiento constante de suelo a la parcela, ya que la estructura física que presenta el material de los jales es de grano muy fino y es similar en varios aspectos físicos al suelo. Como resultado de esta práctica los MMTOX se transportan, acumulan y absorben en el suelo y especies vegetales (las que son consumidas por el hombre), existiendo un riesgo de exposición de MMTOX para los seres humanos. La ruta de entrada a la cadena trófica de los MMTOX, es la ingesta directa de las partículas del suelo por los animales (ganado) que al pastar puede ser una fuente importante en su dieta. A su vez, la carne de los animales del ganado es consumida por el ser humano, lo cual significa un riesgo potencial para la salud del hombre. Otra de las rutas es el consumo de las plantas nativas y el desecho de la planta de maíz (rastrojo, producido después de segar), que son consumidas por los animales. Por lo tanto, puede ser por estas vías potenciales suelo-planta-animal-humano, la entrada de los MMTOX al cuerpo humano.

En la zona minera, para las dos áreas de estudio San Antonio y La Concha, se identifica una mayor concentración total de Pb que de As y Cd (Anexo 2, Tabla 27). Las concentraciones de estos metales rebasan los valores de la concentración crítica para plantas y además, son mayores que las reportados por otros autores en otras áreas mineras (Del Río *et al.*, 2002, Hongyu *et al.*, 2005, Boularbah *et al.*, 2006) (Tabla 27). En el área de estudio el tejido de la raíz de *Zea mays* presentó la mayor acumulación de todos los metales, las concentraciones de los otros tejidos de la planta fueron menores. El orden de proporción de los MMTOX, tejido y zona de estudio se citan en la tabla 20. Se observaron diferencias en las concentraciones de As en raíz y en hoja entre la zona control y la minera. La planta de *Zea mays* tiene la capacidad de acumular estos MMTOX, principalmente en la raíz, esto se debe a que los metales son secuestrados en las vacuolas de este tejido, en segundo término la hoja y por último los tejidos reproductivos o comestibles (granos, semillas) que presentan menores concentraciones.

**Tabla 27.** Concentración promedio de As, Cd y Pb en plantas afectadas por residuos mineros en diferentes áreas mineras.

Planta	Metal			Área Minera	Referencia
	As	Cd	Pb		
<i>Suma Promedio</i>	8	1	13	Taxco, México	Datos obtenidos en este trabajo
	399	27	2 112	<i>San Juan</i>	
	227	401	1 379	<i>San Antonio</i> <i>La Concha</i>	
		(mg kg <sup>-1</sup> )		Zacatecas, México	Carrillo <i>et al.</i> , 2006
<i>Teloxys graveolens</i>		42.9	125	<i>El Bote</i>	
<i>Polygonium aviculare</i>		37	124		
<i>Jatropha dioica</i>		30.5	112		
<i>Stachys coccinea</i>		12	96	<i>Sombrerete</i>	
<i>Polygonium aviculare</i>		6.5	62		
<i>Aster gymnocephalus</i>		7	40		
<i>Casuarina equisetifolia</i>		15	32	<i>Fresnillo</i>	
<i>Cyperus sp.</i>		13.8	32		
<i>Solanum elaeagnifolium</i>		5	80		
<i>Asphodelus</i>		9.2	104	<i>Noria de los Angeles</i>	
<i>Salsola kali L.</i>		4.8	92		
<i>Solanum elaeagnifolium</i>		8	151		
<i>Andropogon barbinodis</i>		3.8	112		
				Sevilla, España	Del Río <i>et al.</i> , 2002
<i>Amaranthus blitoides S.</i>	114	4.3	225	<i>Soberbina</i>	
<i>Beta vulgaris</i>	6	1.6	104		
<i>Coronopus squamatus F.</i>	21	7	104		
<i>Solanum nigrum L.</i>	4.5	1.6	53		
<i>Amaranthus blitoides S.</i>	21		86	<i>Vicario</i>	
<i>Cynodon dactylon (L)</i>	10		26		
<i>Amaranthus blitoides S.</i>	11	0.4	34	<i>P241</i>	
<i>Cynodon dactylon (L)</i>	17	0.1	37		
<i>Piptatherum milliaceum L.</i>			30		
<i>Amaranthus blitoides S.</i>	11	1.1	32	<i>Quema</i>	
<i>Anchusa azurea Miller</i>	17	1.9	43		
<i>Convolvulus arvensis L.</i>	8	0.6	30		
				Chenzhou, China	Hongyu <i>et al.</i> , 2005
<i>Zea mays</i> (maíz)	0.21	0.47	1.91	<i>Shizuyuan (SZY)</i>	
<i>Capsicum</i> (pimiento)	1.3	1.37	4.58		
<i>Zea mays</i> (maíz)	1.48	0.03	0.29	<i>Guanyin Bridge (GYB)</i>	
<i>Oryza sativa</i> (arroz)	0.49	6.99	0.8		
<i>Sorghum</i> (sorgo)	2.22	0.14	4.25		
<i>Capsicum</i> (pimiento)	14.79	0.57	23.81		
<i>Arachis hypogaea</i> (cacahuete)	1.63	0.55	0.78		
<i>Zea mays</i> (maíz)	0.12	0.05	0.18	<i>Jintianchun (JCT)</i>	
<i>Oryza sativa</i> (arroz)	0.93	0.38	0.24		
<i>Sorghum</i> (sorgo)	0.38	0.16	0.1		
<i>Capsicum</i> (pimiento)	0.83	0.51	2.38		
<i>Arachis hypogaea</i> (cacahuete)	0.27	0.36	0.13		
<i>Xeranthemum inapertum (L.)</i>		0.56		Marrakech, Morocco	Boularbah <i>et al.</i> , 2006
<i>Lavandula dentata L.</i>		0.60			
<i>Echium plantagineum L.</i>		1.84			
<i>Ononis natrix L.</i>		2.90			
<i>Rumex buccifolius L.</i>		1.38			

El Cd y Pb en el tejido de la raíz de la zona minera (San Antonio y La Concha) presentaron las

concentraciones promedio más altas de la zona de estudio (Anexo, 2, Tabla 28). Chaney *et al.*, (1997) indican que la raíz puede acumular 10 veces más Cd que la parte aérea. Se muestra que hay una alta absorción y acumulación de Cd en *Zea mays* y en raíz; mientras tanto, en algunos otros vegetales es relativamente baja la acumulación de este metal (Ver Tabla 28). Aunque el Cd no es un elemento esencial para las plantas, estas lo absorben en la raíz por vía pasiva y es traslocado libremente a las hojas (Das *et al.*, 1997; Bingham, 1980). Lombi *et al.*, (2001) observaron que el maíz (raíz) acumula mayores concentraciones de Pb en comparación a los tejidos aéreos. Como lo mencionan Piechalak *et al.*, (2002), la raíz puede tomar de 3 a 50 veces más Pb que las hojas. Este comportamiento se explica por el hecho de que la raíz es la ruta principal para la entrada de los metales pesados a la planta. Bondada *et al.*, (2002) demostraron que el secuestro de los metales en las vacuolas de la raíz previene el desplazamiento a otros tejidos de la planta, como es para tallo y hoja, que no tienen una función primordial de almacenar metales pesados.

La raíz del maíz presenta mayor capacidad de concentrar Pb que la hoja, resultados que coinciden con lo observado por Cobb *et al.*, (2000) en plantas de *Lactuca sativa*, *Raphanus sativus*, *Phaseolus vulgaris* y *Lycopersicum esculentum* (Tabla 28). Comparando los resultados obtenidos en el presente trabajo y los de Cobb *et al.*, (2000), se observa que hay una similitud en el orden de acumulación (excepto en La Concha, con Cd), lo que también indica que el Pb está disponible para otras especies de vegetales (comestibles) las cuales tienen la capacidad preferente de absorber Pb del suelo y translocarlo hacia el tejido de la hoja. Ello es explicado, en parte, porque la absorción de Pb por las plantas es afectada de manera frecuente por la difusión lenta en el suelo, razón por la cual la raíz lleva cierta ventaja sobre la hoja (y los demás tejidos) en especial en edad temprana. Además, el Pb es el menos móvil de los metales pesados en suelo, generalmente se acumula en la superficie.

**Tabla 28.** Concentración promedio de As, Cd y Pb en diferentes especies de plantas afectadas por residuos mineros.

Planta	Metal ( $mg\ kg^{-1}$ )						Área Minera	Referencia
	As		Cd		Pb			
<i>Zea mays</i>	hoja	raíz	hoja	raíz	hoja	raíz	Taxco; Guerrero, México	Datos obtenidos en este trabajo
	1.99	395.9	3.38	22.53	16.0	2 079.95	San Antonio	
	1.88	224.5	16.0	379.1	6.20	1 370.50	La Concha	
<i>Phaseolus vulgaris</i> (frijol)	18.5	29.2	1.35	2.75	46.0	117.0	Utah, EE.UU.	Cobb <i>et al.</i> , 2000
	39.3	58.3	0.86	4.62	222	522.0	Bingham Creek	Mezcla de residuos mineros y suelo pro-Fundidad (0-15 cm)
<i>Raphanus sativus</i> (rábano)	9.63	2.94	8.76	2.31	261	92.4	25% Residuos mineros	Fundidad (0-15 cm)
	3.91	10.6	11.8	3.38	170	131.0	50% Residuos mineros	
<i>Lycopersicum esculentum</i> (tomate)	5.30	37.9	2.63	7.23	72.5	244.0		
	5.65	41.0	4.42	10.8	71.0	602.0		
<i>Lactuca sativa</i> (lechuga)	21.5	37.5	5.37	5.85	227	475.0		
	14.8	37.7	8.61	8.11	248	469.0		

Los datos de Cobb *et al.*, (2000) se obtuvieron en muestras de especies vegetales desarrolladas en una mezcla de residuos mineros y suelo superficial (0-15 cm de profundidad) (Tabla 28). La concentración de Fe en raíz, normalmente es superior a la de las hojas (aunque para San Antonio, es el tercer lugar en acumulación después de Pb y Cd) lo que refleja en cierta medida la disponibilidad de Fe en suelo y el maíz (solo las gramíneas) presenta un mecanismo para producir fitosideróforos (agente quelante natural) que extraen el metal del suelo.

Respecto al tejido de la hoja, en la Tabla 20 se presenta el orden de proporción por zona de estudio y por MMTOX. Los datos obtenidos en este trabajo para la zona minera (San Antonio y La Concha), muestran que el Pb y el Cd presentan una concentración significativa. Esto indica que también existe absorción de estos metales a través de las hojas y podría deberse al arrastre del viento y la deposición de los granos de jales-suelo, cuando se encuentran sobre la superficie de la hoja (a través de sus caras expuestas) lo que permite que penetren a la cutícula y a la pared por difusión libre, posteriormente se introducen vía apoplasto y son absorbidos en la membrana plasmática; finalmente llegan al citoplasma (Fergusson, 1984), Además, pueden influir en la absorción de metales las condiciones climáticas del área de estudio; siendo factores importantes la temperatura, evaporación y disponibilidad de la luz (Prieto-García *et al.* 2005), lo que refleja la necesidad de la planta de responder a las alteraciones de las condiciones ambientales estableciendo mecanismos de control de entrada transporte y acumulación del metal tóxico a nivel celular de cada tejido.

En el área de San Antonio, estos metales presentan concentraciones menores a las obtenidas por Cobb *et al.*, (2000); excepto para Cd en La Concha donde la concentración es mayor comparada con las determinadas en los vegetales analizados en la zona minera de Bingham Creek (Cobb *et al.*, 2000). La hoja podría considerarse como tejido bioindicador de niveles de concentración de estos metales en suelo y con base a ello, podría valorarse para un estudio de ecotoxicidad en suelo contaminado; para nuestro caso, residuos mineros.

El grano de *Zea mays* tiene una concentración significativa de Fe (zona control) y Pb (zona minera) (Tabla 29). En la zona minera (San Antonio y La Concha), el As presenta diferencias en las concentración en el grano pues en el área de San Antonio fue mayor que en La Concha. Además las concentraciones no superan el valor máximo permisible para grano de acuerdo a los criterios señalados en la normatividad mexicana (NOM-187, 2002), lo que sugiere que fue excluido del tejido del grano. Con relación al Cd, los valores de las concentraciones promedio obtenidas en grano de maíz de San Antonio y La Concha rebasan el máximo permisible para este tejido (LFU, 1989) (Tabla 29). Por otro lado, el valor promedio obtenido del área de San

Antonio, supera el valor señalado como límite máximo de la NOM-247 (2008) (Tabla 29). En el área de La Concha hubo valores de concentración bajos de Cd, lo que se atribuye a una translocación pobre desde las raíces, hacia tallo y grano. Malan y Farrant (1998) indican que la soya (*Glycine max*, familia de las Leguminosas), concentra el Cd 30 veces más en raíz que en hojas, mientras que la concentración fue menor en semillas. Los metales no esenciales en plantas, como lo es el Cd, también se transportan a las semillas y esto representa un problema a especies de plantas cultivadas, los niveles de metales presentes en las semillas pueden exceder los límites de seguridad para el consumo humano. Sankaran y Ebbs (2008) demostraron en *Brasica juncea* L. Czern, que el transporte de Cd a las semillas se realiza a través del floema (xilema a tallos) y por el transporte rápido hacia hojas antes que se compartamentalice en la vacuola de la raíz.

Las concentraciones promedio de Pb obtenidas en el grano de maíz de la zona minera de San Antonio (uno de los más altos de toda el área de estudio, después del Fe), rebasan el valor máximo permisible para grano (LFU, 1989) (Anexo 2, Tabla 29). Por otro lado, los valores obtenidos en el presente trabajo no rebasan los valores de concentración señalados como límite máximo de la NOM-187 (2002) (Tabla 29). El grano de maíz tiene un valor alto de Pb en San Antonio (en comparación con La Concha y los demás MMTOX en estudio), aunque la mazorca de maíz se desarrolla a la intemperie, el grano se encuentra protegido por hojas que impiden el contacto directo con el viento y por consiguiente la deposición de partículas del jal sobre el mismo.

Con respecto al Fe, el área minera de San Antonio, presenta una diferencia significativa en la concentración promedio en el tejido del grano, siendo de las más altas de toda el área de estudio. No existe criterio señalado en la normatividad internacional y mexicana para especificar la concentración considerada como tóxica en el tejido. Siendo un metal esencial y micronutriente (necesarios para el buen funcionamiento fisiológico y metabólico de la planta) el Fe es transportado durante el desarrollo de la planta hacia el grano (semilla). En la planta, la principal fuente de Fe es a través de la captación continua que se hace en la raíz y para el desarrollo de la semilla, solo hay un aporte del 20 al 30% que viene de reservas almacenadas de los otros tejidos. Stacey *et al.*, (2008) demostraron que en soya el transporte de Fe a las semillas se produce exclusivamente a través del floema, el movimiento de la savia del xilema es impulsado por la transpiración que realiza la planta, y está limitado por la impermeabilidad de la cubierta de la semilla. Por otra parte, la planta de maíz (granos) podría enriquecer alimentos con Fe y beneficiar a los pobladores de las comunidades que no tienen acceso a este nutriente esencial. Se establece una comparación de nuestros resultados con la normatividad mexicana e internacional; la primera utiliza criterios de las NOM's (147 y 207)

que consideran el valor límite máximo de As, Cd y Pb en tortilla y en la elaboración de diferentes alimentos en los que podría estar involucrado el grano de maíz que son muy importantes en la alimentación de los mexicanos (Tabla 29).

Segunda, la normatividad internacional del Codex Alimentarius, establece los valores de referencia, que especifican límites de tolerancia para el contenido de Cd, Pb y As, en cereales (granos) y para diversos grupos de alimentos (Tabla 29). Los valores obtenidos en el área minera de San Antonio de Cd y Pb en cereales (grano) sobrepasan las concentraciones del valor promedio recomendado por la normatividad internacional del Codex Alimentarius. En tanto, en el área minera de La Concha, solo los valores de Cd en grano (cereales) exceden las concentraciones recomendadas por la normatividad internacional citada.

**Tabla 29.** Valor máximo permisible de referencia en grano, valor límite máximo de la normatividad mexicana y normatividad internacional del Codex Alimentarius en diferentes alimentos y cereales de los MMTOX en estudio.

	<b>As</b>	<b>Cd</b>	<b>Pb</b>	<b>Fe</b>
<b>Grano</b>	<i>(mg kg<sup>-1</sup>)</i> <b>LFU, 1989.</b>			
<b>Valor Máximo Permisible</b>	<b>0.5</b>	<b>0.1</b>	<b>0.3</b>	-
<i>San Juan</i>	0.05	0.05	0.13	3
<i>San Antonio</i>	0.50	0.33	4.0	5
<i>La Concha</i>	0.09	0.12	0.09	2.53
<b>Valor Límite Máximo</b>				
*NM-187-SSA1/SCFI-2002	3		8	
*NOM-247-SSA1-2008		0.1		
<b>Alimento</b>	<b>Codex Alimentarius, 2001; 2005.</b>			
<i>Vegetales de hoja</i> (excepto espinaca)		0.2	0.3	-
<i>Leguminosas</i> (ejote, chicharo, lenteja)		0.1	0.2	-
<b>Cereales</b> (granos)		0.1	0.2	-
<i>Aceite Vegetal Comestible</i>	0.1		0.1	-
<i>Sal Calidad Alimentaria</i>	0.5	0.5	2	-

#### 9.4 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE METALES (As, Cd, Pb y Fe) EN *Zea mays*.

##### PLANTA

De manera general, la entrada de metales a la planta refleja el contenido de metales en suelo. Los datos obtenidos en este trabajo de la zona minera de San Antonio y La Concha para los MMTOX en estudio indican que el Cd presenta un coeficiente de transferencia significativo, es mucho más alto que los del Pb, As y Fe. Se observa que los rangos de valores del coeficiente de transferencia para Cd tiene un orden de magnitud más alto que los demás metales en

estudio (Tabla 30). El Cd es más fácil de absorber y ser transportado desde la raíz hacia la parte comestible de la planta, para este caso el grano de maíz. Esto indica que el Cd tiene alta biodisponibilidad, presentando concentraciones bajas en suelo, comparándolas con los otros tres metales. El Cd y Pb, metales sin función biológica conocida presentan mayor coeficiente de transferencia. Sin embargo, el Cd presentó concentraciones bajas en suelo, lo que está expresando una transferencia mayor con respecto a los demás metales. Probablemente, la movilidad y absorción selectiva es más dependiente de las características químicas del metal en suelo y de los mecanismos de absorción y traslocación de la planta, para nuestro estudio el maíz.

Harrison y Chirgawi (1989 a) reportaron coeficientes de transferencia de Cd y Pb en *Lactuca sativa* (lechuga) y Coughtrey y Thorne (1983) en Cd en cereal (grano), menores a los obtenidos en este trabajo (Tabla 2). Kloke *et al.*, (1984) cuantificaron coeficientes de transferencia para el Cd, que se encuentran dentro del rango establecido (1-10) y para el Pb entre 0.01 y 0.1; los coeficientes de transferencia obtenidos en este trabajo fueron mayores a los reportados por este autor. Mientras tanto, el As presenta un coeficiente de transferencia bajo (menor a 1), este valor se presentó en los tres sitios de muestreo. Los coeficientes de transferencia, comparados con los datos obtenidos en el presente trabajo son bajos con respecto a los reportados por Kloke *et al.*, (1984). El Fe, es considerado metal esencial para la planta, se observa una concentración significativa en grano, la cual es mayor en el área de San Antonio, el coeficiente de transferencia fue menor a 1 (excepto en la zona control) (Tabla 2 y 30).

El As, Pb y Fe (excepto en San Juan) tienen baja biodisponibilidad para la planta. Estos metales al lixiviarse de minerales generalmente precipitan y están relativamente inmóviles debido a que los minerales alcalinos como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), presentes en la matriz de la roca neutralizan la acidez y favorecen la precipitación del As, Pb y Fe como óxido, hidróxido o carbonato. La obtención de los coeficientes de transferencia de metales tóxicos desde los suelos hacia las plantas es de importancia, ya que los valores obtenidos en este trabajo, en particular en la zona minera permiten estimar el contenido del metal en la planta con base en las concentraciones en suelos, y de esta manera predecir si la planta cultivada o algún tejido en específico puede ser consumido como alimento. Estos valores podrían utilizarse en zonas con suelo de tipo similar a la zona de Taxco, aunque su aplicación en otras áreas sería sólo indicativa.

**Tabla 30.** Coeficiente de Transferencia de As, Cd y Pb en la zona de estudio, en diferentes especies de plantas y áreas mineras.

Planta	Coeficiente de Transferencia				Área Minera	Referencia
	As	Cd	Pb	Fe		
<i>Zea mays</i>	0.7	2.0	0.4	0.2	Taxco, México	Datos obtenidos en este trabajo
	0.6	7.3	0.6	0.02	<i>San Antonio</i>	
					<i>La Concha</i>	
				Zacatecas, México	Carrillo <i>et al.</i> , 2006	
<i>Polygonum aviculare</i> L.		29.9	1.0		<i>El Bote</i>	
<i>Teloxys graveolens</i> W.		27.9	2.0			
<i>Jatropha dioica</i> Sessé ex		18.8	1.7			
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.		9.8	0.9			
<i>Bricckellia veronicifolia</i>		7.5	1.3			
<i>Viguiera linearis</i>		2.0	2.7		<i>Sombrerete</i>	
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.		1.2	2.0			
<i>Polygonum aviculare</i> L.		1.2	6.8			
<i>Casuarina equisetifolia</i>		5.5	1.0		<i>Fresnillo</i>	
<i>Heterospema pinnatum</i>		4.6	0.9			
<i>Cyperus sp.</i>		3.8	1.4			
<i>Asphodelus fistulosus</i> L.		9.8	0.9		<i>Noria de los Ángeles</i>	
<i>Salsola kali</i> L.		6.3	1.6			
<i>Bahía absinthifolia</i> B.		5.8	3.4			
					Guadarrama, España	Moreno <i>et al.</i> , 2009
<i>Salix Atrocinera</i>		4.3			<i>Mina Desfiladero</i>	
<i>Digitalis thapsi</i>		2.9				
<i>Hypericum perforatum</i>		2.1				
<i>Xeranthemum inapertum</i> (L.)		1.04			Marrakech, Marruecos	Boularbah <i>et al.</i> , 2006
<i>Lavandula dentata</i> L.		1.11				
<i>Echium plantagineum</i> L.		0.11				
<i>Ononis natrix</i> L.		15.3				
<i>Rumex bucephalophorus</i> L.		3.0				
<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill			0.76		Yunnan, China	Yankun <i>et al.</i> , 2005
<i>Oxalis corymbosa</i> DC.			0.65			
<i>Potentilla fulgens</i> Wall.		0.26				
<i>Plantage erosa</i> Wall.		0.38				
<i>Rhododendron annae</i>		6.02	6.68		Lanping, China	Yankun <i>et al.</i> , 2004
<i>Llex plyneura</i>		6.10	1.33			
<i>Salix cathayana</i>		1.82				
<i>Fargesia dura</i>		1.41				
					Sevilla, España	Del Río <i>et al.</i> , 2002
<i>Amaranthus blitoides</i> S.	1.74		1.15		<i>Soberbina</i>	
<i>Chamaemelum fuscatum</i>		3.7			<i>Quema</i>	
<i>Lavatera cretica</i>		3.2				
<i>Cynodon dactylon</i>	0.33					

En la zona minera, particularmente en el área de estudio de La Concha, se identifican coeficientes de transferencia mayores de Cd respecto al Pb. Sin embargo, los coeficientes de transferencia de Cd reportados por otros autores en otras áreas mineras son mayores a las

obtenidas en este trabajo (Carrillo *et al.*, 2006) (El Bote, en todas las especies de plantas citadas y Noria de los Ángeles, solo la especie de *Asphodelus fistulosus* L.; Zacatecas) y Boularbah *et al.*, (2006) en la especie de *Ononis natrix* L. (Tabla 30). Respecto al Pb, los coeficientes de transferencia obtenidos en las dos áreas mineras, San Antonio y La Concha, son menores a los reportados por Carrillo *et al.*, (2006) (todas las áreas de estudio en referencia, Zacatecas), Yankun *et al.*, (2005) (Yunnan, China), Yankun *et al.*, (2004) (Lanping, China), Del Río *et al.*, (2002) (solo *Amaranthus blitoides* S. en el área de Soberbina, España) (Tabla 30). Por último, el coeficiente de transferencia para el As en el área de San Antonio es bajo y el de La Concha es alto, comparados con los reportados por Del Río *et al.*, (2002) (Soberbina y Quema, España) (Tabla 30).

### **TEJIDO DE LA HOJA**

En la zona control de San Juan, los coeficientes de transferencia presentaron valores similares para los MMTOX en estudio y fueron relativamente altos, comparándolos con los de la zona minera, excepto para Cd. Para la zona minera de San Antonio y La Concha, el Cd presentó coeficientes de transferencia significativos, comparándolos con los de Pb, As y Fe (Tabla 23). De igual manera, el coeficiente de transferencia del tejido de la hoja tiene el mismo orden de proporción que presenta el coeficiente de transferencia en la planta de los MMTOX en estudio. Así también, la biodisponibilidad que presenta el Cd, probablemente se ve reflejada en el transporte hacia la hoja. El As y Pb presentan coeficientes de transferencia menores; en el caso del Pb, es uno de los metales que se concentra en la raíz y con los datos obtenidos no existen suficientes evidencias de translocación hacia la biomasa foliar. Sin embargo, el Fe fue el metal que presentó el coeficiente de transferencia más bajo de toda el área de estudio, principalmente en el área de La Concha.

El tejido de la hoja, presenta valores de concentración altos, esto sugiere que la hoja también podría ser utilizada en el almacenamiento de los MMTOX. Sin embargo; la mayoría de los valores de CT obtenidos en este trabajo están claramente por debajo de 1, considerándose que la bioconcentración de los MMTOX en la hoja es baja (Tabla 23). Aunque el Cd no es un elemento esencial para las plantas, estas lo absorben por la raíz y es transportado hacia la hoja. Al ser el segundo de los tejidos con una mayor concentración de metales, podría pensarse que la exposición directa al sol, tienen una influencia significativa sobre la manera en que son acumulados los metales en las hojas de la planta de maíz.

La absorción de los metales también se ve afectada por factores que intervienen en el metabolismo de la planta, como la temperatura ambiental y la disponibilidad de luz. Las hojas del maíz en presencia de luz llevan a cabo la fotosíntesis, para el cual se requiere CO<sub>2</sub>, y la

apertura de los estomas, para que sea por esta vía por donde entra el CO<sub>2</sub>. Pero a expensas de la apertura estomática se provoca una mayor transpiración de la planta en proporción al aumento de temperatura en el ambiente. El proceso de la transpiración es el primer mecanismo responsable de la movilidad del agua y de nutrientes dentro de la planta. Para este caso, el cultivo de maíz se encuentra expuesto directamente al sol, por lo que la transpiración será mayor, aumentando la absorción de agua y probablemente también de los MMTOX en estudio.

### **9.5 ÍNDICE DE TRANSPORTE DE As, Cd, Pb y Fe HACIA LOS DIFERENTES TEJIDOS DE *Zea mays*.**

De manera general, en las tres áreas de estudio y para los MMTOX determinados en este trabajo, el tejido de mayor acumulación se presenta en la raíz y el transporte hacia los otros tejidos aéreos de la planta resulta en una disminución de estos metales. La absorción de los metales por el tejido de la raíz es la ruta más importante para la entrada de metales en la planta de maíz. El tejido de la raíz, generalmente actúa como barrera, retiene metales y reduce su transferencia hacia los tejidos aéreos. Los resultados indican que es incapaz de excluir completamente estos metales potencialmente tóxicos y solo restringe su entrada absorbiendo el mayor contenido en la raíz y/o reduciendo su transporte hacia los otros tejidos. Con base al índice de transporte que presenta, la planta de maíz puede acumular y tolerar los MMTOX bajo las características químicas determinadas y ambientales del área de estudio. Sin embargo, la movilidad de estos metales, algunos considerados fitotóxicos, se puede dar a través de los tejidos, mayormente en la hoja y en orden decreciente en el tallo y grano.

Además, las plantas establecen mecanismos o estrategias adaptativas para acumular o tolerar altas concentraciones de metales. La planta de maíz muestra la capacidad de acumular dos o más metales; así mismo, esta habilidad de acumulación de un metal dado está determinada por la capacidad de entrada y transportación intracelular de la planta. Los resultados de este trabajo, de alguna manera nos dan información acerca del proceso de la movilización, el transporte y se analiza la acumulación de MMTOX en los diferentes tejidos que conforman a la planta del maíz. Se observa una tendencia de mayores concentraciones a nivel raíz a medida que la concentración en suelo aumenta. Los MMTOX se transportan de la raíz a las partes aéreas, dependiendo de la biodisponibilidad, concentración presente en el suelo, características químicas de cada metal y de la especie de planta; lo que indica la capacidad de la planta para absorber, acumular y transportar los MMTOX. Todas las plantas contienen algún metal en sus tejidos, el maíz cultivado sobre suelos contaminados por jales mineros, crece y sobrevive desarrollando algún grado de tolerancia hacia la toxicidad de los metales en estudio.

De toda el área de estudio, en la zona control (San Juan), el Cd obtuvo valores significativos en el índice de transporte para la relación raíz/hoja (uno de los índices más alto de toda el área de estudio), seguida por la relación raíz/tallo y el menor índice fue para raíz/grano (pero comparándola con los otros metales, el índice es alto). Los valores obtenidos en el índice de transporte presentan el orden siguiente Cd >Pb >As > Fe en esta zona de estudio (Tabla 24). Probablemente, el valor obtenido del índice de transporte sea alto, debido a que la concentración de Cd en la raíz, resulte probablemente de agregar fertilizantes fosfatados en el cultivo del maíz y de ello, también se refleje en el índice de transporte de la hoja.

En la zona minera, el área de San Antonio, también el Cd fue el metal que obtuvo el índice de transporte más alto en la relación raíz/hoja, seguido de raíz/tallo. De igual manera, en La Concha, estas mismas relaciones tuvieron igual orden en el índice de transporte. El Cd se absorbe eficazmente en el maíz y lo concentra dentro de sus tejidos, los índices de transporte fueron mayores a 1, principalmente en la relación raíz/hoja y en la relación raíz//tallo de las dos áreas de muestreo. En nuestros resultados, se presenta una gran diferencia entre la concentración de la raíz y la hoja, el Cd puede penetrar utilizando transportadores de otros metales tales como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Zn}^{2+}$ , que también existen en *Zea mays* L. (Clemens, 2006; Mullins y Sommers, 1986). Los resultados indican una importante restricción en el transporte interno de Cd desde la raíz hacia el tejido de la hoja (también hacia los otros tejidos de tallo y grano). Probablemente esta restricción de Cd en raíz, podría explicar la ausencia de síntomas de toxicidad en hoja, además; la raíz constituye una de las principales barreras de defensa mediante la inmovilización (en este estudio parcialmente) del Cd.

En el área de La Concha; aún presentando concentración elevada de Cd en hojas no presentan ningún daño (marchitez, clorosis en hoja) (Anexo 2 y Tabla 24). Se ha identificado que el Cd genera estrés oxidativo (producción de grandes cantidades de especies reactivas de  $\text{O}_2$ , ROS en inglés), en el que la planta aumenta sus concentraciones de carotenoides, como una medida para contrarrestar la formación de radicales libres. El Cd es capaz de aumentar seis veces el contenido de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en hojas de *Pisum sativum*. Probablemente, la planta de maíz presente un mecanismo de defensa en contra del Cd, que en la hoja, aumenta el contenido de especies reactivas de  $\text{O}_2$  (Ferrat *et al.*, 2003; Romero-Puertas *et al.*, 2004). En la zona minera de San Antonio y La Concha los menores índices fueron para la relación de raíz/grano fueron menores a 1, lo cual indica un mecanismo de exclusión para el grano; aunque el maíz tolera elevadas concentraciones de Cd en el suelo, restringe su absorción y/o translocación hacia los tejidos aéreos (Tabla 24).

En la zona control (San Juan), el Pb obtuvo valores significativos en el índice de transporte de

la relación raíz/hoja, seguida en orden por la relación raíz/tallo y el menor índice fue para raíz/grano, los tres valores obtenidos de las relaciones fueron altas en esta zona (Tabla 24). En la zona minera, el área de San Antonio, el Pb fue el metal que obtuvo el índice de transporte más alto en la relación raíz/hoja, seguido en orden la de raíz/tallo y la menor raíz/grano. De igual manera, en el área de la Concha, estas mismas relaciones tuvieron igual orden y son menores a las de San Antonio. En la zona minera, los índices fueron menores a 1, de las tres relaciones la de menor índice de transporte se presentó para el grano tanto en San Antonio como en La Concha (Tabla 24).

Una posible vía de transporte del Pb desde el suelo hacia las células de la raíz, es a través de la membrana plasmática, probablemente a través de los canales catiónicos de Ca, ya que éste bloquea el transporte de Pb dentro de la raíz y en consecuencia disminuye la toxicidad por Pb sobre el crecimiento de la misma. El efecto protector del Ca sobre la toxicidad del Pb puede ser relacionado con su inhibición para ser acumulado en el ápice de la raíz y ser blanco de la toxicidad del Pb (Yo-Young *et al.*, 2002). Dentro de las células de la raíz, la mayor parte de Pb es secuestrado en la vacuola en forma de complejos, que en plantas puede ser otro mecanismo de detoxificación de este metal (Wierzbica y Antosiewicz, 1993). Probablemente, el Pb se absorba fuertemente en el tejido de la raíz y por ello el transporte hacia la hoja (también, tallo y grano) sea menor, para evitar lesiones o daños en los tejidos aéreos (Tabla 24). Además, la distancia que existe entre ellos (raíz y tejidos aéreos); puede indicar, que la planta tenga mecanismos para acumular mayormente el metal en la raíz y sea una importante restricción en el transporte interno del Pb a la parte aérea. En el grano de maíz podría indicar un mecanismo para excluir o restringir el transporte de Pb, ya que en semillas la testa (capa externa, sirve de protección) previene la entrada de Pb.

En la zona control de San Juan los índices de transporte del Fe en las relaciones raíz/hoja, raíz/tallo y raíz/grano son relativamente altos, comparados con los del área minera de La Concha. Las tres relaciones determinadas, presentan un transporte eficiente en la planta de maíz (Tabla 24). El área minera de San Antonio, el Fe fue el metal que obtuvo el índice de transporte más alto en la relación raíz/tallo (de toda la zona de muestreo), en ella se refleja un transporte más eficiente con respecto a las otras dos relaciones raíz/hoja y raíz/grano (índice más bajo en el área). Estos resultados indican que el Fe es absorbido principalmente en la raíz, y el transporte hacia el tallo es mayor comparado con los otros tejidos aéreos. Probablemente la mayor parte del Fe es transportada primero hacia el tallo, siendo el tejido de conducción para todos los nutrimentos en la planta. En el área de La Concha, el índice de transporte fue menor en la relación raíz/tallo (comparándolo con el de San Antonio, aunque con los otros metales es alto), en esta relación el transporte es más eficiente con respecto a

las otras dos relaciones (Tabla 24).

En la relación raíz/hoja hay diferencia entre las dos áreas mineras, en San Antonio el transporte de Fe es eficiente, no es un factor limitante para el metabolismo de la planta de maíz y por lo tanto en la hoja (la deficiencia esta asociada a los síntomas de amarillamiento y se vería afectada en la formación de cloroplastos y en la síntesis de clorofila). Es probable, que la mayor parte de Fe fuera absorbido en las primeras etapas de crecimiento y sea utilizado para el desarrollo de la planta. Posterior a ello, las raíces no se vieron afectadas por una alta concentración de Fe. El Fe en suelo se presenta en dos estados de oxidación: Fe (III) férrico y Fe (II) ferroso, este último la planta lo toma preferentemente. Después de la toma de Fe por la planta, el exceso es secuestrado o complejado en las células, para evitar el efecto tóxico debido a la generación de radicales libres producida por el Fe (II), que en plantas (estrategia II, como las gramíneas) distribuyen el Fe intra-extracelularmente con ayuda de la nicotinamina que forma complejos estables con el Fe (II) y protege a las células de los daños oxidativos (Marschner *et al.*, 1986; Pich *et al.*, 1997).

En la zona minera (San Antonio y La Concha) los altos índices de transporte de Fe en las relaciones raíz/tallo y raíz/hoja sugieren que probablemente el Fe sea dependiente del contenido en el suelo y por ello también, de los residuos mineros, lo que se ve reflejado en su movilización y transporte. Los residuos mineros pueden ser un importante aporte de Fe, ya que se encuentra relacionado con la piritita y la calcopiritita que fueron identificadas como fases portadoras de este metal en San Antonio, y sólo en La Concha se identificaron jarosita, escorodita y goetita (variedades de minerales secundarios de Fe) (Talavera *et al.*, 2005).

En la relación raíz/grano, el índice de transporte de Fe es mayor en la zona minera, principalmente en el área de San Antonio, que también es mayor a la de los otros metales en estudio (Tabla 24). De igual manera, en el área de La Concha es mayor a la de los otros metales. Estos resultados sugieren que el Fe en el grano de maíz, probablemente sea dependiente del contenido en el suelo y también en los residuos mineros, lo que se ve reflejado en su contenido, movilización y transporte.

En la zona control de San Juan, los índices de transporte de As fueron mayores a 1, principalmente en la relación raíz/hoja, seguido de raíz//tallo. En la zona minera, las dos áreas, San Antonio y La Concha tuvieron el mismo orden en las dos relaciones citadas que la zona control. Entre las dos áreas mineras, La Concha obtuvo altos índices de transporte, principalmente en la relación raíz/hoja y la menor fue en raíz//grano (Tabla 24).

La toxicidad del As depende de la forma química de que se trate, la cual determina su solubilidad, comportamiento y grado de afectación al ambiente. El As en suelo puede existir en dos formas químicas arseniato (As V) y arsenito (As III) que es el más fitotóxico (Peryea, 1991). El transporte de arsenito desde la raíz está limitado por su alta toxicidad para las membranas radicales, el arseniato es más rápidamente absorbido y traslocado, debido a su menor toxicidad para las raíces. Las dos formas químicas difieren en muchas plantas debido a los diversos mecanismos que presentan para la captación en la superficie de la raíz (Meharg y Hartley-Whitaker, 2002). En suelo existen evidencias de acumulación de arsenito en las cercanías de la raíz de girasol y maíz (Ultra et al., 2007). Las plantas aprovechan la alta afinidad del arsenito por los grupos –SH para inactivar los efectos tóxicos del As.

En el área de La Concha los contenidos de As podrían estar relacionados con la arsenopirita (FeAsS), identificada como la principal fase portadora de este metal (Talavera *et al.*, 2005) (Tabla 25). La arsenopirita podría estar disponible para la planta (Bech *et al.*, 1997). Los resultados indican que casi el total de As absorbido permanece en el tejido de la raíz y el transporte desde la raíz a los tejidos aéreos parece estar muy restringido.

En la zona minera San Antonio se observa un transporte bajo de As y Pb a partir de los valores del índice de transporte para la relación raíz/hoja. Sin embargo, el Cd mostró un transporte más eficiente en la zona control que en la zona minera. Las relaciones raíz/hoja obtenidas en este trabajo, principalmente para Cd, seguido de Fe, As y Pb, son superiores a las reportadas por otro autor (Queirolo *et al.*, 2000) (Tabla 31).

**Tabla 31.** Valores del índice de transporte de la relación raíz/hoja de la planta de maíz de As, Cd, Pb y Fe en el área de Taxco, Guerrero y en Antofagasta, Chile

<i>Zea mays</i>				Referencia
As	Cd	Pb	Fe	Datos obtenidos en este trabajo Taxco, Guerrero
<i>raíz / hoja</i>				
10.0	60.0	19.44	4.40	San Juan
0.50	15.0	0.80	5.97	San Antonio
0.84	4.20	0.45	3.54	La Concha
0.18	0.024			Queirolo <i>et al.</i> , (2000) Antofagasta, Chile

## 10. CONCLUSIONES

- Las características químicas determinadas en el área de estudio fueron diferentes en las dos zonas de muestreo. En la zona minera, San Antonio presentó valores de pH más ácidos, las concentraciones de sulfatos y la conductividad eléctrica son relativamente bajas. Sin embargo, las concentraciones en suelo de As, Pb y Fe son altas comparándolos con los de La Concha.
- En toda el área de estudio, el Fe es el metal de mayor concentración en suelo y el orden de proporción es el siguiente: Fe>Pb>As>Cd.
- En la zona minera de San Antonio, las altas concentraciones de Fe se podría asumir que están asociadas a la pirita y la calcopirita (presencia y abundancia relativa en la mineralogía de esta área de estudio). Además, la contaminación de los jales hacia el suelo podría tener potencial para continuar el proceso de oxidación de minerales sulfurosos de Fe.
- Los resultados de este estudio indican que las altas concentraciones totales de los MMTOX en las muestras de suelo de la zona minera presentan resultados congruentes con la mineralogía que se ha identificado para los yacimientos minerales del área de estudio.
- En la zona minera de San Antonio y La Concha las concentraciones de As, Cd y Pb superan en al menos un orden de magnitud los valores de la zona control y exceden los límites permisibles para suelo, concentración crítica, los valores de concentración para la limpieza y remediación de suelos contaminados destinados a la agricultura en México y los valores de concentraciones de fondo en suelo de cultivo.
- En el área minera de San Antonio las altas concentraciones de Fe, Pb y As, indican que su liberación se produce a valores de pH ácido lo que facilita su movilización haciéndolos más disponibles para la planta de maíz.
- La concentración de los metales en estudio de la planta de maíz en las zonas control y minera presentan el orden de proporción siguiente: San Juan Fe>Pb>As>Cd, San Antonio Pb>As>Fe>Cd y La Concha Pb>Fe>Cd>As. Todos los metales fueron acumulados en distintas concentraciones dependiendo del tejido de la planta. Esto refleja en cierta medida la

disponibilidad de estos metales en el suelo. El orden de acumulación por tejido fue el siguiente: raíz > hoja > tallo > grano.

- La planta de maíz, es acumuladora de estos MMTOX, principalmente en la raíz y en segundo término la hoja, esta última podría considerarse como tejido bioindicador de niveles de concentración de estos metales.

- La zona minera de San Antonio presentó las más altas concentraciones promedio de los metales en estudio, excepto Cd que tuvo mayores valores en La Concha. En San Antonio el As y Pb rebasan las concentraciones críticas para plantas y el As, Cd y Pb en La Concha. En San Antonio el As rebasa el valor máximo permisible en grano en tres de las muestras, el Cd y Pb en la mayoría de las muestras. El Cd es superior al valor máximo permisible en todas las muestras de La Concha y Pb en la mayoría de sus muestras.

- El Pb presentó una concentración promedio alta en la raíz en la zona de San Antonio y en La Concha comparado con el As de estas mismas áreas y el Cd en La Concha. Para el Fe no existen criterios sobre límites de fitotoxicidad, solo se ha reportado su contenido normal en vegetales (50 - 300 ppm).

- Las concentraciones de metales tóxicos requieren atención debido a los daños potenciales en los niveles que pueden alcanzar en la planta como alimento del hombre. Esta situación es relevante como es el caso de San Antonio ya que el grano presentó las mayores concentraciones de Pb, As y Cd (inclusive la planta de maíz rebasa el valor máximo permisible).

- Los metales en estudio, principalmente los tóxicos, pueden llegar al ganado por productos derivados del cultivo (forraje, granos secos) o se incorporan al suelo llegando así por otras vías al ser humano (consumo de carne de animales que se han alimentado de la planta).

- La absorción de metales por la planta refleja su contenido en suelo. La mayor concentración de Cd y Pb en la planta de maíz fue observada en el área de San Antonio a pH ácidos.

- Los valores más altos del CT en la planta de maíz se presentaron para Cd en la zona minera, principalmente en La Concha, estos valores indican que el Cd tiene alta biodisponibilidad en la planta de maíz. Los valores de CT menores a 1.0 fueron para Pb, As y Fe. El valor de CT para Fe en San Juan (zona control) fue alto, no existe valor reportado en la literatura de CT para el Fe.

- Los valores más altos del CT en el tejido de la hoja (aproximadamente 0.3) se presentaron para Cd en la zona minera, principalmente en La Concha, de igual manera estos valores indican que el Cd tiene mayor biodisponibilidad en el tejido de la hoja.
- El As, Cd, Pb y Fe tienden a acumularse en la raíz antes de ser traslocados hacia los otros tejidos de la planta. Hay grandes diferencias entre las concentraciones de la raíz y los demás tejidos, expresando una importante restricción del transporte interno de los metales en estudio desde la raíz hacia hoja, tallo y grano.
- En la zona minera, San Antonio y La Concha, presentaron altos índices de transporte en Fe, en las tres relaciones consideradas en este trabajo. Seguido en orden por el Cd, solo en raíz/tallo y raíz/hoja, está última fue la más alta de la zona minera.
- Los valores de la relación raíz/tallo y raíz/hoja, principalmente en San Antonio indican que la planta de maíz puede transportar al Fe y Cd hacia el tallo y hoja. Probablemente, el Fe sea dependiente del contenido en el suelo y por ello también, de los residuos mineros (contribuyan las fases portadoras de este metal), lo que se ve reflejado en su movilización y transporte (raíz-tallo, hoja y grano).

## **11. RECOMENDACIONES**

Se sugieren realizar más estudios en esta zona minera, ya que esta actividad se ha llevado a cabo por muchos años y es probable que continúe la generación de residuos y por lo tanto, la liberación de MMTOX hacia los diferentes ecosistemas. El realizar diferentes estudios en otros sitios de la zona permitirá tener mayor conocimiento de la movilidad, transferencia de los metales de suelo a la planta de maíz y/o a otros tipos de cultivos que son consumidos por la población.

Así también, se plantea elaborar muestreos más detallados en los sitios donde se localizaron las concentraciones más altas de MMTOX, San Antonio y La Concha, para determinar las interacciones que se puedan dar en el sistema suelo-planta y que involucren la transferencia de MMTOX a los seres humanos. La información obtenida de las concentraciones totales en suelo nos da idea de la dispersión del contaminante que pueden ser utilizadas como un importante indicador para establecer el alcance espacial de la afectación por los jales mineros, estableciendo su dirección y magnitud. En relación a las plantas, es de importancia ya que contribuye a tener un mayor conocimiento sobre los procesos de contaminación por residuos mineros, y sobre la acumulación, absorción y transferencia de los MMTOX en el maíz. Sin embargo, no es suficiente para concluir que las concentraciones encontradas tengan o no efectos sobre la planta de maíz y en dado caso al ganado vacuno y a la salud de la población.

Se sugieren realizar evaluaciones de impacto ambiental que impliquen los posibles efectos tóxicos en la población y los ecotoxicológicos, los cuales incluyan los elementos necesarios para valorar con mayor certeza las acciones correctivas que deban implementarse en sitios con altas concentraciones de MMTOX. Es importante recalcar que las condiciones que se presentan durante y posteriormente al abandono de áreas mineras son perjudiciales para el desarrollo de especies vegetales y principalmente para cultivos con una producción altamente económica y de seguridad alimentaría, como es el maíz.

Deberían tenerse bajo estricta observación y monitoreo el suelo cercano a la zona minera en estudio para evaluar su potencial toxicidad, de esta manera minimizar los riesgos por exposición nociva a Cd, Pb y As, así como la movilidad de metales, tanto en suelo como en plantas o cultivos comestibles. No deberían permitirse actividades de cultivo y/o pastoreo.

## 12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adriano, D. 2001 ***Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability and Risks of Metals***. 2ª Edition. Springer-Verlag, Berlin.
- Alaniz-Álvarez, S. A., Nieto-Samaniego, Á. F., Morán-Zenteno, D. J., Alba-Aldave, L. 2002 ***Rhyolitic volcanism in extension zone associated with strike-slip tectonics in the Taxco region, southern Mexico***. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **118**: 1-14.
- Albert, A. L. 1990 ***Curso Básico de Toxicología Ambiental***. Editorial Limusa. México.
- Alloway, J.B. 1990 ***Heavy metals in soils***. 2ª. Edición. Elsevier Scientific Publishing Company. New York.
- Alloway, J. B., Ayres, C. D. 1993 ***Chemical Principles of Environmental Pollution***. 1ª Edition. Blackie Academic & Professional. London.
- Albers, B.; Bray, D.; Johnson, A.; Lewis, J.; Raff, M.; Roberts, K. and Walter, P. 1999 ***Introducción a la Biología Celular***. Ediciones Omega.
- Armienta Hernández, M. A., Talavera Mendoza, O., Morton Bermea, O y Barrera, M. 2003 ***Geochemistry of Metals from Mine Tailings in Taxco, Mexico***. Bull. Environ. Contam. Toxicol. **71**: 387-393.
- Armienta Hernández, M. A., Talavera Mendoza, O., Villaseñor, G., Espinosa, E., Pérez-Martínez, I., Cruz, O., Cenicerros, N. y Aguayo, A. 2004 ***Environmental behaviour of metals from tailings in shallow rivers: Taxco, central Mexico***. Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B). **13**: 76 - 82.
- Armienta Hernández, M. A., Ongley, L.K. Rodríguez, R., Cruz, O., Mango, H & Villaseñor, G. 2008 ***Arsenic distribution in mesquite (Prosopis laevigata) and huizache (Acacia Farnesiana) in the Zimapán mining area, México***. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. **8**: 191 - 197.
- Baker, A. J. M. and 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., McGrath, S.P., Reeves, R., Smith, J. A. C. 2000 ***Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils***. In: Terry, N., Bañuelos, G. (Eds.), ***Phytoremediation of Contaminated Soil and Water***. Lewis Publishers, Boca Raton.
- Balistrieri L.S., Box S.E., Bookstrom A.A. and Ikramuddin M. 1999 ***Assessing the influence of reacting pyrite and carbonate minerals on the geochemistry of drainage in the Coeur d'Alene mining district***. Environ. Sci. Technol. **33**: 3347-3353.
- Barceló, J. and Poschenrieder, Ch. 1989 ***Estrés vegetal***. Investigación y Ciencia No. 154 Prensa Científica. Calabria. Barcelona, España.
- Bartolini, R. 1990 ***El Maíz***. Ediciones Mundi-Prensa. Agroguías.

- Beaty, R. D. 1979 **Conceptos, Instrumentación y Técnicas de Espectrofotometría de Absorción Atómica**. Perkin-Elmer Corporation.
- Bech, J., Poschenrieder, Ch., Llugany, M., Barceló, J., Tume, P., Tobias, F.J., Barranzuela, J. I., Vázquez, E. R. 1997 **Arsenic and heavy metal contamination of soil and vegetation around a copper mine in Northern Peru**. The Science of the Total Environment, **203**: 83-91.
- Bidwell, R. G. S. 1979 **Fisiología Vegetal** 1° Edición. AGT. Editor.
- Bingham, F. T., Page, A. L., Strong, J. E. 1980 **Yield and cadmium content and rice grain in relation to addition rates of cadmium, copper, nickel and zinc with sewage sludge and liming**. Soil Sci. **130**: 32.
- Bondada, B. R and Ma, M. L. 2002 **Tolerance of heavy metals in vascular plants: arsenic hyperaccumulation by chinese, brake fern (Pteris vittata L.)** Cap. **28**: 398-420. In: Chandra S and M Srivastava (Eds). Pteridology in The New Millennium. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- Boularbah, A., Schwartz, C., Bitton, G., Morel, J. L. 2006 **Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils**. Chemosphere, **63**, 802–810.
- Bowen, H. J. M. 1979 **Environmental Chemistry of The Elements**. Academic Press, New York.
- Buckman, O. H., Brady, C. N. 1993 **Naturaleza y Propiedades de los Suelos**. UTEHA, Noriega Editores.
- Campa, U. M. F.; Ramírez, J. 1979 **La Evolución Geológica y Metalogénesis del Noroccidente de Guerrero**. Serie Técnica Científica No. 1. Universidad Autónoma de Guerrero.
- Carrillo, G. R., González-Chávez, M. C. A. 2006 **Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes**. Environmental Pollution. **144**:84-92
- Carta de Suelos. 1988 **“Guerrero”** Escala 1:50 000.
- Castañeda, R. P. 1990 **El maíz y su cultivo**. 1° Edición. AGT. Editor.
- Chaney, R. L., Malik, M., Li, Y. M., Brown, S. L., Brewer, E. P., Angle, J. S. and Baker, A. J. M. 1997 **Phytoremediation of soil metals**. Current Opinion in Biotechnology. **8**: 279-284.
- Chumbley, C. G and Unwin, R. J. 1982 **Cadmium and lead content of vegetable crops grown on land with a history of sewage sludge application**. Environmental Pollution, **4**: 231-237
- Clemens, S. 2006 **Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants**. Biochimie. **88**: 1707-1719.
- Clijsters, H and Van Assche, F. 1985 **Inhibition of photosynthesis by heavy metals**. Photosynthesis Research **7**: 31-40.
- Cobb, G. P., Sands, K., Water, M., Wixson, B. G., Dorward-King, E. 2000 **Accumulation of heavy metals by vegetables grown in mine wastes**. Environ. Tox. Chem. **19**: 600-607.

- Conesa, H. M., Faz, A., Arnaldos, R. 2006 ***Heavy metal accumulation and tolerance in plants from mine tailings of the semiarid Cartagena-La Unión mining district (SE Spain)***. Science of the Total Environment, **366**: 1-11.
- Conesa, H. M., Robinson, B. H., Schulin, R., Nowack, B. 2007 ***Growth of *Lygeum spartum* in acid mine tailings; response of plants developed from seedlings, rhizomes and at field conditions***. Environmental Pollution, **145**: 700-707
- Consejo de Recursos Minerales. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Coordinación General de Minería. 1999 ***Monografía Geológica Minera del Estado de Guerrero***. 1ª Edición.
- Cserna, Z. 1965 ***Reconocimiento Geológico de la Sierra Madre del Sur de México, entre Chilpancingo y Acapulco, Estado de Guerrero***. Instituto de Geología, Boletín. Volumen 62.
- Cserna, Z. y Fries, C. 1981 ***Hoja Taxco 14Q-h (7), con Resumen de la Geología de la Hoja Taxco, Estados de Guerrero, México y Morelos***. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Serie de 1:100,000.
- Cui, Yu-Jing., Zhu, Yong-Guan., Zhai, Ri-Hong., Chen, Deng-Yun., Huang Yi-Zhong., Qui Yi., Liang Jian-Zhong. 2004 ***Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China***. Environment International **30**: 785-791.
- Cullen, W. R and Reimer, K. J. 1989 ***Arsenic speciation in the environmental***. Chem Rev. **89**. 713 - 764.
- Connell, D. W., Miller, Y. G. 1984 ***Chemistry and ecotoxicology of pollution***. John Wiley & Sons, Inc.
- Cooughtrey, P. J. & Thorne, M. C. 1983 ***Radionuclide Distribution and Transport in Terrestrial and Aquatic Ecosystems***. Volumen 1. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Das, P., Samantaray, S., Rout, G. R. 1997 ***Studies on cadmium toxicity in plants: a review***. Environ. Pollut, **98**: 29-36.
- Date, A. R. and Gray, A. L. 1989 ***Applications of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry***. Champa and Hall, New York.
- Davis, R.D and Calton-Smith C. 1980 ***Crop as Indicators of the Significance of Contamination of Soil by Heavy Metals***. Tech. Rept. 140. Water Research Centre, Stevage UK.
- Del Río, M., Font, R., Almela, C., Vélez, D., Montoro, R. y De Haro, A. 2002 ***Heavy metals and arsenic uptake by wild vegetation in the Guadiamar river area after the toxic spill of the Aznalcóllar mine***. Journal of Biotechnology. **98**. 125-137.
- Edwards, J. A. 1955 ***Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico: United States Geological Survey Professional Paper, 264-H***.
- Ehlken, S., Kirchner, G., 2002. ***Environmental processes affecting plant root uptake of radioactive trace elements and variability of transfer factor data. A review***. Journal of Environmental Radioactivity, **58**: 97-112.
- Emsley, J. 1998 ***The Elements***. Third Edition. Department of Chemistry. University of Cambridge.

- EPA. 1992 **Guide to site and soil description for hazardous waste site characterization**. Vol 1: Metals. Protection Agency. Las Vegas NV.
- Ferrat, C., Pergent-Martini, M. Roméo. 2003 **Assessment of the use of biomarkers in aquatic plants for the evaluation of environmental quality: application to sea grasses L.** *Aquatic Toxicology*, **65**: 187- 204.
- Fergusson, J. E. 1990 **The Heavy Metals Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects**. Pergamon Press. USA.
- Figueroa, C. E. 1980 **Atlas Geográfico e Histórico del Estado de Guerrero**. FONAPAR, Guerrero. Gobierno del Estado.
- Fitz, W. J. and Wenzel, W. W. 2002 **Arsenic transformations in the soil-rhizosphere-plant system: fundamentals and potential application to phytoremediation**. *Journal of Biotechnology* **99**: 259-278.
- Florescano, E. 2003 **Los mitos fundadores de Mesoamérica**. La Jornada, Suplemento Quincenal. **9**. 1-8.
- Florijn, P. J., Van Beusichem, M. L. 1993 **Uptake and distribution of cadmium in maize inbred lines**. *Plant Soil*. **150**: 25-32
- Franco-Hernández, M. O., Vásquez-Murrieta, M. S, Patiño-Siciliano, A and Dendooven, L. 2010 **Heavy metals concentration in plants growing on mine tailings in Central Mexico**. *Bioresource Technology* **101**: 3864–3869
- Freedman, B. 1989 **Environmental ecology: the impacts of pollution and other stresses on ecosystem structure and function**. Academic Press, Inc. San Diego, California.
- Fries, C. 1960 **Geología del estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México**. UNAM. Inst. Geol., Boletín 60, 236.
- Garibay, Romero, L. M., Guerrero-Suástegui, M. y Torres de León, R. 1998 **Trilobite Pérmico de la Formación Olinalá (Los Arcos), Estado de Guerrero**. VI Congreso de Paleontología. Soc. Mex. Paleont, Resúmenes.
- Godbold, D. L. and Huttermann, A. 1985 **Effect of low zinc, cadmium and mercury on root elongation of P. abies (Karst) seedlings and the significance of these metals to forest die-back**. *Environmental Pollution*. **38**. 375-381.
- Gutiérrez-Ruiz, M., Romero, M. F., González-Hernández, G. 2007 **Suelos y sedimentos afectados por la dispersión de jales inactivos de sulfuros metálicos en la zona minera de Santa Bárbara, Chihuahua, México**. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. **24**: 170-184.
- Haifeng, L., Wang, Q., Cui, Y., Dong, Y., Christie, P. 2005 **Slow release chelate enhancement of lead phytoextraction by corn (Zea mays L.) from contaminated soil—a preliminary study**. *Science of the Total Environment* **339**: 179-187.
- Harrison, R. M., Chirgawi, M. B. 1989a **The assessment of air and soil as contributors of some trace metals to vegetable plants. Use of a filtered air growth cabinet**. *The Science of the Total Environment* **83**: 13-34.
- Harrison, R. M., Chirgawi, M. B. 1989b **The assessment of air and soil as contributors of some trace metals to vegetable plants. III-Experiments with field-grown plants**. *The Science of the Total Environment* **83**: 47-63.

- Henry, J. R. 2000 In: **An Overview of Phytoremediation of Lead and Mercury**. NNEMS Report. Washington, D.C.
- Hernández, E., González, G., Morton, O. 2004 **Manual para la Preparación de Muestras para Análisis por Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS). Reportes Internos**. Instituto de Geofísica, UNAM, México, D.F.
- Hongyu, L., Probst, A and Bohan L. 2005 **Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)**. Science of The Total Environment, **339** (1-3) 153-166.
- Hopkins, W, G. 1995 **Introduction to Plant Physiology**. John Wiley & Sons, Inc.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 1990 **Carta de Suelo** Escala 1:50 000.
- Instituto Mexicano de Transporte. Secretaría de Comunicaciones y Transporte. 1998 **Génesis; Identificación y Uso de los Suelos de México; Distribución, Propiedades, Clasificación y Manejo de Suelos Residuales y Transportados con Aplicaciones a la Ingeniería Civil**. Documento Técnico No. 19. Sanfandila, Querétaro.
- Jarvis, M.D., Leung, D. W. M. 2002 **Chelated lead transport in Pinus radiata: an ultrastructural study**. Environ. Exp. Bot. **48**: 21-32.
- Kabata-Pendias, A. and H. Pendias. 1992 **Trace elements in soils and plants**. 4a. Edición. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Kloke, D. R. 1984 **The contamination of plants and soil with heavy metals and the transport of metals interrestrial food chains**. In: J. Nriagu, Editor, Changing metal cycles and human health, Springer, Berlin.
- Lasat, M, M. 2000 **Phytoextraction of metal from contaminated soil: a review of planta/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues**. Journal of Hazardous Substance Research. **2**: 5 - 25.
- Lindsay, W. L. 1979 **Chemical Equilibria in Soils**. Edited by John Woley & Sons. N. Y.
- Lombi, E., Zhao, F, J., McGrath, S. P., Young S. D., Sacchi, G. A. 2001 **Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a Thlaspi caerulescens ecotype**, New Phytol. **149**: 53–60.
- LFU. 1989 **Grenz-und Richtwerte fur die Umweltmedien Luft, Wasser, Boden**. Landesanstalt fur Umweltdhutz, Karlsruhe.
- Ma, L. Q., K.M. Komart, C. Tu, W. Zhang, Y. Cai and E.D. Kennelly. 2001 **A fern that hyperaccumulates arsenic**. Nature 409.
- Malan, H. L. and Farrant, J. M. 1998 **Effects of the metal pollutants cadmium and nickel on soybean seed development**. Seed Science Research, **8**: 445-453.
- Marschner, H., Röemheld, V., Kissel, M. 1986 **Different strategies in higher plants in mobilization and uptake of iron**. Journal Plant Nutr., **9**: 695-713.
- McBride, M.B. 1994 **Environmental chemistry of soils**. Oxford University Press. Oxford.
- Merian, E. 1991 **Metals and their compounds in the environmental**. VCH. Alemania.

- Meharg, A.A., Hartley-Whitaker, J. 2002 ***Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species.*** New Phytol, **154**: 29–43.
- Morán-Zenteno, D. J., Tolson, G., Martínez-Serrano, R. G., Martiny, B., Schaaf, P., Silva Romo, G., Macías-Romo, C., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M. S., Solís-Pichardo, G. N. 1999 ***Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, and its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt:*** Journal of South American Earth Sciences, **12**: 513 – 535.
- Moreno-Jimenez, E., Peñalosa, J. M., Manzano, R., Carpena-Ruiz, R. O., Gamarra, R., Esteban, E. 2009 ***Heavy metals distribution in soils surrounding an abandoned mine in NW Madrid (Spain) and their transference to wild flora.*** Journal of Hazardous Materials, **162**: 854-859.
- Mullins, L & Sommers, L. F. 1986 ***Cadmium and zinc influx characteristics by intact corn (Zea mays) seedlings.*** Plant and Soil, **96**: 153-164.
- Murad, E., Fischer, W. R. 1988 ***Geobiochemical cycle of iron.*** In: Stucki, J.W., Goodman, B.A., Schwertmann, U. (Eds.), Iron in Soils and Clay Minerals. D. Reidel, Dordrecht,
- Nikolić, N., Kojić, D., Pilipović, A., Pajević, S., Krstić, B., Borišev, M and Saša Orlović. 2008 ***Responses of hybrid poplar to cadmium stress: photosynthetic characteristics, cadmium and proline accumulation and antioxidant enzyme activity.*** Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica, **50**: 95-103
- Ochaia, E. I. 1987 ***General Principles of Biochemistry of the Elements.*** Plenum Press, New York.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO. 1995 ***El Cultivo de la Soja en los Trópicos. Mejoramiento y Producción.*** Colección FAO: Producción y Protección Vegetal No. 27. FAO, Roma.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Organización Mundial de la Salud. Comisión del Codex Alimentarius. Codex Stan 248. 2005 ***Niveles Máximos para Cadmio.*** Roma Italia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Organización Mundial de la Salud. Comisión del Codex Alimentarius. Codex Stan 230. 2001 ***Niveles Máximos para Plomo.*** Roma Italia.
- Peryea, F. J. 1991 ***Phosphate-induced release of arsenic from soils contaminated with lead arsenate.*** Soil Sci Soc Am J. **55**: 1301–1306
- Pich, A., Hillmer, S., Manteuffel, R., Scholz, G. 1997 ***First immunohistochemical localization of the endogenous Fe<sup>2+</sup>-chelator nicotianamine.*** Journal of Experimental Botany **48**: 759-767.
- Piechalak, A., Malecka, A., Baralkiewicz, D and Tomaszewska, B. 2002 ***Lead uptake, toxicity and accumulation in Phaseolus vulgaris plants.*** Biologia Plantarum. **52**: 565-568
- Pierzynski, G. M., Sims, T. J., Vance, F. G. 1993 ***Soils and Environmental Quality.*** Lewis CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida.
- Prasad, M. N. V. 1995 ***Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants.*** Environ. Experiment. Botany. **35** 525-545.

- Prieto-García, F. Callejas, H., Lechuga, J. 2005 ***Acumulación en tejidos vegetales de arsénico proveniente de aguas y suelos de Zimapán, Estado de Hidalgo, México.*** Bioagro, **17**: 129-136.
- Queirolo, F., Stegen, S., Restovic, M., Paz, M., Ostapczuk, P., Schwuger, M. J and Muñoz, L. 2000 ***Total arsenic, lead, and cadmium levels in vegetables cultivated at the Andean villages of northern Chile.*** The Science of the Total Environment, **255**: 75-84.
- Rauser, W. E., Glover, J. 1986 ***Cadmium-binding protein in roots of maize.*** Canadian Journal of Botany, **62**: 1645-1650.
- Reeves, R. D. and Brooks, R.R. 1983 ***European species of Thlaspi L. (Cruciferae) as indicators of nickel and zinc.*** J. Geochem Explor, **18**: 275-283.
- Repetto, J. M. 1995 ***Toxicología Avanzada.*** Ed. Díaz de Santos. Madrid.
- Reséndiz, M. R. I. 2007 ***Evaluación del grado de movilización de arsénico hacia el suelo en el entorno de jales mineros en Zimapán, Hidalgo.*** Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. México, D.F.
- Restrepo, F. N. J. 2007 ***Diccionario Ambiental.*** Edic. ECOE
- Rodushkin, I, Ruth, T. and Huhtasaari, A. 1999 ***Comparison of two digestion methods for elemental determinations in plant material by ICP techniques.*** Analytica Chimica Acta **378**, 191-200.
- Romero, F. M. 2000 ***Interacción del Agua Contaminada con Arsénico con las Rocas Calizas de Zimapán, Hidalgo.*** Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Romero, F. M., Armienta Hernández, M. A., González-Hernández, G. 2007 ***Solid-phase control on the mobility of potentially toxic elements in an abandoned lead/zinc mine tailings impoundment, Taxco, Mexico.*** Applied Geochemistry, **22**: 109–127.
- Romero, F. M., Armienta Hernández, M. A., Gutiérrez, R. M. E., Villaseñor, G. 2008 ***Factores geológicos y climáticos que determinan la peligrosidad y el impacto ambiental de jales mineros.*** Rev. Int. Contam. Ambient. **24**: 43-54.
- Romero, F. M y Gutiérrez, R. M. 2010 ***Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México.*** Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. **62**: 43-53.
- Romero-Puertas M. C., Rodríguez-Serrano M., Corpas F. J., Gómez, M., Del Río, L. A. 2004 ***Cadmium-induced subcellular accumulation of O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in pea leaves.*** Plant Cell Env. **27**: 1122-1134.
- Ross, M. S. 1994 ***Toxic Metals in Soil-Plant Systems.*** John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex, England.
- Salas-Luévano, M. A, Manzanares-Acuña, E., Letechipía-de León, C. and Vega-Carrillo, H.R. 2009 ***Tolerant and Hyperaccumulators Autochthonous Plant Species from Mine Tailing Disposal Sites.*** Asian Journal of Experimental Sciences, **23**: 1.
- Salvador, R. J. 1997 ***Maize en The Encyclopedia of Mexico: History, Culture and Society.*** Fitzory Dearborn Publishers.

- Sankaran, R. P., Ebbs, S. D. 2008 ***Transport of Cd and Zn to seeds of Indian mustard (Brassica juncea) during specific stages of plant growth and development.*** Physiologia Plantarum, **132** (1) 69-78.
- SECOFI. 1999 Monografía-Geológico Minera del Estado de Guerrero.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004. ***Establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.*** Diario Oficial de la Federación, México 11 de Marzo de 2007.
- Secretaría de Programación y Presupuesto (SPP). 1981 ***Síntesis Geográfica de Guerrero.*** Coordinación Nacional de Estadística y Geográfica e Informática. México, D. F.
- Secretaría de Salud. NOM-187-SSA1/SCFI-2002. ***Productos y servicios. Masa, tortillas, tostadas y harinas preparadas para su elaboración y establecimientos donde se procesan. Especificaciones sanitarias. Información comercial. Métodos de prueba.*** Diario Oficial de la Federación, México 1 de Febrero del 2011.
- Secretaría de Salud. NOM-247-SSA1-2008. ***Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba.*** Diario Oficial de la Federación, México 27 de Julio del 2009.
- Servicio Meteorológico Nacional. 2000 ***Normales Climatológicas, Estado de Guerrero.*** Estación Teloloapan (00012084) y Taxco (00012081).
- Shallari, S., Schwartz, C., Haskob, A., Morel, J. L. 1998 ***Heavy metals in soils and plants of serpentine and industrial sites of Albania.*** The Science of the Total Environment **209**: 33-142
- Simon, M., Martín, F., Ortiz, I., García, I., Fernández, J., Fernández, E. 2001 ***Soil pollution by oxidation of tailings from toxic spill of a pyrite mine.*** Sci. Tot. Environ. **279**: 63–74.
- Singer, M. J. and Munns, D. N. 1992 ***Soil an Introduction.*** 2th. Ed. Maxwell MacMillan International Editions.
- Snakin, V., Krechetov, P. P., Kuzovnikova, T. A., Alyabina, I. O., Gurov, A. F., and Stepichev, A. F. 1996 ***The system of assessment of soil degradation.*** Soil Technol. **8**: 331-343.
- Stacey, M G., Patel, A., McClain, W. E., Mathieu M., Remley, M., Rogers, E. E., Gassmann, W., Blevins D. B. and Stacey, G. 2008 ***The Arabidopsis AtOPT3 Protein Functions in Metal Homeostasis and Movement of Iron to Developing Seeds.*** Plant Physiology. **146**:589-601
- Sturgeon, R. E. 2000 ***Current Practice and Recent Developments in Analytical Methodology for Trace Element Analysis of Soils, Plants and Water.*** Commun. Soil Sci. Plant Anal. **31**: 1479-1512.
- Sutarno, R. and Steger, H.F. 1985 ***The use of certified reference materials in the verification of analytical data and methods.*** Talanta. **32**: 439-445.

- Szalai, G., Janda, T., Golan-Goldhirsh, A., Páldi, E. 2002 ***Effect of Cd on phytochelatin synthesis in maize.*** Acta Biol. Szeg. **46**:121–122.
- Taiz, Lincoln and Zeiger, E. 2002 ***Plant Physiology.*** Third Ed. Sinauer Associates, Inc. Massachusetts.
- Talavera Mendoza, O., Yta, M., Moreno, Tovar R., Dótor A. A., Flores, M. N. y Duarte, G. C. 2005 ***Mineralogy and geochemistry of sulfide-bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact.*** Geofísica Internacional. **1**:49-64.
- Talavera Mendoza, O., Ma. Aurora Armienta Hernández, M. A., García Abundis, J. & Flores Mundo, N. 2006 ***Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, southern Mexico.*** Environmental Geochemistry and Health. **28**:243–255
- Tomsett, A. B and Thurman D.A. 1988 ***Molecular biology of metal tolerance in plants.*** Plant Cell and Environment. **11**: 383-394.
- Ultra, V.U., Tanaka, S., Sakurai, K., Iwasaki, K. 2007 ***Effects of arbuscular mycorrhiza and phosphorus application on arsenic toxicity in sunflower (Helianthus annuus L.) and on the transformation of arsenic in the rhizosphere.*** Plant & Soil **290**: 29–41.
- Van Lon, J. V. 1980 ***Analytical Atomic Absorption Spectroscopy.***
- Wierzbicka, M.; Antosiewicz, D. 1993 ***How lead can easily enter the food chain-a study of plant roots.*** Sci. total Environ. Suppl. **1**:423-429.
- Wild, A. 1993 ***Soils and the environment: An introduction.*** Cambridge University Press.
- Wood, R. 1999 ***How to validate analytical methods.*** Trends in Analytical Chemistry, **18**: 624-632.
- Yankun, Zu., Yuan Li., Jianjun, Ch., Hsiyan, Ch., Li Q., Schwartz, Ch. 2005 ***Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous Brown on lead-zinc mining area in Yunnan, China.*** Environment International, **31**:.755-762.
- Yankun, Zu., Yuan Li., Schwartz, Ch., Langlad. L., Fan, L. 2004 ***Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China.*** Environment International, **30**: 567-576.
- Yo-Young, Kim.; Young-Yell, Yang.; Young-Sook, Lee. 2002 ***Pb and Ca uptake in rice roots.*** Physiologia Plantarum, **116**: 368–372.
- Youn, Joo. An. 2004 ***Soil ecotoxicity assessment using cadmium sensitive plants.*** Environmental Pollution, **127**: 21-26.
- Zartner-Nyilas G and Deutsch. 2002 ***Grenzwerte: Kennzahlen zur Umwelt-belastung in Deutschlanda und in der EG.*** Ecomed Verlag, Germany.
- Zhi-ting, X., Ping, L. 2002 ***Joint enhancement of lead accumulation in Brassica plants by EDTA and ammonium sulfate in sand culture.*** Journal of Environmental Sciences. **14**: 216-220.
- Zuang, H. 1982 ***La fertilisation des cultures légumières.*** Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes. Paris.

## 13. ANEXOS

**Anexo 1.** Parámetros físico-químicos y MMTOX en muestras de suelo del área de estudio de Taxco, Guerrero.

No. de Muestra	Potencial Hidrógeno (pH)	Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ )	Sulfatos $\text{SO}_4^{2-}$ (ppm)	METALES			
				As	Cd	Pb (ppm)	Fe
<b>SAN JUAN</b>							
(n = 6)							
1	6.7	78	33	27	0.56	23	100
1'	6.7	78	40	26	0.55	23	98
2	6.4	86	31	26	0.41	24	105
2'	6.4	88	36	25	0.41	23	105
3	6.6	102	32	14	0.56	31	102
3'	6.6	102	36	13	0.69	32	102
	<b>6.6 <math>\pm</math> 0.1</b>	<b>89 <math>\pm</math> 11</b>	<b>35 <math>\pm</math> 3</b>	<b>22 <math>\pm</math> 7</b>	<b>1 <math>\pm</math> 0.10</b>	<b>26 <math>\pm</math> 4</b>	<b>102 <math>\pm</math> 3</b>
<b>SAN ANTONIO</b>							
(n = 12)							
1	5.4	92	59	492	17	3 001	51 900
1'	5.3	92	61	496	17	3 151	51 100
2	4.7	101	363	168	11	4 840	51 200
2'	4.7	101	391	163	12	4 790	53 200
3	4.6	104	32	658	17	3 950	10 600
3'	4.6	103	30	690	17	4 017	11 940
4	4.2	131	24	535	15	4 299	11 560
4'	4.3	140	24	557	16	4 623	11 520
5	4.3	210	507	636	16	7 071	12 240
5'	4.2	224	519	605	16	7 125	11 880
6	5.2	42	43	1 047	7	5 142	16 360
6'	5.1	39	39	1 044	6	5 140	16 500
	<b>4.7 <math>\pm</math> 0.5</b>	<b>115 <math>\pm</math> 56</b>	<b>174 <math>\pm</math> 196</b>	<b>591 <math>\pm</math> 188</b>	<b>14 <math>\pm</math> 4</b>	<b>4 760 <math>\pm</math> 1 290</b>	<b>25 830 <math>\pm</math> 19 370</b>
<b>LA CONCHA</b>							
(n = 6)							
1	6.9	120	799	143	32	1 372	9 360
1'	6.9	130	831	123	32	1 281	9 280
2	7.3	414	1192	568	78	3 029	11 420
2'	7.2	416	1281	578	80	3 077	13 620
3	6.4	320	863	426	54	2 205	9 640
3'	6.4	318	989	420	51	2 008	9 780
	<b>7 <math>\pm</math> 0.4</b>	<b>286 <math>\pm</math> 132</b>	<b>992 <math>\pm</math> 201</b>	<b>376 <math>\pm</math> 200</b>	<b>55 <math>\pm</math> 21</b>	<b>2 162 <math>\pm</math> 777</b>	<b>10 517 <math>\pm</math> 1 710</b>

Nota: Promedio  $\pm$  Desviación Estándar.

**Anexo 2.** MMTOX en muestras de *Zea mays* en el área de estudio de Taxco, Guerrero.

No. de Mtra.	<b>As</b>					<b>Cd</b>				
	(ppm)									
ZONA CONTROL										
SAN JUAN										
	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	S.P.P.	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	S.S.P.
<b>1</b>	5.83	0.12	0.16	0.09		0.31	0.11	0.28	0.07	
<b>1'</b>	5.78	0.18	0.11	0.01		0.31	0.14	0.24	0.02	
<b>2</b>	2.77	0.47	1.17	0.09		0.72	0.27	0.38	0.06	
<b>2'</b>	2.52	0.44	1.67	0.09		0.76	0.14	0.36	0.01	
<b>3</b>	11.75	0.014	0.59	0.0		0.59	0.22	0.35	0.06	
<b>3'</b>	11.90	0.055	0.37	0.0		0.59	0.22	0.36	0.06	
	<b>6.76 ± 4.17</b>	<b>0.21 ± 0.20</b>	<b>0.68 ± 0.62</b>	<b>0.05 ± 0.05</b>	<b>7.70</b>	<b>0.55 ± 0.20</b>	<b>0.18 ± 0.06</b>	<b>0.33 ± 0.06</b>	<b>0.05 ± 0.03</b>	<b>1.11</b>
ZONA MINERA										
SAN ANTONIO										
<b>1</b>	904.00	0.22	1.09	1.92		29.80	4.11	2.82	0.10	
<b>2</b>	4.4	0.65	0.59	0.02		1.98	0.48	0.74	0.06	
<b>2'</b>	3.9	0.43	0.52	0.0		1.70	0.48	0.67	0.06	
<b>3</b>	623.44	0.39	0.99	0.06		76.83	0.52	3.21	0.31	
<b>4</b>	66.78	0.47	4.60	0.65		1.02	0.52	7.50	0.07	
<b>5</b>	472.00	0.78	1.66	0.82		31.90	1.58	4.72	1.42	
<b>6</b>	697.00	3.51	4.50	0.04		14.5	0.71	4.00	n.d	
	<b>395.93 ± 370.06</b>	<b>0.92 ± 1.16</b>	<b>1.99 ± 1.79</b>	<b>0.50 ± 0.71</b>	<b>399.34</b>	<b>22.53 ± 27.30</b>	<b>1.20 ± 1.34</b>	<b>3.38 ± 2.37</b>	<b>0.33 ± 0.54</b>	<b>27.44</b>
LA CONCHA										
<b>2</b>	6.00	0.11	2.40	0.03		348.00	2.42	21.00	0.10	
<b>3'</b>	443.00	1.50	1.35	0.16		410.20	8.50	10.90	0.13	
	<b>224.50 ± 309.01</b>	<b>0.81 ± 0.98</b>	<b>1.88 ± 0.74</b>	<b>0.09 ± 0.09</b>	<b>227.28</b>	<b>379.10 ± 43.98</b>	<b>5.46 ± 4.30</b>	<b>15.95 ± 7.14</b>	<b>0.12 ± 0.02</b>	<b>400.63</b>

Nota: Promedio, ± Desviación Estándar, S.P.P. Suma Promedio de la Planta, No hubo muestra (San Antonio 1', 3' a 6'; La Concha 1, 1', 2' y 3).

Anexo 2. Continuación.

No. de Mtra.	<i>Pb</i>					<i>Fe</i>				
	( ppm )									
<b>ZONA CONTROL</b>										
<i>SAN JUAN</i>										
	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	S.P.P.	Raíz	Tallo	Hoja	Grano	S.S.P.
<b>1</b>	12.02	0.14	0.68	0.05		154.50	3.45	6.60	3.33	
<b>1'</b>	11.14	0.11	0.74	0.02		159.00	2.80	5.45	2.90	
<b>2</b>	2.43	0.70	3.88	0.12		108.00	3.16	8.95	2.60	
<b>2'</b>	1.98	0.60	3.56	0.10		107.00	3.50	9.05	3.20	
<b>3</b>	16.12	0.32	1.48	0.21		161.50	5.15	3.40	2.77	
<b>3'</b>	18.02	0.32	1.64	0.30		161.00	5.15	3.95	2.91	
	<b>10.29 ± 6.76</b>	<b>0.37 ± 0.24</b>	<b>2 ± 1.39</b>	<b>0.13 ± 0.10</b>	<b>12.79</b>	<b>141.83 ± 26.71</b>	<b>3.87 ± 1.02</b>	<b>6.23 ± 2.42</b>	<b>2.95 ± 0.27</b>	<b>154.88</b>
<b>ZONA MINERA</b>										
<i>SAN ANTONIO</i>										
<b>1</b>	5797.0	6.88	11.37	9.67		246.00	3.40	7.75	7.45	
<b>2</b>	33.50	5.38	6.76	0.27		26.30	26.70	8.20	4.00	
<b>2'</b>	33.60	5.66	5.98	0.25		21.90	26.00	7.10	3.80	
<b>3</b>	1638.77	6.64	6.60	0.51		31.10	3.50	5.15	1.30	
<b>4</b>	223.81	6.48	33.00	6.14		15.54	2.95	9.85	6.30	
<b>5</b>	3449.0	17.24	28.84	2.81		252.00	3.65	7.30	5.00	
<b>6</b>	3384.0	40.99	19.74	6.09		320.00	10.95	9.10	6.35	
	<b>2 079.95 ± 2 213.85</b>	<b>12.75 ± 13.12</b>	<b>16.04 ± 11.28</b>	<b>3.68 ± 3.70</b>	<b>2112.42</b>	<b>130.41 ± 135.25</b>	<b>11.02 ± 10.83</b>	<b>7.78 ± 1.52</b>	<b>4.89 ± 2.06</b>	<b>153.79</b>
<i>LA CONCHA</i>										
<b>2</b>	404	2.07	4.05	0.09		129.00	3.60	6.25	1.25	
<b>3'</b>	2337	2.02	8.34	0.09		230.00	4.35	6.45	3.80	
	<b>1 370.50 ± 1 366.84</b>	<b>2.05 ± 0.04</b>	<b>6.20 ± 3.03</b>	<b>0.09 ± 0.0</b>	<b>1378.84</b>	<b>179.50 ± 71.42</b>	<b>3.98 ± 0.53</b>	<b>6.35 ± 0.14</b>	<b>2.53 ± 1.80</b>	<b>192.36</b>

Nota: Promedio, ± Desviación Estándar, S.P.P. Suma Promedio de la Planta, No hubo muestra (San Antonio 1',3' a 6'; La Concha 1, 1', 2' y 3).

## MÉTODOS DE ANÁLISIS PARA METALES EN SUELOS Y PLANTAS

El análisis de un suelo es importante para la predicción y diagnóstico de enfermedades en la planta; así también, para los problemas de toxicidad ambiental. El grado de contaminación que presenta un suelo por un elemento químico específico puede ser medido para determinar su concentración y compararlo con análisis previos o con contenidos de suelos no contaminados. La estimación de las diferentes fracciones (soluble, móvil, intercambiable ó la disponible para la planta) de los metales en suelos son una indicación más directa de la problemática de efectos deletéreos o tóxicos sobre el ambiente (Alloway, 1990).

### MÉTODOS ANALÍTICOS.

En la Tabla 32 se mencionan los más importantes métodos que se utilizan actualmente para efectuar los análisis de muestras para elementos traza: Espectrometría de Absorción Atómica con Horno de Grafito (GF-AAS), Espectrometría de Absorción Atómica con Flama (F-AAS), Espectrometría de Emisión Atómica con Acoplamiento Inductivo (ICP-AES), Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS), Fluorescencia de Rayos-X y Refracción Total (TR-XRF), Espectrometría de Florescencia Atómica de Excitación de Láser con Horno de Grafito (GF-LEAFS). Las primeras cinco técnicas analíticas son utilizadas en estudios ambientales y tienen la capacidad de medir muchos de los elementos a un nivel de ng/g (Rodushkin, 1999; Sturgeon, 2000).

#### ***Espectrometría de Masas con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS).***

A últimas fechas se ha visto el poder de detección multielemental que es logrado con las técnicas del ICP-MS, un método analítico con capacidad de obtener en un análisis la totalidad de los elementos químicos de la tabla periódica con límites de detección bajos de 0.005-1 ppb y una precisión excelente. Los elementos son medidos simultáneamente con un tiempo de dos minutos, por ello es considerado un método analítico extremadamente rápido. Debido a la alta sensibilidad, es adecuada para el análisis de elementos traza que se encuentran en concentraciones menores a 0.01%. El rango para la mayoría de los elementos es de 0.01 a 100 ppm. El ICP-MS ha sido utilizado para analizar muestras geológicas –suelos, rocas y minerales–, aguas –residual, potable y subterránea–, plantas –comestibles y no comestibles–, relaciones isotópicas de elementos químicos.

**Tabla 32.** Características importantes de las diferentes técnicas analíticas de espectrometría.

<b>Técnica Analítica</b>	<b>Límites de Detección (ppb)</b>	<b>Multielemental</b>	<b>Selectividad</b>	<b>Interferencia de la Matriz</b>	<b>Precisión (%)</b>	<b>Exactitud</b>
<i>GF-AAS</i>	$10^{-2} - 1$	No	Buena	Pequeña	0.5 - 5	Buena
<i>F-AAS</i>	$1 - 10^3$	No	Buena	Pequeña	0.1 - 1	Buena
<i>ICP-AES</i>	$10^{-2} - 10$	Si	Moderada	Moderada	0.3 - 2	Moderada
<i>ICP-MS</i>	$10^{-3} - 1$	Si	Buena	Moderada	0.5 - 2	Buena
<i>TR-XRF</i>	$10^{-2} - 1$	Si	Buena	Moderada	2 - 5	Buena
<i>GF-LEAFS</i>	$10^{-5} - 10$	No	Excelente	Pequeña	3 - 5	Buena

Fuente: Sturgeon, 2000.

**Principio del Método.****Bases Teóricas.**

El plasma de acoplamiento inductivo es un generador de iones, en el que se alcanzan temperaturas de 600 a 10 000° K, las cuales permiten la extracción de un electrón de la capa exterior del átomo produciendo uno o dos iones con una carga positiva, más un electrón.



El plasma acoplado inductivamente se genera por una descarga de electrodos (el argón es empleado en la técnica); la muestra introducida al plasma entra a la región de más alta temperatura en donde se volatiliza, se disocia, se excita y finalmente se ioniza. La fuente de iones producida en el plasma es dirigida hacia el filtro de masas a través de lentes electrostáticos; estos lentes son placas metálicas cargadas y permiten únicamente el paso de partículas de cargas positivas. El filtro de masas es un cuadrupolo que consiste de cuatro barras hiperbólicas que ocasionan que las partículas cargadas eléctricamente sean atraídas o rechazadas (Date, 1989).

***Digestión en Horno de Microondas para muestras de suelo y plantas.***

La solución acuosa es la forma que debe presentar la muestra para introducirla al ICP-MS por nebulización. Para el proceso de disolución o descomposición de las muestras de suelo, material vegetal, agua, etcétera, son utilizados una combinación de ácidos, tales como el nítrico (HNO<sub>3</sub>), sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), perclórico (HClO<sub>4</sub>), o el fluorhídrico (HF); aunque el nítrico es el preferido para los métodos de análisis de espectrometría (Sturgeon, 2000).

**Suelo**

*A 0.2 g de muestra de suelo cuarteado se les hizo la digestión*

con 5 ml de H<sub>2</sub>O desionizada + 5 ml de HNO<sub>3</sub> + 10 HF  
Digestión por 30 min. en horno de microondas.

**Planta** A 0.2 g de muestra de material vegetal (raíz, tallo, hoja, grano de maíz y espiga) cuarteados, se agregaron 5 ml de H<sub>2</sub>O desionizada + 5 ml de HNO<sub>3</sub>  
Digestión por 30 min. en horno de microondas.

*Digestión Abierta sobre parrilla de calentamiento para muestras de suelo y planta.*

Preparación para el análisis por ICP-MS

**Suelo** Solución digerida + 5 ml de H<sub>2</sub>O desionizada + 2 ml de HNO<sub>3</sub>  
+ 2 ml de HClO<sub>4</sub> + 5 ml HF.  
*Calentar, evaporar hasta quedar una masa pequeña gelatinosa, sin ningún sedimento.*  
+ 10 ppb In – Re  
Aforar a 100 ml.

**Planta** Solución digerida + 5 ml de H<sub>2</sub>O desionizada + 5 ml de HNO<sub>3</sub>  
+ 10 ml de HClO<sub>4</sub>  
*Calentar, evaporar hasta quedar una masa pequeña gelatinosa, sin ningún sedimento.*  
+ 10 ppb In – Re  
Aforar a 100 ml.

### ***Espectrometría de Absorción Atómica (AAS).***

La espectrometría de absorción atómica es utilizada para la determinación de metales, metaloides y algunos no metales. La más alta sensibilidad es obtenida para los átomos más ligeros de la tabla periódica e incluye los elementos de la primera fila de la serie de los elementos de transición.

### ***Bases Teóricas.***

Un átomo está constituido por núcleo y electrones, estos últimos rodean al núcleo, cada elemento tiene un número específico de electrones que está directamente relacionado con el núcleo atómico y con ello dan una estructura o configuración orbital que es única para cada elemento. El estado “**fundamental o basal**” es la configuración orbital normal para el átomo, es la más estable y su contenido energético es bajo. El estado “**excitado**” sucede cuando el

orbital está inestable, el átomo inmediata y espontáneamente retornará a su configuración fundamental, por lo tanto el electrón retornará a su orbital inicial estable y emitirá energía radiante equivalente a la cantidad de energía inicialmente absorbida en el proceso de excitación. Esta técnica analítica consiste en aplicar energía de una magnitud apropiada a un átomo libre en estado fundamental, este átomo puede absorber energía que inducirá a la promoción de su electrón exterior a un orbital menos estable, provocando que el átomo pase a un estado excitado. Es de importancia en la absorción atómica la cantidad de luz, a la longitud de onda resonante, que es absorbida cuando la luz pasa a través de una nube atómica, cuando el número de átomos se incrementa en el paso de la luz, la cantidad que de ésta será absorbida se incrementará en una forma predecible.

### ***Instrumentación.***

Se utiliza la lámpara de cátodo hueco como fuente especial de luz y la selección cuidadosa de la longitud de onda del elemento que se va a determinar, los dos se utilizan para efectuar una determinación cuantitativa específica de elementos individuales en la presencia de otros. El sistema de atomización (celda de muestreo) lleva los átomos del estado basal de la muestra en solución a átomos libres en forma de vapor y los hace incidir a través del haz de luz proveniente de la lámpara para que se lleve a cabo el proceso de absorción. En el caso del presente estudio se utilizó el sistema de atomización por flama, su función es la de maximizar el camino del haz de luz dentro de la flama, y por lo tanto la sensibilidad del instrumento. Los ejes tanto de la ranura como la del instrumento deben de estar dispuestos de manera tal que coincidan entre sí. Posteriormente la muestra en solución es llevada a través de un capilar hacia un nebulizador, donde se convierte en aerosol (solo el 10% de la solución es transformada y el resto se desecha, por un drenaje específico), este aerosol resultante es mezclado con un gas combustible y llevado a la base de la flama.

Para medir la luz específica el monocromador dispersa las distintas longitudes de onda de la luz que es emitida de la fuente y separa la línea particular que se emplea para este fin. El detector es un tubo fotomultiplicador que produce una corriente eléctrica que depende de la intensidad de la luz incidente; posteriormente esta corriente es amplificada y procesada por la electrónica del instrumento, produciendo una señal la cual es medida en unidades de concentración. En la espectrofotometría de absorción, la medida cuantitativa para caracterizar la absorción de la luz es la absorbancia, esta cantidad guarda una relación lineal con la concentración. La ley de Lambert y Beer define la relación:

$$A = abc$$

Donde: **A** = a la absorbancia,

- a** = coeficiente de absorptividad que es característico para cada especie que actúa como absorbente,
- b** = la longitud del paso de la luz ocupado por la celda de absorción, y
- c** = la concentración de las especies absorbentes en la celda de absorción.

Dicha ecuación guarda una dependencia lineal entre absorbancia y concentración y se utiliza para determinar la concentración de la muestra de nuestro interés. Se debe de preparar una serie de soluciones estándares que permiten generar un gráfico de concentración vs absorbancia (Van Lon, 1980; Beaty, 1979).

### ***Control de Calidad.***

Para evaluar la calidad de los resultados, tanto de preparación de muestra como análisis instrumental, se utilizaron dos materiales de referencia certificados internacionales del National Institute of Standards & Technology (NIST) para la planta de maíz el 1573 (hojas de tomate) y para suelo se utilizó el 2586 (contenido de Pb en pintura), con el objetivo de verificar la calidad de preparación de muestra y análisis, según procedimiento establecido en el laboratorio de ICP-MS del Instituto de Geofísica. Para tener un control sobre la posible contaminación entre las muestras, se efectuó la digestión de un blanco reactivo el cual lleva el mismo tratamiento que las muestras. Por cada 10 muestras se realizó un duplicado y una digestión de un material de referencia certificado. Para verificar la calidad de los resultados se evaluó la precisión y la exactitud del método.

### *Precisión.*

La precisión es una estimación de la reproducibilidad analítica de una medición, y se calcula normalmente como la desviación porcentual relativa de una muestra por duplicado. La precisión se evaluó en términos de la desviación porcentual relativa (%DPR), la cual se considera como un parámetro confiable para determinar la reproducibilidad. Se encontró que para los metales en estudio la %DPR es < 15%, excepto para Cd en suelo (Wood, 1999) (Tabla 33). La precisión se define de la siguiente manera:

$$\%DPR = \frac{\text{Concentración de la Muestra} - \text{Concentración Duplicado de la Muestra}}{\text{Promedio}} \times 100$$

### *Exactitud.*

La exactitud es una medición del valor real y se estima de acuerdo a los valores obtenidos respecto a los reportados por los materiales de referencia certificada. La exactitud se evaluó

en términos del por ciento de error y se define como:

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Valor Obtenido} - \text{Valor Certificado Teórico}}{\text{Valor Certificado Teórico}} \times 100$$

La exactitud es < 20% para Cd y Pb, lo que indica que los resultados encontrados son satisfactorios (Sutarno & Steger, 1985) (Tabla 33). Con esto podemos decir que el proceso de preparación y determinación instrumental son los óptimos para la evaluación de estos metales.

**Tabla 33.** Resultados obtenidos de los materiales de referencia certificados 1573a (planta), 2586 (suelo) y los valores determinados en el laboratorio de ICP-MS.

Elemento	Límite de Detección (3 sigma) ug/kg	Material de Referencia Certificado <b>1573a</b> mg/kg	Lab. ICP-MS <b>1573a</b> (n=5) ppm	Precisión DPR (%)	Exactitud %error
<b>Planta</b>					
<b>As</b>	0.20	0.1	0.12	3.31	21
<b>Cd</b>	0.27	1.5	1.25	8.00	16.67
<b>Pb</b>	0.12	NR	0.36	4.74	
<b>Suelo</b>					
		<b>2586</b> mg/kg	<b>2586</b> (n=5) ppm		
<b>As</b>	0.20	8.7	9.9	14.75	13.79
<b>Cd</b>	0.27	2.71	3.07	17.59	13.28
<b>Pb</b>	0.12	432	419.44	6.78	2.91

Nota: NR = No Reportado.

La determinación de As, Cd y Pb en un ICP-MS marca VGEElemental modelo Plasma Quad3®, el cual tiene por características una alta sensibilidad y bajos límites de detección, además se encuentra libre de interferencias en comparación con otras técnicas analíticas (Hernández-Álvarez et al., 2004). Las condiciones de optimización se establecieron con el control de los parámetros instrumentales (flujo de gas acarreador, flujo de gas enfriador, velocidad de introducción, posición de la antorcha, voltajes de los lentes, detector y cuadrupolo) (Tabla 34).

La optimización de estos parámetros se realizó con una solución de 10 ug/l de Be, Co, Bi, In y Tb para cubrir un intervalo amplio de masas. La sensibilidad más alta se logró para la masa <sup>115</sup>In debido a que es la masa intermedia entre los rangos de masas a analizar. Para la calibración se realizó una curva con cinco puntos: Blanco, 0.1 ug/l, 1 ug/l, 10 ug/l y 100 ug/l de una solución acuosa certificada mutielemental de metales pesados, de la marca SPEX, alta pureza. Además, se añadió una solución de Indio-Renio como estándar interno a cada uno de

los blancos y muestras, con la finalidad de corregir fluctuaciones inmediatas del instrumento y efectos de matriz.

**Tabla 34.** Parámetros instrumentales del ICP-MS marca VGEelemental modelo Plasma Quad3®.

<i><b>Instrumento</b></i>	<i><b>VGEelemental PlasmaQuad PQ3</b></i>
Plasma de acoplamiento inductivo	ICP
Poder de radiofrecuencia	1510W
Potencia reflejada	< 5W
Gas del plasma	Argón (pureza 99.999%)
Nebulizador	Meinhardt "De Galen"
Cámara de nebulización	Con atomizador enfriada por agua
Antorcha	Cuarzo, 1.5 mm
Flujos del gas argón	l / min
Gas enfriador	16
Gas auxiliar	0.68
Gas nebulizador	0.70
Espectrómetro de Masas	MS
Cono muestreador	Niquel, 1.0 mm de orificio
Cono "Skimmer"	Niquel, 0.7 mm de orificio
Región diferencial de vacío	1.0 X 10 <sup>-6</sup> mbar
Cuadrupolo	Hiperbólico
Detector	Multicanal en modo de pulso