UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Departamento de Suelos

Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible

"Enseñar la explotación de la tierra no la del hombre"

Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible

ESPECIES SILVESTRES COMO FITORREMEDIADORAS DE SUELOS CONTAMINADOS CON Cd, Ni, Pb y Zn

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

PRESENTA:

ELIZABETH REYES CABRERA

Chapingo, estado de México, Marzo de 2007

"ESPECIES SILVESTRES COMO FITORREMEDIADORAS DE SUELOS CONTAMINADOS CON Cd, Ni, Pb y Zn"

Tesis realizada por la Ing. Elizabeth Reyes Cabrera bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA

PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

CONSEJERO

Dr. Antonio Vázquez Alarcón

ASESOR

Dr. Miguel Ángel Vergara Sánchez

ASESOR

Dr. Mateo Vargas Hernández

ASESOR

M. C. Miguel Uribe Gómez

“ESPECIES SILVESTRES COMO FITORREMEDIADORAS DE SUELOS CONTAMINADOS CON Cd, Ni, Pb y Zn”

Tesis realizada por la Ing. Elizabeth Reyes Cabrera bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROFORESTERÍA

PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE

CONSEJERO _____
Dr. Antonio Vázquez Alarcón

ASESOR _____
Dr. Miguel Ángel Vergara Sánchez

ASESOR _____
Dr. Mateo Vargas Hernández

ASESOR _____
M. C. Miguel Uribe Gómez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme la oportunidad de obtener conocimiento de ciencia en mis estudios de Maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico en la culminación de la presente tesis.

Al Dr. Antonio Vázquez Alarcón por la dirección, asesoría y sugerencias muy valiosas en la presente investigación.

Al MC. Miguel Uribe Gómez por su apoyo como Coordinador de la Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible y asesor en el desarrollo del presente trabajo.

Al Dr. Miguel Ángel Vergara Sánchez por sus aportaciones en esta investigación.

Al Dr. Mateo Vargas Hernández por las sugerencias en la presente tesis.

A Dolores Coronel Sánchez (Lolita) por su apoyo administrativo y emocional a lo largo de este caminar en la Maestría y a Rocío Rodríguez Sosa (Chío) por su apoyo en los trámites para culminar el presente trabajo.

Al Laboratorista Gabriel Vega Ruiz, por su ayuda en el laboratorio de análisis químicos del Departamento de Suelos.

A mi amiga Marcela, y a Miguel (Coatli) por tu gran apoyo en el trabajo de campo, Isabel, a todos….. Gracias

DEDICATORIA

Bendice, alma mía, a Jehová,
y bendiga todo mi ser su santo nombre.
Bendice, alma mía, a Jehová,
y no olvides ninguno de sus beneficios.
Salmos 103: 1 y 2

Dedico este presente trabajo a DIOS que me ha enseñado a cosechar con PACIENCIA y FE lo que deseo alcanzar.

A Salomón (mi Amado) sin tu valiosa ayuda este trabajo no se habría terminado, mil GRACIAS, **TE AMO**.

A Elianné, tus sonrisas y tus palabras al decirme “mamita te quiero mucho” me alegran la vida y me animan a seguir, eres mi “**tesoro preciado**”.

A bebé, que aun que no has nacido, eres parte de este trabajo.

A mis padres Candido Reyes Guerrero y Maria Cabrera Santiago, que han sido siempre mi ejemplo a seguir y por haberme dado la vida.

DATOS BIOGRÁFICOS

Elizabeth Reyes Cabrera nació el 8 de Noviembre de 1978, en la comunidad La Union, Municipio de Xopala, estado de Pueba. Estudió la primaria en la escuela bilingüe, “Lazaro Cardenas” de la comunidad Panorama Municipio de Coyutla del estado de Veracruz. Continuó sus estudios de secundaria en la escuela telesecundaria bilingüe “20 de Noviembre” de la misma comunidad. Los estudios de bachillerato fueron cursados en la escuela “Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario” de la comunidad La Chaca, Coyutla, Veracruz. Durante estos tres años fue becada por su buen desempeño por el INIA y la SEP. Ingresó a la Universidad Autónoma Chapingo en Julio de 1996. Cursó la carrera de Ingeniero agronomo especialista en Fitotecnia, y terminó en el año 2002. Trabajó en Africam Safari, ubicado en Valsequillo, Puebla como supervisor del mariposario desde 2001 a 2002. Posteriormente fungió como auxiliar en el departamento de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología desde 2002 a 2004. En el año 2004 ingresó a la maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible.

"Especies silvestres como fitorremediadoras de suelos contaminados con Cd, Ni, Pb y Zn"

"Wild species as phytoremediators of solid polluted with Cd, Ni, Pb and Zn"

E. Reyes Cabrera[1]; A. Vázquez Alarcón[2]

RESUMEN

El presente trabajo se realizo para evaluar la capacidad de fitoextracción de Cd, Ni, Pb y Zn, en especies vegetales como *Ricinus communis*, *Cynodon dactylon*, *Senecio salignus* DC., *Phragmites australis*, *Nicotiana glauca* Graham y *Buddleja cordata* H. B. K., así como para medir el efecto del EDTA, sustancias húmicas y modificación del pH del suelo sobre la absorción de aquellos metales. En un suelo de la región del Valle del Mezquital, Hidalgo, México se aplicaron tratamientos, de EDTA, modificación del pH del suelo, sustancias húmicas y se plantaron las especies a evaluar.El análisis de varianza indicó que la absorción de Cd, Ni, Pb y Zn por las plantas donde se aplicaron los tratamientos de EDTA y sustancias húmicas, fueron estadísticamente diferentes. Esto también se presentó con los tratamientos de modificación de pH y EDTA con sustancias húmicas. La absorción de los metales por efecto de la especie y/o tratamiento, presentó diferencia estadística. La especie con mayor absorción de Cd fue *Nicotiana glauca* Graham y para Ni fue *Ricinus communis*. La más alta acumulación Pb y Zn se registró en *Nicotiana glauca* Graham. En las condiciones del testigo *Buddleja cordata* H. B. K. y *Cynodon dactylon* mostraron alta capacidad de absorción de Ni, mientras que *Ricinus communis*, *Cynodon dactylon*, *Senecio salignus* DC., *Phragmites australis*, *Nicotiana glauca* Graham y *Buddleja cordata* H. B. K. registraron esta capacidad de absorción para el Zn. La especie con mayor acumulación de Cd, Ni, Pb y Zn en parte aérea fue *Nicotiana glauca* Graham.

PALABRAS CLAVE: acidificación del suelo, EDTA, sustancias húmicas, metales pesados

ABSTRACT

The present work was conducted to assess the capacity of phytoextractión of Cd, Ni, Pb and Zn, in the plant species *Ricinus communis, Cynodon dactylon, Senecio salignus* DC., *Phragmites australis, Nicotiana glauca* Graham and *Buddleja cordata* H. B. K., and to measure the effect of EDTA, humic substances and modification of soil pH on the absorption of those metals. Soil of the Mezquital Valley, Hidalgo, Mexico, received the following treatments: EDTA, modification of soil pH and application of humic substances, before planting the above species. The analysis of variance indicated that the absorption of Cd, Ni, Pb and Zn by the plants in soil to which the EDTA and humic substances treatments were applied was statistically different. This was also the case with the treatments of pH modification and EDTA with humic substances. The absorption of metals by effect of species and/or treatment was statistically different; the species with the highest Cd absorption was *Nicotiana glauca* Graham, and the species that most absorbed Ni was *Ricinus communis*.

The highest Pb and Zn accumulation was recorded with *Nicotiana glauca* Graham. The control, *Buddleja cordata* H. B. K. and *Cynodon dactylon* exhibited great Ni absorption capacity, while *Ricinus communis, Cynodon dactylon, Senecio salignus* DC., *Phragmites australis, Nicotiana glauca* Graham and *Buddleja cordata* H. B. K. exhibited Zn absorption capacity. *Nicotiana glauca* Graham showed high accumulation of Cd, Ni, Pb and Zn in the aerial part.

KEYWORDS: soil acidification, EDTA, humic substances, heavy metals.

[1] TESISTA
[2] DIRECTOR

ÍNDICE

RESUMEN… vi
ÍNDICE DE CUADROS x
ÍNDICE DE FIGURAS xii

1. INTRODUCCIÓN 1

2. REVISIÓN DE LITERATURA 2
2.1. Problemática general 2
2.2. Sitios contaminados en México 3
2.3. Caracterización de suelos contaminados 9
2.4. Tecnologías de fitorremediación de suelos 11
2.4.1. Rizodegradación 14
2.4.2. Rizofiltración 14
2.4.3. Fitoextracción 15
2.4.4. Fitodegradación 16
2.4.5. Fitoestabilización 17
2.5. Ventajas y desventajas de la fitorremediación 18
2.6. Impactos de los metales (Cd, Ni, Pb y Zn) en los seres vivos 20
2.6.1. Cadmio 20
2.6.2. Plomo 21
2.6.3. Níquel 22
2.6.4. Zinc 23
2.7. Absorción de los metales pesados por las raíces de las plantas 23
2.8. EDTA y Ácidos húmicos 24
2.9. Efecto del pH en la absorción de metales pesados 30

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS 32
Objetivos generales 32
Objetivos específicos 32
Hipótesis 33

4. MATERIALES Y MÉTODOS 34
4.1. Colecta de suelo 34
4.2. Preparación del suelo 34
4.3. Obtención del material vegetal 36
4.4. Enraizamiento del material vegetal y siembra. 36
4.5. Riego 37
4.6. Obtención de suelo en la cosecha. 37
4.7. Cosecha de material vegetal 37
4.8. Contenido final de metales pesados totales en el suelo 38
4.9. Medición del contenido de metales absorbidos por las plantas 38
4.10. Diseño experimental y análisis de datos 39

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 40
5.1. Valores de pH en el suelo al aplicar HNO_3 40
5.2. Absorción de Cd, Ni, Pb y Zn en las plantas testigo. 41
5.3. Absorción y acumulación de Cd 42
5.4. Absorción y acumulación de Ni 45
5.5. Absorción y acumulación de Pb 47
5.6. Absorción y acumulación de Zn 50
5.7. Fitoextracción por especie 51
5.7.1. Absorción de Cd por especie en parte aérea 51
5.7.2. Absorción de Cd por especie en parte raíz 52
5.7.3. Absorción de Ni por especie en parte aérea 52
5.7.4. Absorción de Ni por especie en parte raíz 53
5.7.5. Absorción de Pb por especie en parte aérea 55
5.7.6. Absorción de Pb por especie en parte raíz 55
5.7.7. Absorción de Zn por especie en parte aérea 55
5.7.8. Absorción de Zn por especie en parte raíz 55
5.8. Coeficiente de transferencia de Cd en parte aérea y raíz 57
5.9. Coeficiente de transferencia de Ni en parte aérea y raíz 58

5.10. Coeficiente de transferencia de Pb en parte aérea y raíz 60
5.11. Coeficiente de transferencia de Zn en parte aérea y raíz 61
5. 12. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Cd, Ni, Pb y Zn 62
6. CONCLUSIONES 67
7. LITERATURA CITADA 68
8. ANEXOS 77

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Contenido promedio de Cd, Ni, Pb y Zn del suelo evaluado por Ibañez (2005). 5

Cuadro 2. Especies que crecen en áreas mineras contaminadas con metales pesados en el estado de Zacatecas. 7

Cuadro 3. Especies que crecen en áreas mineras contaminadas con metales pesados en Temascaltepec, estado de México..... 8

Cuadro 4. Ventajas y limitaciones de la fitorremediación..... 19

Cuadro 5. Estimación de los costos de la fitorremediación en comparación con los costos de otras técnicas establecidas (tomado de Chappell (1997). 20

Cuadro 6. Aplicación de EDTA, Sustancias húmicas y modificación de pH al suelo. 35

Cuadro 7. Valores de la curva de acidificación de pH en el suelo, al aplicar HNO_3. 40

Cuadro 8. Absorción de Cd, Ni, Pb y Zn en tejido aéreo en las plantas testigo. 41

Cuadro 9. Absorción de Cd, Ni, Pb y Zn en tejido raíz en las plantas testigo. 41

Cuadro 10. Capacidad de fitoextracción significativa de Cd en especies silvestres. 42

Cuadro 11. Capacidad de fitoextracción significativa de Ni en especies silvestres. 46

Cuadro 12. Capacidad de fitoextracción significativa de Pb en especies silvestres. 48

Cuadro 13. Capacidad de fitoextracción de Zn en especies silvestres. 50

Cuadro 14. Especies silvestres con mayor capacidad de fitoextracción por metal con tratamiento en especies silvestres. 54
Cuadro 15. Especies arbustivas silvestres con mayor capacidad de fitoextracción por metal en especies silvestres. 56
Cuadro 16. Tratamientos con mayor extracción de Cd en parte aérea y raíz. 58
Cuadro 17. Tratamientos con mayor extracción de Ni en parte aérea y raíz. 59
Cuadro 18. Tratamientos con mayor extracción de Pb en parte aérea y raíz. 60
Cuadro 19. Tratamientos con mayor extracción de Zn en parte aérea y raíz. 61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Acidificación del suelo al aplicarse HNO_3..... 40
Figura 2. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Cd, por especie, respecto al testigo..... 62
Figura 3. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Ni, por especie, respecto al testigo..... 63
Figura 4. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Pb, por especie, respecto al testigo..... 64
Figura 5. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Zn, por especie, respecto al testigo..... 65

ANEXOS

Anexos Datos (mg kg^{-1}) obtenidos del espectrofotometro de absorción atomica …….. 79

1. INTRODUCCIÓN

Un gran número de sitios en el mundo se encuentran contaminados por la presencia de metales pesados, como resultado de las actividades humanas (Lombi *et al.*, 2001). En México se han reportado estudios en los que se documenta una acumulación de metales pesados en la zona chinampera de Xochimilco y Tlahuác, México. D.F., regada con aguas negras (Ramos-Bello *et al*., 2001). Los metales pesados también se encontraron en suelos agrícolas del municipio de Atlixco, Puebla (Méndez-García *et al*., 2000). En Monterrey, Nuevo León, Torreón, Coahuila y San Luis Potosí, México se han reportado niveles de plomo (Pb) en el intervalo de 61 hasta 40 000 mg kg^{-1} de suelo (Rodríguez *et al.*, 2006). En la región del Valle del Mezquital del estado de Hidalgo, México hay acumulación de metales pesados como Pb, Cd, Ni, Zn y Cr entre otros por el uso de aguas residuales para el riego agrícola (Cajuste *et al.*, 1991; Vázquez *et al.*, 2001).

Es importante que se pueda limpiar o disminuir la contaminación de estos suelos, debido a que los metales pesados se incorporan a las cadenas tróficas, a través del cultivo agrícola. En México las tecnologías que se han aplicado para descontaminar estos sitios son de tipo químicas/físicas y térmicas, sin considerar la alternativa Biológica, dentro de la cual se encuentra la fitorremediación.

El uso de plantas para limpiar o disminuir la toxicidad de sitios contaminados por metales pesados en el suelo o agua se denomina fitorremediación (Robinson *et al.*, 1998; Barceló and Poschenrieder, 2003; Erdei *et al.*, 2005). Esta tecnología es limpia, barata y eficaz (Wangensteen, 2002; Vashegyi *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2006). Sin embargo, la fitorremediación esta aún en fase de desarrollo y existe la necesidad de investigación enfocada fundamentalmente al conocimiento del suelo y su relación con la acumulación de metales pesados en las plantas; motivo por el cual la presente investigación tuvo como objetivo identificar algunas especies fitorremediadoras de suelos

contaminados con Pb, Cd, Ni, Zn y medir el efecto de la aplicación de EDTA, sustancias húmicas y acidificación al suelo, para conocer la disponibilidad de dichos metales por las plantas con suelo contaminado del Valle del Mezquital, Hidalgo, México.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Problemática general

En las zonas urbanas, el uso y abuso del agua se ha convertido en un problema. La zona metropolitana de la ciudad de México produce 40 m^3 s^{-1} de aguas residuales, y desde hace más de 100 años, éstas se utilizan para regar cultivos de maíz, alfalfa, frijol, cebada y trigo en el Valle del Mezquital, Hidalgo. México. Los metales pesados dañan en forma directa la salud humana (Raya, 2002) y al utilizarse estas aguas residuales existe traslocación de esos metales al tejido vegetal, lo que representa un grave riesgo de salud al consumidor.

Las tecnologías que ofrecen las empresas con permiso autorizado por la SEMARNAT, en México, para remediar suelos contaminados con metales pesados, están enfocadas a la remediación con compuestos orgánicos y ninguna empresa ofrece servicios para la restauración de suelos contaminados por medio de la fitorremediación (Volke y Velasco, 2002).

2.2. Sitios contaminados en México

A nivel mundial un gran número de sitios en el mundo se encuentran contaminados por la presencia de metales pesados, como resultado de las actividades humanas (Lombi *et al.*, 2001). En México se han reportado estudios en los que se documenta acumulación de metales pesados en la zona chinampera ubicada en las delegaciones Xochimilco y Tlahuác en México, D.F., las cuales son regadas con aguas negras. Ramos-Bello *et al*. (2001) encontraron en el suelo concentraciones de Pb en el intervalo de 0.41 a 4.70 mg kg^{-1}, para Cd de 0.22 a 0.66 mg kg^{-1}. Para Ni de 0.93 a 3.14 mg kg^{-1}, y para Zn de 0.50 a 5.59 mg kg^{-1}. Las concentraciones de Ni y Cd están por arriba de la permitida por la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996.

En suelos agrícolas en el municipio de Atlixco, Puebla los cultivos se riegan con aguas negras y se han reportado niveles altos de metales como Mn, Fe, Pb y Cd en concentraciones de 68.63, 4.22, 4.22 y 0.30 mg kg^{-1}, respectivamente (Méndez-García *et al*., 2000). En Monterrey, Nuevo León, Torreón, Coahuila y San Luis Potosí, México se han reportado valores de Pb en un intervalo de 61 hasta 40 000 mg kg^{-1} (Rodríguez *et al.*, 2006).

Armienta (2006) reportó que en Zimapan, Hidalgo hay un área con residuos mineros donde el agua subterránea se encuentra contaminada con metales y metaloides tóxicos, como el Pb, Ni, Cu As y Cd entre otros. Esta contaminación procede del suelo contaminado, hasta los 40 cm de profundidad, con un radio de 100 a 500 m. donde se genera drenaje ácido y arrastre de partículas sólidas por erosión de lluvia

Carrillo *et al.* (1992) reportaron cantidades de Pb en el intervalo de 40 a 52 µg L^{-1} en el agua residual (50% agua negra y 50% agua de la presa Requena), utilizada para regar cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México, mientras que en el agua de pozo los niveles de Pb fueron menores a 0.005 g L^{-1}. El contenido de Cd fue medido en las aguas residuales entre 13 y 14 µg L^{-1},

mientras que en agua de pozo fue menor de 0.01 µg L^{-1}. El Níquel fue reportado en las aguas residuales entre 64 a 212 µg L^{-1}, mientras que en el agua de pozo había menos de 0.01 µg L^{-1}. El Zn fue reportado entre 32 y 215 µg L^{-1} en las aguas residuales, y en el agua de pozo con menos de 2 µg L^{-1}.

Carrillo *et al*. (1992) midieron en el suelo concentraciones de Pb en 124 mg kg^{-1} con HNO_3 4N, entre 1989 y 1990, en este mismo Valle en Hidalgo, México, lo que equivale a la absorción y fijación completa de la cantidad que se encuentra en el agua residual. El Cd se encontró en cantidades de 2.16 mg kg^{-1}, esto corresponde al 10.5% de la cantidad cuantificada en el agua residual. El Ni fue reportado en 2.76 mg kg^{-1}, con el 2% de lo que se encontró en el agua residual; y el Zn estuvo en 67.6 mg kg^{-1}, esto es el 54.7% del que se encuentra en el agua residual.

Avilés (2000) reportó valores en el suelo de este mismo Valle, con concentraciones de Cd que van de 0.60 a 1.22 mg kg^{-1}. El Pb se cuantificó en valores mayores de 10 mg kg^{-1} (42.44 y 70.71 mg kg^{-1}). El Zn se reportó entre 93.54 y 194.86 mg kg^{-1}.

Ibañez (2005), reportó un análisis de suelo en el que se incluyen cuatro formas químicas en que se encuentran los metales. En el Cuadro 1 se puede apreciar que la forma de los metales que más domina es la ligada a la materia orgánica y la forma residual. El sitio descrito se encuentra en Tlaxcoapan, Hidalgo, tiene una textura franco arcillo-arenoso, un pH entre 6.5 y 7, carbonatos en 0.17% y contenido de materia orgánica de 3.83%.

Cuadro 1. Contenido promedio de Cd, Ni, Pb y Zn del suelo evaluado por Ibañez (2005).

Metal	Fracción	Contenido promedio (mg kg^{-1})
Zn	Hidrosoluble	0.98
	Intercambiable	2.65
	Ligado a Materia Orgánica	66.09
	Residual	118.68
Cd	Hidrosoluble	0.08
	Intercambiable	1.63
	Ligado a Materia Orgánica	1.62
	Residual	1.29
Pb	Hidrosoluble	0.58
	Intercambiable	8.69
	Ligado a Materia Orgánica	11.00
	Residual	43.04
Ni	Hidrosoluble	0.77
	Intercambiable	11.76
	Ligado a Materia Orgánica	6.40
	Residual	5.23

Avilés (2000) identificó a especies como *Mirabilis jalapa* Linn., *Rumex obtusifolius* L., Pasto coquillo, Pasto cultivado, Pasto grama, *Malva parviflora* L., Compuesta, Hierba del caballo, Pasto jardinero, *Senecio salignus* L., *Senecio vulneraria, Rumex crispus* L., Phaseolus vulgaris, Planta acuática, *Coriamdrum sativum* L., *Brassica napus* L., *Polygonum acre* H.B.K., *Cynodon dactylon* L., *Urtica urens* L., *Bidens ostruthioides* (D.C.) Scna. Bip., *Bidens triplinervia* H.B.K., *Amaranthus hibridus* L., *Chenopodium mexicanum* K. Moq., y *Portulaca oleracea* L., que se desarrollan en áreas contaminadas con metales pesados en el Valle del Mezquital.

En estas especies la cantidad de Cd asimilado estuvo en el intervalo de 0.0 a 3.81 mg kg^{-1} en tejido aéreo, con valores más frecuentes inferiores a la unidad. Sin embargo, las especies del Género *Bidens* absorbieron 3.62 y 3.81 mg kg^{-1} en tejido aéreo; mientras que en la raíz los valores fueron de 0.18 a 3.47 mg kg^{-1}. La concentración de Cd absorbido por estas especies es muy baja.

Cuando se cuantificó la absorción de Pb en las especies descritas anteriormente el intervalo fue de 0.00 a 9.24 mg kg^{-1} en tejido aéreo, excepto el Pasto jardinero que asimiló 45.14 mg kg^{-1} en materia seca de parte aérea, en tanto que en raíz el intervalo estuvo entre 0.00 y 113.71 mg kg^{-1}, lo que sugiere gran dificultad para traslocar el Pb a la parte aérea.

La asimilación de Zn por estas especies estuvo en el intervalo de 1.39 a 262.78 mg kg^{-1} en tejido aéreo, y en la parte de raíz estuvo entre 12.85 y 223.84 mg kg^{-1}; estos valores reflejan una alta capacidad para absorber Zn, aunque solo el Pasto jardinero, *Rumex crispus* L. y la compuesta tienen de 20 a 200 mg kg^{-1} de Zn más que la parte de la raíz, y *Amaranthus hibridus* L. presentó igual concentración en parte aérea que raíz (Avilés, 2000).

Díaz *et al*. (2005) identificaron las siguientes especies vegetales (Cuadro 2 y 3) que se desarrollan en áreas mineras contaminadas con metales pesados, aunque solo *Tagetes lunulata, Bouvandia ternifolia, Dalea bicolor* y *Polygomun aviculare* tuvieron altas concentraciones de metales pesados, con 500, 300, 200 de Zn, respectivamente y 900 mg kg^{-1}de Cd en *Polygomun aviculare* (Carrillo-González, 2005).

Cuadro 2. Especies que crecen en áreas mineras contaminadas con metales pesados en el estado de Zacatecas.

Familia	Nombre científico	Familia	Nombre científico
Anacardiaceae	*Schinus molle* L.	Gramineae	*Andropogon barbinodis* Lag.
Asclepiadaceae	*Asclepias linaria* Cav.		*Chloris virgata* Sw.
Casuarinaceae	*Casuarina cunninghamiana* Miq.		*Cynodon* sp.
Compositae	*Aster gymnocephalus* (DC.) A. Gray	Labiatae	*Salvia microphylla* HBK
	Aster tanacetifolius HBK.		*Stachys tenerrima* Epling
	Bahia absinthifolia Benth	Leguminosae	*Dalea bicolor* Humb. & Bonpl. Ex Willd.
	Bahia xylopoda Greenm.	Liliaceae	*Asphodelus fistulosus* L.
	Bidens odorata Cav.	Nyctaginaceae	*Allionia choisyi* Standl.
	Brickellia veronicifolia HBK.	Polygonaceae	*Polygonum aviculare* L.
	Dyssodia papposa (Vent.) Hitchc.	Resedaceae	*Reseda luteola* L.
	Erigeron pubescens HBK.	Rubiaceae	*Bouvardia ternifolia* (Cav.)Schlecht.
	Gnaphalium arizonicum Gray	Solanaceae	*Lycium pallidum* Miers
	Grindelia subdecurrens DC in DC		*Solanum* sp.
	Haplopappus venetus (HBK) Blake		*Solanum elaeagnifolium* Cav.
	Heterosperma pinnatum Cav.		Larrea tridentata (Sessé & Moc. ex DC.) Caville
	Stevia salicifolia Cav.		
	Tagetes lunulata Ort.		
	Viguiera linearis (Cav.) Sch. Bip		
	Xanthium strumarium L.		
	Zinnia acerosa (DC.) Gray		
Cupressaceae	*Juniperus* sp.		
Cyperaceae	*Cyperus* sp.		
Chenopodiaceae	*Teloxys graveolens* Willd.		
Equisetaceae	*Equisetum* sp.		
Euphorbiaceae	*Euphorbia* sp.		
	Jatropha dioica Sesse ex Cerv.		

Fuente: Díaz *et al*. (2005)

Cuadro 3. Especies que crecen en áreas mineras contaminadas con metales pesados en Temascaltepec, estado de México

Familia	Nombre científico	Familia	Nombre científico
Commelinaceae	*Callisia insignis* C.B. Clarke	Leguminosae	*Aschynomene villosa* Poir.
Compositae	*Bidens odorata* Cav.		*Astragalus guatemalensis* Hemsl.
	Conyza sp.		*Crotalaria longirostrata* Hook & Arn.
	Galinsoga parviflora Cav.		*Crotalaria rotundifolia* J.F. Gmel.
	Jaegeria hirta (Lag.) Less		*Dalea obreniformis* (Rydb.) Barneby
	Tagetes micrantha Cav.		*Dalea* sp.
	Melanpodium divaricatum (Rich. In Pers.) DC. In DC.		*Trifolium goniocarpum* Lojac.
Convolvulaceae	*Ipomoea pedicellaris* Benth.	Lythraceae	*Cuphea procumbens* Ort.
Euphorbiaceae	*Euphorbia ocymoidea* L.	Malvaceae	*Anoda cristata* (L.) Schlecht.
Gramineae	*Eleusine indica* (L.) Gaertn.		*Sida rhombifolia* L.
	Eragrostis intermedia Hitchc.	Onagraceae	*Lopezia racemosa* Cav.
	Digitaria sp.	Phytolaccaceae	*Phytolacca icosandra* L.
	Paspalum convexum HBK.	Primulaceae	*Anagallis arvensis* L.
	Rhynchelytrum repens (Willd.) Hubb.	Rubiaceae	*Crusea longiflora* (Willd. Ex Roem. & Schutt) Anderson
	Sporobolus indicus (L.) R. Br.		

Fuente: Díaz *et al*. (2005)

En San Luis Potosí, México, Rodríguez *et al*. (2006), evaluaron la capacidad fitorremediadora para acumular Pb de *Ricinus communis, Cenchrus ciliaris, Sorghum sudanense, Brassica campestris, Helianthus annuus* y *Nicotiana tabacum*, su acumulación fue de 290, 245, 175, 130, 65 y 480 mg kg^{-1} de materia seca, respectivamente, cuando el suelo contenía 500 mg kg^{-1}. Éstas mismas especies se evaluaron cuando el suelo contenía 1000 mg kg^{-1} de Pb y *Ricinus communis* acumuló 735 mg kg^{-1} de Pb en materia seca, en tanto que *Cenchrus ciliaris* no tuvo diferencia significativa en la acumulación, *Sorghum sudanense* absorbió 305 y *Helianthus annuus* absorbió 80 mg kg^{-1} de Pb, mientras que *Brassica campestris,* y *Nicotiana tabacum*, no fueron capaces de absorber Pb con esta concentración en el suelo. La mayor acumulación de Pb se originó por la mayor cantidad de tejido.

2.3. Caracterización de suelos contaminados

La SEMARNAT (2001) describe la forma en que se puede caracterizar a un sitio afectado por contaminantes, para ello se lllevan a efecto las siguientes fases:

Fase I: Caracterización preliminar. En la que se establece un modelo teórico del sitio mediante todo lo que ya se conoce acerca de él. En esta fase se recaba información de: registros históricos del sitio y del área aledaña, el marco físico regional y detallado del sitio, los usos actuales y futuros del lugar, los datos analíticos de estudios previos, y un reconocimiento del sitio y el área aledaña.

Fase II: Caracterización detallada. En la que se complementan las informaciones obtenidas anteriormente. A través del diseño y ejecución del muestreo y análisis, y de la interpretación de los resultados obtenidos de manera que se tenga un modelo teórico nuevo, más elaborado.

La Sociedad Pública de Gestión Ambiental (IHOBE, 2002) Menciona que los suelos contaminados o potencialmente contaminados pueden clasificarse con base en las siguientes actividades:

- Extracción de minerales metálicos
- Lavado, desengrasado, blanqueo y tintado de fibras textiles
- Preparación, curtido y acabado del cuero
- Preparación industrial de la madera
- Refino de petróleo
- Coquerías
- Plantas asfálticas
- Industria química
- Metalurgia
    - Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones.
    - Producción y primera transformación de metales no férreos
    - Fundición de metales
- Fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo mecánico incluyendo la forja, estampación, embutición, tratamiento y revestimiento de metales.
- Fabricación de armas y municiones
- Fabricación de material y maquinaria eléctrica y electrónica
- Fabricación de material de transporte
- Gasolinerías
- Instalaciones de gestión ambiental, incluyendo vertederos
- Comercio al por mayor de minerales, metales, productos químicos, chatarra y residuos
- Depósito y almacenamiento de mercancías peligrosas
- Generación de energía. Centrales térmicas.

La investigación exploratoria de suelos sirve para confirmar niveles de contaminación que hagan suponer un riesgo inaceptable para la salud humana y los ecosistemas, así como confirmar la hipótesis de distribución espacial de la contaminación y la obtención de datos relevantes que permitan el deseño óptimo de la siguiente fase. Finalizada esta etapa, dede recopilarse información previa, realizar un estudio histórico, analizar el medio físico, visita a campo y la interpretación de los resultados para realizar el diseño y estrategia a seguir (IHOBE, 2002).

2.4. Tecnologías de fitorremediación de suelos

Las alternativas de remediación se pueden clasificar en forma general de la siguiente forma (SEMARNAT, 2001):
Biológicas, Químicas/físicas y Térmicas.
La remediación biológica se realiza mediante la biorremediación y la Fitorremediación. Las alternativas físicas son aquellas que utilizan la extracción de vapores del suelo y aspersión de aire, lavado del suelo, extracción con disolventes, deshalogenación y solidificación/estabilización. La estrategia térmica utiliza desorción térmica.

El término “tecnología de tratamiento” implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzca la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA, 2001).

EPA (2001) Clasifica a las tecnologías de remediación en base a los siguientes principios:

(i) Estrategia de remediación: son tres estrategias básicas que pueden usarse separadas o en conjunto, para remediar la mayoría de los sitios contaminados:

a) Destrucción de los contaminantes. Este tipo de tecnología busca alterar la estructura química del contaminante.

b) Extracción o separación. Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica).

c) Aislamiento o inmovilización del contaminante. Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.

(ii) Lugar en que se realiza el proceso de remediación. En general se distinguen dos tipos de tecnología.

a) In situ. Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien los contaminantes del suelo son removidos, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realiza en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.

b) Ex situ. La realización de este tipo de tecnologías requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (on site) o fuera de él (off site).

(iii) Tipo de tratamiento. Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos de tratamiento.

a) Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.

b) Tratamientos físicos. Este tipo de tratamientos utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.

c) Tratamientos térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo.

Las tecnologías de remediación de suelos utilizadas para reducir la contaminación son la base principal que influye a futuro en los costos, tiempo y eficiencia. Una estrategia utilizada para la remediación, es la extracción de contaminantes con tratamientos biológicos con plantas, este método viable es barato, y en general aún se conoce poco; debido a esta razón se establecen las siguientes definiciones:

El uso de plantas para limpiar o disminuir la toxicidad de sitios contaminados por metales pesados en el suelo o agua se denomina fitorremediación (Salt *et al*., 1998; Robinson *et al.*, 1998). Esta tecnología es limpia, barata y eficaz (Vashegyi *et al.*, 2005; Rodríguez *et al.*, 2006) y puede aplicarse in situ o ex situ para contaminantes orgánicos e inorgánicos (Hutchinson *et al*., 2001). Esta técnica estabiliza el suelo y mejora el paisaje, aunque su resultado se refleja a mediano y largo plazo porque se requieren varios ciclos de cultivo (Salt *et al*., 1998).

Existen diferentes formas de fitorremediación y pueden clasificarse basándose en el tipo de extracción del contaminante en degradación, extracción, adsorción o una combinación de estos. Entre las formas más comunes de extracción de elementos tóxicos, según la clasificación de EPA (2000) se incluyen la rizodegradación, la rizofiltración, la fito-extracción, la fitodegradación y la fitoestabilización.

2.4.1. Rizodegradación

Se trata de la disminución de contaminantes orgánicos en el suelo por medio de la actividad microbiana de la zona radical, ya que las raíces de las plantas pueden afectar las condiciones del suelo para aumentar la aireación del suelo, moderan la humedad y propiciar condiciones favorables para la biodegradación, por medio de los microorganismos presentes (EPA, 2000).

La población microbiana, la actividad en la rizosfera y la cantidad de exudados definen el incremento de la biodegradación de los compuestos orgánicos presentes en el suelo. La rizodegradación tiene como ventajas la destrucción del contaminante en el sitio y la mineralización del contaminante, aunque el crecimiento y desarrollo de las raíces de la planta requiere tiempo y la profundidad de la raíz depende de la textura y estructura.

Los contaminantes que se pueden remover por medio de esta técnica son los hidrocarburos derivados del petróleo, hidrocarburos aromáticos policíclicos, el benceno, tolueno y etilbenceno.

2.4.2. Rizofiltración

Se aplica para limpiar tierras inundadas con aguas residuales, las plantas recolectan la concentración del contaminante y es traslocada dentro del tejido de las plantas por medio de las raíces, esta absorción debe ser alta y las plantas deben ser tolerantes a la saturación de agua en el suelo por varios días (Schnoor, 1997; Barceló y Poschenrieder, 2003; Erdei *et al*., 2005). No se aplica a suelos debido a que los contaminantes necesitan estar en solución para ser absorbidos por las plantas.

Esta tecnología permite la utilización de plantas acuáticas o terrestres, pero se necesita un soporte o base (plataforma flotante) y el sistema puede ser aplicado in situ o ex situ, aunque el pH afecta la absorción óptima de los elementos. Los elementos que pueden ser removidos por esta técnica son los metales: Cr^{6+}, Cd^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+} y los radio nucleótidos Uranio, Cesio y Estroncio.

La rizofiltración fue utilizada por Carizañes-Villanueva *et al*., (2000) cuando estimaron la eficiencia de eliminación de metales a través de pruebas de eficiencia de toxicidad aguda ($CL_{50-48\ h}$) en las que utilizó *Daphnia magna* y *Chlorella vulgaris*, especies que se desarrollaron en un medio sintetico. A este medio adicionaron diferentes dósis de metales pesados Cr (IV), Cd, Zn, Cu y Ni por separado y/o mezclas. Los resultados indicaron que la captación de cadmio y zinc fue diferente cuando los metales se añidieron por separado. Cuando las dósis se mezclaron existió influencia por el tipo de sistema de cultivo.

2.4.3. Fitoextracción

Es la absorción de contaminantes por medio de las raíces de las plantas y su traslocación de éstos al tejido (Schnoor, 1997; Meers *et al*., 2004; Erdei *et al*., 2005).

Los contaminantes son removidos cuando son cosechadas las plantas. Esta tecnología es aplicada a sedimentos de suelos y lodos residuales aunque puede ser utilizada en aguas residuales (EPA, 2000). Tiene como ventaja la utilización de menores costos, respecto a cualquier otro tratamiento que se pueda dar a suelos contaminados.

Los contaminantes que se pueden fitoextraer son los metales Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn, los metaloides As y Se, los radio nucleótidos Sr, Cs, Pu, U.

Salido *et al*., (2003) estimaron que la concentración de Pb en *Brassica juncea* fue de 423 mg kg^{-1} de materia seca y cuando se aplicó al suelo 5.0 y 5.4 g de EDTA kg^{-1}, aumentó a 1302 mg kg^{-1} de materia seca, lo que representa tres veces mayor extracción. En cambio cuando se aplicó 10 g de EDTA kg^{-1} se absorbió 9000 mg de Pb kg^{-1} de materia seca, esto es veinte veces más que al no aplicarse EDTA.

En suelo franco arcilloso (sedimentos dragados) con un pH de 6.7 y 9.2% de materia orgánica Meers *et al*., (2004) estimaron una extracción de Cd en 14.4% de los 9 mg kg^{-1}. De los 181 mg kg^{-1} de Pb, se extrajo 0.66%. El Ni del 58 mg kg^{-1} que había en el suelo el maíz (*Zea mays*) extrajo 1.3%. Para el Zn había 874 mg kg^{-1} y la planta de maíz acumuló 14.6%. Todo ello en un periodo de seis semanas y después de aplicar al suelo 2 g de EDTA kg^{-1}.

2.4.4. Fitodegradación

Es la remoción o disminución de contaminantes orgánicos por medio de la descomposición de materia orgánica (Erdei *et al*., 2005), a través de procesos metabólicos dentro de las plantas o por medio de productos o los compuestos producidos por las plantas tales como las enzimas (EPA, 2000; Barceló and Poschenrieder, 2003).

Ninguna degradación causada por microorganismos asociados a las raíces de las plantas se considera rizodegradación y la toma de los contaminantes estará dada por la hidrofobicidad, solubilidad y la polaridad ya que los componentes hidrofóbicos orgánicos son traslocados por las plantas de una manera más efectiva; esto también dependerá del tipo de planta y de las características físicas y químicas del suelo (EPA, 2000).

Al utilizar la técnica de la fitodegradación, la degradación por medio de las enzimas producidas permite que la planta pueda desarrollarse en medios libres de microorganismos, ya que estás son capaces de crecer en medios estériles o medios en los que las concentraciones de tóxicos son tan elevadas que no permiten el desarrollo de los microorganismos o que pueden ser tóxicos para ellos, por lo que la fitodegradación puede ocurrir donde la biodegradación sea limitada; aunque se pueden formar productos intermedios que sean tóxicos (EPA, 2000) y los únicos contaminantes que se pueden remover por medio de está técnica son los solventes clorados, herbicidas e insecticidas.

2.4.5. Fitoestabilización

Es la tecnica que inmoviliza a los contaminantes orgánicos e inorgánicos en y hacia las raíces por medio de plantas con la finalidad de evitar su movilidad o migración a otras partes del suelo, por la erosión o alguna otra forma de distribución (EPA, 2000; Barceló and Poschenrieder, 2003; Erdei *et al*., 2005).

Cuando se utiliza esta técnica el pH del suelo puede ser cambiado por los exudados de la raíz de la planta o por medio de la producción de CO_2. La Fitoestabilización puede cambiar la solubilidad y movilidad del metal, o cambiar la disociación de los componentes orgánicos. Se puede utilizar para el tratamiento de suelos, sedimentos y lodos residuales. Los costos de la fitoestabilización son más bajos en comparación a otras técnicas de recuperación de suelos contaminados ya que la vegetación promueve la restauración del ecosistema, no se requiere la disposición adecuada de materiales peligrosos o el tejido.

Cuando el contaminante permanece en el sitio, la vegetación y el suelo pueden requerir de constante cuidado para prevenir la liberación de contaminantes y el posible lavado del mismo; asimismo, la vegetación puede requerir de fertilización o un mejoramiento de las propiedades físicas y químicas del suelo.

Además se debe evitar que las plantas trasloquen los metales desde las raíces hacia la parte aérea. Los metales que se pueden remover por medio de está técnica son el arsenico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, plomo y zinc (EPA, 2000).

Santibáñes y Ginocchio, (2006) utilizaron macetas en las que depositaron relaves de biosolidos en proporciones equivalentes de 0, 200 y 400 t ha^{-1}. Los biosolidos se aplicaron en forma superficial al relave o mezclados con este y se sembraron con *Lolium perenne*. A los seis meses y bajo condiciones de invernadero, el tratamiento con mayor control de erosión de relaves, en la fitoestabilización, y con menor riesgo de acumulación de metales en la parte aérea de la planta, fue con 200 t ha^{-1} de biosolidos, en mezcla de relaves. Los metales absorbidos fueron Cu, Zn y Cd.

Gentiana pennelliana es una especie que se desarrolla en sitios contaminados con Pb, Cu y Zn. Fue identificada con alto potencial en la fitoestabilización de sitios contaminados con Pb, Cu y Zn con un factor de bioconcentración (tasa de concentración del metal del suelo a las raíces de la planta) de 11, 22 y 2.6, respectivamente (Yoon *et al*., 2006).

2.5. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Chappell (1997) menciona que la fitorremediación tiene ventajas para limpiar suelos contaminados, pero también tiene algunas limitaciones, como se indica en el Cuadro 4:

Cuadro 4. Ventajas y limitaciones de la fitorremediación.

Ventajas de la fitorremediación	Limitaciones de la fitorremediación
In situ	Limitada a suelos poco profundos, arroyos y aguas subterráneas
Inactiva	Altas concentraciones de materiales peligrosos pueden ser peligrosos a las plantas
Secado solar	Las limitaciones en la transferencia a la masa está asociado con otros biotratamientos
Costos del 10% al 20% de los tratamientos mecánicos	Más lenta que los tratamientos mecánicos
La transferencia es más rápida que la disminución en forma natural	Solo es efectiva en contaminantes moderadamente mezclados con agua
Alta aceptancia pública	La Tóxicidad y biodisponibilidad de los productos degradados no se conoce
Menor emisión de aire y agua	Los contaminantes pueden ser mobilizados dentro de aguas subterráneas
Genera menos desperdicios secundarios	Hay un potencial de que los contaminantes entren en la cadena alimenticia a través del consumo animal
Los suelos permanecen y pueden usarse en otros tratamientos	Desconocimiento de muchas regulaciones

Chappell (1997) reporta algunas diferencias entre los costos utilizados con la fitorremediación y otras tecnologías, las cuales se mencionan en el Cuadro 5:

Cuadro 5. Estimación de los costos de la fitorremediación en comparación con los costos de otras técnicas establecidas (tomado de Chappell (1997).

Contaminante	Costo de la fitorremediación (Dolares)	Costo con otras tecnologías (Dolares)
Metales	105 (m^{-3} de suelo)	329 (m^{-3} de suelo)
Sitios contaminados con hidrocarburos de petróleo.	70 000	850 000
10 acres de suelo contaminado.	500 000	12 millones
Radionucleotidos en la superficie del agua.	2 a 6 por mil galones tratados	No mencionado
1 ha (15 cm de profundidad) varios contaminantes.	2 500 a 15 000	No mencionado

2.6. Impactos de los metales (Cd, Ni, Pb y Zn) en los seres vivos

2.6.1. Cadmio

Es un producto de desecho que se usa en el electroplatinado, manufactura de pigmentos, elaboración de baterías, fertilizantes fosfatados. Se encuentra en los depósitos de lodos producto del tratamiento de agua residual. El Cd es asimilado fácilmente por las plantas, debido a su relación (10), esto significa que es 10 veces más alto en parte aérea que en suelo (Vázquez, 1999).

Las exposiciones al cadmio producen daño a los conductos renales (Albert, 1990; citado por Vázquez, 1999), y en menor proporción osteoporosis en mujeres posmenopáusicas. También existen diarreas, dolor de estómago, vómitos severos, fractura de huesos, fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad, daño al sistema nervioso central, daño al sistema inmune, desordenes psicológicos y posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer (Copius and Reijnders, 1989).

2.6.2. Plomo

El plomo forma aleaciones con muchos metales y, en general, se emplea en esta forma en la mayor parte de sus aplicaciones (Davies, 1995). Se utiliza como estabilizador de pinturas, en los aditivos para gasolina, soldadura, municiones, pinturas cosméticas, tinta de impresión, vidriado en cerámica, fabricación de acumuladores, forros para cables, elementos de construcción, pigmentos, soldadura suave y municiones. También se utiliza en los pigmentos como el blanco de plomo $2PbCO_3.Pb(OH)_2$, el sulfato básico de plomo y los cromatos de plomo (Greenwood, 1997). Es de importancia ambiental debido a su amplio uso y dispersión en el ambiente.

El plomo es uno de los metales con mayor efecto dañino sobre la salud humana, este puede entrar en el cuerpo humano a través de la comida, agua y aire en un 65, 20 y 15%, respectivamente (Copius and Reijnders, 1989). El Pb también puede entrar por inhalación en pequeñas cantidades como por ejemplo el humo de los cigarros.

El Plomo puede causar efectos como la perturbación de la biosíntesis de hemoglobina y anemia, incremento de la presión sanguínea, daño a los riñones, abortos, perturbación del sistema nervioso, daño al cerebro, disminución de la fertilidad del hombre a través del daño en el esperma, disminución de las habilidades de aprendizaje de los niños, perturbación en el comportamiento de los niños como la agresión. El Pb puede entrar en el feto a través de la placenta de la madre y causar serios daños al sistema nervioso y al cerebro de los niños por nacer (Copius and Reijnders, 1989).

El plomo se puede acumular en los huesos, en un 90%, riñones y así daña el sistema nervioso central (FDA, 1997; citado por Vázquez, 2001).

2.6.3. Níquel

El níquel es un elemento que constituye cerca de 0.008% de la corteza terrestre y 0.01% de las rocas ígneas (Greenwood, 1997). La mayor parte del níquel comercial se emplea en el acero inoxidable y otras aleaciones resistentes a la corrosión, es importante en monedas como sustituto de la plata y como ingrediente del acero y otros productos metálicos como la joyería. El níquel finamente dividido se emplea como catalizador de hidrogenación.

El níquel es moderadamente reactivo, resiste la corrosión alcalina y no se inflama en trozos grandes, pero los alambres muy finos pueden incendiarse (Greenwood, 1997).

Los alimentos contienen pequeñas cantidades de níquel, excepto en el chocolate y en las grasas en que es alta. En dosis mínimas el níquel es esencial, pero cuando es tomado en altas concentraciones puede ser peligroso para la salud humana. Las plantas acumulan níquel, este elemento se puede ingerir cuando la gente come vegetales procedentes de suelos contaminados. También se puede asimilar por el contacto de la piel con suelo o agua contaminado por níquel.

La asimilación o exposición de altas cantidades de níquel, mayormente de las joyas, repercute en la probabilidad de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata. Después de la exposición al gas de níquel se puede desarrollar embolia de pulmón, fallos respiratorios, defectos de nacimiento, asma y bronquitis crónica, reacciones alérgicas como son erupciones cutáneas y desordenes del corazón (Copius and Reijnders, 1989).

2.6.4. Zinc

Es un elemento de transición, divalente, y sus propiedades son muy parecidas a las de Cd, es electropositivo; oxidante en forma pura, adquiere la propiedad de ser antioxidante al asociarse con otros elementos (Greenwood, 1997).

El Zn es un elemento traza que es esencial para la salud humana. Los alimentos tienen concentraciones de Zn, el agua potable también lo contiene, pero aumenta cuando es almacenada en tanques de metales como el Fe.

La falta de Zn en las personas se evidencia por la pérdida del apetito, disminución de la sensibilidad, el sabor, el olor, pequeñas llagas y erupciones cutáneas. Asimismo el exceso de Zn causa problemas de salud, como úlceras en el estómago, irritación de la piel, vómitos, náuseas, anemia, daño en el páncreas, disturbio del metabolismo de las proteínas, arteriosclerosis y defectos de nacimiento. Exposiciones al clorato de Zn intensivas pueden causar desordenes respiratorios. En el ambiente de trabajo el contacto con Zn puede causar la gripe conocida como la fiebre del metal. (Copius y Reijnders, 1989).

Los efectos dañinos de los metales como plomo, cadmio níquel y zinc en las personas, se pueden resumir en daños a la salud, vulnerabilidad a ciertas enfermedades como nefrotoxicidad, anemia, cáncer, infertilidad, enfermedades vasculares, y la reducción en la esperanza de vida (Albert, 1990).

2.7. Absorción de los metales pesados por las raíces de las plantas

La raíz es el principal órgano de absorción de iones metálicos y no metálicos que pueden ser transportados dentro del sistema de la planta. Los metales en la solución del suelo (iones libres o quelatos) se mueven por difusión o flujo de masas. La absorción de agua por las raíces se lleva acabo principalmente en la región justo atrás de la zona de elongación donde los pelos radicales están bien desarrollados (Streit y Stumm, 1993)

Existen algunas sustancias que se aplican en la recuperación de suelos cuyo principio se basa en la solubilización del metal, favorecen la estabilidad química del metal en el suelo y causan un cambio en el comportamiento iónico del elemento para que pueda ser extraído del suelo, lo que provoca mayor accesibilidad para su toma por las raíces de las plantas. Las sustancias son el EDTA, las sustancias húmicas y los ácidos. Estas sustancias se utilizan en la fitorremediación para hacer más eficiente la técnica de remediación de suelos.

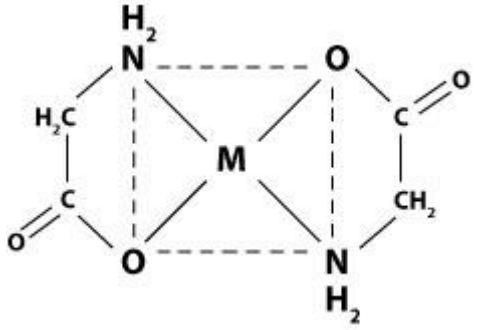
Por lo general forman compuestos complejos con los metales, dichos compuestos tienen una elevada solubilidad por lo que las raíces de las plantas los pueden tomar. Entre esas sustancias complejantes se encuentran el EDTA (ácido etilen diamino tetraacético), DTPA (ácido dietilen triamino pentaacético, NTA (ácido amino triacético; acido nitrilotriacético).
Las sustancias húmicas de la materia orgánica poseen grupos funcionales que se comportan como agentes complejantes, en consecuencia también estas sustancias permiten incrementar la solubilidad de los metales.

2.8. EDTA y Ácidos húmicos

La quelatación es una combinación química con un metal en complejos en los cuales forma parte de un anillo. El ligamento orgánico es llamado quelator o agente quelatante. EL más grande número de anillos que cierra a un átomo de metal es el componente más estable. Este fenómeno es llamado efecto quelato.

La palabra quelato deriva de la palabra griega “chel” que significa tenaza y se refiere al comportamiento del metal que está alrededor. Químicamente un quelato es un componente de cationes complejos con componentes orgánicos, resultando en una estructura de anillo (Neilands *et al*., 2001).

Los quelatos usualmente contienen dos moles de unión (Glicina) y un mol de metal, tal como se muestra a continuación:



La quelatación es un proceso natural que previene la precipitación de nutrientes, al interaccionar con ellos. Así como el hierro forma precipitación con el fosforo, una vez que los cationes entran a las celulas de las plantas, inmediatamente formarán quelatos con ácidos orgánicos como los ácidos citricos, melánicos y algunos amino ácidos. El proceso de la quelatación habilitará que los nutrientes se muevan libremente dentro de las plantas. La quelatación en el suelo incrementa la disponibilidad de nutrientes, previene que formen precipitados insolubles, reduce la toxicidad de algunos iones del metal en las plantas, previene el lixiviado de nutrientes, incrementa la movilidad de nutrientes en las plantas y suprime el desarrollo de plantas con patógenos (Neilands *et al*., 2001).

Los agentes quelatantes ofrecen un intervalo amplio para el secuestro de iones de metales en medios acuosos. El EDTA es un agente quelatante que tiene átomos de nitrógeno y cadenas cortas del grupo carboxilo. La sal de sodio de EDTA es usada como un antidoto para el envenenamiento por metales, como un anticoagulante, y un ingrediente en una variedad de detergentes. Los agentes quelatantes son importantes en el campo de los jabones, detergentes, tintura de textiles, tratamiento químico del agua, enchapados terminados en metal, pulpa y papel, desactivación de enzimas, fotoquímica y bactericidas.

El EDTA y DTPA han sido extensamente usados por muchos años, pero ahora causan algunas preocupaciones. Ellos forman complejos altamente estables solubles en agua con metales pesados que son capaces de pasar a través de un tratamiento efluente en la planta y dentro los causes del agua. Estos complejos eventualmente se rompen dejando alta toxicidad de los metales en el ambiente. El NTA es una alternativa menos estable que puede ser disponible en algunos casos; aunque el complejo producirá menor estabilidad que el EDTA o DTPA, si este es adecuado para los trabajos entonces asi serán todas las materias producidas. La ganancia es que el NTA y su complejo son degradados más rapidamente que el EDTA o DTPA (Norman y Seddon, 1991). Meers *et al*. (2004) también observaron esta mayor biodegradabilidad del NTA en el suelo y sedimentos en comparación con el EDTA.

Los quelatos sintéticos orgánicos aumentan la biodisponibilidad de metales pesados en el suelo, su aplicación optimiza la respuesta de las plantas y el desplazamiento de los metales pesados por las raíces a las partes aéreas de las plantas (Epistein *et al*., 1999).

La sal disódica del ácido tetraacético (EDTA) y la sal disódica del ácido pentaacético (DTPA) es objeto de investigación para la corrección del suelo por medio de la fitoextracción, estas sales incrementan la cantidad de metales pesados extraídos al tejido aéreo de plantas que sobre acumulan dichos metales, cuando se aplicó al suelo 2 g kg^{-1} con plantas de maíz. El NTA también incrementa la absorción de metales pesados al tejido aéreo, aunque estos no fueron significativos en plantas de maíz (Meers *et al*., 2004).

La aplicación de EDTA a suelos contaminados con Cd, Pb Zn y Cu aumenta la extracción de los mismos (Sun *et al.,* 2000). Al aplicarse Na_2 EDTA en suelos contaminados con Cd, Zn y Ni en cantidades de 1 y 2 g kg^{-1} de suelo se aumentó la solubilidad de los metales y por tanto la extracción de los mismos por las plantas a los 5 meses de su transplante (Liz-Z y Shuman, 1997).

La aplicación de EDTA en dosis de 3 g kg^{-1} de suelo en el cultivo de *Brassica rapa* aumentó las concentraciones de Pb, Zn y Cd en las hojas de las plantas, en el caso del Pb, las concentraciones en las hojas fueron de 16.6 veces mayor que en las plantas de control (Grëman *et al*., 2001). Zhen-Guo *et al.*, (2002) reportaron que el EDTA fue el mejor solubilizante en el suelo para aumentar la absorción de Pb en parte aérea de *Brassica rapa* L. subsp. *chinensis* (L.), respecto a otros quelatos como el HEDTA, DTPA y NTA. Esta acumulación fue favorecida cuando se aplicó al suelo 1.5 ó 3 g de EDTA kg^{-1}. Sin embargo, la aplicación al suelo con plantas de *Brassica rapa* en 3 g de EDTA kg^{-1} disminuyó la producción de tejido vegetal y la aplicación de 5 g de EDTA kg^{-1} redujo el crecimiento de las plantas y disminuyó el rendimiento de material vegetal en las hojas.

Blaylock *et al*. (1997) mencionan que la aplicación de EDTA favorece la fitoacumulación de Pb, Cd, Cu, Ni y Zn.

La concentración de EDTA aplicado al suelo influye en la capacidad de absorción del metal hacia la parte aérea, por ejemplo, en *Brassica juncea* cuando se aplicó 5.4 g de EDTA kg^{-1} suelo se obtuvo 423 mg de Pb kg^{-1} en materia seca de la parte aérea. Sin embargo, en la segunda cosecha y con la aplicación de 10 g de EDTA kg^{-1} se cosechó 1189 mg de Pb kg^{-1} de materia seca de la parte aérea, y con esos mismos 10 g de EDTA kg^{-1}, en la tercera cosecha se obtuvo 9000 mg de Pb kg^{-1} de materia seca (Salido *et al*., 2003).

El EDTA no afecta el crecimiento de las plantas, pero si aumenta la extracción de metales por plantas fitorremediadoras; por ejemplo, en plantas de *Thlaspi caerulescens* y *Zea mays* se aumentó la movilidad en el suelo y acumulación en las raíces de Cd Ni y Zn, en diferentes proporciones en función de la planta y tipo de metal, aunque no se incrementó la transferencia de estos metales a la parte aérea (Lombi *et al*., 2001).

La aplicación al suelo de EDTA, DTPA o NTA en plantas de *Berkheya coddii* causó menor biodispinibilidad de Ni, aunque no existió reducción en la producción de biomasa (Robinson *et al*., 1999); lo cual indica que los quelatos no tienen mayor biodisponibilidad de Ni en todas las plantas.

Ácidos húmicos.

La materia orgánica del suelo normalmente es dividida en material humificado y no humificado. Las sustancias no humificadas son residuos de plantas y otros organismos con características definidas, ejemplo de ellos son los carbohidratos, aminoácidos, proteínas, lípidos, ácidos nucleicos y ligninas usualmente sujetos a reacciones de degradación y descomposición.

Los ácidos húmicos son relativamente estables, producto de la descompomposición de la materia orgánica y su acumulación en el ambiente. Los ácidos húmicos pueden beneficiar el crecimiento de las plantas por medio de nutrientes quelatos no disponibles y amortiguamiento del pH al formar complejos acuosos con los micronutrientes (Mackowiak *et al*., 2001).

Tan (1982) menciona que la fracción conocida como humus o compuestos húmicos es considerado como el producto final de la transformación de los residuos orgánicos y de plantas. Esos compuestos se definen como sustancias coloidales polidispersantes, amorfas, de color amarillo a café o negro y con un alto peso molecular relativo y constituyen una parte esencial del suelo y junto con las arcillas son responsables de un gran número de procesos químicos en el mismo. Las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo pueden modificarse y estimular el crecimiento de las plantas a través de su efecto en el metabolismo y otros procesos fisiológicos. También participan en la formación del suelo y tienen un papel especialmente importante en la translocación o movilización de las arcillas, aluminio y hierro.

Las investigaciones recientes han estado dirigidas a producir sustancias húmicas a gran escala para el uso como fertilizantes, acondicionadores y mejoramiento del suelo (Tan, 1982).

Los ácidos húmicos disminuyen las concentraciones de iones libres de Cd y Zn en ambientes naturales acuáticos (Koukal *et al*., 2003)

Mackowiak *et al.* (2001) reportaron que los ácidos húmicos facilitan una mayor absorción del Zn, más que el HEDTA cuando hay niveles adecuados de otros micronutrientes.

Natividad (2005) al probar a los acidos humicos para movilizar metales; aplicando contenido de humedad en el suelo; a capacidad de campo y saturación (30 y 45 mL respectivamente), ácidos húmicos (0, 1 y 2 mL) y DTPA y (0, 0.1 g) como material quelatante, con tratamiento aplicado en 50 g de suelo; los resultados mostraron una disminución en el contenido de metales extraíbles con $CaCl_2$ 0.05M debido a la aplicación de ácidos húmicos. En este experimento la aplicación de sustancias húmicas permitieron estabilizar a los metales debido a la naturaleza químicas de esas sustancias.

Al aumentar el contenido de humedad de capacidad de campo a punto de saturación, existe una mayor concentración de metales pesados en el suelo, lo que significa mayor disponibilidad de metales en condiciones de saturación del suelo, asimismo, la adición de ácidos humicos genera una disminución en la cantidad de metales extraíbles, efecto contrario al reportado en la literatura, dado que hubo una solubilización de los metales.

2.9. Efecto del pH en la absorción de metales pesados

La retención de metales de la materia orgánica del suelo es mayor con un pH bajo. Un pH más ácido contribuye en una mayor disponibilidad del metal, de la solución del suelo, para la absorción por la raíz. Muchos cationes de metales son más solubles y disponibles en la solución del suelo con un pH bajo (menor que 5.5), como el Cd, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn (Blaylock y Huang, 2000).

Salido *et al*. (2003) mencionan que el Pb es menos absorbido conforme aumenta el pH. El pH está fuertemente correlacionado con la absorción cationes de metales como el Cd en (0.90), Cr (0.88), Ni (0.88) y en menor proporción el Pb (0.57). Sin embargo, en la absorción de metales pesados, existe una mayor dependencia de la CIC en Pb (0.93) y Ni (0.79), aunque el Zn no mostró ninguna relación entre el pH y la CIC (Gomes *et al*., 2001). Además del pH, la calidad de la materia orgánica juega un papel importante en la movilidad, disponibilidad y complejidad de los metales pesados.

Una de las más importantes fracciones de la materia orgánica son los ácidos húmicos que también participan en la interacción con los metales pesados (Barančíková and Makovníková, 2003).

El suelo con mayor contenido de materia orgánica, textura fina mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC) y menor porcentaje de saturación de aluminio en el complejo de cambio, retiene en mayor cantidad al Zn y Cd, aunque la presencia de Zn favorece la movilidad y disponibilidad de Cd (Estévez *et al*., 1998).

Al asimilarse estos metales, por medio de productos vegetales provenientes del Valle del Mezquital, depositados en las centrales de abastos del estado de México y Distrito Federal existe la posibilidad de contraer en las personas daños en su salud, por esta razón es urgente encontrar alternativas a bajo costo y amigables ambientalmente para reducir la contaminación de suelos en ésta zona agrícola.

Debido a que la investigación y evaluación de plantas con capacidad de extraer metales pesados del suelo en México, y especialmente en el Valle del Mezquital es escasa; el presente trabajo aporta nueva información para establecer referencias de acumulación de metales pesados en plantas y así ayudar a minimizar los impactos y consecuencias que origina su acumulación en cultivos agrícolas en esta zona.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Objetivos generales

- Identificar la capacidad de las especies *Ricinus communis* (higuerilla), *Cynodon dactylon* (grama nativa), *Senecio salignus* DC. (jarilla), *Phragmites australis* (carrizo), *Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo) y *Buddleja cordata* H. B. K. (tepozán), para extraer: cadmio, níquel, plomo y zinc del suelo.

- Evaluar el efecto de la aplicación de EDTA, de sustancias húmicas y la modificación del pH del suelo, sobre el contenido de metales fitoextraídos en el tejido vegetal de las especies mencionadas.

Objetivos específicos

- Cuantificar las concentraciones de los elementos: cadmio, níquel, plomo y zinc en el suelo, en la parte del follaje y en la raíz de las especies a estudiar.

- Medir el efecto del EDTA, sustancias húmicas y acidificación del suelo, sobre la disponibilidad de los metales por las plantas y su interacción mediante la cantidad recuperada de las especies a evaluar.

- Identificar la especie con mejor posibilidad para ser usada como fitorremediadora de suelos contaminados con metales.

Hipótesis

- Entre las especies *Ricinus communis* (higuerilla), *Cynodon dactylon* (grama nativa), *Senecio salignus* DC. (jarilla), *Phragmites australis* (carrizo), *Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo) y *Buddleja cordata* H. B. K. (tepozán), al menos hay una que puede ser empleada como fitorremediadora de suelos contaminados con cadmio, níquel, plomo y zinc.

- Hay diferencia entre las especies para absorber y traslocar los metales Cd, Ni, Pb y Zn, lo que condiciona que estos metales se acumulen en la raíz o en el tejido aéreo.

- Una mayor concentración de EDTA, sustancias húmicas y acidificación del suelo facilitan la absorción de los metales pesados presentes en el suelo, por lo que se pueden acumular en la raíz y en la parte aérea de las especies bajo estudio.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Colecta de suelo

El suelo que se utilizó corresponde a un franco arcillo-arenoso y se colectó en una parcela localizada a 2 km de la carretera Tlaxcoapan – Ajacuba, localizada en el municipio de Tlaxcoapan Hidalgo dentro del área del Valle del Mezquital, Hidalgo, México, Este Valle se localiza entre los 19° 53’ a 20° 30’ de Latitud Norte y los 98° 57’ a 99° 30’ de Longitud Oeste. Se sitúa al norte del Distrito Federal, México, en el centro del estado de Hidalgo, limita al norte con la Sierra Juárez, al este con la Serrania Cerro del Fraile y Sierra Actopan, al sur por la Serranía Mexe y al Oeste por la Sierra Xinthé.

La región se ubica en la cuenca del río Tula, que es la principal corriente en la vertiente oriental. En la llanura el clima es estepario y en las partes altas existe mayor humedad. La temperatura media anual oscila entre los 18 y 19 °C, y muestra grandes variaciones dentro de un día por efecto de la altitud; el periodo de heladas se presenta de noviembre a febrero y las precipitaciones más altas se presentan en al periodo de junio a septiembre con un intervalo anual de 200 a 500 mm (INEGI, 2000).

La colecta del suelo se realizó en un solo sitio, para analizar el contenido de metales pesados en el suelo a una profundidad 0-30 cm.

4.2. Preparación del suelo

El suelo colectado se secó al aire libre, a temperatura ambiente, se trituraron los terrones y se tamizó el suelo con una malla de 2 mm para excluir piedras, Posteriormente se mezcló todo el suelo para obtener un volumen homogéneo; con ese suelo se prepararon las macetas de cada unidad experimental con 2.5 kg de suelo.

El experimento en condiciones de invernadero se diseñó para evaluar la capacidad de extracción de metales por las seis especies. Para ello a cada unidad experimental se le aplicaron los siguientes tratamientos: a) dos dosis de EDTA (1.25 y 2.5 g kg^{-1} suelo), b) modificación de pH del suelo (6.3, e intervalo de 4.4 a 4.9) y c) aplicación de dos dosis de sustancias húmicas (1.25 y 2.5 mL kg^{-1} suelo), tal como se describe en el Cuadro 6.

Para la modificación de pH del suelo de cada maceta se aplicó 330 mL de HNO_3 6N (Cuadro 6). Con la finalidad de homogeneizar el contenido de Cd, Pb y Ni se aplicó al suelo 10, 20 y 40 mg de Cd Ni y Pb kg^{-1} suelo, respectivamente, en una dilución de 800 mL de agua.

Cuadro 6. Aplicación de EDTA, Sustancias húmicas y modificación de pH al suelo.

Tratamiento	Clave	Tratamiento aplicado al suelo		
		EDTA (g kg^{-1})	Sustancias húmicas (mL kg^{-1})	Modificación de pH
0	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	0	0	6.3
1	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	1.25	1.25	6.3
2	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	1.25	1.25	4.4 - 4.9
3	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	1.25	2.50	6.3
4	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	1.25	2.50	4.4 - 4.9
5	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_0	2.5	1.25	6.3
6	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_1	2.5	1.25	4.4 - 4.9
7	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	2.5	2.50	6.3
8	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1	2.5	2.50	4.4 - 4.9

Para obtener las dósis que permitieran abatir el pH, se realizó un ensayo con tres repeticiones. Para ello se preparó una curva de acidificación del suelo, la cual consistió en aplicar a muestras de 25 g de suelo, volumenes crecientes de HNO_3 4M (0.8, 1.6, 3.3, 5, 6.6, 8.3 y 10 mL de ese ácido).

Ese volumen de ácido se aplicó diluido con agua en 50 mL. Después de un periodo de incubación se midió el pH. Con estos valores de pH y miliequivalentes de ácido, se preparó la curva de acidificación y por intersección se obtuvo los miliequivalentes de ácido que permiten bajar el pH del suelo a un valor de 4.3. Todas las unidades experimentales se colocaron en bloques al azar.

4.3. Obtención del material vegetal

Para la especie *Senecio salignus* DC. (jarilla) se colectaron estacas de 20 cm de largo y de 0.4 a 0.7 cm de diámetro. De la especie *Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo) se obtuvieron plantas completas, las cuales fueron colectadas en terrenos de minas de arena de San Dieguito, Texcoco y de Molino de Flores, Texcoco. El tepozan (*Buddleja cordata* H. B. K.) se obtuvo por donación del vivero forestal de la Universidad Autónoma Chapingo. Para *Cynodon dactylon* (grama nativa) y *Phragmites australis* (carrizo) se utilizaron rizomas colectadas en Boyeros, Texcoco. Para *Ricinus communis* (higuerilla) se colectó semilla del río Chapingo, Texcoco, estado de México. Las condiciones donde se colectó el material vegetal son una altitud de 2250 m con una temperatura media anual de 15 °C y una precipitación media anual de 645 mm; el clima es Cb (w1) (w) (i´) g, templado húmedo, con verano fresco largo y poca oscilación (García, 1988).

4.4. Enraizamiento del material vegetal y siembra.

El enraizamiento de las estacas se realizó plantando las mismas directamente en la maceta en posición diagonal sin aplicar hormonas de enraizamiento. Se apisonó la tierra alrededor de ellas, se realizó un riego a capacidad de campo y se tuvo cuidado de no favorecer el desarrollo de enfermedades realizando los riegos según requerimiento de la planta. En *Ricinus comunis* las semillas se humedecieron 24 h, y se colocaron a 2 cm de profundidad. Las rizomas de *Cynodon dactylon* (grama nativa) y *Phragmites australis* (carrizo) fueron

colocadas a 5 cm de profundidad en posición diagonal. En estos dos casos los rizomas fueron colocados directamente en la unidad experimental que le correspondía.

4.5. Riego

Los riegos en las unidades experimentales inicialmente fueron cada tercer día, sin embargo, debido a que algunas plantas demandaron más agua que otras, se procedió a dar riegos para mantener constante la humedad a capacidad de campo en el suelo de las macetas, acorde a las condiciones ambientales de cada día.

4.6. Obtención de suelo en la cosecha.

A los cinco meses de establecidas las plantas, se tomó una muestra homogénea de 100 g de suelo de cada maceta, libre de residuos de las plantas, se colocó en bolsas de papel, se etiquetó y se secó en una estufa a 70 °C durante 72 h con circulación forzada de aire. Debido a la presencia de algunos terrones se trituró en un mortero de porcelana y se volvió a tamizar en una malla de 2 mm. Para realizar los análisis y conocer el contenido de metales totales en el suelo.

4.7. Cosecha de material vegetal

En función de la velocidad de crecimiento se realizaron cuatro podas en *Cynodon dactylon* (grama nativa), las podas se realizaron cada mes con tijeras de podar, en las otras especies se realizaron dos podas cada dos meses. La cosecha final de follaje y raíz se realizó al quinto mes. La cosecha de raíz se obtuvo por lavado de suelo y raíces en un bote, de forma tal que no quedara suelo en las raíces.

Una vez cosechado el material vegetal de la parte aérea y la parte radical, se procedió a separar ambas partes en bolsas de papel, se identificó cada parte de acuerdo al tratamiento y especie, y se colocaron en una estufa de secado a 70 °C durante 72 h.

Cada muestra de parte aérea y raíz fue molida en un molino marca Wiley y el material vegetal obtenido se tamizó en una malla de 0.5 mm.

4.8. Contenido final de metales pesados totales en el suelo

Para conocer el contenido total de metales en el suelo se pesaron 5 g de suelo y se colocaron en tubos de centrifuga de PVC de 50 mL a los cuales se les adicionó 25 mL de HNO_3 4N y se taparon con plástico sujetándolos con una liga, el plástico se perforó con una aguja para permitir la salida de gases. Posteriormente los tubos se colocaron verticalmente en el baño María por 4 horas a 70 °C, después se dejaron enfriar y se adicionó agua destilada para completar el volumen perdido. Los tubos se taparon y se agitaron por una hora colocando los tubos de forma horizontal en el agitador a 150 oscilaciones por minuto. Posteriormente se centrifugó por ocho minutos a 25000 rpm. Finalmente, se decantó el sobrenadante en un tubo de ensaye y se analizó el contenido de metales en el espectrofotómetro de absorción atómica marca GBC modelo Avanta PM.

4.9. Medición del contenido de metales absorbidos por las plantas

Para cuantificar el contenido de metales en raíz y parte aérea de las especies, se procedió de la siguiente forma: se pesaron 0.500 g de tejido vegetal previamente molido y se colocó en un matraz Kjeldhal de 30 mL.

Posteriormente se aplicaron 4 mL de HNO_3 concentrado para humedecer el tejido y se dejó 24 h en reposo, después se colocó en la campana de extracción, y se predigestó sometiendo las muestras a una temperatura entre

70 y 90 °C durante una hora en la plancha de calentamiento, se agregó el HNO_3 necesario para mantener húmeda la muestra. Una vez fría la muestra se agregó 2 mL de ácido perclorico concentrado para nuevamente digestar en la plancha de calentamiento a 70 y 90 °C por una hora o hasta que ya no existiera emisión de humos pardos o rojizos. Después se elevó la temperatura de la plancha hasta 200 °C y se dejó digestando hasta que el extracto se aclarara.
El extracto se transfirió a un matraz aforado de 10 mL con enjuagues previos y finalmente se aforó a 10 Ml. Después se guardó en un tubo de ensaye y poder realizar su posterior lectura en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica marca GBC modelo Avanta PM.

4.10. Diseño experimental y análisis de datos

El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con tres repeticiones para cada una de las seis especies evaluadas. Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 1999); y el análisis de varianza se realizó con PROC GLM, realizando análisis individuales para cada uno de los niveles de metal y especie (evaluando solo las diferencias entre los tratamientos), análisis combinados por metal (para evaluar si hubo diferencias entre especies), y un analisis combinado por especie (que permite evaluar diferencias entre los metales). Adicionalmente se aprovechó la estructura factorial de los tratamientos sin incluir el testigo (factorial 2^3) para poder evaluar los efectos principales e interacciones entre los factores. Al realizar el análisis de varianza y observar diferencias estadísticas se aplicó la prueba de comparaciones múltiples por el método de TUKEY que permite obtener una separación de efectos de medias.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Valores de pH en el suelo al aplicar HNO_3

Los valores de la curva de acidificación de pH del suelo se muestran en el Cuadro 7. Al obtenerse la curva de acidificación (Fig. 1), se decidió aplicar la dosis de 6.6 mL de HNO_3 aforados en 50 mL de agua para 25 g de suelo; después se calculó su equivalente en 2.5 kg de suelo. La acidez de suelo estuvo alrededor del valor 4.3.

Cuadro 7. Valores de la curva de acidificación de pH en el suelo, al aplicar HNO_3.

Tratamiento	Concentración HNO_3 (mL)	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
0	0	6.3	6.3	6.3
I	0.8	6.4	6.3	6.3
II	1.6	6.3	6.3	6.4
III	3.3	5.7	5.9	5.8
IV	5	5.2	5.1	5.5
V	6.6	4	3.8	4.9
VI	8.3	3.1	3.5	4.4
VII	10	3.8	3.7	2.6

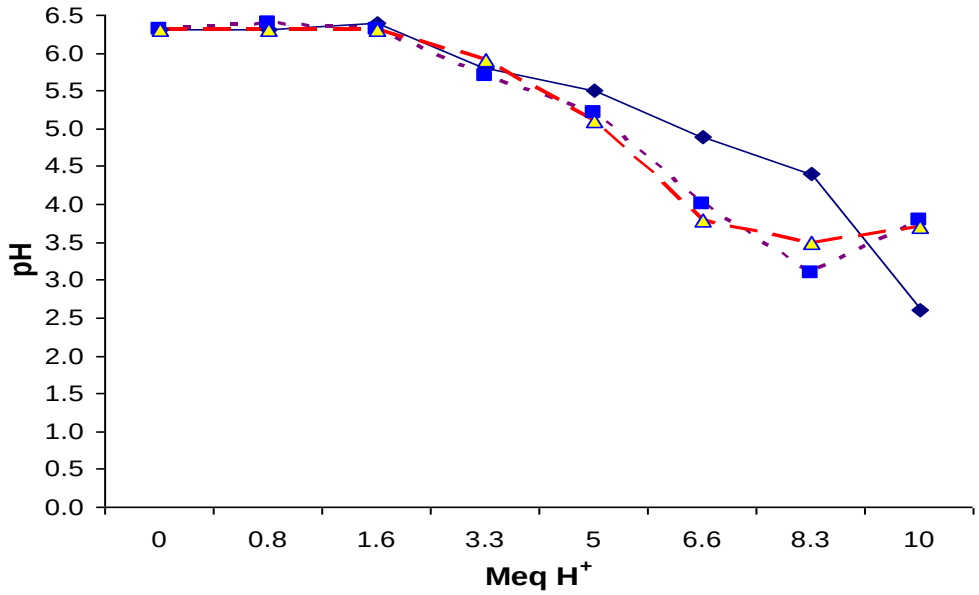


Figura 1. Acidificación del suelo al aplicarse HNO_3.

5.2. Absorción de Cd, Ni, Pb y Zn en las plantas testigo.

En los Cuadros 8 y 9 se muestra el contenido total de metales presentes en las unidades experimentales testigo.

Cuadro 8. Absorción de Cd, Ni, Pb y Zn en tejido aéreo en las plantas testigo.

Especie	Cd	Ni	Pb	Zn
	----------(mg kg^{-1})----------			
Ricinus communis (higuerilla)	0,15	8,52	7,91	61,17
Cynodon dactylon (grama nativa)	0,15	1,01	1,83	41,50
Senecio salignus DC. (jarilla)	2,88	1,23	1,72	62,33
Phragmites australis (carrizo)	0,26	0,94	2,74	42,56
Nicotiana glauca Graham (tabaquillo)	4,73	49,18	5,51	131,33
Buddleja cordata H. B. K. (tepozán)	0,64	21,10	5,48	31,47

Cuadro 9. Absorción de Cd, Ni, Pb y Zn en tejido raíz en las plantas testigo.

Especie	Cd	Ni	Pb	Zn
	----------(mg kg^{-1})----------			
Ricinus communis (higuerilla)	6,31	14,54	0,79	147,33
Cynodon dactylon (grama nativa)	5,73	14,44	9,13	267,83
Senecio salignus DC. (jarilla)	2,81	2,25	7,05	116,05
Phragmites australis (carrizo)	1,38	8,37	13,71	218,42
Nicotiana glauca Graham (tabaquillo)	3,26	14,29	27,54	138,25
Buddleja cordata H. B. K. (tepozán)	0,68	8,91	1,03	60,37

5.3. Absorción y acumulación de Cd

El análisis de varianza indicó que los valores de absorción de Cd por parte de las especies, en los tratamientos con EDTA y sustancias húmicas, fueron estadísticamente diferentes del testigo (p=0.0004). También existió diferencia sobre los tratamientos con modificación de pH y EDTA con sustancias húmicas (p=0.020).

La especie que acumuló más Cd por efecto de la aplicación de EDTA y de sustancias húmicas fue *Senecio salignus* DC., y las especies con mayor acumulación de Cd por modificación de pH con EDTA y sustancias húmicas fueron *Phragmites australis*, *Cynodon dactylon*, *Ricinus communis*, *Nicotiana glauca* Graham, y *Senecio salignus* DC. (Cuadro 10); sin embargo, ninguno de estos tratamiento tuvieron efecto sobre la acumulación de Cd en *Buddleja cordata* H. B. K.

Cuadro 10. Capacidad de fitoextracción significativa de Cd en especies silvestres.

Especie	Área de tejido	Absorción (mg kg^{-1})	% Acumulado	Tratamiento	Pr > F
Phragmites australis (carrizo)	aéreo	10.1	55.85	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	0.0007
Phragmites australis (carrizo)	raíz	7.9	44.15	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	0.0008
Cynodon dactylon (grama nativa)	aéreo	7.3	19.4	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	0.0047
Ricinus communis (higuerilla)	aéreo	5.6	6.17	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	0.0185
Senecio salignus DC. (jarilla)	aéreo	11.4	47.03	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	0.0004
Senecio salignus DC. (jarilla)	raíz	12.9	52.93	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	0.0135
Nicotiana glauca Graham (tabaquillo)	raíz	25.5	41.65	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	0.0208

S. H. = Sustancias húmicas; $EDTA_0$= sin aplicar EDTA; $EDTA_1$= 1.25 g kg^{-1}; $EDTA_2$= 2.5 g kg^{-1}
S. $H._0$ = sin aplicar S. H.; S. $H._1$= 1.25 mL kg^{-1}; S. $H._2$= 2.5 mL kg^{-1}
pH_0 = pH 6.3; pH_1= pH 4.4 - 4.9.

El Cuadro 10 muestra las diferencias significativas respecto a la absorción de metales pesados entre especies, tanto en parte aérea como en raíz. La mayor absorción de Cd en parte aérea se encontró en la especie *Senecio salignus* DC., la cual acumuló mayor cantidad de Cd por efecto del tratamiento (cuatro veces más respecto al testigo en tejido vegetal aéreo y raíz) con el tratamiento $EDTA_1$, S. $H._2$, pH_0.

La acumulación total de Cd en *Senecio salignus* DC. se distribuyó en 47.03% en parte aérea y un 52.93% en parte radical. Sin embargo, aunque la mayor acumulación de Cd en parte aérea la realizó esta especie, en la parte radical la mayor tendencia de acumulación fue obtenida por *Nicotiana glauca* Graham (Cuadro 10) por el efecto del tratamiento con menor dósis de sustancias húmicas y un pH más ácido, esto es, $EDTA_1$, S. $H._1$, pH_1. Estas sustancias favorecieron una mayor solubilización del Cd, por la cual la especie pudo tomar una mayor cantidad de ese metal.

La cantidad de Cd absorbida en la parte aérea no fue influenciada por los tratamientos aplicados; lo que significa que existe una alta preferencia de *Nicotiana glauca* Graham por la absorción de Cd en el tejido radical, no así en la parte de tejido aéreo.

Una de las características elementales de las plantas a utilizar en la descontaminación de metales pesados por medio de la fitorremediación es la traslocación de éstos metales a la parte tejido aéreo, debido que se puede cosechar y confinar junto con los contaminantes fitoextraídos (EPA, 2000; Barceló and Poschenrieder, 2003; Meers *et al*., 2004; Erdei *et al*., 2005). Esto siginifica que *Senecio salignus* DC es una planta con potencial para extraer Cd, pues trasloca el 47.03% (11.9 mg kg^{-1}) a la parte aérea del 100% extraído.

Nicotiana glauca Graham absorbió 58.35% en la parte aérea, lo que sugiere mayor potencial de traslocación al tejido vegetal en la parte aérea, además esto ocurre sin efecto de los tratamientos al suelo como es la aplicación de EDTA y Sustancias húmicas. Para esta especie la asimilación de Cd fue 8 veces mayor en el tejido radical por el efecto del tratamiento aplicado, en comparqación con el testigo. *Nicotiana glauca* Graham fue la especie con mayor acumulación de Cd en parte radical (41.65%), equivalente a 25.5 mg kg^{-1} (Cuadro 10).

La absorción de Cd en tejido aéreo y raíz por efecto de los tratamientos aplicados también fue realizada por *Phragmites australis* con 55.85% en parte aérea (40 veces más respecto al testigo) y 44.15% en tejido radical (seis veces más respecto al testigo). Esto demuestra una alta traslocación de Cd a la raíz y a la parte aérea de esta especie. Situación que fue favorecida por el tratamiento con 1.25 g kg^{-1} de EDTA, 1.25 mL de sustancias húmicas kg^{-1} y una acidificación del suelo en el intervalo de 4.4 a 4.9, la absorción en parte radical fue por el tratamiento $EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1.

Existe alta significancia por el efecto del tratamiento en la absorción de metales en la raíz de *Phragmites australis* (Cuadro 10), pero este efecto es mayor en la traslocación a la parte del tejido vegetal aéreo, lo cual hace que esta especie pueda utilizarse en la fitoextracción de metales pesados con una dosis de aplicación baja de sustancias como el EDTA y sustancias húmicas y un pH ácido.

Cynodon dactylon y *Ricinus communis* absorbieron Cd en cantidades de 7.35 y 5.67 mg kg^{-1}. Existió una traslocación a la parte aérea con 14 veces más respecto al testigo (19.4%) y 63 veces más respecto al testigo (6.17%) (Cuadro 10) del contenido total absorbido por el efecto de los tratamientos aplicados ($EDTA_1$, S. $H._1$, pH_1. y $EDTA_1$, S. $H._2$, pH_1. respectivamente). La absorción de *Cynodon dactylon* y *Ricinus communis* en la raíz con 80.6% y 93.8% del contenido total no depende de los tratamientos aplicados.

La mayor absorción de Cd en tejido aéreo con aplicación de sustancias quelatantes, está en el siguiente orden: (1) *Senecio salignus* DC., (2) *Phragmites australis*: (3) *Cynodon dactylon*, (4) *Ricinus communis*. Para la raíz la secuencia es: (1) *Nicotiana glauca* Graham, (2) *Senecio salignus* DC. y (3) *Phragmites australis*.

En el análisis factorial comúnmente el factor sustancias húmicas no resultó significativo y en la mayoría de los casos el factor pH fue el más altamente significativo. El EDTA fue el segundo en importancia, basados en la cantidad de veces que resultó significativo

5.4. Absorción y acumulación de Ni

El efecto de la aplicación de EDTA y sustancias húmicas ambos a su nivel bajo y sin alteración del pH para absorber mayor cantidad de Ni, se apreció principalmente en *Ricinus communis* raiz (p=0.015) *Cynodon dactylon* parte aérea (p=0.012). La combinación de EDTA, sustancias húmicas y modificación de pH fue notorio en *Senecio salignus* DC. (p=0.0007) y *Ricinus communis*. Ninguno de los tratamientos con EDTA, sustancias húmicas y pH afectó la mayor acumulación de Ni en *Cynodon dactylon*, *Phragmites australis*, *Nicotiana glauca* Graham y *Buddleja cordata* H. B. K.; aunque una alta acumulación de Ni en el testigo fue evidente en *Cynodon dactylon* (Cuadro 8, 9 y 11).

Cuadro 11. Capacidad de fitoextracción significativa de Ni en especies silvestres.

Especie	Área de tejido	Absorción (mg kg^{-1})	% Acumulado	Tratamiento	Pr > F
Cynodon dactylon (grama nativa)	raíz	14.44	90.5	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	0.0053
Cynodon dactylon (grama nativa)	aéreo	10.88	72.53	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	0.0121
Ricinus communis (higuerilla)	aéreo	23.75	43.91	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	0.0001
Ricinus communis (higuerilla)	raíz	46.46	66.24	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	0.0152
Senecio salignus DC. (jarilla)	aéreo	39.70	46.64	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	0.0007
Senecio salignus DC. (jarilla)	raíz	45.42	53.36	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	*0.2112*

S. H. = Sustancias húmicas $EDTA_0$= sin aplicar EDTA; $EDTA_1$= 1.25 g kg^{-1}; $EDTA_2$= 2.5 g kg^{-1}
S. $H._0$ = sin aplicar S. H.; S. $H._1$= 1.25 mL kg^{-1}; S. $H._2$= 2.5 mL kg^{-1}
pH_0 = pH 6.3; pH_1= pH 4.4 - 4.9.

La especie *Cynodon dactylon* absorbió mayor cantidad de Ni, en la raíz (90.5%), sin la aplicación de sustancias quelatantes o modificación de pH, es decir, en condiciones naturales de suelo (Cuadro 11), esto significa que al aplicarse alguno de estos tratamientos, la absorción de Ni en el tejido radical disminuye. Sin embargo, en la fitorremediación se desea mayor absorción de los elementos contaminantes y su traslocación al tejido vegetal en la parte aérea, por ello cuando se aplicó el tratamiento con 1.25 g de EDTA kg^{-1}, 1.25 mL de sustancias húmicas kg^{-1} y pH de 6.3 se absorbió 10.88 mg kg^{-1} de Ni en parte aérea (72.53%, p= 0.0121), lo que equivale a siete veces más respecto al testigo (Cuadro 8), aunque la absorción en la raíz disminuye. Sin embargo, Madejón *et al.*, 2006 documentaron que *Cynodon dactylon* contenía concentraciones de Cd, Fe, Mn, Zn y Pb en tejido vegetal de la parte aérea, en áreas abandonadas donde existió explotación de minas. El potencial de fitoextracción para esa especie fue insignificante.

Ricinus communis acumuló la mayor cantidad de Ni en la parte aérea, esto es, 23.75 mg Kg^{-1} (43.91%) (Cuadro 11), por la aplicación del tratamiento $EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1. En la parte de raíz acumuló 30.33 mg kg^{-1} de Ni (56.09%, lo que equivale a dos veces más respecto al testigo, Cuadros 8 y 9). Al aplicarse el tratamiento $EDTA_1$, S. $H._1$, pH_0, la máxima acumulación resultó en la parte de raíz con 46.46 mg kg^{-1} de Ni (66.79%).

Existe un efecto en la acumulación de Ni, en la parte aérea con 39.70 mg kg^{-1}, equivalente a 46.64%, en *Senecio salignus* DC (Cuadro 11) por la aplicación del tratamiento $EDTA_1$, S. $H._2$, pH_1. La mayor absorción de Ni en la raíz (45.42 mg kg^{-1}, esto es, 53.36%) de esta especie, se debe a la aplicación de este mismo tratamiento, aunque estadísticamente su acumulación no tuvo efecto (p=0.2112).

La mayor absorción de Ni en parte aérea y raíz fue con *Ricinus communis*, sin embargo, al considerar únicamente de la parte aérea fue *Senecio salignus* DC. En raíz fue *Cynodon dactylon* la especie que acumuló mayor cantidad de Ni después de *Ricinus communis* y *Cynodon dactylon*. En forma general se puede apreciar que en la absorción y acumulación de Ni en las especies evaluadas al tratar el suelo con EDTA y sustancias húmicas, se registra un efecto positivo en la toma de Ni por parte de las especies bajo estudio. Esto se debe al efecto que tienen el EDTA y las sustancias húmicas para solubilizar lo metales (Norman y Seddon, 1991).

5.5. Absorción y acumulación de Pb

El análisis de varianza indicó diferencias significativas respecto a la acumulación de Pb por efecto de la aplicación de EDTA y sustancias húmicas en *Cynodon dactylon* (p=0.0228) y *Buddleja cordata* H. B. K. (p=0.025).

También hubo efecto significativo con los tratamientos donde se modificó el pH, se aplicó EDTA y sustancias húmicas en *Nicotiana glauca* Graham y *Buddleja cordata* H. B. K. (p=0.0138 y p=0.025, respectivamente).

No hubo efecto al aplicarse EDTA, sustancias húmicas y modificación de pH en la acumulación de Pb en las especies *Ricinus communis*, *Cynodon dactylon*, *Senecio salignus* DC., *Phragmites australis*. Rodríguez *et al.*, (2006) estimaron una extracción en condiciones naturales de 2.78 mg de Pb, de los cuales 73% (2.02 mg Pb) fue acumulado en la parte aérea de *Ricinus communis*, lo que equivale a 284 mg de Pb kg^{-1} en parte aérea, cuando el suelo contenía 500 mg de Pb kg^{-1}. Sin embargo, en el presente estudio el suelo contenía 453.39 mg de Pb kg^{-1}, y *Ricinus communis* solo fitoextrajo 7.9 y 0.8 mg de Pb kg^{-1} en parte aérea y raíz, respectivamente, en condiciones naturales. Al aplicarse EDTA solo acumuló 14 y 33.8 mg kg^{-1} de Pb en parte aérea y raíz con el tratamiento 1.25 g de EDTA kg^{-1} al suelo, 1.25 mL de sustancias húmicas kg^{-1} y pH 6.3.

Cuadro 12. Capacidad de fitoextracción significativa de Pb en especies silvestres.

Especie	Área de tejido	Absorción (mg kg^{-1})	% Acumulado	Tratamiento	Pr > F
Cynodon dactylon (grama nativa)	aéreo	13.0	37.44	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	0.0228
Nicotiana glauca Graham (tabaquillo)	raíz	33.2	95.73	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	0.0138
Buddleja cordata H. B. K. (tepozán)	aéreo	49.3	66.53	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	0.0288
Buddleja cordata H. B. K. (tepozán)	raíz	36.9	42.18	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_1	0.0250

S. H. = Sustancias húmicas $EDTA_0$= sin aplicar EDTA; $EDTA_1$= 1.25 g kg^{-1}; $EDTA_2$= 2.5 g kg^{-1}
S. $H._0$ = sin aplicar S. H.; S. $H._1$= 1.25 mL kg^{-1}; S. $H._2$= 2.5 mL kg^{-1}
pH_0 = pH 6.3; pH_1= pH 4.4 - 4.9.

Entre las especies evaluadas la máxima acumulación de Pb se registró en *Buddleja cordata* H. B. K. en parte aérea y raíz (Cuadro 12), por efecto de la aplicación del tratamiento con $EDTA_1$, S. $H._1$, pH_0, con 66.53% en la parte

aérea, lo que representa nueve veces más respecto al testigo (Cuadro 8); y 42.18% en raíz, esto es, 36 veces más respecto al testigo (Cuadro 9), con el tratamiento $EDTA_2$, S. $H._1$, pH_1. Esto significa que *Buddleja cordata* H. B. K. trasloca el mayor porcentaje a la parte aérea, esto la hace una planta potencial para fitorremediación de suelos contaminados con plomo.

La fitoextracción de Pb, en el tejido aéreo de *Cynodon dactylon* con la aplicación de $EDTA_1$, S. $H._1$, pH_0 (Cuadro 12), tuvo una distribución del Pb acumulado en 37.44% en parte aérea y 62.56% en la raíz, aunque no hubo efecto por la aplicación de algún tratamiento, para la absorción de Pb en la raíz. La acumulación de Pb en la parte aérea por el tratamiento aplicado al suelo, causó siete veces más absorción respecto al testigo, sin embargo, este porcentaje acumulado en el tejido aéreo es bajo con propósitos de fitorremediación. La aplicación de EDTA al suelo contaminado afecta la fitoextracción de Pb, aunque está en función de la especie.

Nuevamente se aprecia que para el caso del plomo, las especies evaluadas tienen mecanismos de adaptación que le permiten no tomar al plomo y en el caso de que ocurra, el metal se queda en su mayoría en las raíces.

Zhen-Guo *et al*. (2002) reportaron que la aplicación de EDTA al suelo en dósis de 1.5 a 3.0 mg kg^{-1}, propició que la especie de *Brassica rapa* L. subsp. *chinensis* (L.), acumulara entre 4620 y 5010 mg de Pb kg^{-1} en materia seca; el EDTA fue el mejor quelatante respecto a DTPA, HEDTA y NTA en la fitoextracción de Pb en esa especie. La máxima fitoextracción de *Brassica rapa* L. subsp. *chinensis* (L.) se alcanzó con 3.0 mg de EDTA kg^{-1}, lo cual indica que la dósis aplicada para alcanzar mayor acumulación hacia la parte aérea, depende de la especie y el metal. En el presente estudio se registró que la especie *Buddleja cordata* H. B. K. obtuvo la mayor fitoextracción de Pb con el tratamiento 1.25 g de EDTA kg^{-1}.

5.6. Absorción y acumulación de Zn

La aplicación de sustancias quelatantes como el EDTA y sustancias húmicas al suelo en cada unidad experimental, tuvo efecto en la especie *Nicotiana glauca* Graham respecto a la absorción de Zn a la parte radical con el tratamiento $EDTA_2$, S. $H._2$, pH_1. (Cuadro 13).

La distribución fue en 4.26% en la parte aérea (no significativo) y 95.74% en la raíz. Esto sugiere alta capacidad de acumulación de Zn en *Nicotiana glauca* Graham en la raíz, pero baja capacidad de traslocación a la parte aérea. Esto es una característica no deseable en las plantas con propósitos de fitorremediación.

Cuadro 13. Capacidad de fitoextracción de Zn en especies silvestres.

Especie	Área de tejido	Absorción (mg kg^{-1})	% Acumulado	Tratamiento	Pr > F
Cynodon dactylon (grama nativa)	aéreo	125.75	54.14	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	0.0308
Cynodon dactylon (grama nativa)	raíz	267.83	86.58	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	0.0005
Nicotiana glauca Graham (tabaquillo)	raíz	197.00	95.74	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1	0.0082

S. H. = Sustancias húmicas $EDTA_0$= sin aplicar EDTA; $EDTA_1$= 1.25 g kg^{-1}; $EDTA_2$= 2.5 g kg^{-1}
S. $H._0$ = sin aplicar S. H.; S. $H._1$= 1.25 mL kg^{-1}; S. $H._2$= 2.5 mL kg^{-1}
pH_0 = pH 6.3; pH_1= pH 4.4 - 4.9.

En la especie *Cynodon dactylon* se registró un efecto estadísticamente significativo (p=0.03) sobre la absorción de Zn, cuando se aplicó EDTA y sustancias húmicas. Cuando se aplicó EDTA, sustancias húmicas y se modificó el pH, esta significancia se obtuvo en *Nicotiana glauca* Graham (p=0.008). Las especies *Ricinus communis*, *Senecio salignus* DC., *Phragmites australis*, y *Buddleja cordata* H. B. K. no registraron esta significancia cuando se aplicó EDTA, sustancias húmicas y modificación de pH.

Sin embargo, en *Cynodon dactylon* se apreció una alta acumulación de Zn en la parte radical en forma natural. Esta fitoextracción de Zn en forma natural fue documentada por Madejón *et al.*, (2006).

Las sustancias quelatantes provocaron que *Cynodon dactylon* absorbiera Zn con 54.14% en parte aérea y un 86.58% en la raíz. Los tratamientos que originaron este efecto fueron $EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0 y sin aplicación de sustancias quelatantes con pH sin modificar en el segundo caso, respectivamente. Esto significa que el tratamiento con quelatantes influye en la traslocación a la parte aérea, y el testigo absorbe gran cantidad de Zn pero no existe traslocación a la parte aérea en esta especie.

La acumulación de Zn en tejido de raíz tuvo efecto por la aplicación de $EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1 con el 65.57% en *Nicotiana glauca* Graham, lo que refleja alta retención en la raíz, pero baja capacidad de traslocación a la parte aérea.

Barazani *et al*. (2004) reportó que *Nicotiana glauca* Graham absorbió 531 mg kg^{-1} de Zn en suelos contaminados, y una fitoextracción de 56 mg de Zn kg^{-1} en sitios no contaminados. Estos valores son más altos, dos veces más, a los reportados en este estudio para sitios contaminados, bajo condiciones naturales.

5.7. Fitoextracción por especie

5.7.1. Absorción de Cd por especie en parte aérea

El análisis de varianza indicó diferencia estadística en la absorción de Cd por efecto de la especie. *Nicotiana glauca* Graham acumuló más Cd en la parte aérea por efecto de la especie, tratamiento y la interacción de ambos (p=0.0001), como se aprecia en el Cuadro 14. *Nicotiana glauca* Graham es una especie que tiene potencial para usarse como fitorremediadora de Cd en el suelo. Se sugiere continuar con estudios que permitan esclarecer como mejorar

esa capacidad extractora de Cd. Asimismo, se deben estudiar e identificar a los mecanismos fisiológicos que permiten esa mayor proporción de Cd en la parte aérea de *Nicotiana glauca* Graham.

Ricinus communis, *Cynodon dactylon*, *Senecio salignus* DC. , *Phragmites australis* y *Buddleja cordata* H. B. K. no tuvieron significancia estadística en la extracción de Cd en tejido aéreo por efecto de la especie, tratamiento y/o interacción.

5.7.2. Absorción de Cd por especie en parte raíz

La absorción de Cd en la raíz, fue diferente estadísticamente por efecto de la especie (p=0.0001) en *Ricinus communis* y *Cynodon dactylon*; más no tuvo efecto por el tratamiento o la interacción de la especie y tratamiento (Cuadro 14).

La absorción de Cd en la raíz no tuvo efecto por la especie, tratamiento y/o interacción de ambos en *Senecio salignus* DC., *Phragmites australis*, *Nicotiana glauca* Graham y *Buddleja cordata* H. B. K.

5.7.3. Absorción de Ni por especie en parte aérea

Los valores de acumulación de Ni, en la parte aérea, por efecto de la especie, tratamiento y la interaccción de estos dos factores, fue diferente estadísticamente en *Nicotiana glauca* Graham, *Buddleja cordata* H. B. K., *Ricinus communis* (p=0.0001, p=0.027, p=0.018). La cantidad de Ni acumulado en tejido aéreo, no tuvo significancia estadística por efecto de la especie, tratamiento y/o interacción de ambos en *Cynodon dactylon*, *Senecio salignus* DC. y *Phragmites australis*.

5.7.4. Absorción de Ni por especie en parte raíz

La absorción de Ni en la parte de raíz fue diferente estadísticamente en *Ricinus communis* y *Senecio salignus* DC. por el efecto de la especie, tratamiento y su interacción (Cuadro 14). La absorción de Ni en la raíz no tuvo efecto por la especie, tratamiento y/o interacción de ambos en *Cynodon dactylon*, *Phragmites australis*, *Nicotiana glauca* Graham y *Buddleja cordata* H. B. K.

Cuadro 14. Especies silvestres con mayor capacidad de fitoextracción por metal con tratamiento en especies silvestres.

Metal	Especie	Área de tejido	Absorción mg kg^{-1}	Pr > F (Especie)	Pr > F (Tratamiento)	Pr > F (Especie x Tratamiento)
Cd	*Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo)	aéreo	23.689	<0.0001	<.0001	0.0002
Cd	*Ricinus communis* (higuerilla)	raíz	33.119	<0.0001	N.S.	N.S.
	Cynodon dactylon (grama nativa)	raíz	22.488			
Ni	*Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo)	aéreo	27.591	<0.0001	0.0278	0.0188
	Buddleja cordata H. B. K. (tepozán)	aéreo	18.559			
	Ricinus communis (higuerilla)	aéreo	11.191			
Ni	*Ricinus communis* (higuerilla)	raíz	26.218	<0.0001	0.0003	0.0885
	Senecio salignus DC. (jarilla)	raíz	19.844			

5.7.5. Absorción de Pb por especie en parte aérea

Los valores de acumulación de Pb, en tejido aéreo, fueron estadísticamente diferentes por efecto de la especie (p=0.0001) y tratamiento (p=0.0006) en *Nicotiana glauca* Graham, *Buddleja cordata* H. B. K. y *Senecio salignus* DC. No hubo efecto por la interaccción de la especie x tratamiento (Cuadro 15). La cantidad de Pb en la parte aérea fue estadísticamente igual en las especies *Ricinus communis*, *Cynodon dactylon* y *Phragmites australis*.

5.7.6. Absorción de Pb por especie en parte raíz

La absorción de Pb en la raíz fue estadísticamente diferente en *Phragmites australis* y *Cynodon dactylon* por efecto de la especie (p=0.006) y tratamiento (p=0.0004), no así por la cinteracción de estos (Cuadro 15). La acumulación de Pb en la raíz no fue afectada por la especie y/o tratamiento en *Ricinus communis*, *Senecio salignus* DC., *Nicotiana glauca* Graham y *Buddleja cordata* H. B. K.

5.7.7. Absorción de Zn por especie en parte aérea

La acumulación de Zn, en la parte aérea, fue estadísticamente diferente en *Nicotiana glauca* Graham por efecto de la especie (p=0.0001) y tratamiento (p=0.001) (Cuadro 15). No existió efecto de la especie y/o tratamiento, en la absorción de Zn en la parte aérea, en *Ricinus communis*, *Cynodon dactylon*, *Senecio salignus* DC. , *Phragmites australis* y *Buddleja cordata* H. B. K.

5.7.8. Absorción de Zn por especie en parte raíz

La absorción de Zn en la raíz por efecto de la especie, tratamiento y su interacción fue evidente en *Ricinus communis*, *Phragmites australis*, *Cynodon dactylon* y *Nicotiana glauca* Graham (Cuadro 15). Barazani *et al*., (2004) reportó que *Nicotiana glauca* Graham acumuló más Zn y Cu en la raíz cuando se desarrolló en sitios contaminados. La acumulación de Zn en la parte de raíz no fue relacionada con la interacción de la especie y/o tratamiento en *Senecio salignus* DC. y *Buddleja cordata* H. B. K.

Cuadro 15. Especies arbustivas silvestres con mayor capacidad de fitoextracción por metal en especies silvestres.

Metal	Especie	Área de tejido	Absorción mg kg^{-1}	Pr > F (Especie)	Pr > F (Tratamiento)	Pr > F (Especie x Tratamiento)
Pb	*Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo)	aéreo	35.057	<0.0001	0.0006	N.S.
	Buddleja cordata H. B. K. (tepozán)	aéreo	25.565			
	Senecio salignus DC. (jarilla)	aéreo	14.093			
Pb	*Phragmites australis* (carrizo)	raíz	24.813	0.0061	0.0004	N.S.
	Cynodon dactylon (grama nativa)	raíz	23.944			
Zn	*Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo)	aéreo	114.30	<0.0001	0.0012	N.S.
Zn	*Ricinus communis* (higuerilla)	raíz	131.67	0.0011	0.0018	0.0419
	Phragmites australis (carrizo)	raíz	119.15			
	Cynodon dactylon (grama nativa)	raíz	118.70			
	Nicotiana glauca Graham (tabaquillo)	raíz	103.13			

5.8. Coeficiente de transferencia de Cd en parte aérea y raíz

El coeficiente de transferencia es un parametro fisiológico que indica proporciones de concentración del contaminante entre la planta y el suelo. Se obtiene al dividir el metal encontrado en la planta (parte aérea o raíz) entre el contenido del metal en el suelo. Esto es, si existen valores mayores que uno, el valor que está en el numerador es el que domina, y en consecuencia es en esa parte donde se encuentra mayormente el metal; lo cual indica una tendencia a que el metal sea traslocable y soluble para la planta.

El Cuadro 16 contiene los valores promedio de absorción de Cd con los tratamientos que facilitaron esa mayor extracción. La especie con mayor coeficiente de transferencia de Cd a la parte aérea es *Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo) con el tratamiento 1.25 g de EDTA kg^{-1}, 1.25 mL de sustancias húmicas kg^{-1} y pH en el intervalo de 4.4 a 4.9. En la parte aérea el coeficiente de transferencia estuvo en el intervalo de 0 a 1.5. Esto sugiere que esta especie facilita la traslocación del suelo a la parte aérea.

Nicotiana glauca Graham tuvo mayor coeficiente de transferencia del suelo a la raíz con un valor de 1.1 con el tratamiento $EDTA_1$ $S.H._1$ pH_1 lo que facilita la absorción a la parte raíz desde el suelo. El coeficiente de transferencia de la raíz a la parte aérea estuvo en el intervalo de 0.1 a 4.1 y la especie con mayor coeficiente fue *Nicotiana glauca* Graham, en la cual hay una tendencia a traslocar el Cd de la raíz a la parte aérea.

Cuadro 16. Tratamientos con mayor extracción de Cd en parte aérea y raíz.

Especie	Tratamiento	Parte aérea	Parte raíz	Suelo	C. T. P.A[¶]	C. T. P.R[†]	Parte aérea / Raíz[§]
		------mg kg^{-1}------					
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	9,6	8,0	34,8	0,3	0,2	1,2
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	10,1	6,6	20,7	0,5	0,3	1,5
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	4,0	7,0	40,8	0,1	0,2	0,6
GRAMA	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	6,0	78,7	116,6	0,1	0,7	0,1
GRAMA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	7,4	30,5	44,5	0,2	0,7	0,2
GRAMA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	5,1	22,8	51,2	0,1	0,4	0,2
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	5,7	86,1	83,2	0,1	1,0	0,1
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	3,3	56,5	130,7	0,0	0,4	0,1
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	3,0	44,2	106,7	0,0	0,4	0,1
JARILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	11,5	12,9	55,4	0,2	0,2	0,9
JARILLA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	11,5	5,7	40,0	0,3	0,1	2,0
JARILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	7,3	7,7	44,0	0,2	0,2	0,9
TABAQUILLO	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	35,8	25,6	23,1	1,5	1,1	1,4
TABAQUILLO	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1	32,5	12,5	98,8	0,3	0,1	2,6
TABAQUILLO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	33,0	8,0	45,4	0,7	0,2	4,1
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	10,4	9,1	33,0	0,3	0,3	1,1
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	11,8	5,7	28,1	0,4	0,2	2,1
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	3,5	10,5	25,7	0,1	0,4	0,3

[¶] Coeficiente de transferencia de Cd del suelo a la parte aérea
[†] Coeficiente de transferencia de Cd del suelo a la raíz.
[§] Coeficiente de transferencia de Cd de la raíz a la parte aérea
S. H. = Sustancias húmicas $EDTA_0$= sin aplicar EDTA; $EDTA_1$= 1.25 g kg^{-1}; $EDTA_2$= 2.5 g kg^{-1}
$S.\ H._0$ = sin aplicar S. H.; $S.\ H._1$= 1.25 mL kg^{-1}; $S.\ H._2$= 2.5 mL kg^{-1}
pH_0 = pH 6.3; pH_1= pH 4.4 - 4.9.

5.9. Coeficiente de transferencia de Ni en parte aérea y raíz

La especie con mayor coeficiente de transferencia de Ni, desde el suelo a la parte aérea fue *Buddleja cordata* H. B. K. (tepozán) con el tratamiento $EDTA_2$ $S.\ H._2$ pH_1 y un valor de 0.9. *Senecio salignus* DC. (jarilla) tuvo un coeficiente de transferencia del suelo a la parte de 0.8 con el tratamiento 1.25 g de EDTA kg^{-1}, 2.50 mL de sustancias húmicas kg^{-1} y pH de 4.4 - 4.9. *Phragmites australis* (carrizo) no tuvo absorción de Ni en parte aérea, lo cual sugiere sensibilidad de esta especie al Ni en la parte aérea (Cuadro 17).

El mayor coeficiente de transferencia de Ni, del suelo, a la raíz fue registrado en *Cynodon dactylon* (grama nativa) sin adición de EDTA, sustancias húmicas y/o modificación de pH, esto indica alta selectividad de absorción de Ni en la raíz bajo condiciones naturales. *Senecio salignus* DC. (jarilla) tuvo el mismo

coeficiente de transferencia a la raíz (0.9) con el tratamiento 1.25 g de EDTA kg^{-1}, 2.50 mL de sustancias húmicas kg^{-1} y pH en el intervalo de 4.4 a 4.9. El intervalo de oscilación del coeficiente de transferencia en la parte de raíz fue de 0 - 0.9 (Cuadro 17).

Nicotiana glauca Graham (tabaquillo) tuvo el mayor coeficiente de transferencia de la raíz a la parte aérea (3.4) con el tratamiento $EDTA_0$ $S.H._0$ pH_0, es decir, en condiciones naturales trasloca un alto porcentaje de Ni de la raíz a la parte aérea. *Buddleja cordata* H. B. K. (tepozán) registró un coeficiente de transferencia de la raíz a la parte aérea (2.8) con el tratamiento $EDTA_1$ $S.H._1$ pH_0 el intervalo de este coeficiente fue de 0.0 a 3.4.

Cuadro 17. Tratamientos con mayor extracción de Ni en parte aérea y raíz.

Especie	Tratamiento	Parte aérea	Parte raíz	Suelo	C. T. P.A†	C. T. P.R¶	Parte aérea / Raíz
		-------mg kg^{-1}--------					
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	§	20,4	113,2	0,0	0,2	0,0
CARRIZO	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_1	§	20,2	44,7	0,0	0,5	0,0
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	§	19,6	40,7	0,0	0,5	0,0
GRAMA	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	1,0	14,4	16,9	0,1	0,9	0,1
GRAMA	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	6,7	8,5	142,1	0,0	0,1	0,8
GRAMA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	10,9	4,1	128,8	0,1	0,0	2,7
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	23,1	46,5	173,7	0,1	0,3	0,5
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	19,2	45,6	104,4	0,2	0,4	0,4
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	23,8	30,3	116,0	0,2	0,3	0,8
JARILLA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	39,7	45,4	49,1	0,8	0,9	0,9
JARILLA	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_0	4,3	26,5	88,4	0,0	0,3	0,2
JARILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	0	23,8	71,1	0,0	0,3	0,0
TABAQUILLO	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	49,2	14,3	87,0	0,6	0,2	3,4
TABAQUILLO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	29,6	31,7	58,7	0,5	0,5	0,9
TABAQUILLO	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1	36,6	18,7	90,1	0,4	0,2	2,0
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	44,6	16,2	103,2	0,4	0,2	2,8
TEPOZAN	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1	41,1	15,6	43,6	0,9	0,4	2,6
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	20,5	19,5	104,0	0,2	0,2	1,1

† Coeficiente de transferencia de Ni del suelo a la parte aérea
¶ Coeficiente de transferencia de Ni del suelo a la raíz.
§ No existió traslocación de Ni de la parte radical al tejido aéreo
S. H. = Sustancias húmicas $EDTA_0$= sin aplicar EDTA; $EDTA_1$= 1.25 g kg^{-1}; $EDTA_2$= 2.5 g kg^{-1}
$S.H._0$ = sin aplicar S. H.; $S.H._1$= 1.25 mL kg^{-1}; $S.H._2$= 2.5 mL kg^{-1}
pH_0 = pH 6.3; pH_1= pH 4.4 - 4.9.

5.10. Coeficiente de transferencia de Pb en parte aérea y raíz

El coeficiente de transferencia de Pb del suelo a la parte aérea fue muy bajo en todas las especies (0 - 0.5), excepto en *Buddleja cordata* H. B. K. (tepozán) que registró un coeficiente de hasta 4.9 con el tratamiento 1.25 g de EDTA kg^{-1}, 1.25 mL de sustancias húmicas kg^{-1} y pH 6.3 (Cuadro 18). Esto sugiere que al aplicar a esta especie, el tratamiento descrito, existe una alta capacidad de extracción de Pb.

En la parte de raíz el coeficiente de transferencia también fue muy bajo (0 a 0.2), excepto en *Buddleja cordata* H. B. K. (tepozán) con 2.5. Estos datos sugieren escasa transferencia de Pb del suelo a la raíz en las especies bajo estudio.El coeficiente de transferencia de la raíz a la parte aérea fue más grande en *Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo) (11.2). Ello supone alta capacidad de trasnferencia en esta especie. El intervalo de transferencia de la raíz a la parte alta fue de 0.1 a 11.2.

Cuadro 18. Tratamientos con mayor extracción de Pb en parte aérea y raíz.

Especie	Tratamiento	Parte aérea	Parte raíz	Suelo	C. T. P.A†	C. T. P.R¶	Parte aérea / Raíz
		-------mg kg^{-1}--------					
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	5,8	37,0	150,8	0,0	0,2	0,2
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	10,2	30,3	604,9	0,0	0,1	0,3
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	7,3	30,6	217,6	0,0	0,1	0,2
GRAMA	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	4,4	31,1	141,3	0,0	0,2	0,1
GRAMA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	13,1	21,8	192,9	0,1	0,1	0,6
GRAMA	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_1	4,1	29,6	160,1	0,0	0,2	0,1
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	14,0	33,8	1752,4	0,0	0,0	0,4
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	12,5	21,0	2485,2	0,0	0,0	0,6
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	11,7	21,8	2326,3	0,0	0,0	0,5
JARILLA	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_1	26,6	31,0	220,8	0,1	0,1	0,9
JARILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	22,2	29,9	202,7	0,1	0,1	0,7
JARILLA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	25,0	16,4	601,3	0,0	0,0	1,5
TABAQUILLO	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	68,1	6,1	221,1	0,3	0,0	11,2
TABAQUILLO	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_0	60,8	8,7	135,0	0,5	0,1	7,0
TABAQUILLO	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	47,7	5,4	198,7	0,2	0,0	8,8
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	49,3	24,8	10,1	4,9	2,5	2,0
TEPOZAN	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_1	27,0	37,0	134,7	0,2	0,3	0,7
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	33,0	30,4	41,4	0,8	0,7	1,1

† Coeficiente de transferencia de Pb del suelo a la parte aérea
¶ Coeficiente de transferencia de Pb del suelo a la raíz.
S. H. = Sustancias húmicas $EDTA_0$= sin aplicar EDTA; $EDTA_1$= 1.25 g kg^{-1}; $EDTA_2$= 2.5 g kg^{-1}
S. $H._0$ = sin aplicar S. H.; S. $H._1$= 1.25 mL kg^{-1}; S. $H._2$= 2.5 mL kg^{-1}
pH_0 = pH 6.3; pH_1= pH 4.4 - 4.9.

5.11. Coeficiente de transferencia de Zn en parte aérea y raíz

Nicotiana glauca Graham (tabaquillo) fue la especie con más alto coeficiente de transferencia de Zn, del suelo, a la parte aérea (0.5), con el tratamiento 2.50 g de EDTA kg^{-1}, 2.50 mL de sustancias húmicas kg^{-1} y pH 6.3. Ésta especie en condiciones naturales, tuvo un coeficiente de transferencia similar a las otras especies. Las demás especies registraron un coeficiente de transferencia muy bajo, el cual estuvo entre 0 y 0.2 (Cuadro 19).

En la parte de raíz el coeficiente de transferencia más alto fue en *Nicotiana glauca* Graham (tabaquillo). El intervalo de este coeficiente a la parte raíz fue de 0.1 a 0.5. El coeficiente de la parte aérea y raíz fue muy bajo en todas las especies evaluadas. La transferencia de la parte raíz a la parte aérea fue más alta en *Buddleja cordata* H. B. K. (tepozán).

Cuadro 19. Tratamientos con mayor extracción de Zn en parte aérea y raíz.

Especie	Tratamiento	Parte aérea	Parte raíz	Suelo	C. T. P.A†	C. T. P.R¶	Parte aérea / Raíz
		-------mg kg^{-1}--------					
CARRIZO	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	42,6	218,4	761,5	0,1	0,3	0,2
CARRIZO	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	74,8	147,9	682,7	0,1	0,2	0,5
CARRIZO	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_0	73,2	111,6	584,0	0,1	0,2	0,7
GRAMA	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	41,5	267,8	734,0	0,1	0,4	0,2
GRAMA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	125,8	106,5	617,7	0,2	0,2	1,2
GRAMA	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	82,3	144,5	599,4	0,1	0,2	0,6
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	98,6	141,9	736,5	0,1	0,2	0,7
HIGUERILLA	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	65,9	160,7	624,8	0,1	0,3	0,4
HIGUERILLA	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	53,7	169,1	579,8	0,1	0,3	0,3
JARILLA	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	62,3	116,1	747,3	0,1	0,2	0,5
JARILLA	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_0	26,6	125,3	606,0	0,0	0,2	0,2
JARILLA	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	70,1	73,9	656,8	0,1	0,1	0,9
TABAQUILLO	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	178,5	177,3	357,0	0,5	0,5	1,0
TABAQUILLO	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1	103,4	197,0	784,5	0,1	0,3	0,5
TABAQUILLO	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	131,3	138,3	747,2	0,2	0,2	0,9
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	76,1	135,8	582,2	0,1	0,2	0,6
TEPOZAN	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	108,3	77,3	636,5	0,2	0,1	1,4
TEPOZAN	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	94,0	86,7	583,3	0,2	0,1	1,1

† Coeficiente de transferencia de Zn del suelo a la parte aérea
¶ Coeficiente de transferencia de Zn del suelo a la raíz.
S. H. = Sustancias húmicas $EDTA_0$= sin aplicar EDTA; $EDTA_1$= 1.25 g kg^{-1}; $EDTA_2$= 2.5 g kg^{-1}
S. $H._0$ = sin aplicar S. H.; S. $H._1$= 1.25 mL kg^{-1}; S. $H._2$= 2.5 mL kg^{-1}
pH_0 = pH 6.3; pH_1= pH 4.4 - 4.9.

5. 12. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Cd, Ni, Pb y Zn

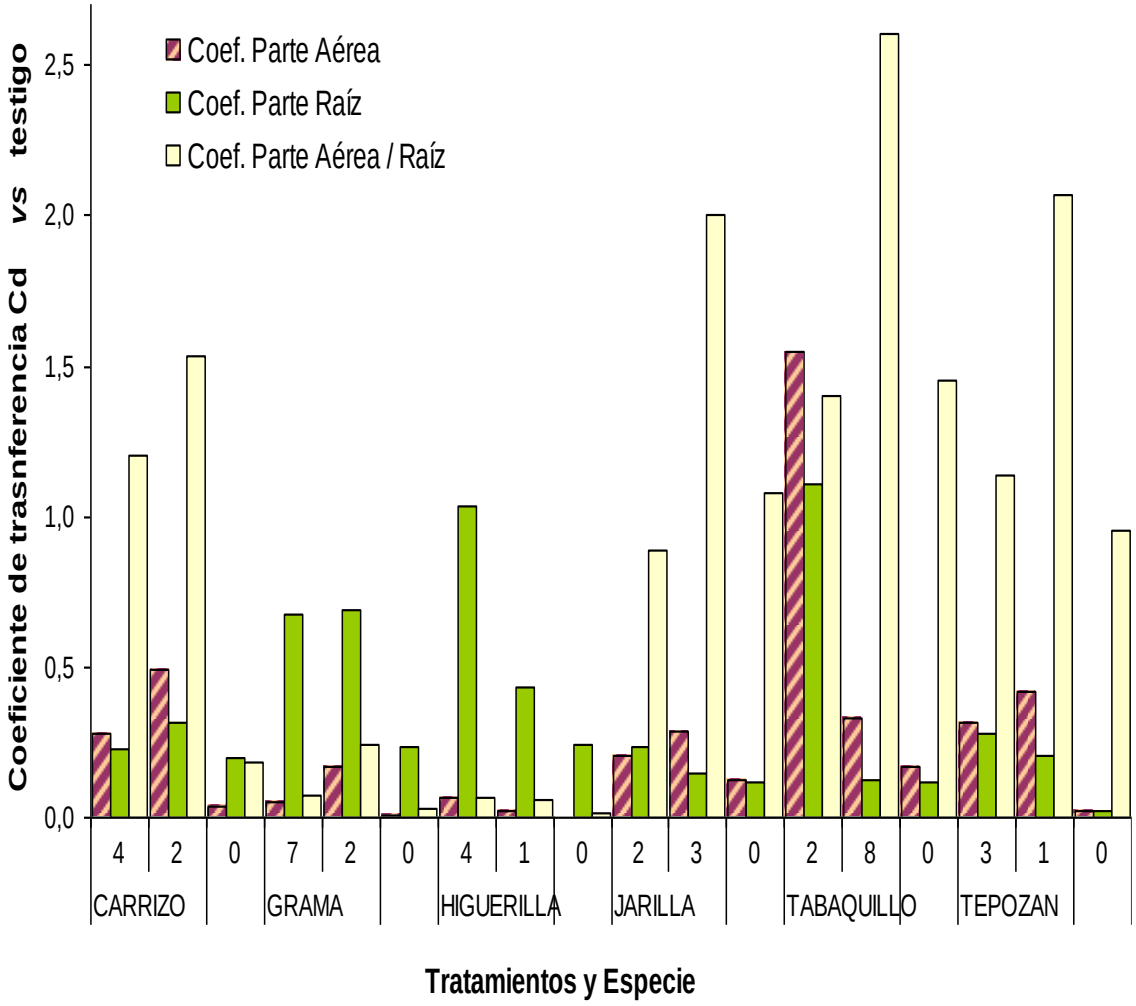


Figura 2. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Cd, por especie, respecto al testigo.

No. de tratamiento	Clave	EDTA (g kg^{-1})	Sustancias húmicas (mL kg^{-1})	pH
0	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	0	0	6.3
1	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	1.25	1.25	6.3
2	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	1.25	1.25	4.4 - 4.9
3	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	1.25	2.50	6.3
4	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	1.25	2.50	4.4 - 4.9
5	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_0	2.5	1.25	6.3
6	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_1	2.5	1.25	4.4 - 4.9
7	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	2.5	2.50	6.3
8	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1	2.5	2.50	4.4 - 4.9

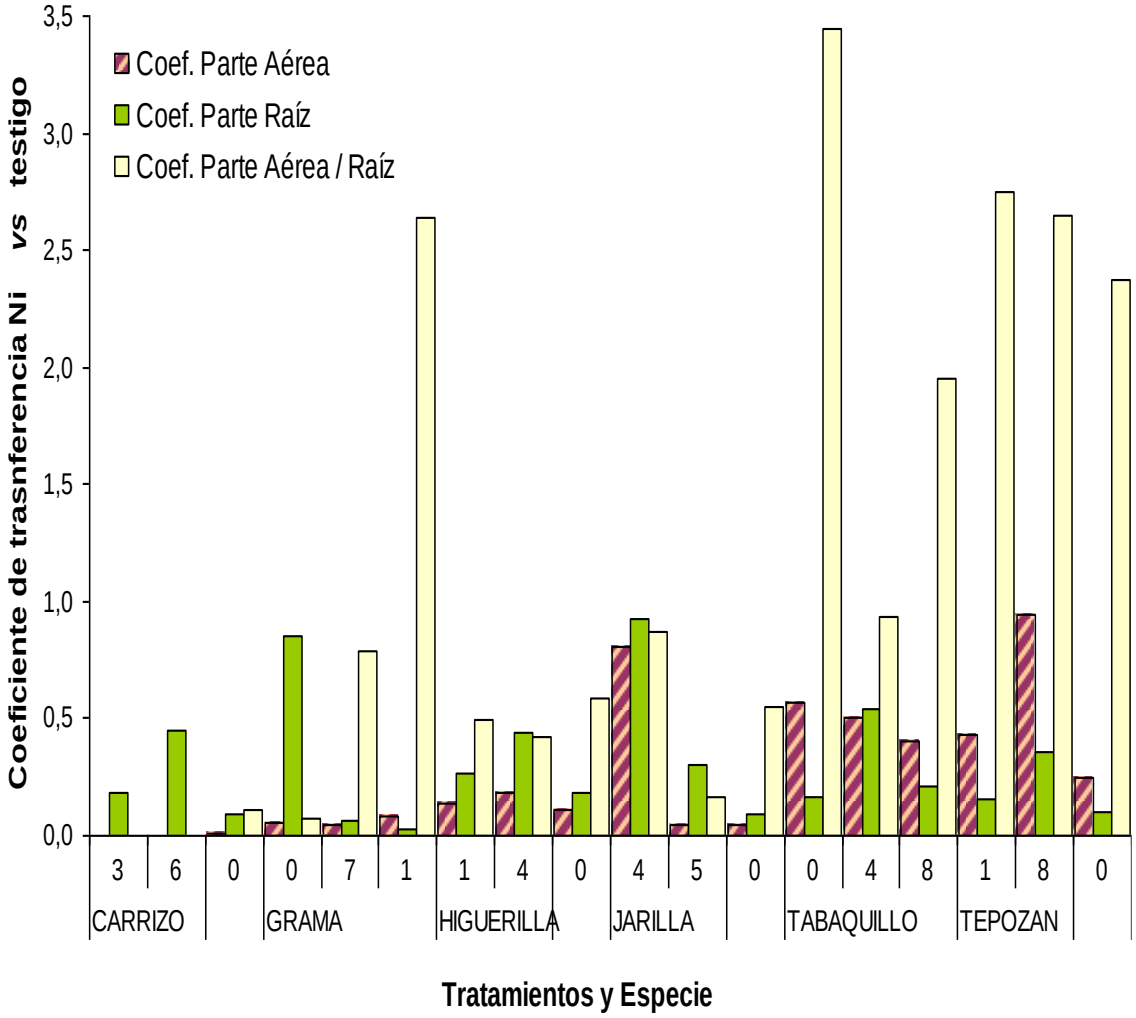


Figura 3. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Ni, por especie, respecto al testigo.

No. de tratamiento	Clave	EDTA (g kg^{-1})	Sustancias húmicas (mL kg^{-1})	pH
0	$EDTA_0$ S. $H._0$ pH_0	0	0	6.3
1	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_0	1.25	1.25	6.3
2	$EDTA_1$ S. $H._1$ pH_1	1.25	1.25	4.4 - 4.9
3	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_0	1.25	2.50	6.3
4	$EDTA_1$ S. $H._2$ pH_1	1.25	2.50	4.4 - 4.9
5	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_0	2.5	1.25	6.3
6	$EDTA_2$ S. $H._1$ pH_1	2.5	1.25	4.4 - 4.9
7	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_0	2.5	2.50	6.3
8	$EDTA_2$ S. $H._2$ pH_1	2.5	2.50	4.4 - 4.9

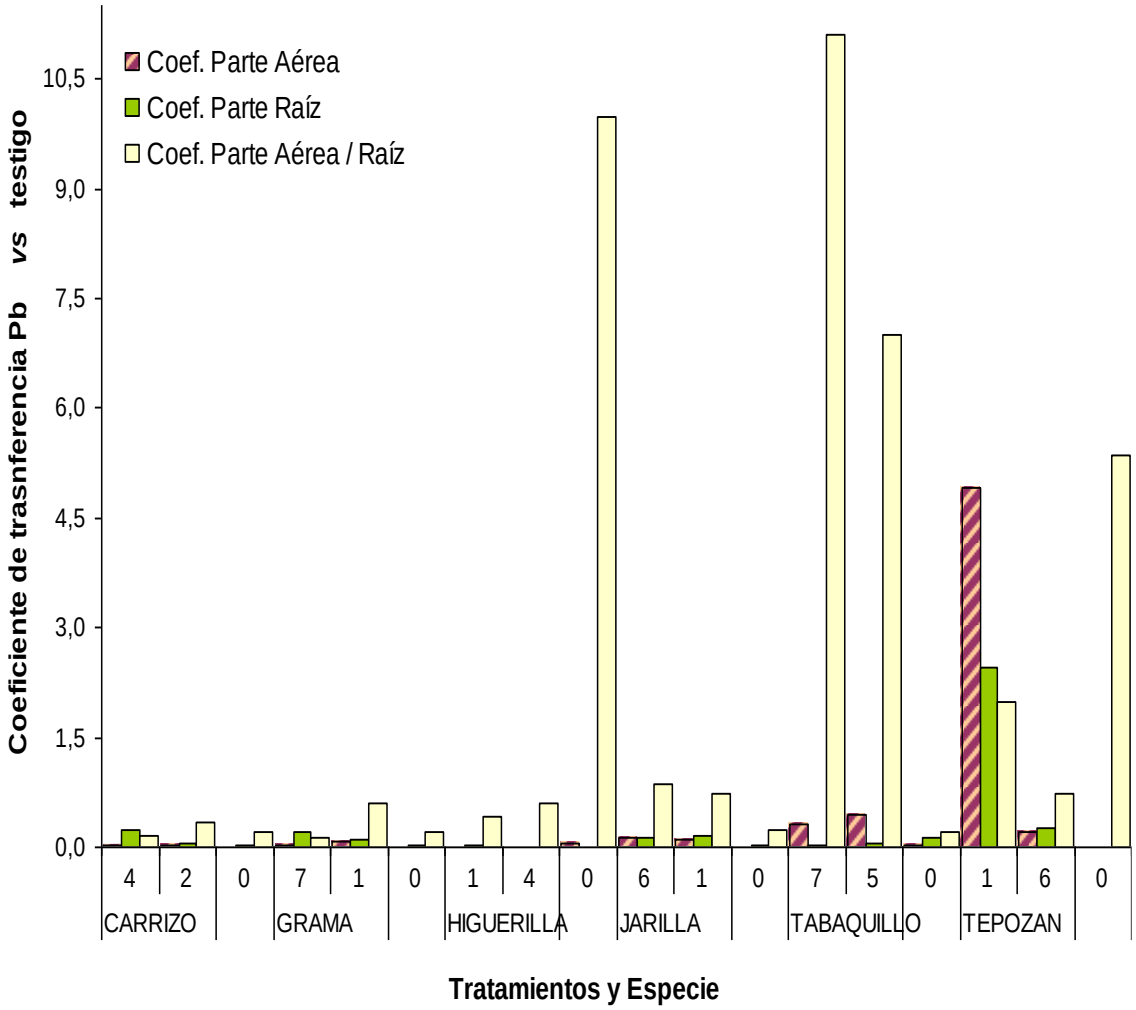


Figura 4. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Pb, por especie, respecto al testigo.

No. de tratamiento	Clave	EDTA (g kg^{-1})	Sustancias húmicas (mL kg^{-1})	pH
0	$EDTA_0$ S. H.$_0$ pH_0	0	0	6.3
1	$EDTA_1$ S. H.$_1$ pH_0	1.25	1.25	6.3
2	$EDTA_1$ S. H.$_1$ pH_1	1.25	1.25	4.4 - 4.9
3	$EDTA_1$ S. H.$_2$ pH_0	1.25	2.50	6.3
4	$EDTA_1$ S. H.$_2$ pH_1	1.25	2.50	4.4 - 4.9
5	$EDTA_2$ S. H.$_1$ pH_0	2.5	1.25	6.3
6	$EDTA_2$ S. H.$_1$ pH_1	2.5	1.25	4.4 - 4.9
7	$EDTA_2$ S. H.$_2$ pH_0	2.5	2.50	6.3
8	$EDTA_2$ S. H.$_2$ pH_1	2.5	2.50	4.4 - 4.9

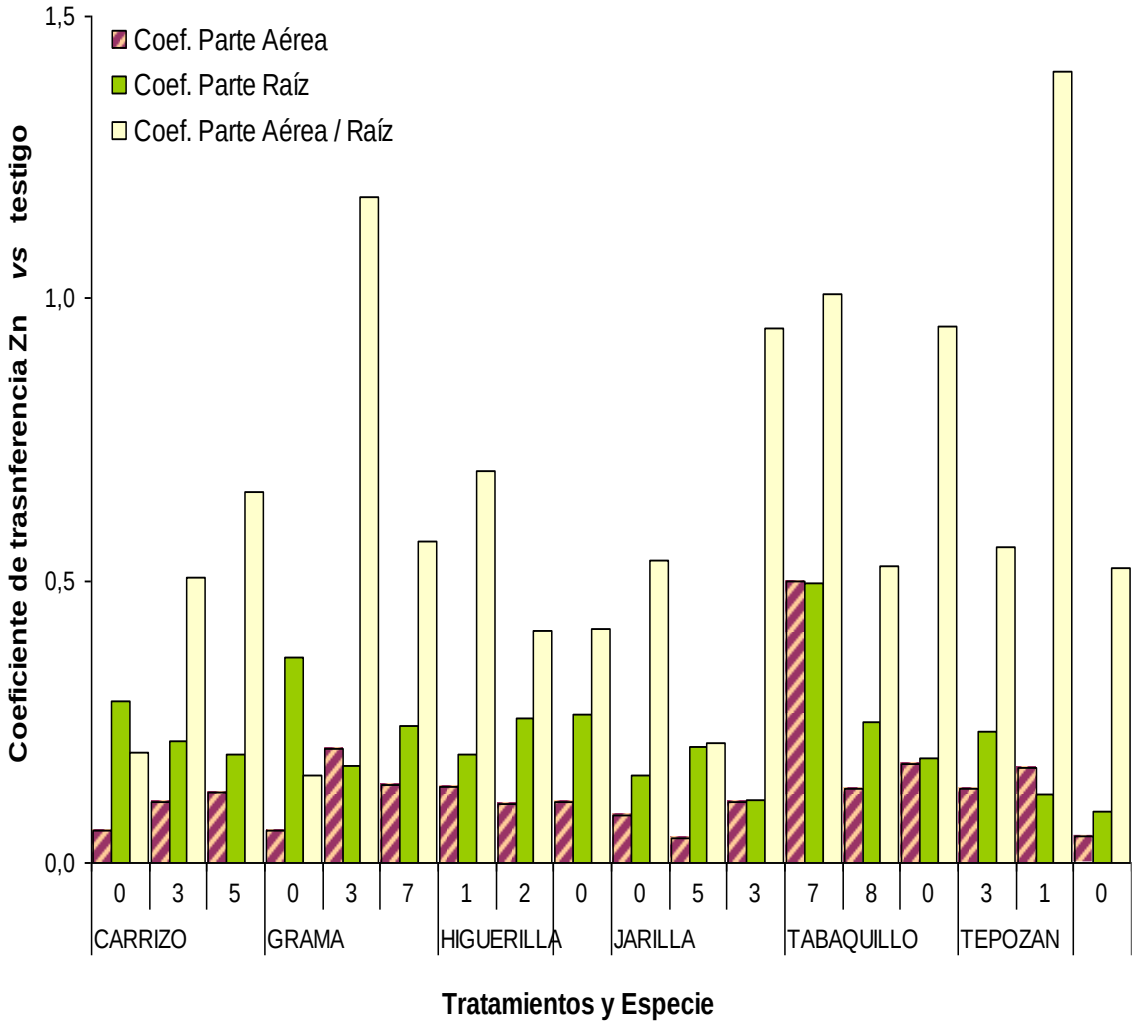


Figura 5. Coeficiente de transferencia de los tratamientos con mayor extracción de Zn, por especie, respecto al testigo.

No. de tratamiento	Clave	EDTA (g kg^{-1})	Sustancias húmicas (mL kg^{-1})	pH
0	$EDTA_0$ S. H.$_0$ pH_0	0	0	6.3
1	$EDTA_1$ S. H.$_1$ pH_0	1.25	1.25	6.3
2	$EDTA_1$ S. H.$_1$ pH_1	1.25	1.25	4.4 - 4.9
3	$EDTA_1$ S. H.$_2$ pH_0	1.25	2.50	6.3
4	$EDTA_1$ S. H.$_2$ pH_1	1.25	2.50	4.4 - 4.9
5	$EDTA_2$ S. H.$_1$ pH_0	2.5	1.25	6.3
6	$EDTA_2$ S. H.$_1$ pH_1	2.5	1.25	4.4 - 4.9
7	$EDTA_2$ S. H.$_2$ pH_0	2.5	2.50	6.3
8	$EDTA_2$ S. H.$_2$ pH_1	2.5	2.50	4.4 - 4.9

Los análisis realizados de concentración de metales en el suelo, utilizados en este estudio, indican que el Cd ha aumentado hasta un 930% con 20.10 mg kg^{-1}, el Ni aumentó en 233% con 64.32 mg kg^{-1}, el Pb registró un aumento de 333% con 413.39 mg kg^{-1}, y el Zn fue detectado en 1036% con 700.53 mg kg^{-1}, respecto al año 1989, en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Esto indica una urgente necesidad de conocer alternativas a bajo costo para descontaminar estos suelos porque no existe un método implementado para disminuir su contaminación debido a que es costoso hacerlo con métodos químicos, mientras que el uso de plantas para extraer estos metales es barato.

El EDTA es un quelatente y que junto con la modificación de pH tendiente a la acidez, y sustancias húmicas, ayuda a la traslocación de elementos traza a la parte aérea. Esta traslocación está en función de la especie y el elemento contaminante.

Se recomienda realizar experimentos con la aplicación del ácido indol tres acético (AIA), ya que Liphadzi *et al.*, (2006) documentaron que al aplicar el AIA en dósis de 3 a 6 mg L^{-1} el EDTA no tuvo efecto en la traslocación de Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn en *Helianthus annuus* L.; pero, si existió mayor crecimiento de las raíces, lo cual contribuyó a una mayor absorción de estos metales que se encontraban en áreas agrícolas regadas con aguas negras (residuales).

6. CONCLUSIONES

El análisis de varianza indicó que los valores de absorción de Cd, Ni, Pb y Zn, por las plantas, con los tratamientos EDTA y sustancias húmicas, fueron estadísticamente diferentes. Asimismo, existió diferencia estadística con los tratamientos de modificación de pH y EDTA con sustancias húmicas. También hubo significancia estadística en la absorción de estos metales por efecto de la especie y/o tratamiento.

La dósis de aplicación de EDTA para alcanzar mayor acumulación en la parte aérea, está en función de la especie y el metal.

La especie con mayor absorción de Cd fue *Nicotiana glauca* Graham y para Ni fue *Ricinus communis*. La más alta acumulación Pb y Zn se registró en *Nicotiana glauca* Graham.

Buddleja cordata H. B. K. y *Cynodon dactylon* mostraron alta capacidad de absorción de Ni en condiciones naturales. *Ricinus communis*, *Cynodon dactylon*, *Senecio salignus* DC., *Phragmites australis*, *Nicotiana glauca* Graham y *Buddleja cordata* H. B. K. registraron alta absorción de Zn en condiciones naturales.

La especie con mayor acumulación de Cd, Ni, Pb y Zn en parte aérea fue *Nicotiana glauca* Graham.

7. LITERATURA CITADA

Alloway B. J. 1995 Heavy metals in soils. Chapman & Hall. Second edition. United kindom.

Albert A. L. 1990. Curso básico de toxicología ambiental. Ed. Limusa. México, D.F.

Armienta H. M.A., 2006. Arsénico y metales pesados en suelos y sedimentos: Su relación con actividades mineras en México. *In*: Alternativas para la rehabilitación de suelos contaminados con metales pesados y metaloides. González-Chávez, MC.; Carrillo-González, R.; Corlay Chee, L. y Hernández Tapia, A. Colegio de Postgraduados – Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. México.

Avilés, H. V. 2000. Identificación de especies vegetales con capacidad para remover metales pesados en suelos contaminados. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México.

Barančíková, G. and J. Makovníková. 2003. The influence of humic acid quality on the mobility of heavy metals. Plant Soil Environmental. 49 (12):565-571.

Barazani O. ,P. Sathiyamoorthy, U. Manandhar, R. Vulkan, A. Golan-Goldhirsh. 2004. Heavy metal accumulation by *Nicotiana glauca* Graham in a solid waste disposal site. Chemosphere. 54 (7): 867-872.

Barceló J. and C. Poschenrieder. 2003. Phytoremediation: principles and perspectives. Contributions to science. 2 (3): 333-344.

Blaylock M.J, D.E Salt, S. Dushenkov, O. Zakharova and C. Gussman. 1997. Enhanced accumulation of Pb in Indian mustard by soil-applied chelating agents. Environmental Science Technological.12 (31): 860-865.

Blaylock M.J. and J.W. Huang. 2000. Phytoextraction of metals. *In:* Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean-up the environment. Raskin I. and B.D. Ensley (eds.). John Wiley & Sons, Inc., New York. pp. 53-70.

Bradford, G.R., A.L. Page, L.J. Lund y W. Olmestead. 1975. Trace element concentrations of sewage treatment plant effluents and sludges: their interactions with soils and uptake by plants. Journal Environmental Quality. 4: 123-127.

Cajuste L. J., R. Carrillo, E. Cota and R. J. Laird.1991. The distribution of metals from waste in the Mexican Valley of Mezquital. Water, Air and Soil Pollution. 58: 763-771.

Carizañes–Villanueva, R. O., F. Matínez–Jerónimo, F Espinosa–Chávez. Acute toxicity to *Daphnia magna* for effluents containing Cd y Zn and a mixture Cd–Zn after metal renoval by *Cholrella vulgaris*. Environmental Toxicology. 15 (1): 2000. 160 – 164.

Carrillo-González R. 2005. Niveles de contaminación de los suelos y plantas. In: El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. González-Chávez, M.C., J. Pérez-Moreno y R. Carrillo-González (eds.), Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México. pp: 34-60.

Carrillo R., L. Cajuste and L. Hernández. 1992. Acumulación de metales pesados en un suelo regado con aguas residuales. Terra. 10 (2): 166-173.

Chappell J., 1997. Phytoremediation of TCE using *Populus*. Status Report prepared for the U.S. EPA Technology Innovation Office under a National Network of Environmental Management Studies Fellowship. 47 p.

Copius Peereboom y Reijnders. 1989. Análisis de los efectos que tienen los contaminantes del medio ambiente sobre los hombres. Volúmenes 1 y 2.

Davies, B. E. 1995. Lead in: Heavy metals in soils. Ed. B. J Alloway. Blackie Academic & Profesional. Secon Edition. London, England.

Díaz Garduño L.M., A. Díaz O., R. Carrillo-González y M. C. A. González-Chávez. 2005. Plantas que se desarrollan en áreas contaminadas con residuos mineros. *In*: El sistema planta-microorganismo-suelo en áreas contaminadas con residuos de minas. González-Chávez, M.C., J. Pérez-Moreno y R. Carrillo-González (eds.), Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México. pp: 9-33.

Estévez, I. J., L. Andrade, P. Marcet y M.J. Montero. 1998. Influencia de las propiedades del suelo en la fijación y movilidad de Zn y Cd. Edafología. 5: 19-27.

EPA (Enviromental Protection Agency). 2000. Introduction to phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory. Ohio, U. S. A., 93 Pág.

EPA (Enviromental Protection Agency). 2001. Tratament tecnologies for site cleanup: annual status report. 10th Edition. Office of soild Waste and Emergency Response. http://www.epa.gov/TIO.

Epistein A.L., C.D. Gussman, M.J. Blaylock, U. Yermiyahu , J.W. Huang, Y. Kapulnik and C.S. Orser. 1999. EDTA and Pb-EDTA accumulation in Brassica juncea grown in Pb-amended soil. Plant and Soil. 208:87-94.

Erdei, L., G. Mezösi, I. Mécs, F. Föglein, L. Bulik. 2005. Phytoremediation as a program for decontamination of heavy-matal polluted environment. Acta Biologica Szegediensis. 49 (1-2): 75-76.

García de M., E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen. 4ª Ed. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 217 p.

Gomes, P.C., M.P.F. Fontes, A.G. da Silva, E. de S. Mendonza, and A. R. Netto. 2001. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils. Soil Science Society and American Journal. 65: 1115-1121.

Grëman H., V. D. Velikonja-Boltas, B. Kos and D. Lestan. EDTA enhanced heavy metal phytoextraction: metal accumulation leaching and toxicity. Plant and Soil. 235: 105-114.

Hutchinson S. L., M.K. Banks and A.P. Schwab. Phytoremediation at aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer. Journal Environmental Quality. 30: 395-403.

IHOBE (Sociedad Pública de Gestión Ambiental dependiente del Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco). 2002. Manual (electrónico) práctico investigación de la contaminación del suelo. España. 107 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2000. Anuario estadístico del estado de Hidalgo. pp 15-28.

Koukal B., C. Guéguen, M. Pardos y J. Dominik. 2003. Influence of humic substances on the toxic effects of cadmiun and zinc to the green alga *Pseudokirchneriella subcapitata*. Chemosphere. 53: 953-961.

Liphadzi, M.S., M.B. Kirkham, G.M. Paulsen. 2006. Auxin-enhanced root growth for phytoremediation of sewage-sludge amended soil. Environmental Technology. 27(6): 695-704.

Li -Z and L.M. Shuman, 1997. Redistribution of forms of Zn, Cd, Ni and soils trated with EDTA. Science of the Total Environmental. 191 (1-2): 95-107.

Lombi E., F.J. Zhao, S.J. Dunham, and S.P. McGrath. 2001. Phytoremediation of heavy metal-contaminated soils: Natural hyperaccumulation versus chemically enhanced phytoextraction. Journal Environmental Quality. 30: 1919-1926.

López R. G. 2001. Limites permisibles de Cr. Zn, Cu, Se y As en Suelos: aproximación metodológica. Tesis, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Mackowiak C. L., P. R. Grossl and B. G. Bugbee. 2001. Beneficial effects of humic acid on micronutrient availability to wheat. Soil Science Society American Journal. 65: 1744-1750.

Madejón, P., J.M. Murillo, T. Marañón and F. Cabrera. 2006. Bioaccumulation of trace elements in a wild grass three years after the Aznalcóllar mine spill (South Spain). Environmental Monitoring and Assessment. 114 (1/3): 169-189.

Mangensteen O. 2002. Plantas que lo chupan todo. Ciencia Digital. 32, Mayo, 2002 http://cienciadigital.net/mayo2002/fito.html.

Meers E., M. Hopgood, E. Lesage, P. Vervaeke, F.M.G. Tack, and M.G. Verloo. 2004. Enhanced phytoextraction: In search of EDTA alternatives. International Journal of Phytoremediation. 6 (2): 95-109.

Méndez-García T., L. Rodríguez-Dominguez y S. Palacios-Mayorga. 2000. Impacto del riego con aguas contaminadas, evaluado a través de la presencia de metales pesados en suelos. Terra. (18) 4: 277-288.

Natividad, D.M. 2005. Métodos químicos para movilizar e inmovilizar Pd. Cd y Zn en suelos contaminados. Tesis de licenciatura, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. México.

Neilands 2001. Chelation and Mineral Nutrition. (21): 6 http://www.jhbiotech.com/plant_products/chelation.htm

NOM-001-ECOL-1996 (Norma Oficial Mexicana) 1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norman P.I. and R. Seddon. 1991. Pollution control in the textile industry – the chemical auxiliary manufacturer´s role. Journal of the Society of Dyers Annal Colourists. 107: 150-152.

Raya P., J.C. 2002. El estado actual del planeta. Ciencia y Desarrollo. (28) 164: 34-39.

Robinson B.H., M. Leblanc, D. Petit, R. Brooks, J. Kirkman and P. Gregg. 1998. The potential of Thlaspi caerulescens for phytoremediation of contaminated soils. Plant and Soil. 203: 47-56.

Robinson, B.H., R.R. Brooks and B.E. Clothier. 1999. Soil amendments aftecting nickel and cobalt uptake by *Berkheya coddii*: Potential use for phytomining and phytoremediation. Annals of Botany. 84: 689-694.

Rodríguez O., J.C., H. Rodríguez F., G. de Lira R., J.Martínez de la C., J.L. Lara M., 2006. Capacidad de seis especies vegetales para acumular plomo en suelos contaminados. 2006. Fitotecnia Mexicana. (29) 3:239-245.

Santibáñes C. y Ginocchio R. 2006. Uso de biosolidos y *Lolium perenne* para la fitoestabilización de tranques de realves de cobre. *In*: Alternativas para la rehabilitación de suelos contaminados con metales pesados y metaloides. González-Chávez, MC.; Carrillo-González, R.; Corlay Chee, L. y Hernández Tapia, A. Colegio de Postgraduados – Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco. México.

Salido, A. L., K. L. Hasty, J. Lim, and D.J. Butcher. 2003. Phytoremediation of Arsenic and Lead in contaminated soil using chinese brake ferns (*Pteris vittata*) and Indian mustard (*Brassica juncea*). International Journal of Phytoremediation. 5 (2): 89-103.

SAS (Statical Analysis Software) Institute. 1999. The SAS System for Windows V8. Cary, NC: SAS Institute.

Salt D. E., M. Blaylock, P. B. A. N Kumar, V. Dushenkov, B. D. Ensley, I. Chel and L. Raskin. 1998. Phytormediation: a novel strategy for the removal of toxi metals from the enviroment using plants. Biotechnology. 13: 468-474.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2001. Elementos a considerar para integrar las bases de política para la prevención de la contaminación del suelo y su remediación. México, D.F. 64 p.

Schnoor J.L. 1997. Phytorremediation. Technology evaluation report. The University of Iowa Department of Civil and Environmental Engineering and Center for Global and Regional Environmental Research Iowa City, Iowa. 37 p.

Streit, B. And W. Stumm. 1993 chemical propertiies of metals and the process of bio-acumulation in terrestrial plants. In plants as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial enviromental. Ed. B. Markert. VCH. Federal Republic of Germany. Pp: 31-35.

Sun B. Zhao, F.J. E. Lombi and S.P. Mc Grath. 2000. Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA. Environmental Pollution. 113: (2): 111-120.

Tan, K. H. 1982. Principles of soil chemistry. The University of Georgia. USA.

Vashegyi, A., G. Mezösi, K. Barta, A. Farsang, G. Dormány, B. Bartha, S. Pataki, L. Erdei. Phytoremediation of heavy metal pollution: A case study. Acta Biologica Szegediensis. 49 (1-2): 77-79.

Vázquez A. A., 1999. Evaluación del riesgo a la contaminación con metales pesados, en la región del Valle del Mezquital, Hgo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. México.

Vázquez A. A., L. Cajuste, C. Siebe, G. Alcantar y M. de L. de la Isla de Bauer. 2001. Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Agrociencia. 35: 267-274.

Volke S. T y J.A. Velasco T. 2002. Tecnologías de remediación para suelos contaminados, México. D.F. SEMARNAT. 62 p.

Yoon, J.K., X.D., Cao, Q. Zhou and Ma., L.Q. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of the Total Environment. 368 (2/3): 456-464.

Zhen-Guo, S., L. Xiang-Dong, W. Chun-Chun, C. Huai-Man and H. Chua. 2002. Lead phytoextraction from contaminated soil with high-biomass plant species. Journal of Environmental Quality. 31:1893-1900.

Greenwood y Earnshaw. 1997.Química de los elementos (Chemistry of the Elements).

8. ANEXOS

Datos (mg kg^{-1}) obtenidos del espectrofotometro de absorción atomica

Metal	Epecie	NOMBRE	Trat	Rep	Parte aerea	Raíz	Suelo
Cd	1	JARILLA	1	1	7,425	8,9	43,8
Cd	1	JARILLA	1	2	6,8	8,825	49,375
Cd	1	JARILLA	1	3	7,8	5,3	38,95
Cd	1	JARILLA	2	1	10,725	16,05	70,675
Cd	1	JARILLA	2	2	13,275	15,85	57,725
Cd	1	JARILLA	2	3	10,45	6,925	37,825
Cd	1	JARILLA	3	1	9,3	4,95	43,325
Cd	1	JARILLA	3	2	14,85	8,4	37,65
Cd	1	JARILLA	3	3	10,325	3,875	39,075
Cd	1	JARILLA	4	1	8,525	3,65	74,775
Cd	1	JARILLA	4	2	1,35	2,325	19,175
Cd	1	JARILLA	4	3	6,075	5,225	88
Cd	1	JARILLA	5	1	5	3,2	65,225
Cd	1	JARILLA	5	2	5,225	4,875	21,525
Cd	1	JARILLA	5	3	5,075	3,95	29,125
Cd	1	JARILLA	6	1	5,975	6,5	19,75
Cd	1	JARILLA	6	2	4,925	2,8	77,975
Cd	1	JARILLA	6	3	8,525	5,475	54,775
Cd	1	JARILLA	7	1	4,8	2,625	21,05
Cd	1	JARILLA	7	2	3	2,825	25,6
Cd	1	JARILLA	7	3	.	11,35	56,825
Cd	1	JARILLA	8	1	6,2	5,3	52,15
Cd	1	JARILLA	8	2	3,675	4,65	36,675
Cd	1	JARILLA	8	3	1,3	1,3	10,075
Cd	1	JARILLA	0	1	1,425	3,075	29,225
Cd	1	JARILLA	0	2	3,325	1,75	26,875
Cd	1	JARILLA	0	3	3,875	3,6	28,075
Cd	2	GRAMA N	1	1	4,65	10,6	31,075
Cd	2	GRAMA N	1	2	3,1	17	56,95
Cd	2	GRAMA N	1	3	2,875	5,1	54,075
Cd	2	GRAMA N	2	1	9,125	11,775	24,05
Cd	2	GRAMA N	2	2	7,05	35,325	17,25
Cd	2	GRAMA N	2	3	5,875	44,425	92,075
Cd	2	GRAMA N	3	1	7,9	20,3	129,7
Cd	2	GRAMA N	3	2	8,975	18,55	25,15
Cd	2	GRAMA N	3	3	4,15	10,4	38,05
Cd	2	GRAMA N	4	1	2,15	26,525	9,875
Cd	2	GRAMA N	4	2	7,15	24,975	22,15
Cd	2	GRAMA N	4	3	6	16,775	121,425
Cd	2	GRAMA N	5	1	4,75	15,025	87,625
Cd	2	GRAMA N	5	2	4,05	29,275	31,825
Cd	2	GRAMA N	5	3	4,925	12,4	47,55
Cd	2	GRAMA N	6	1	4,725	10,35	10,85

Cd	2	GRAMA N	6	2	4	8,275	29,625
Cd	2	GRAMA N	6	3	4,35	8,925	118,375
Cd	2	GRAMA N	7	1	3,325	28,4	193,4
Cd	2	GRAMA N	7	2	4,875	15,575	32,625
Cd	2	GRAMA N	7	3	9,825	192	123,725
Cd	2	GRAMA N	8	1	6,2	7,25	110,325
Cd	2	GRAMA N	8	2	6,775	11,05	49,425
Cd	2	GRAMA N	8	3	5,175	9,725	114,525
Cd	2	GRAMA N	0	1	0,425	6,225	26,025
Cd	2	GRAMA N	0	2	0,025	4,5	23,75
Cd	2	GRAMA N	0	3	0	6,45	22,575
Cd	3	CARRIZO	1	1	1,925	5,4	64,425
Cd	3	CARRIZO	1	2	1,975	2,75	29,925
Cd	3	CARRIZO	1	3	0,65	1,8	46,775
Cd	3	CARRIZO	2	1	9,3	8,75	20,15
Cd	3	CARRIZO	2	2	10,9	6,225	84
Cd	3	CARRIZO	2	3	10,1	4,75	21,25
Cd	3	CARRIZO	3	1	3,2	3,875	45,825
Cd	3	CARRIZO	3	2	3,25	6,625	41,325
Cd	3	CARRIZO	3	3	5,6	10,575	35,375
Cd	3	CARRIZO	4	1	4,8	8,35	16,65
Cd	3	CARRIZO	4	2	7,525	7,175	23,1
Cd	3	CARRIZO	4	3	16,425	8,425	64,6
Cd	3	CARRIZO	5	1	0,375	1,6	20,025
Cd	3	CARRIZO	5	2	0,375	1,175	31
Cd	3	CARRIZO	5	3	3,55	1,375	33,9
Cd	3	CARRIZO	6	1	0	3,5	13,175
Cd	3	CARRIZO	6	2	4,875	3,35	73,95
Cd	3	CARRIZO	6	3	1,45	2,7	16,65
Cd	3	CARRIZO	7	1	2,1	2,175	24,6
Cd	3	CARRIZO	7	2	0,875	1,675	21,825
Cd	3	CARRIZO	7	3	1,125	2,1	34,25
Cd	3	CARRIZO	8	1	5,525	7,875	17,65
Cd	3	CARRIZO	8	2	0,275	3,25	19,95
Cd	3	CARRIZO	8	3	4,875	2,65	76,9
Cd	3	CARRIZO	0	1	0,125	2,325	11,625
Cd	3	CARRIZO	0	2	0,575	0,825	4,125
Cd	3	CARRIZO	0	3	0,075	1	5
Cd	4	TEPOZAN	1	1	15,975	2,875	26,275
Cd	4	TEPOZAN	1	2	8,125	3,575	28,2
Cd	4	TEPOZAN	1	3	11,4	10,725	29,95
Cd	4	TEPOZAN	2	1	2,8	2,425	15,575
Cd	4	TEPOZAN	2	2	3,15	4,575	22
Cd	4	TEPOZAN	2	3	3,175	7,475	24,4
Cd	4	TEPOZAN	3	1	10,775	8,025	35,575

Cd	4	TEPOZAN	3	2	9,975	10,225	28,375
Cd	4	TEPOZAN	3	3	3,975	1,825	34,95
Cd	4	TEPOZAN	4	1	5,8	5,725	22,375
Cd	4	TEPOZAN	4	2	3,325	20,825	21,575
Cd	4	TEPOZAN	4	3	1,3	5	33,125
Cd	4	TEPOZAN	5	1	6,375	5,35	29,925
Cd	4	TEPOZAN	5	2	2,25	6,625	21,4
Cd	4	TEPOZAN	5	3	0,875	3,05	25,375
Cd	4	TEPOZAN	6	1	2,75	7,3	23,975
Cd	4	TEPOZAN	6	2	7,975	4,05	26,75
Cd	4	TEPOZAN	6	3	3,8	3,425	21,75
Cd	4	TEPOZAN	7	1	20,65	5,025	21,4
Cd	4	TEPOZAN	7	2	4,95	4,725	20,95
Cd	4	TEPOZAN	7	3	2,8	2,3	24,5
Cd	4	TEPOZAN	8	1	1,125	5,925	15,6
Cd	4	TEPOZAN	8	2	3,7	2,325	20,775
Cd	4	TEPOZAN	8	3	17,825	2,55	12,325
Cd	4	TEPOZAN	0	1	1,1	1,225	28,9
Cd	4	TEPOZAN	0	2	0,475	0,8	25,975
Cd	4	TEPOZAN	0	3	0,35	0	29,3
Cd	5	TABAQUILLO	1	1	18,95	4,75	42,025
Cd	5	TABAQUILLO	1	2	43,1	4,3	29,075
Cd	5	TABAQUILLO	1	3	23,725	6,025	36,6
Cd	5	TABAQUILLO	2	1	35,825	25,575	23,125
Cd	5	TABAQUILLO	2	2	.	.	.
Cd	5	TABAQUILLO	2	3	.	.	.
Cd	5	TABAQUILLO	3	1	38,95	7,625	37,875
Cd	5	TABAQUILLO	3	2	30,425	11,525	57,275
Cd	5	TABAQUILLO	3	3	29,7	4,775	41,05
Cd	5	TABAQUILLO	4	1	24,4	7,6	39,45
Cd	5	TABAQUILLO	4	2	18,725	30,45	38,275
Cd	5	TABAQUILLO	4	3	.	.	.
Cd	5	TABAQUILLO	5	1	6,45	1,875	19,725
Cd	5	TABAQUILLO	5	2	46,25	3,475	25,075
Cd	5	TABAQUILLO	5	3	40,2	2,775	23,575
Cd	5	TABAQUILLO	6	1	14,225	6,475	44,925
Cd	5	TABAQUILLO	6	2	23,575	10,975	26,85
Cd	5	TABAQUILLO	6	3	.	.	.
Cd	5	TABAQUILLO	7	1	10,375	6,375	164
Cd	5	TABAQUILLO	7	2	13,45	6,425	41,625
Cd	5	TABAQUILLO	7	3	.	.	188,25
Cd	5	TABAQUILLO	8	1	30,25	15,15	114,8
Cd	5	TABAQUILLO	8	2	.	.	.
Cd	5	TABAQUILLO	8	3	34,725	9,775	82,8
Cd	5	TABAQUILLO	0	1	5,925	3,875	28,125

Cd	5	TABAQUILLO	0	2	6,05	2,075	27,2
Cd	5	TABAQUILLO	0	3	2,2	3,825	27,15
Cd	6	HIGUERILLA	1	1	3,025	15,525	96,45
Cd	6	HIGUERILLA	1	2	4,225	35,275	174
Cd	6	HIGUERILLA	1	3	2,75	118,75	121,75
Cd	6	HIGUERILLA	2	1	3,65	7,125	105,875
Cd	6	HIGUERILLA	2	2	2,3	101,5	97,7
Cd	6	HIGUERILLA	2	3	3	24,075	116,575
Cd	6	HIGUERILLA	3	1	1,775	28,35	169,5
Cd	6	HIGUERILLA	3	2	4,45	12,65	197,25
Cd	6	HIGUERILLA	3	3	1,525	14,375	214
Cd	6	HIGUERILLA	4	1	1,7	39	112,975
Cd	6	HIGUERILLA	4	2	8,675	27,625	129,875
Cd	6	HIGUERILLA	4	3	6,65	191,75	6,675
Cd	6	HIGUERILLA	5	1	2,425	6,975	19,775
Cd	6	HIGUERILLA	5	2	0,625	27,575	23,325
Cd	6	HIGUERILLA	5	3	0,75	12,15	24,375
Cd	6	HIGUERILLA	6	1	1,825	32,05	60,3
Cd	6	HIGUERILLA	6	2	1,325	38,1	88,45
Cd	6	HIGUERILLA	6	3	.	.	79,95
Cd	6	HIGUERILLA	7	1	0,75	16,45	21,625
Cd	6	HIGUERILLA	7	2	1,775	5,8	21,25
Cd	6	HIGUERILLA	7	3	0	21,175	20,975
Cd	6	HIGUERILLA	8	1	0,725	9,575	58,675
Cd	6	HIGUERILLA	8	2	3,575	33,975	66,425
Cd	6	HIGUERILLA	8	3	0,85	22,35	66,8
Cd	6	HIGUERILLA	0	1	0	13,6	26,225
Cd	6	HIGUERILLA	0	2	0,25	3,35	25,75
Cd	6	HIGUERILLA	0	3	0,025	1,975	26,1
Ni	1	JARILLA	1	1	0	20,275	75
Ni	1	JARILLA	1	2	0	23,925	89,75
Ni	1	JARILLA	1	3	0	21,7	50,25
Ni	1	JARILLA	2	1	0	27,525	57,8
Ni	1	JARILLA	2	2	0	25,425	79,3
Ni	1	JARILLA	2	3	0	18,575	76,225
Ni	1	JARILLA	3	1	0	16,4	53,5
Ni	1	JARILLA	3	2	0	20,825	118,45
Ni	1	JARILLA	3	3	0	11,3	57,25
Ni	1	JARILLA	4	1	57,8	17,2	73,1
Ni	1	JARILLA	4	2	.	97,1	73,8
Ni	1	JARILLA	4	3	21,6	21,95	0,25
Ni	1	JARILLA	5	1	.	10,775	106,95
Ni	1	JARILLA	5	2	.	46,4	77,4
Ni	1	JARILLA	5	3	4,3	22,45	80,75
Ni	1	JARILLA	6	1	5,625	18,325	43,675

Ni	1	JARILLA	6	2	2,275	9,25	123,5
Ni	1	JARILLA	6	3	4,2	15,6	64,925
Ni	1	JARILLA	7	1	0	10,95	85,825
Ni	1	JARILLA	7	2	0	11,175	93,85
Ni	1	JARILLA	7	3	0	25,9	114,1
Ni	1	JARILLA	8	1	2,975	17,975	48,075
Ni	1	JARILLA	8	2	12,525	7,25	65,2
Ni	1	JARILLA	8	3	1,1	10,8	54,375
Ni	1	JARILLA	0	1	0,55	2,69	26,75
Ni	1	JARILLA	0	2	0,3	2,14	25,95
Ni	1	JARILLA	0	3	2,85	1,905	23,35
Ni	2	GRAMA N	1	1	5,925	3,5	119,175
Ni	2	GRAMA N	1	2	5,55	4,805	135,075
Ni	2	GRAMA N	1	3	21,175	4,075	132,2
Ni	2	GRAMA N	2	1	7,05	2,33	38,4
Ni	2	GRAMA N	2	2	7,425	4,725	29,625
Ni	2	GRAMA N	2	3	13,05	7,7	111,625
Ni	2	GRAMA N	3	1	4,725	5,275	116,25
Ni	2	GRAMA N	3	2	0	4,685	108,15
Ni	2	GRAMA N	3	3	0	4,64	129,775
Ni	2	GRAMA N	4	1	0	6,36	45,975
Ni	2	GRAMA N	4	2	0	3,9	73
Ni	2	GRAMA N	4	3	0	7,045	75,5
Ni	2	GRAMA N	5	1	0	3,835	76
Ni	2	GRAMA N	5	2	0	5,23	133,825
Ni	2	GRAMA N	5	3	0	4,46	130,475
Ni	2	GRAMA N	6	1	.	4,165	90,25
Ni	2	GRAMA N	6	2	10,2	4,035	38,425
Ni	2	GRAMA N	6	3	9,9	4,23	127,75
Ni	2	GRAMA N	7	1	3,325	5,1	155,5
Ni	2	GRAMA N	7	2	6,325	5,945	92,675
Ni	2	GRAMA N	7	3	10,5	14,5	178
Ni	2	GRAMA N	8	1	13,3	2,55	119,625
Ni	2	GRAMA N	8	2	5,95	2,86	55,5
Ni	2	GRAMA N	8	3	8,4	4,585	114,6
Ni	2	GRAMA N	0	1	2,975	8,75	22,55
Ni	2	GRAMA N	0	2	0,05	13,625	25,45
Ni	2	GRAMA N	0	3	0	20,95	2,8
Ni	3	CARRIZO	1	1	0	12,75	118,025
Ni	3	CARRIZO	1	2	0	20,4	87,325
Ni	3	CARRIZO	1	3	0	11,225	60,5
Ni	3	CARRIZO	2	1	1,05	19,175	132,675
Ni	3	CARRIZO	2	2	0	18,6	55,8
Ni	3	CARRIZO	2	3	0	16,975	46,525
Ni	3	CARRIZO	3	1	0	13,525	110,325

Ni	3	CARRIZO	3	2	0	16,75	107,15
Ni	3	CARRIZO	3	3	0	31	122,225
Ni	3	CARRIZO	4	1	0	16,725	31,175
Ni	3	CARRIZO	4	2	0	20,975	43,4
Ni	3	CARRIZO	4	3	0	20,975	47,6
Ni	3	CARRIZO	5	1	0	11,2	57,525
Ni	3	CARRIZO	5	2	0	11,35	81,15
Ni	3	CARRIZO	5	3	0	18,225	99,675
Ni	3	CARRIZO	6	1	0	15,75	31,875
Ni	3	CARRIZO	6	2	0	13,225	67,275
Ni	3	CARRIZO	6	3	0	31,725	34,9
Ni	3	CARRIZO	7	1	0	13,3	94,9
Ni	3	CARRIZO	7	2	0	12,85	77,45
Ni	3	CARRIZO	7	3	0	24,325	97,575
Ni	3	CARRIZO	8	1	0	10,15	34,1
Ni	3	CARRIZO	8	2	0,175	12,9	42,35
Ni	3	CARRIZO	8	3	11,625	12,075	58,775
Ni	3	CARRIZO	0	1	0	11,55	89,275
Ni	3	CARRIZO	0	2	2,825	5,25	90,275
Ni	3	CARRIZO	0	3	0	8,3	88,825
Ni	4	TEPOZAN	1	1	56,725	14,625	84,225
Ni	4	TEPOZAN	1	2	19,275	9,8	91,05
Ni	4	TEPOZAN	1	3	57,725	24,3	134,425
Ni	4	TEPOZAN	2	1	10,85	8,6	54,975
Ni	4	TEPOZAN	2	2	15,525	8,9	52,45
Ni	4	TEPOZAN	2	3	9,35	20,475	57,55
Ni	4	TEPOZAN	3	1	26,975	10,625	120,725
Ni	4	TEPOZAN	3	2	34,55	41,3	84,875
Ni	4	TEPOZAN	3	3	0	6,65	106,325
Ni	4	TEPOZAN	4	1	10,45	11,775	49,35
Ni	4	TEPOZAN	4	2	8,55	14,8	58,175
Ni	4	TEPOZAN	4	3	0	11,875	48,675
Ni	4	TEPOZAN	5	1	30,1	24,475	98,625
Ni	4	TEPOZAN	5	2	0	12,975	65,7
Ni	4	TEPOZAN	5	3	0	8,25	43,625
Ni	4	TEPOZAN	6	1	0	9,7	38
Ni	4	TEPOZAN	6	2	20,275	8,75	77,675
Ni	4	TEPOZAN	6	3	4,225	8,65	41,35
Ni	4	TEPOZAN	7	1	6,225	17,5	72,65
Ni	4	TEPOZAN	7	2	1,075	16,4	65,55
Ni	4	TEPOZAN	7	3	2,6	13,4	82,775
Ni	4	TEPOZAN	8	1	35,2	19,225	45,275
Ni	4	TEPOZAN	8	2	80,4	9,125	45,025
Ni	4	TEPOZAN	8	3	7,725	18,3	40,55
Ni	4	TEPOZAN	0	1	16,725	8,575	87,025

Ni	4	TEPOZAN	0	2	26	8,625	80,15
Ni	4	TEPOZAN	0	3	20,575	9,525	92,75
Ni	5	TABAQUILLO	1	1	22,525	14,775	120,125
Ni	5	TABAQUILLO	1	2	32,7	10,75	80,55
Ni	5	TABAQUILLO	1	3	14,7	18	97,925
Ni	5	TABAQUILLO	2	1	6,275	25,6	45,925
Ni	5	TABAQUILLO	2	2	.	.	.
Ni	5	TABAQUILLO	2	3	.	.	.
Ni	5	TABAQUILLO	3	1	24,775	16,25	105,325
Ni	5	TABAQUILLO	3	2	48,55	20,25	106,8
Ni	5	TABAQUILLO	3	3	14,55	18,7	120,5
Ni	5	TABAQUILLO	4	1	23,575	12,475	57,425
Ni	5	TABAQUILLO	4	2	35,675	50,875	60,05
Ni	5	TABAQUILLO	4	3	.	.	.
Ni	5	TABAQUILLO	5	1	13,8	9,875	51,25
Ni	5	TABAQUILLO	5	2	50,8	15,7	63,175
Ni	5	TABAQUILLO	5	3	38,4	10,75	62,15
Ni	5	TABAQUILLO	6	1	16,75	7,875	42,8
Ni	5	TABAQUILLO	6	2	8,475	9,275	42,7
Ni	5	TABAQUILLO	6	3	.	.	.
Ni	5	TABAQUILLO	7	1	2,85	14,45	11,75
Ni	5	TABAQUILLO	7	2	16,525	22,225	77,3
Ni	5	TABAQUILLO	7	3	6,3	0	0
Ni	5	TABAQUILLO	8	1	88,225	29,175	67
Ni	5	TABAQUILLO	8	2	21,6	0	105,5
Ni	5	TABAQUILLO	8	3	0	27,05	97,775
Ni	5	TABAQUILLO	0	1	82,075	15,9	89,3
Ni	5	TABAQUILLO	0	2	0	10,825	89,45
Ni	5	TABAQUILLO	0	3	65,475	16,15	82,175
Ni	6	HIGUERILLA	1	1	20,125	30,975	196,25
Ni	6	HIGUERILLA	1	2	15,2	52,925	200
Ni	6	HIGUERILLA	1	3	33,975	55,475	124,8
Ni	6	HIGUERILLA	2	1	26,45	13,75	133,85
Ni	6	HIGUERILLA	2	2	27,3	47,9	110,075
Ni	6	HIGUERILLA	2	3	17,525	29,325	104,15
Ni	6	HIGUERILLA	3	1	1,2	39,375	120,125
Ni	6	HIGUERILLA	3	2	8,3	25,55	239
Ni	6	HIGUERILLA	3	3	3,775	19,45	172
Ni	6	HIGUERILLA	4	1	13,025	42,85	104,35
Ni	6	HIGUERILLA	4	2	20,875	30,35	114,05
Ni	6	HIGUERILLA	4	3	23,825	63,5	94,7
Ni	6	HIGUERILLA	5	1	9,25	10,45	75,45
Ni	6	HIGUERILLA	5	2	4,7	41,975	72,35
Ni	6	HIGUERILLA	5	3	5,125	19,5	82,425
Ni	6	HIGUERILLA	6	1	4,025	18,225	31,075

Ni	6	HIGUERILLA	6	2	5,475	16,1	45,725
Ni	6	HIGUERILLA	6	3	.	.	55,95
Ni	6	HIGUERILLA	7	1	2,95	21,1	55,25
Ni	6	HIGUERILLA	7	2	9,35	11,325	56,425
Ni	6	HIGUERILLA	7	3	1,475	10,375	36,8
Ni	6	HIGUERILLA	8	1	1,8	11,55	22,475
Ni	6	HIGUERILLA	8	2	8,05	12,725	23,225
Ni	6	HIGUERILLA	8	3	1,65	13,3	17,25
Ni	6	HIGUERILLA	0	1	7,9	24,2	80,8
Ni	6	HIGUERILLA	0	2	8,45	10,85	77,15
Ni	6	HIGUERILLA	0	3	9,2	8,575	83,7
Pb	1	JARILLA	1	1	3,425	41,2	214,075
Pb	1	JARILLA	1	2	5,425	31,975	208,475
Pb	1	JARILLA	1	3	57,725	16,4	185,425
Pb	1	JARILLA	2	1	6,925	22,325	270,525
Pb	1	JARILLA	2	2	10,975	31,75	244,375
Pb	1	JARILLA	2	3	21,925	23,35	231,875
Pb	1	JARILLA	3	1	9,475	38,2	200,625
Pb	1	JARILLA	3	2	13,725	27,95	151,725
Pb	1	JARILLA	3	3	12,65	12,55	189,8
Pb	1	JARILLA	4	1	54,85	13,2	244,2
Pb	1	JARILLA	4	2	7,5	18,6	187,775
Pb	1	JARILLA	4	3	12,525	17,25	1372
Pb	1	JARILLA	5	1	9,1	11,75	242,875
Pb	1	JARILLA	5	2	9	31,625	112,45
Pb	1	JARILLA	5	3	15,125	30,175	184,525
Pb	1	JARILLA	6	1	18,65	40,825	189,475
Pb	1	JARILLA	6	2	25,575	14,175	259,825
Pb	1	JARILLA	6	3	35,575	38	213,125
Pb	1	JARILLA	7	1	12,475	20,25	126,775
Pb	1	JARILLA	7	2	6,475	23,55	169,475
Pb	1	JARILLA	7	3	1,225	6,45	230,75
Pb	1	JARILLA	8	1	4,475	31	217,95
Pb	1	JARILLA	8	2	15,45	14,625	208,875
Pb	1	JARILLA	8	3	5,1	13,975	80,825
Pb	1	JARILLA	0	1	4,8	4,025	283
Pb	1	JARILLA	0	2	0,15	9,325	318
Pb	1	JARILLA	0	3	0,2	7,8	334,5
Pb	2	GRAMA N	1	1	9,275	13,475	170,325
Pb	2	GRAMA N	1	2	5,65	18,95	244,075
Pb	2	GRAMA N	1	3	24,275	33,025	164,25
Pb	2	GRAMA N	2	1	4,025	12,625	135,575
Pb	2	GRAMA N	2	2	2,5	30,925	117,25
Pb	2	GRAMA N	2	3	4,875	27,95	1777,5
Pb	2	GRAMA N	3	1	9,7	31,075	169,5

Pb	2	GRAMA N	3	2	7,6	19,55	236,325
Pb	2	GRAMA N	3	3	11,775	20,1	245,05
Pb	2	GRAMA N	4	1	1,675	23,825	215
Pb	2	GRAMA N	4	2	1,725	14,35	138,4
Pb	2	GRAMA N	4	3	4,25	46,725	143
Pb	2	GRAMA N	5	1	5,825	16,2	264,475
Pb	2	GRAMA N	5	2	2,125	42,025	186,85
Pb	2	GRAMA N	5	3	2,55	22,05	238
Pb	2	GRAMA N	6	1	2,875	17,025	263,55
Pb	2	GRAMA N	6	2	4,525	28,475	92,1
Pb	2	GRAMA N	6	3	4,875	43,225	124,5
Pb	2	GRAMA N	7	1	4,1	17,05	139
Pb	2	GRAMA N	7	2	5,025	21,5	143,8
Pb	2	GRAMA N	7	3	4,2	54,675	141
Pb	2	GRAMA N	8	1	4,25	14,025	145
Pb	2	GRAMA N	8	2	8,425	19,25	187,05
Pb	2	GRAMA N	8	3	9,5	31,05	142,5
Pb	2	GRAMA N	0	1	0,525	2,625	322
Pb	2	GRAMA N	0	2	1,275	6,375	311,5
Pb	2	GRAMA N	0	3	3,675	18,375	629,5
Pb	3	CARRIZO	1	1	13,2	20,975	132
Pb	3	CARRIZO	1	2	11,9	45,075	191,7
Pb	3	CARRIZO	1	3	1,55	13,425	231,3
Pb	3	CARRIZO	2	1	14,85	31,275	125,05
Pb	3	CARRIZO	2	2	13,125	33,75	1547,5
Pb	3	CARRIZO	2	3	2,725	25,8	142,05
Pb	3	CARRIZO	3	1	5,975	24,525	246,825
Pb	3	CARRIZO	3	2	3,7	43,3	220,575
Pb	3	CARRIZO	3	3	12,225	23,9	185,375
Pb	3	CARRIZO	4	1	3,125	42,3	95,5
Pb	3	CARRIZO	4	2	5,95	36,225	128,325
Pb	3	CARRIZO	4	3	8,175	32,325	228,475
Pb	3	CARRIZO	5	1	7,25	13,925	103,25
Pb	3	CARRIZO	5	2	6,675	9,225	78,1
Pb	3	CARRIZO	5	3	19,325	26,1	85,8
Pb	3	CARRIZO	6	1	1,55	19,225	34,4
Pb	3	CARRIZO	6	2	10,275	31,1	45,925
Pb	3	CARRIZO	6	3	0,6	22,25	10,225
Pb	3	CARRIZO	7	1	6,25	14,525	26,95
Pb	3	CARRIZO	7	2	6,975	15,975	22,275
Pb	3	CARRIZO	7	3	9,55	18,575	25,3
Pb	3	CARRIZO	8	1	4,375	32,725	9,175
Pb	3	CARRIZO	8	2	1,975	40,9	11,2
Pb	3	CARRIZO	8	3	11,425	11,425	47,825
Pb	3	CARRIZO	0	1	3,95	19,75	660,5

Pb	3	CARRIZO	0	2	1,9	9,5	667,5
Pb	3	CARRIZO	0	3	2,375	11,875	728
Pb	4	TEPOZAN	1	1	67,85	19,25	12,625
Pb	4	TEPOZAN	1	2	33	16,725	5,725
Pb	4	TEPOZAN	1	3	47,15	38,45	11,8
Pb	4	TEPOZAN	2	1	16,525	14,45	1,575
Pb	4	TEPOZAN	2	2	19,85	22,525	4,45
Pb	4	TEPOZAN	2	3	14,475	33,65	71,85
Pb	4	TEPOZAN	3	1	32,85	24,775	62,275
Pb	4	TEPOZAN	3	2	43,05	57,5	38,35
Pb	4	TEPOZAN	3	3	23,05	8,975	23,5
Pb	4	TEPOZAN	4	1	24,45	27,1	9,875
Pb	4	TEPOZAN	4	2	8,325	52,1	3,575
Pb	4	TEPOZAN	4	3	13	24,4	164,3
Pb	4	TEPOZAN	5	1	35,175	19,25	124,55
Pb	4	TEPOZAN	5	2	16,325	14,25	98,5
Pb	4	TEPOZAN	5	3	5,225	11,275	130,95
Pb	4	TEPOZAN	6	1	18,2	44,65	179,925
Pb	4	TEPOZAN	6	2	41,725	43,125	115,975
Pb	4	TEPOZAN	6	3	20,95	23,1	108,225
Pb	4	TEPOZAN	7	1	79,925	17,925	119,4
Pb	4	TEPOZAN	7	2	41,025	20,575	112,9
Pb	4	TEPOZAN	7	3	17,2	4,675	142,45
Pb	4	TEPOZAN	8	1	7,525	9,85	83,175
Pb	4	TEPOZAN	8	2	22,425	6,1	94,85
Pb	4	TEPOZAN	8	3	24,525	10,575	71,7
Pb	4	TEPOZAN	0	1	2,2	1,625	662,5
Pb	4	TEPOZAN	0	2	1,525	0,45	567
Pb	4	TEPOZAN	0	3	12,725	1	874
Pb	5	TABAQUILLO	1	1	38,15	3,25	241,275
Pb	5	TABAQUILLO	1	2	68,45	4,85	165,5
Pb	5	TABAQUILLO	1	3	36,35	8,075	189,3
Pb	5	TABAQUILLO	2	1	1,475	33,225	159,275
Pb	5	TABAQUILLO	2	2	.	.	.
Pb	5	TABAQUILLO	2	3	.	.	.
Pb	5	TABAQUILLO	3	1	17	9,775	205,2
Pb	5	TABAQUILLO	3	2	57,75	10,775	1194
Pb	5	TABAQUILLO	3	3	25,35	6,425	219,15
Pb	5	TABAQUILLO	4	1	26,225	16,325	274,15
Pb	5	TABAQUILLO	4	2	30,425	31,35	1229
Pb	5	TABAQUILLO	4	3	.	.	.
Pb	5	TABAQUILLO	5	1	14,325	1,4	159,25
Pb	5	TABAQUILLO	5	2	94,525	11,55	127,8
Pb	5	TABAQUILLO	5	3	73,55	13,05	117,975
Pb	5	TABAQUILLO	6	1	14,45	3,4	181,225

Pb	5	TABAQUILLO	6	2	11,775	5,55	116,175
Pb	5	TABAQUILLO	6	3	.	.	.
Pb	5	TABAQUILLO	7	1	117,675	4,85	271,225
Pb	5	TABAQUILLO	7	2	18,525	7,4	170,95
Pb	5	TABAQUILLO	7	3	.	.	.
Pb	5	TABAQUILLO	8	1	45,15	13,325	1510,5
Pb	5	TABAQUILLO	8	2	0	0	1620,5
Pb	5	TABAQUILLO	8	3	63,575	19,55	236,2
Pb	5	TABAQUILLO	0	1	6,4	32	650
Pb	5	TABAQUILLO	0	2	7,475	37,375	4
Pb	5	TABAQUILLO	0	3	2,65	13,25	28
Pb	6	HIGUERILLA	1	1	16,75	8,475	242,25
Pb	6	HIGUERILLA	1	2	12,7	17,525	2255
Pb	6	HIGUERILLA	1	3	12,45	75,325	2760
Pb	6	HIGUERILLA	2	1	15,275	5,75	2592,5
Pb	6	HIGUERILLA	2	2	10,4	41,15	2062
Pb	6	HIGUERILLA	2	3	9,45	18,35	2324,5
Pb	6	HIGUERILLA	3	1	11,975	32,575	1545
Pb	6	HIGUERILLA	3	2	13,8	16,925	3330,5
Pb	6	HIGUERILLA	3	3	6	11,45	2610,5
Pb	6	HIGUERILLA	4	1	11,6	32,6	2515
Pb	6	HIGUERILLA	4	2	10,275	28,425	2597
Pb	6	HIGUERILLA	4	3	15,575	1,95	2343,5
Pb	6	HIGUERILLA	5	1	19,675	2,35	276
Pb	6	HIGUERILLA	5	2	6,95	2,025	420,5
Pb	6	HIGUERILLA	5	3	13,5	1,25	1353
Pb	6	HIGUERILLA	6	1	8,4	9,75	1319,5
Pb	6	HIGUERILLA	6	2	9,375	7,125	1007
Pb	6	HIGUERILLA	6	3	.	.	1211
Pb	6	HIGUERILLA	7	1	9,425	3,95	49
Pb	6	HIGUERILLA	7	2	11,075	2,7	64
Pb	6	HIGUERILLA	7	3	3,75	28,45	59
Pb	6	HIGUERILLA	8	1	3,375	12,85	618
Pb	6	HIGUERILLA	8	2	7,3	15,95	1080,5
Pb	6	HIGUERILLA	8	3	4,975	15,5	769,5
Pb	6	HIGUERILLA	0	1	4,075	0,525	186,5
Pb	6	HIGUERILLA	0	2	9,825	0,425	28
Pb	6	HIGUERILLA	0	3	9,825	1,425	186,5
Zn	1	JARILLA	1	1	33,225	53,625	652
Zn	1	JARILLA	1	2	65,75	58,125	668
Zn	1	JARILLA	1	3	69,25	84,75	631,5
Zn	1	JARILLA	2	1	36,5	66,4	684,5
Zn	1	JARILLA	2	2	34,075	56,6	697
Zn	1	JARILLA	2	3	80,25	58,825	703
Zn	1	JARILLA	3	1	82,25	50,8	655

Zn	1	JARILLA	3	2	90,75	117,25	634
Zn	1	JARILLA	3	3	37,3	53,65	681,5
Zn	1	JARILLA	4	1	85,75	43,95	752,5
Zn	1	JARILLA	4	2	84,5	76,25	787
Zn	1	JARILLA	4	3	37	49,775	746,5
Zn	1	JARILLA	5	1	35,15	57,975	710,5
Zn	1	JARILLA	5	2	21,85	89	509,5
Zn	1	JARILLA	5	3	22,7	229	598
Zn	1	JARILLA	6	1	19,2	62,375	613,5
Zn	1	JARILLA	6	2	77,5	49,175	840
Zn	1	JARILLA	6	3	55,5	66,5	737,5
Zn	1	JARILLA	7	1	49,25	102,5	590,5
Zn	1	JARILLA	7	2	30,975	62,8	562,5
Zn	1	JARILLA	7	3	43,75	47,35	650,5
Zn	1	JARILLA	8	1	28,25	88	680
Zn	1	JARILLA	8	2	43,75	50,625	686
Zn	1	JARILLA	8	3	57,75	67,775	604
Zn	1	JARILLA	0	1	37,5	122,75	737,5
Zn	1	JARILLA	0	2	52,5	63,9	753,5
Zn	1	JARILLA	0	3	97	161,5	751
Zn	2	GRAMA N	1	1	49	168,25	578,5
Zn	2	GRAMA N	1	2	125,25	69,225	686,5
Zn	2	GRAMA N	1	3	34,5	170,5	579,5
Zn	2	GRAMA N	2	1	27,25	38,05	605,5
Zn	2	GRAMA N	2	2	48	65,325	564
Zn	2	GRAMA N	2	3	52,25	61	772
Zn	2	GRAMA N	3	1	110,75	127,25	645
Zn	2	GRAMA N	3	2	159	88	593
Zn	2	GRAMA N	3	3	107,5	104,25	615
Zn	2	GRAMA N	4	1	23,175	67,45	560,5
Zn	2	GRAMA N	4	2	34,725	68,825	569,5
Zn	2	GRAMA N	4	3	68,5	83,75	780,5
Zn	2	GRAMA N	5	1	83,5	164,25	781
Zn	2	GRAMA N	5	2	72	69,55	712,5
Zn	2	GRAMA N	5	3	81,75	117,25	714
Zn	2	GRAMA N	6	1	37,45	56,925	781,5
Zn	2	GRAMA N	6	2	45	150,75	557
Zn	2	GRAMA N	6	3	56,5	61,675	695
Zn	2	GRAMA N	7	1	36,75	102	555
Zn	2	GRAMA N	7	2	67	107,5	602,5
Zn	2	GRAMA N	7	3	143,25	224	640,75
Zn	2	GRAMA N	8	1	85,25	45,175	655
Zn	2	GRAMA N	8	2	59,25	125,5	602
Zn	2	GRAMA N	8	3	86,75	64,85	718,5
Zn	2	GRAMA N	0	1	48,25	297,5	757

Zn	2	GRAMA N	0	2	42,5	238,25	715
Zn	2	GRAMA N	0	3	33,75	267,75	730
Zn	3	CARRIZO	1	1	83,75	86	709,5
Zn	3	CARRIZO	1	2	62,25	127,25	653,5
Zn	3	CARRIZO	1	3	34,925	141,5	670,5
Zn	3	CARRIZO	2	1	39	66,75	513
Zn	3	CARRIZO	2	2	46,5	178,25	686,5
Zn	3	CARRIZO	2	3	66,25	61,725	568
Zn	3	CARRIZO	3	1	79	171,75	704
Zn	3	CARRIZO	3	2	37,5	103	655
Zn	3	CARRIZO	3	3	107,75	169	689
Zn	3	CARRIZO	4	1	29,575	69,875	553,5
Zn	3	CARRIZO	4	2	58,25	200	548
Zn	3	CARRIZO	4	3	65,75	84,75	646
Zn	3	CARRIZO	5	1	62,5	13,2	555
Zn	3	CARRIZO	5	2	96,5	168,75	640,5
Zn	3	CARRIZO	5	3	60,5	152,75	556,5
Zn	3	CARRIZO	6	1	26,825	71,75	537
Zn	3	CARRIZO	6	2	30,9	153,25	699,5
Zn	3	CARRIZO	6	3	28,05	64,175	546,5
Zn	3	CARRIZO	7	1	83,5	63,45	617,5
Zn	3	CARRIZO	7	2	35,125	65	584,5
Zn	3	CARRIZO	7	3	163	67,725	608
Zn	3	CARRIZO	8	1	34,875	117	492,5
Zn	3	CARRIZO	8	2	36,5	111,25	507,5
Zn	3	CARRIZO	8	3	39,5	53,7	715
Zn	3	CARRIZO	0	1	32,85	435,25	742
Zn	3	CARRIZO	0	2	62	156,25	756,5
Zn	3	CARRIZO	0	3	32,825	63,75	786
Zn	4	TEPOZAN	1	1	123,75	90,5	713
Zn	4	TEPOZAN	1	2	93,5	64,975	573
Zn	4	TEPOZAN	1	3	107,75	76,5	623,5
Zn	4	TEPOZAN	2	1	39,5	49,35	584,5
Zn	4	TEPOZAN	2	2	33,25	48,375	548
Zn	4	TEPOZAN	2	3	34,975	78,5	571
Zn	4	TEPOZAN	3	1	114,5	64	550
Zn	4	TEPOZAN	3	2	69,5	72,5	561,5
Zn	4	TEPOZAN	3	3	44,25	271	635
Zn	4	TEPOZAN	4	1	57,75	61,65	625,5
Zn	4	TEPOZAN	4	2	38,75	107	548
Zn	4	TEPOZAN	4	3	33	58,45	575
Zn	4	TEPOZAN	5	1	123	86,5	559
Zn	4	TEPOZAN	5	2	33	101	608,5
Zn	4	TEPOZAN	5	3	28,525	52,925	629
Zn	4	TEPOZAN	6	1	35,85	71,75	606,5

Zn	4	TEPOZAN	6	2	68,5	55,95	587
Zn	4	TEPOZAN	6	3	56,5	138,5	531,5
Zn	4	TEPOZAN	7	1	158,75	95,25	556
Zn	4	TEPOZAN	7	2	42	64,8	636,5
Zn	4	TEPOZAN	7	3	81,25	100	557,5
Zn	4	TEPOZAN	8	1	34,275	66,5	553
Zn	4	TEPOZAN	8	2	45,75	73,75	579,5
Zn	4	TEPOZAN	8	3	87,75	61,4	576,5
Zn	4	TEPOZAN	0	1	32,35	59,7	490
Zn	4	TEPOZAN	0	2	26,45	56,875	697,5
Zn	4	TEPOZAN	0	3	35,6	64,525	772,5
Zn	5	TABAQUILLO	1	1	120,75	62,325	609,5
Zn	5	TABAQUILLO	1	2	136,5	58,925	607,5
Zn	5	TABAQUILLO	1	3	143,5	61,475	667,5
Zn	5	TABAQUILLO	2	1	72,5	192,75	650,5
Zn	5	TABAQUILLO	2	2	.	.	.
Zn	5	TABAQUILLO	2	3	.	.	.
Zn	5	TABAQUILLO	3	1	129	92	651,5
Zn	5	TABAQUILLO	3	2	128	83,25	713
Zn	5	TABAQUILLO	3	3	102,5	77,75	573
Zn	5	TABAQUILLO	4	1	120,75	56,25	660,5
Zn	5	TABAQUILLO	4	2	0,725	17,65	585
Zn	5	TABAQUILLO	4	3	.	.	.
Zn	5	TABAQUILLO	5	1	0,725	69,25	592,5
Zn	5	TABAQUILLO	5	2	206,75	97,5	564
Zn	5	TABAQUILLO	5	3	161	52,25	633
Zn	5	TABAQUILLO	6	1	37,475	35,75	626
Zn	5	TABAQUILLO	6	2	82,25	45,25	1040
Zn	5	TABAQUILLO	6	3	.	.	.
Zn	5	TABAQUILLO	7	1	280	111,75	707
Zn	5	TABAQUILLO	7	2	77	242,75	7
Zn	5	TABAQUILLO	7	3	.	.	.
Zn	5	TABAQUILLO	8	1	12,05	255,25	764
Zn	5	TABAQUILLO	8	2	.	.	779,5
Zn	5	TABAQUILLO	8	3	194,75	138,75	810
Zn	5	TABAQUILLO	0	1	134,25	185,25	742,5
Zn	5	TABAQUILLO	0	2	139,75	101,5	744,5
Zn	5	TABAQUILLO	0	3	120	128	754,5
Zn	6	HIGUERILLA	1	1	156	116	777,5
Zn	6	HIGUERILLA	1	2	104	146,25	771
Zn	6	HIGUERILLA	1	3	35,75	163,5	661
Zn	6	HIGUERILLA	2	1	32,3	86,25	697
Zn	6	HIGUERILLA	2	2	89,5	224,5	583
Zn	6	HIGUERILLA	2	3	76	171,25	594,5
Zn	6	HIGUERILLA	3	1	84,75	230,5	749,5

Zn	6	HIGUERILLA	3	2	59,75	99	710
Zn	6	HIGUERILLA	3	3	38,25	82,25	782,5
Zn	6	HIGUERILLA	4	1	43,25	119,75	690
Zn	6	HIGUERILLA	4	2	93	68,275	677,5
Zn	6	HIGUERILLA	4	3	55	166,75	573
Zn	6	HIGUERILLA	5	1	75,25	61,825	553
Zn	6	HIGUERILLA	5	2	59,5	122,25	661,5
Zn	6	HIGUERILLA	5	3	70,5	89	570
Zn	6	HIGUERILLA	6	1	36,3	137,5	773
Zn	6	HIGUERILLA	6	2	25,75	59	651
Zn	6	HIGUERILLA	6	3	.	.	703
Zn	6	HIGUERILLA	7	1	80	115,75	551
Zn	6	HIGUERILLA	7	2	47	238,75	541,5
Zn	6	HIGUERILLA	7	3	34	152,75	647
Zn	6	HIGUERILLA	8	1	24,85	156,5	617
Zn	6	HIGUERILLA	8	2	36,725	111,75	584
Zn	6	HIGUERILLA	8	3	31,35	62	594,5
Zn	6	HIGUERILLA	0	1	62,5	163,5	180
Zn	6	HIGUERILLA	0	2	51,5	180,25	750
Zn	6	HIGUERILLA	0	3	69,5	98,25	749,5