



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"

"EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE
CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS
CONSTITUYENTES Y CONTAMINANTES EN
DIFERENTES ESPECIES HORTÍCOLAS CON FLOR Y
FRUTO EN EL MUNICIPIO DE IXMIQUILPAN, HGO".

T E S I S:

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO

P R E S E N T A :

GUADALUPE BUENROSTRO RAMÍREZ

DIRECTOR:

BIÓLOGO RAMIRO RÍOS GÓMEZ.

ASESOR:

M. en C. A. LOURDES CASTILLO GRANADA

MÉXICO, D. F.

SEPTIEMBRE DE 1995

FALLA DE ORIGEN



LO HERMANO
ES
DE NUESTRA REFLEXION



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Espectroscopia
L-328 y Laboratorio L-314 Campo II de la Facultad de Estudios
Profesionales "Zaragoza". UNAM

Ha sido aceptado para su presentación en:

*Congreso Anual de Botánica. Del 6 al 10 de Noviembre.
Cuernavaca, Morelos. México.

*Simposio Universitario de Edafología. Del 25 al 27 de octubre.
Cd. Universitaria, D. F., México.

DEDICATORIAS

A mis padres.

**Sra. Lucia Ramírez R.
Sr. Miguel Buenrostro G.**

Por haberme dado la vida, apoyo, estímulo, confianza y comprensión; gracias ha esto he logrado una de mis más grandes metas, mi carrera profesional, la mejor herencia que he recibido de ellos.

A mis hermanos

Ruben

Por su inteligencia y grandeza como persona, agradezco el apoyo económico y moral que me dio a lo largo de mis estudios.

Fortunato

Quien ha tenido que enfrentar retos difíciles en su vida, sin perder la fe y el deseo de ayudar. Gracias por su actitud, sin la cual no hubiera podido avanzar en mis estudios.

Jesús Alejandro

Por tu apoyo y cariño.

María y Elvira

Que a su estilo saben estar presentes y demostrar su interés y afecto. Gracias por su contribución y cariño.

A mis sobrinos.

Maribel, Rosa Liliana e Erika Y.

Como un ejemplo de que cuando se quiere se pueden superar los obstáculos que se presentan.

Sonia K. y Omar

Por esa hermosa sonrisa y por la esperanza de vida que trae consigo un hermoso bebe.

A la memoria de

Sebastián Márquez F.

La mejor herencia que puede recibir de ti es esa manera tan especial de ver las cosas positivamente.

AGRADECIMIENTO

A MI DIRECTOR

Biólogo Ramiro Ríos Gómez.

Por sus valiosos conocimientos transmitidos, su paciencia, comprensión así como a su enorme apoyo incondicional al brindarme espacio, tiempo y trabajo durante el desarrollo de este trabajo.

A MI ASESOR

M. en C. A. Lourdes Castillo Granada.

Por transmitirme sus conocimientos y brindarme su tiempo y apoyo durante la realización de este trabajo.

M. en C. Armando Cervantes Sandoval.

Por su apoyo técnico y asesoría para el análisis estadístico del presente trabajo.

Biólogo Maricela Arteaga Mejía y M. en C. Miguel Castillo González.

Por la asesoría técnica en el manejo de las muestras.

ÍNDICE

	Página
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. FUNDAMENTACION	
3.1 Generalidades	3
3.2 Elementos metálicos	22
3.3 Interacciones	36
3.4 Especies químicas	38
3.5 Espectroscopia de Absorción Atómica	40
3.6 Descripción del área de estudio	42
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	43
5. OBJETIVOS	45
6. HIPÓTESIS	46
7. MATERIAL Y EQUIPO	47
8. DESARROLLO EXPERIMENTAL	49
9. RESULTADOS	53
10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	82
11. CONCLUSIONES	90
12. LITERATURA CITADA	92

1. RESUMEN

Desde hace algunos años la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se ha visto afectada por contaminantes de muy diverso origen. Pero la mayoría de ellos no permanecen en el lugar donde se generan sino que se dispersan por aire, suelo y agua.

En el Estado de Hidalgo se localiza el municipio de Ixmiquilpan en donde se utilizan aguas residuales procedentes de la Ciudad de México y Area Conurbada así como también aguas mezcladas (aguas residuales y aguas de manantial) para el riego agrícola.

Esta aguas contienen una cantidad considerable de contaminantes, como metales pesados que afectan a la cadena natural agua-suelo-planta.

Los metales que contienen las aguas residuales son depositados en los suelos agrícolas. Las plantas incorporan sus nutrimentos necesarios principalmente a través de sus raíces desde la solución del suelo y posteriormente son movilizados hacia las partes aéreas.

Considerando lo anterior es importante evaluar los niveles de concentración de los elementos contaminantes y constituyentes en los tejidos de cultivos hortícolas cultivados en esta región. La evaluación se realizó mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica.

De acuerdo a los resultados analíticos se concluyó que en forma general el Cu, Mg, K, Na y Ca mostraron niveles suficientes o normales, mientras Zn mostro niveles ligeramente bajos. Por otro lado el Fe presento niveles ligeramente altos.

Se presentaron cantidades considerables de Cr, Cd, Pb y Ni los cuales de acuerdo a la literatura para el caso de Cr y Cd presentan en forma general concentraciones tóxicas o excesivas.

2. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico y el crecimiento demográfico son factores que contribuyen a la incorporación de manera continua, cantidades crecientes de un gran número de sustancias químicas, sintéticas y naturales. Uno de los medios por los cuales estas sustancias son arrojadas y distribuidas al ambiente son las aguas residuales, las cuales representan el agua desechada por industrias, hogares y pluvial, que en forma natural depuran las ciudades (Alvarez, *et al.* 1993).

Debido a la preferencia de los agricultores por estas aguas y la escasez de agua de mejor calidad, se ha generado la práctica común y extensiva de regar zonas agrícolas con aguas residuales (Albert, 1988; González *et al.* 1986).

Dentro del Estado de Hidalgo se localiza el Municipio de Ixmiquilpan, el cual representa uno de los principales productores de hortalizas para abastecer en buena medida al mercado del centro del país, este municipio utiliza las aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México para irrigar una gran extensión de tierras de cultivo (Quadri, 1989).

Se ha demostrado que dichas aguas residuales contienen una gran variedad de nutrientes, entre los que se encuentran elementos como Ca, Mg, Zn, Cu, Fe y elementos considerados como tóxicos aún a bajas concentraciones como son Cr, Cd, Hg, Pb, As, entre otros (Filardo, *et al.* 1994).

Por lo que es posible que al utilizarlas para el riego de forrajes, granos, verduras y hortalizas, se contaminen acumulando niveles tóxicos de estos elementos.

Esta tendencia puede ser muy peligrosa ya que las plantas forman el primer eslabón de las cadenas tróficas en los ecosistemas, lo cual atentaría finalmente contra la salud humana por acumulación de metales tóxicos en los seres vivos, causando en la mayoría de los casos efectos deletéreos (Barceló, 1990).

La presente investigación tiene la finalidad de evaluar los niveles de concentración de los elementos constituyentes y contaminantes en tejidos de ocho diferentes cultivos hortícolas del Municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica con llama.

3. FUNDAMENTACION DEL TEMA

3.1 Generalidades

El desarrollo tecnológico, el crecimiento demográfico, la industrialización y el uso de nuevos métodos de agricultura tecnificada son factores que contribuyen a que se incorporen en el ambiente de manera continua, cantidades crecientes de un gran número de sustancias químicas, sintéticas y naturales.

El principio de Lavoisier establece que la materia y la energía no se crean ni se destruyen, solamente se transforman. Esto es, cualquier forma o cantidad de materia o energía que entre a un sistema, por ejemplo un organismo vivo, debe acumularse, transformarse o salir de él. En el caso de cualquier sistema abierto, la energía y la materia provienen de otros sistemas en las mismas condiciones con los que está en continuo intercambio (Albert, 1988).

Cuando las formas de materia o energía son de tal clase que los seres vivos o el ambiente abiótico los puede asimilar, transformar o eliminar continuamente, se puede considerar que existe una situación de equilibrio. Sin embargo, en la actualidad debido al gran aumento en la cantidad de sustancias que entran continuamente en el ambiente, en muchos casos se ha rebasado la capacidad de los sistemas para transformarlas, o bien, los sistemas carecen de la capacidad para asimilar, modificar o eliminar las sustancias contaminantes, por lo tanto, se ha alterado el equilibrio ambiental (Stanley, 1993). Como consecuencia sobreviene la acumulación de materia o energía en los sistemas. Esta acumulación se conoce como contaminación.

Por lo común los efectos adversos ocurren por que las sustancias no se pueden eliminar fácilmente en el sistema y exceden el nivel basal, o bien, por que sólo pueden pasar sin cambio de un sistema a otro, lo que da como resultado una acumulación excesiva en un punto final.

A las formas de materia que exceden las concentraciones naturales y causan efectos adversos en él, se les consideran contaminantes tóxicos (Albert, 1988).

Producto de esta contaminación son las aguas residuales, que son una mezcla compleja conteniendo agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos. Entre sus constituyentes se encuentran microorganismos, sólidos, materia orgánica y constituyentes inorgánicos, como son: cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos, detergentes; elementos como Ca, Mg, Zn, Cu, Fe y elementos considerados como

tóxicos aún a bajas concentraciones como son Cr, Cd, Hg, Pb, As entre otros (Glynn, 1989).

En México al igual que en otros países del mundo, se utilizan las aguas residuales provenientes de las zonas urbanas con fines agrícolas, esto data desde principios de siglo, época en que se construyó el gran canal de desagüe que riega una porción del Valle del Mezquital, Hidalgo. Estas aguas generalmente no son sometidas a tratamiento alguno, lo que provoca la dispersión de contaminantes que causan alteraciones de la salud pública, degradación de suelos y contaminación de los mantos freáticos y plantas. El Distrito de Riego (DDR) 063, es el destino final de la mayor parte de las aguas residuales de la zona Metropolitana y son usadas para el riego de forrajes y hortalizas, cuya producción abastece en una buena medida al mercado del centro del país (Barrón, 1990; García, *et al.* 1990; Gutiérrez, *et al.* 1990). Este alcanza cerca de 100,000 hectáreas de riego, formado por los antiguos distritos de riego 03 de Tula, el 100 de Alfajayuca y el 27 de Ixmiquilpan.

El agua residual puede ser definida como una combinación de agua que contiene desechos procedentes de comunidades y establecimientos comerciales o industriales, junto con aguas superficiales y/o pluviales (Alvarez, 1993). Se ha demostrado que dichas aguas residuales arrastran una gran cantidad de contaminantes entre los que se encuentran los metales (Zuñiga, *et al.* 1990). Se trata de un grupo muy numeroso, que comprende dos tercios del total de elementos químicos naturales (Barceló, *et al.* 1989). Estos metales son un conjunto muy destacado, por la gran variedad de sus aplicaciones, están en la base de muchos materiales y procesos industriales y técnicos: metalurgia del hierro y del acero, cables de cobre, aleaciones, biocidas, plásticos, cemento, etc.

Dentro de los metales se encuentra un grupo muy importante designado como metales pesados cuyo peso específico supera los cinco gramos por centímetro cúbico. Desde un punto de vista biológico, los metales pesados están recibiendo gran atención debido a su potencial toxicidad. Aunque no suelen abundar en estado natural, salvo en zonas localizadas (minerías), por su interés industrial, la acumulación de residuos y su concentración en los lodos residuales están generando una notable y creciente contaminación antropogénica de la biosfera (Duffus, 1983; Akhter, *et al.* 1993).

Ante esa situación, las plantas constituyen un material idóneo para el estudio de las acciones de los metales pesados sobre los seres vivos, son sistemas abiertos a la comunicación con su entorno y forma el primer eslabón de las cadenas tróficas en los ecosistemas.

Una típica planta superior se compone de un conjunto de órganos especializados (raíz, tallos y hojas). Durante el crecimiento y desarrollo de la planta, el agua se

difunde de la solución del suelo al interior de las raíces, siendo estas el sistema de fijación de la planta al medio. El suelo gracias a la textura y contenido en materia orgánica posee una capacidad retentiva de agua y de nutrimentos para la planta y para los organismos que la habitan, o sea, que el origen, la estructura y la composición del suelo tienen una gran influencia en la retención del agua y en el grado de aireación de los suelos; estos a su vez son factores determinantes del tipo de planta que puede crecer y de los problemas fisiológicos que estas enfrentan durante su crecimiento, ya que los nutrimentos y otros compuestos se presentan en estado dinámico en el suelo, se añaden y remueven continuamente (González, 1986; Petruzzelli, 1989).

Las raíces tienen varias funciones: absorben nutrimentos y agua del suelo y los transportan a los tallos, son el lugar de síntesis de varias hormonas vegetales y reguladores de crecimiento; pueden actuar como órganos de reserva y anclan la planta en el suelo. Entre el sistema radicular y el sistema foliar, el tallo tiene la función de sostén mecánico y de vía de transporte y distribución de los productos, por medio del xilema y floema. Por esta operación de conjunto la planta capta del medio el agua y los nutrimentos minerales por la raíces que luego el xilema distribuye a los demás órganos. En la parte aérea de la planta, las hojas forman el sistema más elaborado y complejo del metabolismo vegetal, a través de los estomas captan el bióxido de carbono atmosférico en los cloroplastos, mediante la fotosíntesis, forma la materia orgánica (trioxas, hexosas, sacarosa, etcétera) que desde las hojas el floema distribuirá al resto de la planta. Por lo tanto los nutrimentos absorbidos por las plantas cultivadas se distribuyen en la cosecha final entre la parte del vegetal que es el objeto de cultivo (por ejemplo, los granos en los cereales) y el resto de la planta que tiene, normalmente menor valor económico.

Existen tres diferentes tipos de nutrimentos en las plantas: esenciales, beneficiosos y tóxicos. Un elemento se considera esencial cuando las plantas lo requieren para sus procesos metabólicos o de regulación, sin que pueda otro elemento sustituirlo en sus funciones. Hasta el momento solo se ha podido demostrar el carácter esencial de 16 elementos: C, H, O, N, S, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B y Cl. Otros como el Ni son imprescindibles para las leguminosas pero no para otras especies. Los elementos benéficos estimulan el crecimiento y desarrollo de la planta. Este es el caso, en determinadas circunstancias y para ciertas especies vegetales del Ni, Cr, Na, Si, V, Co y otros. Ahora bien cualquiera de esas dos modalidades, a partir de cierta concentración crítica y otros ya en cantidades mínimas, son elementos tóxicos. Este último caso se presenta para el Cd, Pb y Hg entre otros (Barceló, *et al.* 1984).

De acuerdo a las concentraciones de nutrimentos exigidas por las plantas se dividen en macronutrimentos y micronutrimentos. Los macronutrimentos son los elementos que se presentan en niveles considerables dentro de los tejidos o fluidos de la planta; los elementos reconocidos como macronutrimentos esenciales para las plantas son

C, H, O, N, P, K, Ca y Mg. Los micronutrientes se encuentran a niveles muy bajos de concentración y generalmente son requeridos para la función de enzimas esenciales; dentro de este grupo se encuentran B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, V y Zn.

En el presente estudio se cuantificaron 11 elementos cuyas concentraciones reportadas en la literatura se muestran en la Tabla I.

De la Tabla IIa a la Tabla IIg se reportan los niveles de algunos elementos en las diferentes especies hortícolas que fueron analizadas.

Los elementos nutritivos absorbidos por las plantas se utilizan para su crecimiento o son almacenados. La concentración en la superficie radicular juega un papel fundamental en la cobertura de estas exigencias.

Las plantas absorben cantidades relativamente elevadas de nutrientes durante las primeras etapas de desarrollo vegetativo y disminuyen generalmente a medida que se avanza hacia la madurez.

Los pasos implicados en el movimiento de un nutriente desde un punto del suelo hacia el interior de la parte aérea son: primero desplazamiento de este desde la solución del suelo hasta la superficie de la raíz, segundo al interior de ésta y tercero su translocación desde la raíz a la parte aérea (Reuter, *et al.* 1988).

Es deseable que la composición de las plantas que se cultivan para alimento de los seres humanos o de los animales contengan los elementos esenciales que estos requieren y en concentraciones adecuadas.

Se sabe que la mayor parte de los elementos (entre los cuales se encuentran los metales pesados) tienen efectos no deseables sobre las plantas, animales y el ser humano cuando se presenta en concentraciones elevadas.

Los metales pesados constituyen una forma seria de contaminación química, por su persistencia en el tiempo y en el espacio, aún después de su adición al medio (Polic, *et al.* 1994). Forman compuestos relativamente estables y no son fácilmente removidos por procesos naturales. Además de que los cationes de los mismos representan un riesgo a todas las formas de vida, ya que aún en pequeñas cantidades son rápidamente incorporados a la cadena alimenticia. La mayor unión en el ciclo del metal pesado en esta cadena se presenta entre el suelo y la planta.

En general, la entrada de los metales pesados en la cadena alimenticia depende de la translocación de los metales absorbidos por las raíces hacia las porciones comestibles que se desarrollan por encima del suelo (Petruzzelli, 1989; Scholten, 1993), muchos factores pueden influir en esto y comprenden el ambiente donde son

Tabla I. Niveles normales de elementos metálicos en plantas.

Elemento y símbolo	Concentración	Elemento y símbolo	Concentración
Calcio (Ca)	0.04-7%	Níquel (Ni)	0.1-300 ppm
Cadmio (Cd)	<0.1-5 ppm	Plomo (Pb)	<0.01-20 ppm
Cobre (Cu)	0.2-200 ppm	Potasio (K)	0.1-12%
Cromo (Cr)	0.03-250 ppm	Sodio (Na)	0.002-10%
Hierro (Fe)	25-1200 ppm	Zinc (Zn)	40-420 ppm
Magnesio (Mg)	0.05-2%		

Prével, *et al.* 1987

Tabla II. Garbanzo (*Cicer arietinum*)

Nutriente	Etapa de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración (ppm)		País	Referencia
				Adecuada	Tóxica		
Cu	Vegetativo	Retoños	Solución de cultivo experimental	4-35	>35	Australia	Edwards, 1979
Zn	Vegetativo	Retoños	Solución de cultivo experimental	12-500	>510	Australia	Edward, 1979

Tabla II.4. Haba (*Vicia faba*)

Nutriente	Etapa de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración (%) Adecuada	País	Referencia
K	Floración	Hoja y tallo	Experimento de campo	2.2-3.2	Canadá	Bishop, 1976
Na	28 a 56 días	Reñoños	Cultivo arenoso	<0.23	Ucrania	Yousef, 1983

Tabla II. Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*)

Nutriente	Etapas de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración (%) Adecuada	País	Referencia
K	Retoños	Hoja	Campo	4	USA	Lorenz, 1978
	Vegetativo	Cubierta de la hoja	Datos comerciales	2.0-4.0	Australia	Weir, 1980
	Cosecha	Cubierta de la hoja	Campo	3.50-4.20	Australia	Piggot, 1980
	Cosecha	Partes aéreas	Campo	4.20-4.50	Australia	Piggot, 1980

Tabla II. Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) (Continuación)

Nutriente	Etapas de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración (%) Adecuada	País	Referencia
Ca	Vegetativo	Cubierta de la hoja	Datos comerciales	1.20-2.50	Australia	Weir, 1980
	Cosecha	Cubierta de la hoja	Campo	2.90-3.10	Australia	Piggot, 1980
	Cosecha	Partes aéreas	Campo	0.80-0.95	Australia	Piggot, 1980

Tabla II. Brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) (Continuación)

Nutriente	Etapas de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración Adecuada	País	Referencia
Mg	Vegetativo	Cubierta de la hoja	Datos comerciales	0.23-0.40 (%)	Australia	Weir, 1980
	Cosecha	Cubierta de la hoja	Campo	0.48-0.54 (%)	Australia	Piggot, 1980
	Cosecha	Partes áreas	Campo	0.25-0.33 (%)	Australia	Piggot, 1980
Cu	Vegetativo	Cubierta de la hoja	Campo	1-5 (ppm)	USA	Walsh, 1973
Zn	Vegetativo	Cubierta de la hoja	Datos comerciales	45-95 (ppm)	Australia	Weir, 1980

Tabla II.4. Coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*)

Nutriente	Etapas de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración (%) Adecuada	País	Referencia
K	Botonación	Hoja	Campo	4	USA	Lorenz, 1978
	Botonación	Cubierta de la hoja	Datos comerciales	3.0-3.7	Australia	Weir, 1982
	Botonación	Tallo	Datos comerciales	1.5-2.8	Australia	Carrol, 1983
	Cosecha	Hoja	Datos comerciales	2.80-3.50	Australia	Piggot, 1980
	Cosecha	Cubierta de la hoja	Campo	4.20-4.50	Australia	Piggot, 1980

Tabla II.4. Coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*) (Continuación)

Nutriente	Etapa de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración (%)	País	Referencia
				Adecuada		
Ca	Prebotonación	Cubierta de la hoja	Datos comerciales	2.0-3.5	Australia	Weir, 1980
	Botonación	Cubierta de la hoja	Datos comerciales	0.7-0.8	Australia	Weir, 1980
	Botonación	Tallo	Datos comerciales	1.0-2.0	Australia	Carrol, 1983
	Cosecha	Cubierta de la hoja	Campo	2.30-2.70	Australia	Piggot, 1980
	Cosecha	Desconocido	Campo	0.35-0.40	Australia	Piggot, 1980
	Cosecha	Retoño	Campo	1.63	USA	Carolus, 1975

Tabla II. Cebolla (*Allium cepa*)

Nutriente	Etapa de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración Adecuada	País	Referencia
K	Vegetativo	Retoño	Campo	4.18 %	USA	Zink, 1962
	2 cm Bulbo	Bulbo	Campo	2.5-2.75 %	Rumania	Weir, 1980
	Cosecha	Tallo	Campo	1.60-2.20 %	Australia	Piggot, 1976
	Cosecha	Bulbo	Campo	1.70-1.85 %	Australia	Piggot, 1976
Ca	Vegetativo	Tallo	Campo	1.60 %	USA	Zink, 1962
	Vegetativo	Tallo	Campo	1.50-3.50 %	Australia	Weir, 1980
	Cosecha	Tallo	Campo	2.20-2.90 (%)	Australia	Piggot, 1976
	Cosecha	Bulbo	Campo	0.40-0.50 (%)	Australia	Piggot, 1976
	Cosecha	Toda la planta	Campo	0.88 (%)	USA	Carolus, 1975

Tabla II. Cebolla (*Allium cepa*) (Continuación)

Nutriente	Etapa de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración Adecuada	País	Referencia
Mg	Hoja	Retoño	Campo	0.47 (%)	USA	Zink, 1962
	Cosecha	Tallo	Campo	0.60-0.80 (%)	Australia	Piggot, 1976
	Cosecha	Bulbo	Campo	0.15-0.20 (%)	Australia	Piggot, 1976
Na	Crec. medio	Retoño	Campo	0.41 (%)	USA	Zink, 1962
Cu	Cosecha	Hojas	Campo	5-10 (ppm)	Rumania	Davidescu, 1982
Zn	Crec. medio	Tallo	Campo	30-100 (ppm)	USA	Beauer, 1971

Tabla II₄. Calabaza (*Cucurbita pepo*)

Nutriente	Etapas de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración (%) Adecuada	País	Referencia
K	Cosecha	Fruto	Campo	2.70-3.10	Australia	Piggot, 1976
Ca	Cosecha	Fruto	Campo	0.15-0.20	Australia	Piggot, 1976
Mg	Cosecha	Fruto	Campo	0.20-0.25	Australia	Piggot, 1976

Tabla II. Tomate (*Lycopersicon esculentum*)

Nutriente	Etapa de desarrollo	Parte de la planta	Tipo de cultivo	Concentración		País	Referencia
				Adecuada	Tóxica		
K	Vegetativo	Retoños	Campo	4.0-6.0 %		Australia	Barker, 1984
	Cosecha	Fruto maduro	Campo	4.2-5.2 %		Australia	Piggot, 1976
Ca	Cosecha	Fruto	Campo	0.12-0.30 %		Australia	Piggot, 1976
Mg	Cosecha	Fruto	Campo	0.25 %		Australia	Piggot, 1976
Na	Floración	Tallo	Campo	0.4%		Australia	Barke, 1984
Cu	Cosecha	Tallo	Campo	8-15 ppm	>15	Canadá	Gupta, 1979
Zn	Cosecha	Tallo	Campo	24.6 ppm		USA	Chapman, 1966
Fe	Cosecha	Tallo	Campo	100-300 ppm		Australia	Zink, 1962

cultivados (temperatura, pH del suelo, aeración del suelo, condiciones redox y fertilización), tipo de planta, su tamaño, el sistema radicular, la disponibilidad de los elementos en el suelo o depósitos foliares, el tipo de hojas, solución del suelo y el suministro de energía a las raíces y hojas (Fergusson, 1991).

Las plantas comestibles en general concentran metales pesados tóxicos lo cual puede no ser dañino para ellas pero sí para quienes las consumen; en algunos casos se ve afectado su desarrollo.

La cantidad de elementos constituyentes y contaminantes que pueden ser tomados por la planta y consecuentemente causar fitotoxicidad o entrar a la cadena alimenticia no depende sólo de la presencia del elemento y de su cantidad total, sino también de la interacción de los factores edáficos y climatológicos y de la forma química disponible del metal pesado en el suelo. Por ejemplo en suelos calcáreos, aún cuando la cantidad total de Cu o Zn es alta, su disponibilidad para la nutrición de la planta es baja por que las formas químicas presentes son insolubles. Los factores ambientales tales como la temperatura del suelo, pH, contenido en materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico total (CICT) y condiciones de humedad significativamente influyen en la disponibilidad de los metales pesados, la cual tiende a ser mínima a baja temperatura y a un nivel de humedad bajos (Petruzzelli, 1989; Geiger, *et al.* 1993).

Los factores esenciales en el suelo para la presencia de metales pesados en la cadena alimenticia son el pH, potencial redox, actividad biológica, sustancias orgánicas, la cantidad y clase de arcilla (Meyer, 1993; Petruzzelli, 1989; Muller, *et al.* 1994).

La disponibilidad de metales pesados tiende a ser más baja a pH más altos debido a la formación de precipitados muy fuertes y al aumento de la estabilidad de complejos con sustancias húmicas. Cuando el pH del suelo desciende (por debajo de 4.5) este incremento de la acidez del suelo provoca la pérdida de cationes intercambiables (Ca, Mg y K) y la liberación del aluminio y de los metales pesados a la solución del suelo.

Con la disminución del potencial redox en el suelo, puede haber incrementos en la disponibilidad, debido a la disolución de algunos óxidos los cuales mantienen ocluidos elementos del tipo Zn y Cu, hasta valores muy bajos de potencial redox donde la formación de sulfitos insolubles los hacen inaccesibles.

La descomposición de sustancias orgánicas por la biomasa microbiana pueden resultar en la liberación de compuestos orgánicos los cuales pueden formar compuestos solubles con varios metales pesados y estos complejos pueden aumentar la movilidad de muchos elementos. Por otra parte la formación de complejos con sustancias orgánicas pueden también disminuir drásticamente la disponibilidad de

muchos elementos adicionados con ciertas clases de residuos (Guggenberger, *et al.* 1994).

En lo que se refiere a los factores edáficos interviene en la disponibilidad facilitando la solubilización del elemento en la solución del suelo o su retención lábil por adsorción a las micelas del suelo. De esta forma se evita la lixiviación de los iones por el agua de filtración, y se permite un fácil suministro a la planta y a la solución del suelo por intercambio iónico. Debido al predominio de las cargas superficiales negativas en las micelas del suelo, este intercambio iónico es fundamentalmente catiónico. Para los nutrimentos cuya absorción se hace en forma aniónica, la penetración al interior de la raíz se hace en contra de un gradiente de potencial eléctrico y en consecuencia, se necesita energía, que suele ser suministrada por la oxidación de los compuestos (Rozema y Verkleij, 1991).

Los metales pesados pueden estar presentes en varias formas fisicoquímicas:

- (1) iones simples o complejos en solución del suelo;
- (2) iones intercambiables;
- (3) enlazados con sustancias orgánicas;
- (4) ocluidas o coprecipitadas con óxidos, carbonatos y fosfatos, u otros minerales secundarios;
- (5) iones en la red cristalina de los minerales primarios.

Los metales presentes en estas formas son consideradas por ser las formas más disponibles para la nutrición de la planta, cada forma representa sucesivamente menor disponibilidad.

Los metales pesados se van acumulando paulativamente en el suelo principalmente en la superficie, en lo que son sus horizontes húmicos superiores (Hassanin, *et al.* 1993).

Los más importantes mecanismos de enlace de las sustancias potencialmente tóxicas (metales y compuestos orgánicos) en el suelo son:

1. En superficies minerales especialmente en minerales arcillosos y moléculas húmicas, por (a) enlaces electrostáticos por intercambio de ion y protonación, (b) enlace de hidrógeno, (c) enlace de coordinación o intercambio de ligando o (d) enlaces físicos propios o fuerzas de Vander Waals.
2. Precipitación o coprecipitación de compuestos sólidos (Petruzzelli, 1989).

A continuación se describirán algunas de las características más importantes de los elementos comprendidos en el presente estudio, así como los fundamentos de la técnica utilizada para su determinación.

3.2 Elementos metálicos.

a. Cadmio

El cadmio es un elemento que se encuentra en la naturaleza asociado a muchos minerales. El hombre ha liberado cadmio al ambiente sin saberlo desde que estuvo capacitado para fundir y refinar metales como zinc, plomo y cobre. En la actualidad se le considera como uno de los elementos más tóxicos. Tiene una vida media larga y se acumula en los seres vivos permanentemente.

Este elemento pertenece al grupo II B de la tabla periódica y se encuentra en el subgrupo que incluye también al zinc y al mercurio. Su número de valencia es +2 (Carson, *et al.* 1986).

La solubilidad de las sales de cadmio en agua es muy variable, ya que los halogenuros, el sulfato y el nitrato son relativamente solubles mientras que el óxido, hidróxido y el carbonato son prácticamente insolubles en agua.

El cadmio esta presente como un constituyente menor e inevitable en casi todos los concentrados de zinc, los que contienen por lo general de 0.1 a 0.3% de cadmio. Este elemento tiene como fuente natural principalmente el desgaste y la erosión de las rocas. Sus depósitos están asociados geoquímicamente a los de zinc, sobre todo en los minerales asfalerita, blenda de zinc y otros más (Dudka, *et al.* 1994; Abdel-Sabour, 1988).

En la actualidad las principales fuentes antropogénicas por las cuales se libera cadmio en el ambiente son los usos de este elemento. Sus derivados se utilizan en pigmentos y pinturas, baterías, como estabilizadores del cloruro de polivinilo (PVC) como recubrimiento de otros metales en procesos de galvanoplastia, electroplatinado, aleaciones, acumuladores, soldaduras, reactores nucleares, joyería, etc.

A diferencia del plomo, el cadmio se ha utilizado por un periodo relativamente corto y su uso extensivo ha aumentado durante el presente siglo; en 1950 su producción mundial era de 6,000 toneladas aumentando a 16,755 toneladas en 1982 (Albert, 1988).

La mayor parte de cadmio que se emite a la atmósfera se deposita en la tierra y en las aguas de la región cercana a la fuente de emisión. En las aguas superficiales, el cadmio se presenta como ion libre y en su solubilidad influyen la dureza, el pH, los complejos solubles y los sulfuros coloidales de éstas; en este medio se une a la materia particulada.

Por lo general, las concentraciones de este elemento en el agua potable son menores a 5 $\mu\text{g/l}$. La contaminación del agua potable por cadmio puede ocurrir como resultado de la presencia de impurezas de cadmio en la tuberías galvanizadas de zinc o en la soldadura, en los calentadores de agua, grifos, etc.

También ha ocurrido contaminación del agua potable por la filtración de cadmio a los mantos freáticos a partir de los lodos que contengan óxidos de zinc.

En los suelos generalmente, las concentraciones de este elemento son inferiores a 1 mg/Kg y se mantienen entre 0.001 a 0.5 mg/Kg (Albert, 1988). Las principales variaciones en el contenido de cadmio en el suelo se deben a la composición de la roca madre y al suministro de metales que provienen de fertilizantes, abonos, agroquímicos, contaminación atmosférica (industrias metalúrgicas e incinerar basura de plásticos) y la utilización de aguas residuales para riego (Sánchez, 1993).

En los suelos ácidos el cadmio se intercambia fácilmente, lo que lo hace disponible para las plantas. Las plantas no tienen mecanismo para excretar el cadmio y, una vez que lo absorbieron, lo retienen en sus tejidos. Sin embargo, la acumulación generalmente es mayor en las raíces que en la parte aérea de la planta (Morvedt, 1987).

Algunos vegetales, como arroz y trigo, pueden asimilar cantidades considerables de cadmio a partir de suelos contaminados.

Los resultados de varios experimentos muestran claramente las diferencias en el grado de toxicidad para diversos cultivos. Por ejemplo, la espinaca, la soya y el mastuerzo chino son más sensibles al cadmio mientras que el tomate y la col son completamente resistentes.

Los efectos perceptibles de la fitotoxicidad del cadmio dependen de la especie; algunos de los más comunes son la clorosis que incluye una reducción en el contenido de clorofila, marchitez y, en ocasiones, necrosis. Este tipo de efecto se debe principalmente a que las altas concentraciones de cadmio inhiben la fotosíntesis y la fijación del bióxido de carbono.

Aunque los mecanismos de translocación no se han estudiado del todo, se sabe que, por lo general, las semillas y los granos tienen concentraciones más bajas que las hojas.

Cantidades considerables de este elemento se ingieren a través de los alimentos, lo cual es muy importante sobre todo para la población que no está expuesta ocupacionalmente. Para un hombre de 70 Kg como referencia el balance de cadmio en $\mu\text{g/día}$ es: ingiere 150 en alimento y fluidos y menos de 1 proviene del aire;

pierde 100 en orina y 50 en heces. El contenido en el cuerpo se estima en 50 mg (38 mg en tejidos blandos) (Carson *et al.* 1986).

La retención a partir del alimento por parte de los mamíferos es baja pero la absorción aumenta si los mamíferos están sometidos a una dieta deficiente en calcio. Una vez absorbido, el cadmio se asocia con las proteínas de bajo peso molecular, metalotioneína, y se acumula en los riñones, el hígado y los órganos reproductores. Dosis muy pequeñas pueden causar vómitos, diarrea y colitis. La exposición continua al cadmio causa hipertensión, agrandamiento del corazón y muerte prematura. También induce anomalías cromosómicas y puede ejercer efectos carcinógenos en los pulmones (Duffus, 1983).

4. Calcio

El calcio es usado en metalurgia como un desoxidizador para Cu, Be, y acero (con Si). Numerosos compuestos de calcio tienen usos terapéuticos (antiespasmódicos, diuréticos, y preparaciones antiácidas y para acciones en el sistemas circulatorio).

Su número atómico es 20, es un metal alcalino-térreo. Sus compuestos presentan valencia +2 (Carson, *et al.* 1986).

Los valores de calcio en la dieta están en un rango de 690 a 1, 130 mg/día. Las fuentes más ricas en la dieta son leche y queso.

El balance de calcio para un hombre de 70 Kg es:

<u>Ingiere, mg/día</u>	<u>Pérdidas, mg/día</u>
Comida y fluidos 1,100	Orina 180
	Heces 740
	Sudor 32-150
	Otros fluidos trazas
	Cabello trazas

El calcio en el tracto gastrointestinal no es completamente absorbido; normalmente 70 a 80% de lo que se ingiere es excretado en las heces. La toxicidad por calcio incluye anorexia, náusea, vómito, deshidratación, coma y muerte. La muerte súbita puede ocurrir si los niveles de calcio permanecen arriba de 160 mg/L. (Carson, *et al.* 1986).

En casi todos los suelos neutros o sólo ligeramente ácidos, los Ca^{+2} ocupan la mayor parte de las posiciones de cambio de las arcillas y de los coloides húmicos. En las regiones húmedas, el calcio es lixiviado y a medida que el suelo se acidifica, puede ser intercambiado por Al. El calcio penetra en las raíces, fundamentalmente, por flujo de masas.

La concentración de calcio en la materia seca de las plantas puede variar en un intervalo tan amplio como 0.1 a 2.5%, pero como este elemento tiene baja movilidad y no puede redistribuirse desde las hojas más viejas a las jóvenes, las concentraciones más elevadas son, probablemente, superiores a la exigencias metabólicas. Es esencial para el crecimiento de los meristemos y, especialmente, para el adecuado crecimiento y funcionamiento de los ápices radiculares, juega un papel clave en el mantenimiento de la integridad de las membranas protegiéndolas de resquebraaduras (Wild, 1992).

e. Cobre

El cobre es uno de los elementos traza más abundante, importante y esencial para plantas y animales. Es ampliamente usado en su estado metálico, ya sea en forma pura o en aleaciones. El Cu metálico se prepara por fundición y refinado electrolítico. Su principal uso es la producción de cable para conducir la electricidad, utilizado en muchas aleaciones, algunos compuestos de Cu son usados en fungicidas e insecticidas. Otros compuestos son usados como pigmentos en pinturas y cerámica (Alloway, 1990).

El Cu muestra dos valencias en los compuestos en que se presenta en forma natural. En general el Cu (I) es más común en los minerales que se forman a una profundidad considerable y el Cu (II) en los compuestos que se forman cerca de la superficie terrestre. Cualquiera que sea la forma del Cu en las rocas, éste se disuelve mediante el desgaste natural principalmente como Cu (II). Siempre y cuando la solución permanezca en estado de oxidación y por lo menos ligeramente ácida (Morvedt, 1983).

Puede encontrarse en concentraciones muy altas en el agua, sedimentos y biota como resultado de las actividades mineras, del uso intensivo de las pellas de cobre en la cría de cerdos o de la aplicación de fungicidas de cobre (Duffus, 1983).

Para la mayoría de los suelos el Cu(II) es la especie medida como cobre en suelos. Las sustancias orgánicas enlazan Cu. Los grupos COO^- forman ligaduras estables con Cu, disminuyendo la concentración de Cu disponible y toxicidad en plantas.

La disponibilidad de cobre en las plantas depende de la facilidad con la cual el ion Cu(II) hexahidratado es absorbido por las plantas en suelos ácidos y como hidróxido de Cu(II) en suelos alcalinos o neutros (Fernández, 1991).

Es absorbido por las raíces de las plantas en forma de Cu^{+2} y translocado a la parte aérea. Es un constituyente esencial de las enzimas oxidasas: citocromo-oxidasa, fenol-oxidasa, ácido áscorbico-oxidasa y amino-oxidasa. También juega un papel importante en la fotosíntesis como constituyente esencial de la plastocianina (Wild, 1992).

El Cu en el organismo humano es activamente absorbido en el estómago y en el duodeno. Típicamente cerca de la mitad de una dosis puede ser absorbida, pero esto puede ser disminuido por competición con zinc. Una sobredosis aguda causa un inmediato sabor metálico, después una inflamación epigástrica, náusea, vómito, y en varios casos severos diarrea. Casos fatales siempre incluyen efectos secundarios tales como hipertensión, shock y coma (Carson, *et al*, 1986).

4. Cromo

El cromo es un elemento blanco azulado, muy duro. Perteneció al grupo VI de los elementos de transición y sus valencias son +2, +3, +6 (Duffus, 1983).

Su fuente mineral más importante es la cromita ($\text{FeO.Cr}_2\text{O}_3$) y otros minerales que se encuentran en la corteza terrestre.

Entre las fuentes antropogénicas del cromo están la extracción de compuestos de cromo a partir de la cromita, la industria química, colorantes, pigmentos plaguicidas, el cromado electrolítico o galvanoplastia, curtido de cueros y pieles, el uso de compuestos de cromo como mordientes en teñido de telas y otros usos menores como conservación de la madera, cerámica metálica, fotograbado, fabricación de cerillo, explosivos, linóleo, etc.

Además de las aplicaciones antes mencionadas, existen otras de menor escala, pero también importantes, como su uso en fungicidas, fertilizantes (superfosfatos) y detergentes.

En la actualidad, el cromo se usa en grandes cantidades y su producción mundial va en constante aumento, por ejemplo en 1973 se produjeron 7.5 millones de toneladas en todo el mundo mientras que hace un poco más de un siglo apenas se empezaba a aislar.

El quemado de combustibles fósiles como carbón y aceite aporta al ambiente de 50 y 1,400 toneladas de cromo por año, respectivamente.

Los mecanismos que intervienen en la absorción y translocación del Cr en las plantas no son bien conocidos debido, en gran medida, al desconocimiento de las formas iónicas presentes en los diferentes sistemas. Hay pruebas, sin embargo, de que el Cr (VI) es reducido a Cr(III) en la superficie de las raíces y la parte aérea y que, independientemente de la forma en que se aplique, la mayor parte del cromo es retenido en las raíces (Wild, 1992).

Cuando los compuestos de cromo se ingieren por largo tiempo causan irritaciones, úlceras, hepatitis, nefritis, erosión y color amarillo de los dientes.

El cromo al igual que otros metales se une a las proteínas y en las células del túbulo proximal del riñón y altera la filtración de proteínas.

El 80% de los compuestos de cromo se eliminan por la orina y el resto por heces, cabello, uñas y leche.

En 1976, la industria "Cromatos de México" para eliminar sus desechos de cromo, los regaló para tapar los baches de la población de Lechería, Tultitlán, Edo. de México. Además, infiltró sus afluentes líquidos a través de un pozo en los terrenos de su propia industria. Esto sumado a los humos de las chimeneas, hizo de este pueblo un lugar donde el cromo hexavalente se adhería a la piel, se ingería con el agua potable y se respiraba a cada momento. Como resultado, murieron varias personas con llagas, perforación del tabique nasal y cáncer del pulmón (Albert, 1988; Duffus, 1983).

e. Hierro

El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, esta presente en la naturaleza como elemento nativo y con dos estados de oxidación Fe(II) y Fe(III). Sus compuestos ferrosos (+2) y férricos (+3) tienen generalmente baja solubilidad en agua, los nitratos son una excepción (Carson, *et al.* 1986).

Entre otros de los principales usos esta la formación de compuestos para pigmentos, cintas magnéticas, desinfectantes, curtido y aditivo de combustibles.

Muchos afluentes de agua están envenenados por altos niveles de hierro resultantes del drenaje de las minas. La pirita (sulfuro de hierro), se encuentra a menudo asociada a los depósitos de carbono (Duffus, 1983).

Las funciones y los efectos fisiológicos del hierro en las plantas dependen de los cambios en sus estados de oxidación, entre Fe^{+2} y Fe^{+3} , y de la formación de complejos con radicales orgánicos e inorgánicos. Las raíces de las plantas reducen Fe^{+3} a Fe^{+2} y este proceso parece que es un requisito esencial para absorberlo a partir de la solución del suelo. Después de su absorción, el Fe^{+2} se oxida y se transloca a la parte aérea en forma de citrato férrico. Parte del hierro puede almacenarse en las hojas en forma de una fosfoproteína férrica, que sirve de reserva para el desarrollo de los plastos y, en consecuencia, para la fotosíntesis.

Cuando se trata de carencias de hierro, las hojas más afectadas son las más jóvenes ya que este elemento no se desplaza con facilidad. Aportes excesivos de manganeso, cinc, cobre y algún otro elemento metálico pesado, puede inducir síntomas parecidos a las carencias férricas debido, posiblemente, a antagonismos con el hierro, ya sea en su absorción o en su translocación a los puntos funcionales de la planta. Carencias inducidas, o secundarias, de hierro se encuentran frecuentemente en plantas cultivadas en suelos calizos, esto puede atribuirse a los iones bicarbonatos (HCO_3^-) que reducen la absorción y la movilidad del hierro en el interior de la planta (Wild, 1992).

Es un micronutriente esencial para la mayoría de los organismos, pero la ingestión de cantidades excesivas puede originar la inhibición de la actividad de muchas enzimas.

El balance de Fe para un hombre de 70 Kg como referencia en mg/día es: ingiere 16 de alimentos y fluidos y por aire 0.03; pierde en orina 0.25, en heces 15 y por otras rutas 0.51. Para una mujer de 50 Kg como referencia ingiere 12 de alimentos y fluidos y del aire 0.03; pierde 0.2 por orina, 11 en heces y 1.2 por otras rutas entre ellas 0.6 como pérdida menstrual.

Las cantidades consumidas deben ser muy grandes debido a que sólo una pequeña proporción del hierro ingerido es absorbida en el tracto gastrointestinal. La inhalación de polvos de hierro puede causar una pneumoconiosis benigna y puede resaltar los efectos dañinos del bióxido de azufre y varios carcinógenos (Duffus, 1983). En la toxicidad aguda como primer signo se presenta vomito, seguido por sangrado intestinal, letargo y quizás cianosis. Una excesiva absorción puede conducir a hemosiderosis (un incremento generalizado del contenido de Fe) posiblemente acompañado por fibrosis. Puede ser acompañado por metabolismo anormal de glucosa (Carson, *et al.* 1986).

4. Magnesio

El metal es usado como protector catódico de fierro y acero. Los compuestos son usados como refractarios en cemento, como aislador en procesos químicos. Es un metal ligero, con limitado uso por su costo y flamabilidad. Sus compuestos bivalentes son típicamente de los alcalinotérreos.

La concentración de magnesio en la materia seca de las plantas es variable aunque, generalmente, más baja que la del calcio. Sin embargo a diferencia del calcio, el magnesio es móvil y una gran parte del magnesio total se combina con aniones orgánicos. Es un componente específico de la clorofila (porfirina magnésica). Como cofactor de la mayor parte de las enzimas que intervienen en la fosforilización, su importancia es grande en la transferencia de energía, debido a esto la distribución del magnesio en la planta coincide, frecuentemente, con la del fósforo, reportándose para éste una localización mayor en la zona radicular.

Se presentan deficiencias de magnesio en cultivos debido en algunas ocasiones al antagonismo por acción de los iones de calcio, asimismo altos niveles de iones potasio y amonio en la rizosfera producen limitaciones en la absorción del magnesio (Wild, 1992).

El hombre absorbe aproximadamente 30% de lo que ingiere en la dieta. El balance de magnesio para un hombre de 70 Kg como referencia en g/día es: ingiere en alimentos y fluidos 0.34; pierde en orina 0.13, en heces 0.21 y por otras rutas <0.002. En una mujer de 50 Kg como referencia, los valores son 0.27, 0.11, 0.16, y < 0.002 respectivamente. Es un mineral esencial, la ración diaria recomendada es de 350 mg para hombres y 300 mg para mujeres. Niveles muy altos en la dieta (1.5 a 2.5%) puede causar envenenamiento fatal. Los niveles altos de Mg se presentan cuando hay un aumento poco usual en la absorción o una marcada reducción en la excreción urinaria. Es muy difícil que se produzca toxicidad, ya que el riñón elimina los excesos con facilidad. Los síntomas de tal exceso incluyen: mareos, parálisis muscular respiratoria y cardiovascular (Carson *et al.* 1986).

4. Níquel

El níquel constituye cerca de 0.008% de la corteza terrestre, predominantemente en rocas ígneas. La mayoría de sus compuestos presentan valencia +2, pero se conocen estados de oxidación de +1, +3 y +4. Las sales comunes son bastante solubles en agua.

Cerca de la mitad de todo el níquel es usado en aceros, principalmente en los aceros inoxidable. Y una cuarta parte es usada en otras aleaciones para uso en muchas aplicaciones que requieren resistencia a la temperatura y corrosión. Otra parte es electroplateada para proveer una superficie resistente al empañamiento y como recubrimiento antes del platinado de metales preciosos, como catalizador, como mordiente y en cerámica (Carson, *et al.* 1986).

No se ha aceptado, aún, que sea un elemento esencial para los vegetales. La mayor preocupación sobre este elemento corresponde a los informes sobre su toxicidad en algunas plantas, su toxicidad se reduce aumentando el pH.

Es un micronutriente para la mayoría de los microorganismos, pero cantidades excesivas ejercen efectos tóxicos. En los animales, estos efectos abarcan dermatitis y desordenes respiratorios, incluido cáncer de pulmón después de la inhalación. Entre las enzimas inhibidas están la citocromo oxidasa, la isocitrato deshidrogenasa y la maleico deshidrogenasa. Un derivado particularmente venenoso del níquel es el níquel-tetracarbonilo (Duffus, 1983).

El balance de níquel para un hombre de 70 Kg como referencia en $\mu\text{g}/\text{día}$ es: ingiere 400 a partir de alimentos y fluidos y 0.6 a partir del aire; pierde 11 en orina, 370 en heces, y 21 por otras rutas. El grado de absorción del níquel ingerido generalmente depende de la solubilidad del compuesto (típicamente 1 a 10% de la dosis ingerida) La principal toxicidad aguda del níquel, para el metal y los compuestos son dermatosos. El único efecto por exposición crónica que se ha estudiado ha sido como carcinógeno.

4. Plomo

Es un elemento especialmente importante debido a su amplia utilización en una gran variedad de procesos industriales y su toxicidad aguda y crónica. Su resistencia a la corrosión atmosférica y a la acción de los ácidos, especialmente el sulfúrico, hace que el plomo sea muy útil en la edificación, en las instalaciones de fábricas de productos químicos y en tuberías y envolturas de cables.

Las concentraciones de plomo en el medio ambiente se han elevado conforme ha aumentado su uso. A finales de la Segunda Guerra Mundial, la contaminación ambiental por plomo se elevó aún más, entre otras causas, por la introducción de compuestos orgánicos de plomo como aditivos para la gasolina.

Se encuentra en el grupo IV A de la Tabla Periódica junto con el carbono, silicio, germanio y estaño. Sus estados de oxidación son +2 y +4. Su número de valencia generalmente es 2, pero también reacciona con valencia 4, sobre todo en compuestos orgánicos (Carson, *et al.* 1986).

Sus fuentes naturales son la erosión del suelo, el desgaste de los depósitos de los minerales de plomo y las emanaciones volcánicas. Su proporción en la corteza terrestre es aproximadamente de 15 ppm (mg/Kg) y la cantidad total se estima en $3,8 \times 10^{14}$ toneladas. Desde el punto de vista comercial, los minerales más importantes son la galena (sulfuro de plomo, PbS), la cerusita (carbonato de plomo, $PbCO_3$) y la anglesita (sulfato de plomo, $PbSO_4$). La galena es la principal fuente de producción de plomo y se encuentra generalmente asociada con diversos minerales de zinc y, en pequeñas cantidades, con cobre, cadmio y hierro, etc.

En lo que se refiere a las fuentes antropogénicas están: la producción de acumuladores y baterías, pigmentos, insecticidas, explosivos, reactivos químicos, soldaduras, aditivos antidetonantes para gasolina, alfarería decorativa vidriada en hoja metálica y en barro, cubiertas para proteger de los rayos X, tuberías, entre otros.

En los últimos años la producción de plomo ha sido aproximadamente de 3,569 toneladas por año. Los principales productores son Estados Unidos, URSS, Australia, Canadá, Perú, México, China, Yugoslavia y Bulgaria.

La cantidad anual de plomo que se dispersa como contaminante atmosférico es muy elevada. Las emisiones antropogénicas de plomo en el aire se han calculado en alrededor de 450,000 toneladas. Esta cantidad duplica las emisiones por fuentes naturales.

Hoy en día la mayor parte del plomo que se encuentra en las aguas proviene de las emisiones de los vehículos automotores, éstas llegan al atmósfera y, de ahí, se precipitan a los cuerpos acuáticos. En las ciudades, el transporte de plomo se lleva a cabo por la lluvia y las aguas negras (100- 500 $\mu\text{g/l}$ en áreas industriales) y estas últimas son utilizadas para el riego y de esta forma el plomo es depositado en el suelo (Boon, *et al.* 1992).

Una vez que el plomo ha llegado al suelo permanece ahí indefinidamente y sólo una pequeña parte es transportada por la lluvia. Por ello el suelo es uno de los principales depósitos de este contaminante.

En suelos las concentraciones de este elemento varían de 2 a 200 $\mu\text{g/g}$, mientras que en suelos de sitios urbanos, la concentración de plomo llega a ser extremadamente elevada.

Las plantas que crecen en suelos contaminados por este elemento tienden a concentrarlo sobre todo en su sistema radicular (Albert, 1988; Duffus, 1983).

El plomo es retenido en el suelo por los hidróxidos, especialmente por el $\text{Fe}(\text{OH})_3$, y la adsorción aumenta en forma muy rápida a medida que sube el pH. En suelos calizos el plomo puede precipitar en forma de carbonato. La retención en el suelo puede deberse también, en parte a la materia orgánica.

La mayor parte del plomo es absorbido por los glóbulos rojos y circula a través del cuerpo, pudiéndose concentrar inicialmente en hígado y riñones. A continuación puede pasar a los huesos, dientes y cerebro. En los huesos, el plomo queda inmobilizado, y no contribuye a la toxicidad inmediata, pero es un peligro potencial, puesto que puede mobilizarse durante las enfermedades con fiebre, como resultado de un tratamiento con cortisona, y en la vejez. Sus efectos incluyen, dolor de espalda y extremidades, dificultad para caminar, pseudofracturas y osteoporosis (ablandamiento de los huesos debido a la pérdida de minerales como calcio y fósforo) (Albert, 1988; Carson, *et al.* 1986; Duffus, 1983).

Alrededor del 90% del plomo que fue ingerido y que no se absorbió se elimina junto con las heces. Del plomo absorbido, un 76% aproximadamente se elimina por la orina, el resto se elimina a través del cabello, sudor, etc. El plomo también se elimina en la leche materna en concentraciones de hasta 12 mg/l .

Las concentraciones de plomo en sangre asociadas con la intoxicación se encuentran en el intervalo de 80 a 100 $\mu\text{g}/100\text{ml}$ y en ocasiones se han encontrado hasta 300 $\mu\text{g}/100\text{ml}$ de sangre (Albert, 1988).

4. Potasio

Su número atómico es 19, reacciona vigorosamente con oxígeno y con agua siempre a -100°C . Presenta una valencia de +1 en sus compuestos.

Es usado en síntesis orgánicas. Diversos compuestos tienen usos medicinales. KCl y K_2SO_4 son las principales sales producidas. El KCl es utilizado como fertilizante, en fotografía, espectroscopia (por ejemplo celdas del infrarrojo) y como un sustituto de la sal, reactivo de laboratorio y aditivo de alimentos.

El potasio penetra en las raíces en su mayor parte, por difusión; su contenido en las plantas es aproximadamente el mismo que el de nitrógeno, entre los cationes, es el más abundante en los jugos celulares. Interviene en diferentes procesos bioquímicos y fisiológicos de los que, quizás, el más importante sea la síntesis de proteínas. Las demandas de potasio por las plantas son importantes ya que con él se neutralizan otros aniones y grupos ácidos de macromoléculas orgánicas, se activan muchas enzimas y se mantiene la presión osmótica de los jugos celulares. Interviene también en el transporte de los fotoasimilados desde las hojas por lo que ejerce una acción directa sobre la actividad fotosintética. El signo más característico de deficiencia potásica es la muerte prematura de las hojas más viejas, ya que el potasio es muy móvil en la planta y se desplaza con mucha facilidad a las hojas más jóvenes.

Los cultivos difieren notablemente en su respuesta al potasio. Muchos árboles frutales, como manzano, necesitan cantidades importantes para dar buenas cosechas de calidad aceptable; entre los cultivos herbáceos extensivos, las habas y las patatas, y entre los hortícolas, el tomate, presentan respuestas elevadas al potasio. Los tréboles y la alfalfa muestran, también, elevadas exigencias de potasio, especialmente si han de competir con gramíneas en las praderas; para la alfalfa, además, el potasio aumenta su resistencia al frío invernal, debido posiblemente a que estimula el almacenamiento de carbohidratos y proteínas en sus sistemas radiculares (Wild, 1992).

Los excesos de potasio en el suelo, pueden deprimir la asimilación de otros cationes, especialmente del magnesio y provocar reducción del crecimiento por aparición de estados carenciales de estos.

El balance de potasio para un hombre de 70 Kg como referencia es (mg/día): ingiere 3.3 a partir de alimentos y fluidos; pierde en orina 2.8, en heces 0.36, en sudor 0.13 y otros fluidos sólo trazas. Su absorción gastrointestinal es >90%. De 1,875 a 5,625 mg/día es seguro y adecuado para un ingestión diaria de potasio. Incrementos súbitos superiores a 18 g/día para un adulto (12.0 g/m^2 de área de superficie) causa envenenamiento tóxico, el cual puede producir paro cardíaco (Carson, *et al.* 1986).

§. Sodio

Su número atómico es 11, es el metal alcalino más común. Es blando a temperatura ordinaria y reacciona con agua y oxígeno es almacenado bajo líquidos libres de

oxígeno tal como queroseno. Prácticamente todos sus compuestos son solubles en agua.

Los principales usos son manufactura de detergentes, papel y textiles y tratamiento de agua. El metal sodio es utilizado para la manufactura de sus compuestos. Es usado en síntesis orgánicas, en lámparas de sodio y celdas fotoeléctricas.

Es absorbido por las plantas en cantidades muy diferentes según las especies. No es esencial, pero puede tener efectos beneficiosos en muchas ocasiones sobre las plantas de cultivo. Puede reemplazar parcialmente al potasio y jugar su papel en la regulación de la presión osmótica y turgencia de las células; este efecto es máximo cuando el suministro de potasio es deficiente (Wild, 1992).

La información del balance de sodio para un hombre de 70 Kg como referencia es (mg/día): ingiere en alimentos y fluidos 4,400; pierde en orina 3,300, heces 100, sudor 870, otros fluidos 130 y cabello 0.1.

Los adultos necesitan pequeñas cantidades pero pueden consumir 2,300 a 6,900 mg/día siempre y cuando tengan libre acceso a la sal. Su absorción gastrointestinal es del 100%. Los síntomas de envenenamiento son náusea, vómito y repulsión a los alimentos (Carson *et al.* 1986).

4. Zinc

El zinc es un elemento traza esencial para los humanos, plantas superiores y animales. Se estima que las concentraciones de zinc en la corteza terrestre van de 5 a 200 ppm.

Los principales usos del zinc incluyen el recubrimiento para protección de Fe y acero en los procesos de galvanizado, también como ingrediente de aleaciones, como protector en el recubrimiento de otros metales para prevenir la corrosión, para aparatos eléctricos especialmente para celdas de baterías secas, materiales de construcción, recubrimiento de carros de ferrocarril, etc.

Su número atómico es 30. El ZnO , ZnS , y $Zn(CN)_2$ son prácticamente insolubles en el agua.

Es un micronutriente esencial y por lo general se considera como uno de los elementos menos peligrosos, aunque su toxicidad puede aumentar debido a la presencia de impurezas de arsénico, plomo, cadmio y antimonio (Duffus, 1983).

El ion Zn^{+2} es la forma en que lo absorbe la planta por las raíces, hidratado o como quelatos orgánicos, y posteriormente translocado a los brotes como ion libre, principalmente. Su concentración en la materia seca de la planta es, al menos, tres o cuatro veces mayor que la del cobre. Es un componente esencial de tres enzimas vegetales: carbónico anhidrasa, alcohol deshidrogenasa y peróxido dismutasa. La concentración de zinc regula la síntesis de proteínas, en la que interviene el RNA (ácido ribonucleico) (Wild, 1992).

La disponibilidad de Zn en el suelo se ve afectada por una serie de factores tal como pH, contenido total de materia orgánica, sitios de adsorción, actividad microbiana, humedad, condiciones climáticas e interferencia entre el Zn y otros macro y micronutrientes. Observándose que en suelos ácidos muy lixiviados los niveles de Zn total pueden ser muy bajos, resultando baja su disponibilidad; al elevarse el pH del suelo su disponibilidad disminuye; en suelos con bajo contenido de materia orgánica afecta directamente la disponibilidad de Zn por el contenido de complejos orgánicos; los altos niveles de potasio disminuyen la disponibilidad del Zn; la interacción con otros nutrientes como Fe, Cu, N y Ca también disminuyen la disponibilidad del Zn.

El Zn en las plantas actúa de dos maneras: como componente de enzimas o como factor en la regulación de un buen número de enzimas. Existen cuatro enzimas que tienen enlazado al zinc, como la anhidrasa carbónica, alcohol deshidrogenasa, Cu-Zn superóxido dismutasa y la RNA polimerasa.

De acuerdo a las concentraciones de Zn en hojas maduras se puede hacer la siguiente clasificación:

- deficiente, si hay menos de 10-20 mg/Kg de materia seca
- suficiente o normal entre 25-150 mg/Kg
- excesivo o tóxico si hay más de 400 mg/Kg

(Alloway, 1990).

El contenido de Zn en el cuerpo para un hombre adulto es estimado de 1.4 a 3 g. Para un hombre de 70 Kg como referencia se tiene el siguiente balance en mg/día: ingiere de alimentos y fluidos 13 y del aire menos de 0.1, pierde por orina 0.5, por heces 11, por sudor 0.78, por pelo 0.03 y por otras rutas 1 (Carson *et al.* 1986)

El Zn como ion es escasamente absorbido pero las sales ácidas son corrosivas a la piel y tracto gastrointestinal. La ingestión de 2 g o más produce síntomas tóxicos.

3.3 Interacciones

Existe interacción entre dos factores cuando sus efectos combinados no son iguales a la suma algebraica de los efectos de cada uno actuando por separado. La interacción es positiva o negativa de acuerdo al signo de la diferencia. La interacción puede ser definida como: (1) una influencia, una acción mutua o recíproca de un elemento sobre otro en relación al crecimiento de las plantas, y (2) la respuesta diferencial de un elemento en combinación con niveles variables de un segundo elemento aplicado simultáneamente; esto es, los dos elementos se combinan para producir un efecto adicional debido no únicamente a uno de ellos (o un efecto negativo) (Mortvedt, 1983).

La interacción se denomina antagonista cuando los efectos combinados de los dos elementos es menos que la suma de sus efectos separados; y se da el nombre de sinergismo donde el efecto combinado es mas grande que la suma individual de los elementos, la interacción más común es la antagonista. Algunos elementos pueden ser antagonistas o sinergistas para un elemento, presuntamente en diferentes procesos bioquímicos (Fergusson, 1991).

El fenómeno de antagonismo se da ya sea por que algunos inhiben la absorción de otros, o bien contrarrestan su función metabólica. El fenómeno contrario llamado sinergismo ocurre porque un elemento favorece la absorción de otro o refuerza su acción metabólica (Rojas, 1985).

El desarrollo de una interacción depende del estado fisiológico interno de la planta, lo cual es influenciado por genotipo, edad, estado de crecimiento y factores ambientales (Prével, *et al.* 1987).

En la tabla III se resumen las diferentes interacciones entre algunas elementos (Mortvedt, 1983; Fergusson, 1991).

Tabla III. Tipos de interacciones entre distintos elementos

Elemento	Antagonismo	Sinergismo
Cd	Ca, P, K, Zn, Mn	Pb, Mg, Fe, Ni, Cu*, Zn*
Pb	Ca, Zn	Cd
P	Zn, Fe, Cu	
Zn	Fe	Mg
Mn	Zn	
Mo	Fe	
Cu	Fe, Zn	
Mg	K	
K	Mg, Ca**	Na

*En el exterior de la planta y junto a las raíces.

**En acción metabólica.

3.4 Especies químicas.

En su forma más simple, el proceso de bioacumulación puede ser considerado como la consecuencia de: (z) Proceso de adsorción en la superficie radicular de la superficie, y (a) la masa de flujo de agua como el acarreador a través de la planta. Los cationes pueden, en un cierto grado, ser distribuidos a diferentes partes de la planta, pero la eficiencia de la absorción de la raíz así como las proporciones o rangos de transporte en la planta dependen fuertemente en las constantes de precipitación, enlaces de ligandos y mecanismos especializados para facilitar o bloquear la difusión y el sistema de paso de membrana.

Los ligandos orgánicos e inorgánicos son siempre enlazados al átomo metálico por uno de los siguientes posibles donadores (todos son no metales o metaloides): C, N, P, As, O, S, Se, Te, F, Cl, Br, I.

Las constantes de estabilidad de complejos metálicos con diferentes tipos de ligandos son diferentes y han inducido a la clasificación de la mayoría de los metales en: "Cationes metálicos tipo A" y "Cationes metálicos tipo B".

Los cationes metálicos tipo A tienen una configuración electrónica de un gas inerte. Sus orbitales electrónicos no son fácilmente deformados bajo la influencia de campos electrónicos. Forman complejos preferencialmente con el ión fluoruro, y ligandos conteniendo oxígeno como átomo donador, por consiguiente el agua es fuertemente atraída a estos metales, más fuerte que por ejemplo amonio y cianuro. Los precipitados o complejos disueltos son formados por iones hidróxilo, carbonato y fosfato. También los compuestos de cloro y yodo son débiles (y se presentaría más fácilmente bajo condiciones ácidas). Los iones alcalinos univalentes sólo forman relativamente pares iónicos inestables (complejos débiles), con algunos agentes quelantes ligandos macrocíclicos y polifosfatados. Si un agente quelante potencial sólo contienen N o S como ligandos, este no coordina con cationes tipo A para formar complejos de apreciable estabilidad.

Todos los cationes macronutrientes de plantas terrestres (p. ej. K^+ , Mg^{+2} y Ca^{+2}) pertenecen a este grupo pero también todos los otros metales alcalinos y alcalinoterreos así como Al^{+3} , Ga^{+3} , Y^{+3} , Zr^{+4} , Hf^{+4} , Cr^{+3} y Fe^{+3} pertenecen a este grupo.

Los cationes metálicos tipo B tienen una capa electrónica más deformables y son en consecuencia polarizados más fuertemente que los metales A. Ejemplos típicos de este grupo son Ag^+ , Au^+ , Hg^{+2} , Cu^{+1} y Cd^{+2} . Coordinan preferentemente con ligandos conteniendo S, N, I o cianuro como átomos

donadores; el nitrógeno en el amonio es enlazado más fuerte por estos metales que el oxígeno del agua, el cianuro es tomado en preferencia a iones hidroxilo junto con S^{2-} o HS^- . Los metales tipo B forman sulfitos insolubles. La estabilidad de complejos con cationes tipo B aumenta en el orden de $F < O < N < Cl < Br < I < S$. En los organismos estos metales se enlazan siempre fuertemente a aminoácidos conteniendo S (p. ej. en fitoquelatinas) (Markert, 1993).

Los micronutrientes Fe, Zn, Mn y Cu son relativamente insolubles en soluciones de nutrientes cuando son suministrados como sales inorgánicas comunes, y también son casi insolubles en muchas soluciones del suelo. Esta insolubilidad es especialmente marcada si el pH es superior a 5, a causa de esto y otras reacciones que contribuyen a la insolubilidad, ciertas plantas no pueden absorber suficiente de estos metales, especialmente Fe y Zn. Un medio para superar este problema de deficiencia es proveer estos elementos como quelatos metálicos. Ligandos como EDTA son ahora comúnmente usados para prevenir o corregir síntomas de deficiencia de Fe, en suelos calcáreos (Jing, *et al.* 1992).

Naturalmente también existen en el suelo quelatos de cationes micronutrientes, manteniendo una mayor disponibilidad de estos elementos. Aunque los agentes quelantes no todos han sido identificados, se considera que varios compuestos presentes en la materia orgánica del suelo son capaces de esto, incluyendo ciertos compuestos fenólicos, proteínas, aminoácidos y ácidos orgánicos (Salisbury y Ross, 1978; Singh, *et al.* 1987).

3.5 Espectroscopia de Absorción Atómica.

En la metodología general para la evaluación de los contaminantes metálicos existen las técnicas polarográficas, colorimétricas y Espectroscopia de Absorción Atómica (A.A.). Este último método instrumental de análisis se basa en la medida de la radiación electromagnética absorbida por átomos del elemento de interés.

En el análisis por A.A. el elemento a cuantificar debe de ser introducido a la celda de la muestra como átomos libres y neutros, a través de la celda constituida por una llama pasa el haz de radiación que va a ser absorbido por la muestra.

El átomo de cualquier elemento está formado por un núcleo rodeado por orbitales en los que se encuentran los electrones distribuidos de acuerdo a su configuración electrónica, la energía más baja corresponde a la configuración electrónica más estable en la cual los electrones están en los orbitales que les corresponde y se conoce como estado basal, cuando el átomo absorbe energía un electrón de algún orbital puede ser promovido a un orbital más alejado del núcleo y pasar al estado excitado, este estado es de alta energía, es inestable y el electrón retorna espontáneamente a su orbital original o estado basal emitiendo energía. La energía absorbida involucra la Espectrofotometría de Absorción Atómica y el retorno al estado basal involucra la Espectrofotometría de Emisión Atómica.

El análisis cuantitativo por Absorción Atómica se apega a la Ley de Lambert y Beer que implica la relación directa entre la cantidad de energía absorbida y el número de especies absorbentes. La energía absorbida tiene asociada una longitud de onda característica para cada elemento.

La ley de Lambert y Beer esta dada por la relación:

$$A = a b c$$

en donde

A=absorbancia.

a=Coefficiente de absorción, cte para un mismo elemento.

b=Longitud de la celda (10 cm)

c=Concentración de la especies absorbentes.

La aplicación práctica de esta relación consiste en determinar la absorbancia de una serie de soluciones patrón de concentración conocida, construir una gráfica que nos relacione estas dos variables y en esta gráfica interpolar el valor de absorbancia de una muestra de concentración desconocida para conocer su valor (Willard, *et al.* 1981)

Tres componentes básicos constituyen los espectrofotómetros de absorción atómica que emplean llama:

***Fuente de radiación.** Se necesita una fuente de radiación que emita líneas espectrales del elemento a cuantificar. Se usa una lámpara de cátodo hueco que contiene el elemento que se va a determinar, es elaborada para emitir energía de una longitud de onda específica.

***Nebulizador-Queimador.** En dicho sistema se va transformar la solución que contiene el elemento a cuantificar en vapor atómico, estos átomos neutros absorben la energía procedente de la fuente de luz excitándose así a los átomos neutros.

Mediante el sistema nebulizador se aspira la muestra a la cámara de premezclado, mezclándose el fino aerosol con los gases combustible y oxidante. En este momento, los metales se encuentran en solución en las gotas de aerosol. A medida que estas gotas pasan a la llama el calor evaporará al disolvente dejando finas partículas sólidas de la muestra.

Al seguir aplicando más calor se lleva a cabo la licuefacción y un calor adicional vaporizará las muestras, de manera continua, la molécula es disociada en los elementos individuales que la forman y estos llegan a su estado basal como átomos libres y neutros para efectuar el proceso de absorción de radiación.

***Sistema óptico y electrónico.** Este sistema nos permite transformar la variación de energía en una señal digital de absorbancia (Castillo, *et al.* 1993).

3.6 Descripción del Área de Estudio (Ixmiquilpan, Hgo.)

El Municipio de Ixmiquilpan se localiza en la parte central del Estado de Hidalgo, entre los 19°36' y los 20°24' latitud Norte, y los 97°58' longitud Oeste del meridiano de Greenwich; con un extensión territorial de 20,885 km² y cubre el 1.06% en la República Mexicana, con una población de 48,699 habitantes (1980). Limita al Norte con Nicolás Flores y Cardonal, al Sur con Chilcuatla y Santiago de Anaya, al Oriente con Cuatepec y Santiago de Anaya y al Poniente con Tasquillo y Alfayuca. Se encuentra a 84 Km de Pachuca y a 225 km del Distrito Federal. Aunado a esto se encuentra también su cercanía con la presa Endhó, que almacena aguas negras y al río Tula el cual tiene como uno de sus afluentes al río el Salado en donde desembocan las aguas negras que son conducidas por el Gran Canal de Desagüe, que transporta las aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Este municipio pertenece a una de las zonas agrícolas más importantes del país, el clima que presenta la región es de tipo seco semiárido, con verano fresco y largo, con régimen de lluvias de verano y poca oscilación térmica, presenta un ambiente natural sumamente hostil para sus habitantes, los cuales han logrado establecer una cierta relación con su medio. Las zonas de uso potencial del suelo están divididas por una red de riego (3,864 ha), también existe una zona de temporal (6,761 ha), pastizales para el desarrollo de la ovinocultura y matorrales para el desarrollo del libre pastoreo. La porción que cuenta con una red de riego, a lo largo de todo el año ofrece una producción anual muy importante para la economía del municipio (Cortés, 1985).

Por su cercanía a la zona metropolitana de la ciudad de México, el Valle del Mezquital recibe sus aguas residuales a través de diversos canales. Ya sea por el Tajo de Nochistongo, el canal de Tequisquiác o por el Drenaje Profundo, el Mezquital es prácticamente inundado por las aguas negras de la capital de la República, aparte de estas aguas, la región también recibe un volumen importante de aguas blancas (aguas de manantiales que brotan de San Salvador). De esta forma, el DDR 063 es irrigado no sólo por aguas negras, si no también por aguas blancas y aguas mezcladas.

Sus principales cultivos son: maíz, sorgo, cebada, alfalfa, chile, jitomate, trigo, cartamo, calabaza, cebolla, ajo, haba, avena, cabe mencionar que de estos cultivos, el ajo y otras hortalizas está prohibido su cultivo, pero a pesar de esto se cultivan en la región (Quadri, 1989).

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El gran volumen de aguas residuales generadas en las grandes ciudades como el Distrito Federal, así como la baja disponibilidad de agua de mejor calidad, ha motivado a la práctica común y extensiva de regar zonas agrícolas con éstas sin que existan estudios previos de su calidad y que evalúen el impacto que las mismas tienen en el agroecosistema. Esta tendencia puede ser muy peligrosa por la acumulación de contaminantes en el suelo, que pueden ser incorporados a los cultivos, afectando la cadena natural suelo-planta-hombre y alterando propiedades del suelo y desarrollo de la plantas.

En la actualidad México ocupa el segundo lugar en el mundo en el uso de aguas residuales con fines de riego agrícola. Actualmente en nuestro país se riegan 370,000 has. contribuyendo el Estado de Hidalgo con el 22% de esta superficie, localizándose dentro de este el municipio de Ixmiquilpan a 84 Km de Pachuca (Velázquez, 1992). Dichas tierras son regadas con aguas residuales mezcladas con aguas blancas provenientes de manantiales y presas, este municipio pertenece a una de las zonas agrícolas de mayor importancia en el país.

Estas aguas que originalmente llevaban desechos orgánicos se volvieron cada vez más complejas, debido principalmente a su alto contenido en metales pesados como resultado de la industrialización y explosión demográfica que ocurrió a partir de la década de los sesenta, por lo que es posible que al ser utilizadas con fines de riego se contaminen los productos agrícolas (Hernández, 1991). Diversos investigadores (Alvarez, 1993; Barceló, *et al.* 1989; y Zuñiga, 1990) señalan que el uso de aguas residuales en agricultura provocan la dispersión de contaminantes, degradación de suelos, contaminación de mantos freáticos y de especies vegetales, alterando la salud pública.

La contaminación de las especies vegetales en este caso se debe a la acumulación de los metales pesados considerados como contaminantes y los metales considerados como constituyentes, teniendo como consecuencia la presencia de ellos en el organismo humano mediante un proceso cíclico que incluye suelo, agua, aire, animales y hombre.

En el presente trabajo se hará la evaluación de los elementos contaminantes como: Pb, Cd, Cr, Ni y elementos constituyentes: Cu, Fe, Na, K, Ca, Mg, en tejidos de cultivos hortícolas (tabla IV) irrigados con aguas residuales localizados en el Municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo, utilizando la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica a fin de conocer los niveles de estos elementos en el tejido de distintas especies cultivadas bajo riego.

TABLA IV. Especies hortícolas y sus estructuras vegetales analizadas.

Nombre científico	Nombre común	Estructuras vegetales de análisis
<i>Allium sativum</i>	Ajo	raíz, tallo*, peciolo y hoja
<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>	Brócoli	raíz, tallo, hoja y flor*
<i>Cucurbita pepo</i>	Calabaza	raíz, tallo, hoja, peciolo y fruto*
<i>Allium cepa</i>	Cebolla	raíz, tallo*, peciolo y hoja
<i>Brassica oleracea</i> var. <i>botrytis</i>	Coliflor	raíz, tallo, hoja y flor*
<i>Vicia faba</i>	Haba	raíz, tallo, hoja, flor, vaina y semilla*
<i>Cicer arietinum</i>	Garbanzo	raíz, tallo, hoja, vaina y semilla*
<i>Lycopersicon esculentum</i>	Tomate	raíz, tallo, hoja y fruto*

*Partes comestibles

5. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL: Evaluar los niveles de concentración de los elementos contaminantes y constituyentes en tejidos de ajo (*Allium sativum*), brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), calabaza (*Cucurbita pepo*), cebolla (*Allium cepa*), coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis*), haba (*Vicia faba*), garbanzo (*Cicer arietinum*) y tomate (*Lycopersicon esculentum*) del Municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo mediante la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica con llama.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Evaluar la concentración de metales constituyentes: Cu, Fe, Zn, K, Na, Mg y Ca en diferentes órganos de las especies de hortalizas seleccionadas.
2. Evaluar la concentración de metales contaminantes: Pb, Ni, Cd y Cr en diferentes órganos de las especies de hortalizas seleccionadas.
3. Identificar las estructuras vegetales bioacumuladoras de los metales para cada especie hortícola.
4. Establecer las correlaciones entre los elementos estudiados para cada estructura vegetal.

6. HIPÓTESIS

Como resultado de las elevadas concentraciones de elementos metálicos tanto constituyentes como contaminantes en aguas residuales destinadas al riego de hortalizas se observa un aumento de su concentración basal como consecuencia de una mayor absorción a través de la raíz, ocurriendo posteriormente una distribución variable hacia toda la planta, que varía para cada especie.

7. MATERIAL Y EQUIPO

1. Material.

Matraces volumétricos de 50 y 100 ml Pyrex.

Pipetas volumétricas de 1, 2, 5 y 10 ml Pyrex.

Pipetas graduadas de 5 y 2 ml Pyrex.

Matraces kjeldahl 30 ml Pyrex.

Frascos de polietileno de 50 ml.

Probetas de 50 y 200 ml Pyrex.

Papel aluminio.

2. Instrumentos y equipo.

Espectrofotómetro PYE-UNICAM SP 192 con quemador de flujo laminar de 10 cm. de longitud.

Lámpara de cátodo hueco para cada uno de los elementos.

Balanza analítica SARTORIUS 2842

Estufa RIOSSA HS

Digestor LABCONCO.

3. Reactivos**

Ácido nítrico J.T. BAKER.

Ácido sulfúrico J.T. BAKER.

Ácido perclórico J.T. BAKER.

Peróxido de hidrógeno J.T. Baker

** La pureza de los reactivos es grado analítico.

4. Soluciones

Ácido nítrico : ácido sulfúrico : ácido perclórico (5:1:1).

Solución estándar para cada elemento de 1,000 ppm. Merck Titrisol

8. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En la presente investigación se efectuó una colecta de 8 diferentes cultivos hortícolas en el Municipio de Ixmiquilpan, Hidalgo (Tabla IV).

La toma de muestras se realizó en parcelas seleccionadas al azar cuando los cultivos se encontraron entre las etapas fenológicas de floración y madurez fisiológica.

El muestreo fue realizado en tres colectas diferentes, abril, mayo y junio de 1994.

Los ejemplares de cada una de las especies hortícolas se tomaron manualmente utilizando guantes de látex extrayendo cada planta con su raíz, para este fin se evitó el uso de herramientas metálicas; los ejemplares, así obtenidos, fueron transportados al laboratorio de análisis en bolsas de polietileno etiquetadas adecuadamente.

En el laboratorio las muestras vegetales fueron subdivididas de acuerdo a las diferentes estructuras que cada una de las especies presenta y en algunos casos considerando la parte del vegetal que es consumida como se muestra para cada caso en la Tabla IV.

Cada una de las estructuras vegetales fueron secadas en forma independiente en una estufa a una temperatura de 70-73 °C durante 48 horas. Cada muestra fue molida en un mortero procurando obtener la misma textura final.

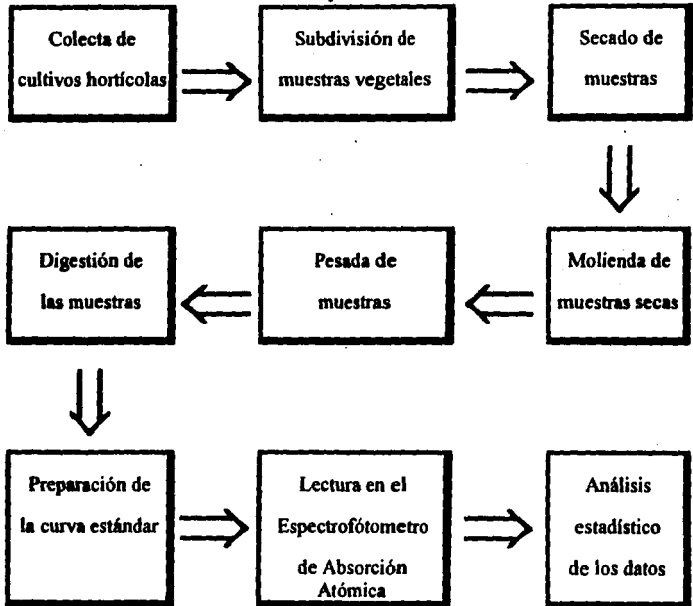
A 0.5 gramos de muestra se le adicionaron 8 ml de mezcla ácida (ácido nítrico, ácido sulfúrico y ácido perclórico), se calentó suavemente en el digestor hasta digestión completa, después se pasó esta solución a un matraz aforado de 50 ml y se aforó con agua desionizada, se filtró y procedió a leer en el Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

En forma paralela se procesó una muestra blanco y se preparó para cada elemento una curva estándar de concentraciones conocidas.

Análisis estadístico.

Todo el análisis estadístico y procesamiento de datos fueron efectuados en una computadora AcerMate 386SX/20, usando un paquete estadístico (SAS). Se llevó a cabo un análisis de varianza seguido por una prueba de Tukey para comparar las medias de los elementos en las diferentes estructuras para cada especie. Los coeficientes de correlación entre los diferentes metales fueron calculados usando valores de Pearson.

DIAGRAMA DE FLUJO

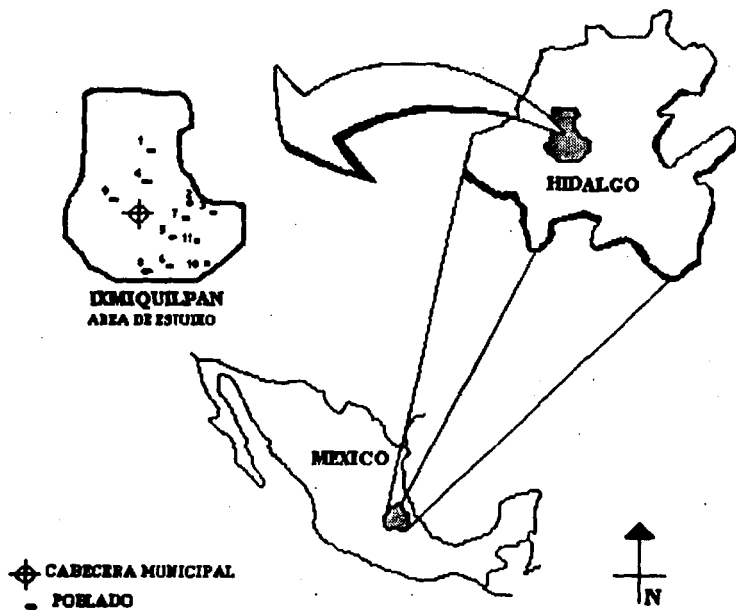


Lugares de muestreo de especies hortícolas (Ixmitzilpan, Hgo)

Especie	Lugar de muestreo
Ajo n=6	1 Camino al poblado de las Emes 2 Jaguey Capula 3 Loma Pueblo Nuevo
Brócoli n=4	4 San Nicolas 1 Camino al pueblo de las Emes
Calabaza n=4	5 El Tephe (junto al Manantial) 6 Camino al Maguey Blanco
Cebolla n=2	7 Pueblo Nuevo
Coliflor n=6	8 Manantial 9 Parada de los Pinos 10 Villagran
Garbanzo n=2	11 Taxhado
Haba n=6	2 Jaguey Capula 11 Taxhado 7 Pueblo Nuevo
Tomate n=6	4 San Nicolas 3 Loma Pueblo Nuevo 7 Pueblo Nuevo

n=número de muestras obtenidas.

LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO



9. RESULTADOS

Las medias de los valores analíticos obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla VI. Concentraciones de metales constituyentes en ajo (ppm).

Estructura	Cu	Zn ($\times 10^1$)	Fe ($\times 10^2$)	K ($\times 10^3$)	Na ($\times 10^3$)	Mg ($\times 10^3$)	Ca ($\times 10^3$)
Raíz	4.13	4.5	16.86	21.3	26.4	9.5	8.6
Tallo	3.5	2.73	1.17	19.2	1.3	3.7	3.4
Vaina	3.5	3.25	1.41	23.3	1.3	6.6	2.9
Hoja	4.85	3.15	10.67	41.4	1.8	13.3	9.8

Tabla VII. Concentraciones de metales constituyentes en brócoli (ppm).

Estructura	Cu	Zn ($\times 10^1$)	Fe ($\times 10^2$)	K ($\times 10^3$)	Na ($\times 10^3$)	Mg ($\times 10^3$)	Ca ($\times 10^3$)
Raíz	2.92	3.22	1.30	32	8.4	8.4	5.1
Tallo	1.95	3.7	1.60	52.1	5.6	9.3	6.2
Pecíolo	2.12	2.38	0.77	45.5	5.7	10	15.1
Hoja	4.3	3.65	1.56	31	11.1	11.6	19.9
Flor	2.92	6.1	1.39	38.4	2.0	4.5	2.2

Tabla VI. Concentraciones de metales constituyentes en calabaza (ppm).

Estructura	Cu	Zn ($\times 10^1$)	Fe ($\times 10^2$)	K ($\times 10^3$)	Na ($\times 10^3$)	Mg ($\times 10^3$)	Ca ($\times 10^3$)
Raíz	7.03	6.91	14.84	45.5	8.2	12.5	9.8
Tallo	5.71	4.91	6.16	52.6	2.2	13.6	13.2
Pecíolo	2.27	3.45	3.51	63.7	1.6	11.6	15.2
Hoja	4.38	7.1	7.63	39.9	1.5	15.4	23.4
Fruto	6.15	5.2	2.96	49.5	1.3	10.5	5.2

Tabla VI. Concentraciones de metales constituyentes en cebolla (ppm).

Estructura	Cu	Zn ($\times 10^1$)	Fe ($\times 10^2$)	K ($\times 10^3$)	Na ($\times 10^3$)	Mg ($\times 10^3$)	Ca ($\times 10^3$)
Raíz	7.95	6.7	28.13	22.8	19.5	10.6	10.1
Tallo	5.3	3.8	20.65	19.5	1.9	3.9	1.8
Vaina	2.6	2.45	8.14	40.8	5.5	8.4	4.8
Hoja	7.25	2.95	4.73	43.7	10.8	12.2	15.2

Tabla VI. Concentraciones de metales constituyentes en coliflor (ppm).

Estructura	Cu	Zn ($\times 10^1$)	Fe ($\times 10^2$)	K ($\times 10^3$)	Na ($\times 10^3$)	Mg ($\times 10^3$)	Ca ($\times 10^3$)
Raíz	3.46	4.68	21.85	20.9	10.2	9.8	5.8
Tallo	4.81	5.93	6.48	48.3	10.6	8.5	3.5
Pecíolo	1.95	2.46	13.35	29.4	20.1	11.7	19.2
Hoja	5.5	4.11	23.11	37.4	17.6	11.3	18.2
Flor	4.16	5.06	4.09	38.1	4.0	5.9	2.5

Tabla VII. Concentraciones de metales constituyentes en garbanzo (ppm).

Estructura	Cu	Zn ($\times 10^1$)	Fe ($\times 10^2$)	K ($\times 10^3$)	Na ($\times 10^3$)	Mg ($\times 10^3$)	Ca ($\times 10^3$)
Raíz	4.6	2.35	7.06	14.1	11.8	3.3	2.1
Tallo	5.25	3.05	4.42	21.4	5.8	6.9	2.9
Hoja	9.95	6.8	4.45	20.4	4.5	8.5	14.5
Vaina	5.25	2.5	4.40	31.5	2.2	8.8	14.2
Semilla	3.3	5.65	1.21	2.29	2.1	2.3	1.0

Tabla VI. Concentraciones de metales constituyentes en haba (ppm).

Estructura	Cu	Zn ($\times 10^1$)	Fe ($\times 10^2$)	K ($\times 10^3$)	Na ($\times 10^3$)	Mg ($\times 10^3$)	Ca ($\times 10^3$)
Raíz	4.15	4.81	23.63	27.6	11.6	4.5	4.8
Tallo	5.06	2.48	9.03	21.5	18	7.0	5.5
Hoja	7.26	5.28	15.05	22.1	10.7	11.2	5.1
Vaina	12.92	3.97	3.96	40.4	6.1	5.2	2.5
Semilla	7.6	5.3	1.32	16	3.4	3.7	0.8
Flor	2.6	5.3	1.92	31.8	4.1	5.8	2.8

86

Tabla VII. Concentraciones de metales constituyentes en tomate (ppm)

Estructura	Cu	Zn ($\times 10^1$)	Fe ($\times 10^2$)	K ($\times 10^3$)	Na ($\times 10^3$)	Mg ($\times 10^3$)	Ca ($\times 10^3$)
Raíz	8.6	4.88	15.34	36.5	5.1	8.7	4.6
Tallo	6.83	4.36	3.43	50.6	1.5	10	5.3
Hoja	12.6	6.85	15.74	43.6	1.1	13.2	9.8
Fruto	4.81	6.86	1.92	44.6	1.1	4.6	0.8

Tabla VI. Concentraciones de metales contaminantes en ajo (ppm).

Estructura	Plomo	Niquel	Cadmio	Cromo
Raíz	12.71	13.3	10.33	6.66
Tallo	4.78	5	8.66	3.33
Vaina	10.33	9.16	4	8.33
Hoja	13.5	15	9.33	11.66

57

Tabla VI. Concentraciones de metales contaminantes en brócoli (ppm).

Estructura	Plomo	Niquel	Cadmio	Cromo
Raíz	22.62	8.75	4.5	5
Tallo	14.32	12.5	8	0
Pecíolo	12.5	9.37	7	5
Hoja	16.67	1.25	12.5	0
Flor	5.97	3.75	6.5	0

Tabla VI4. Concentraciones de metales contaminantes en calabaza (ppm).

Estructura	Plomo	Niquel	Cadmio	Cromo
Raiz	11.13	10.83	7.33	3.33
Tallo	17.46	10	8	8.33
Peciolo	11.92	8.75	8	5
Hoja	19.86	16.66	11	10
Fruto	9.53	8.33	6.66	0

Tabla VI4. Concentraciones de metales contaminantes en cebolla (ppm).

Estructura	Plomo	Niquel	Cadmio	Cromo
Raiz	19.05	2.5	8	20
Tallo	9.55	2.5	4	10
Vaina	7.15	0	6	5
Hoja	11.9	17.5	3	15

Tabla VI. Concentraciones de metales contaminantes en coliflor (ppm).

Estructura	Plomo	Niquel	Cadmio	Cromo
Raíz	12.7	15	10	5
Tallo	11.11	11.66	11	0
Pecíolo	9.55	16.66	11	11.66
Hoja	20.65	5.83	8	6.66
Flor	8.75	6.66	3.33	0

Tabla VI. Concentraciones de metales contaminantes en garbanzo (ppm).

Estructura	Plomo	Niquel	Cadmio	Cromo
Raíz	2.4	15	5	0
Tallo	7.15	2.5	8	5
Hoja	11.9	10	9	5
Vaina	7.15	17.5	9	10
Semilla	11.9	2.5	6	5

Tabla VI. Concentraciones de metales contaminantes en haba (ppm).

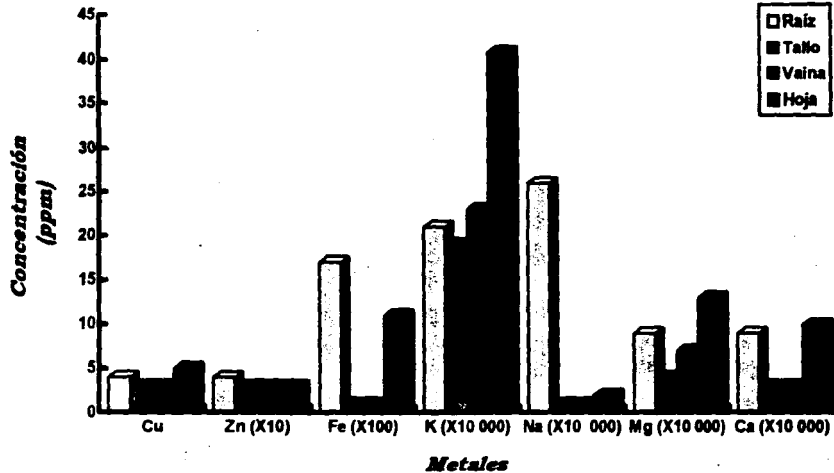
Estructura	Plomo	Niquel	Cadmio	Cromo
Raíz	2.4	6.66	4	6.66
Tallo	11.91	5.83	4.66	3.33
Hoja	11.91	15	7.66	10
Vaina	8.32	6.25	2	2.5
Semilla	8.32	2.5	2	7.5
Flor	0	5	0	15

8

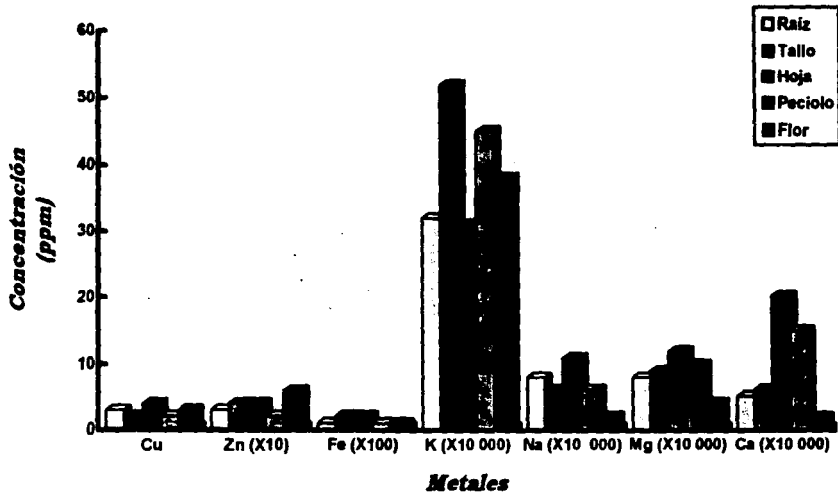
Tabla VI. Concentraciones de metales contaminantes en tomate (ppm).

Estructura	Plomo	Niquel	Cadmio	Cromo
Raíz	12.7	10	6	8.33
Tallo	11.13	17.5	2.33	5
Hoja	11.13	6.66	7.33	8.33
Fruto	6.35	4.16	5.33	0

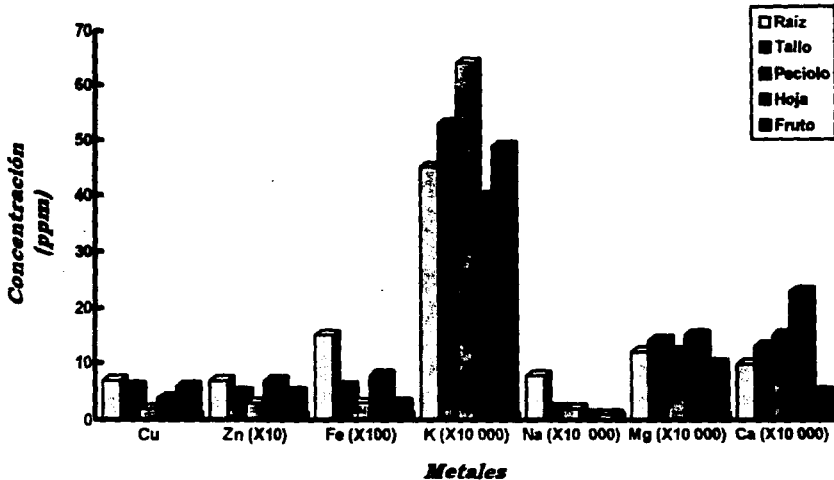
Gráfica 1. Niveles de los metales constituyentes en ajo



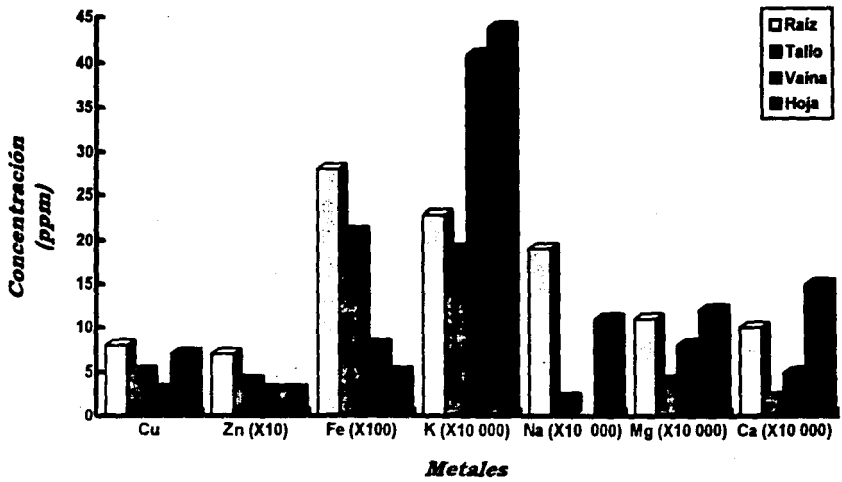
Gráfica 2. Niveles de metales constituyentes en brócoli



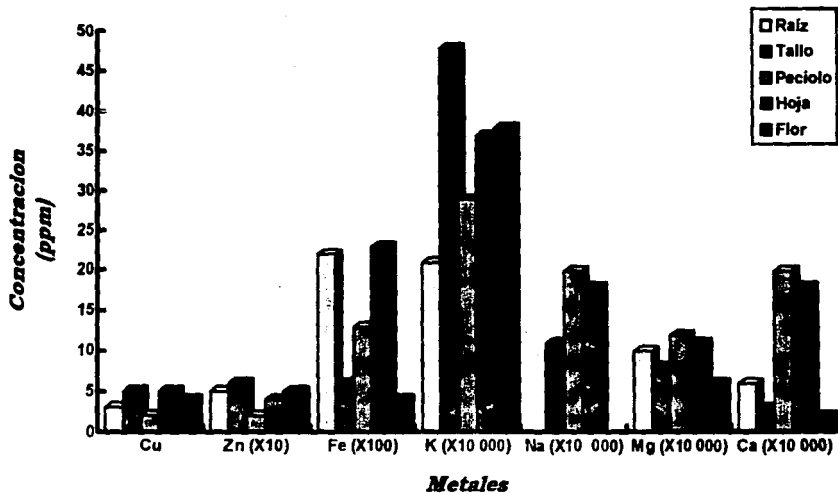
Gráfica 3. Niveles de metales constituyentes en calabaza



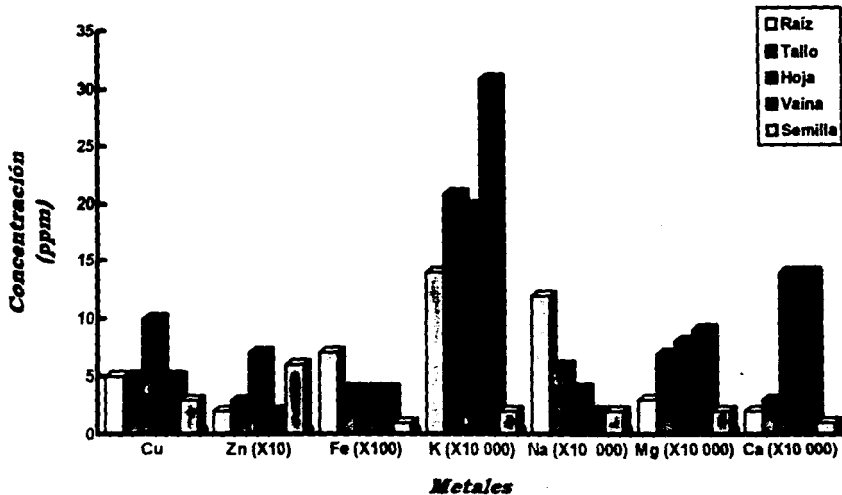
Gráfica 4. Niveles de metales constituyentes en cebolla



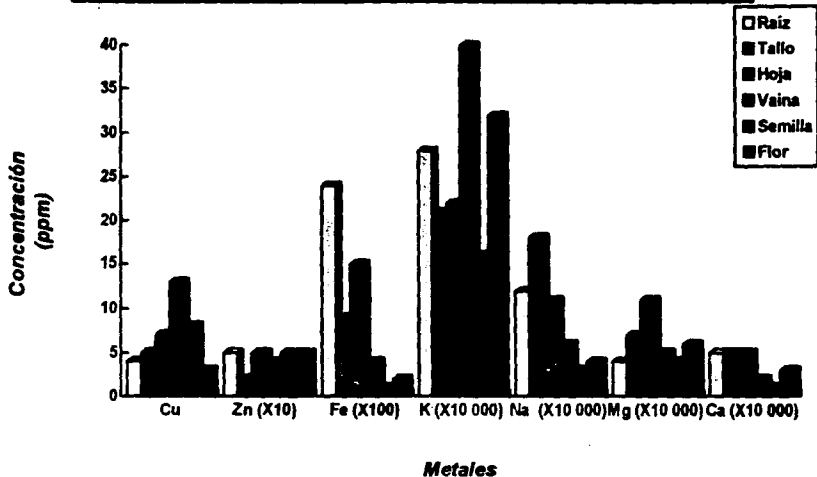
Gráfica 5. Niveles de metales constituyentes en coliflor



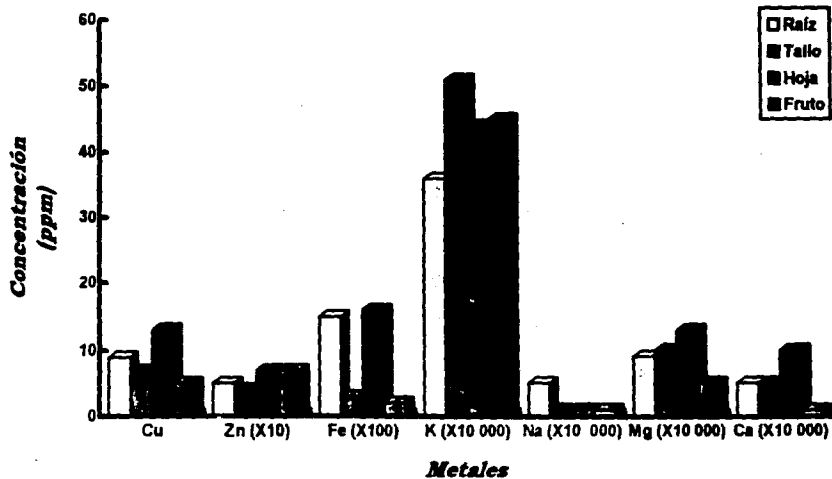
Gráfica 6. Niveles de metales constituyentes en garbanzo



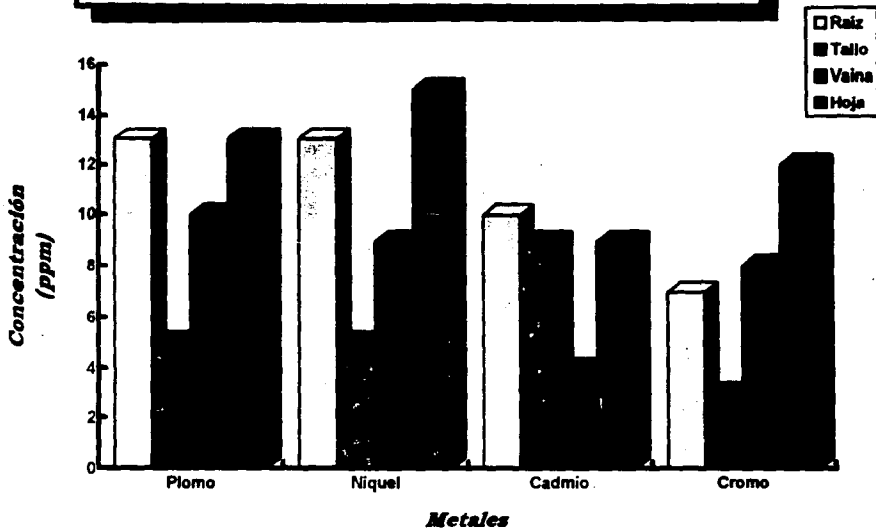
Gráfica 7. Niveles de metales constituyentes en haba



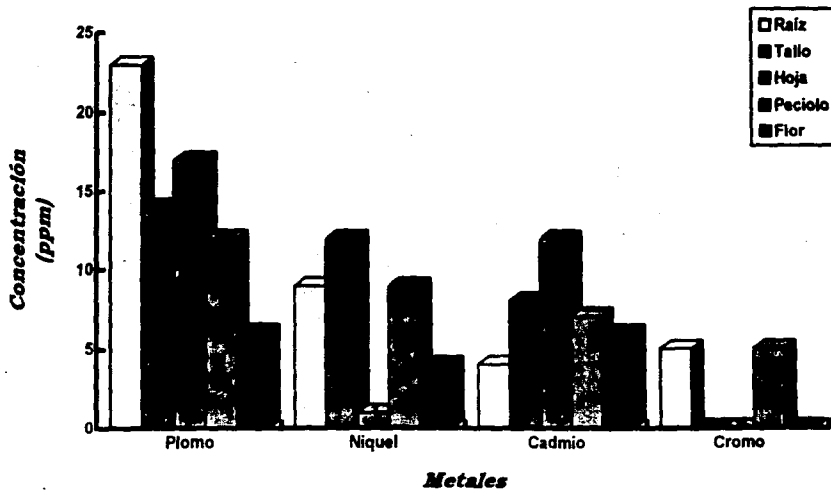
Gráfica 8. Niveles de metales constituyentes en tomate



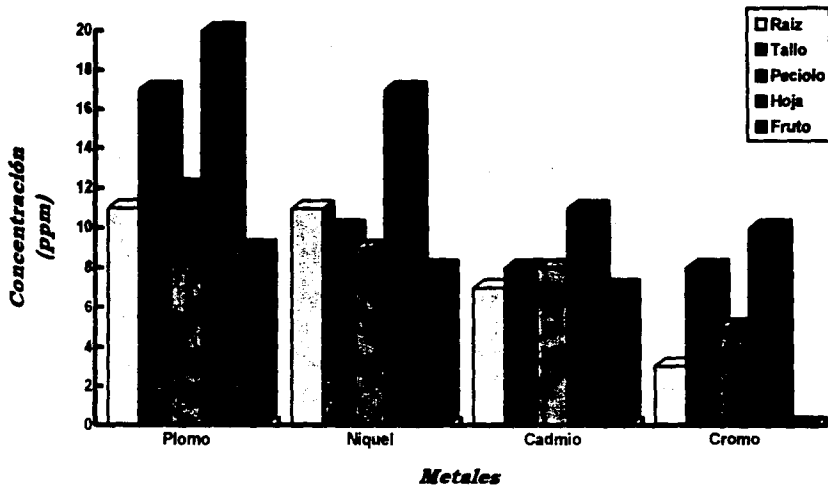
Gráfica 9. Niveles de metales contaminantes en ajo.

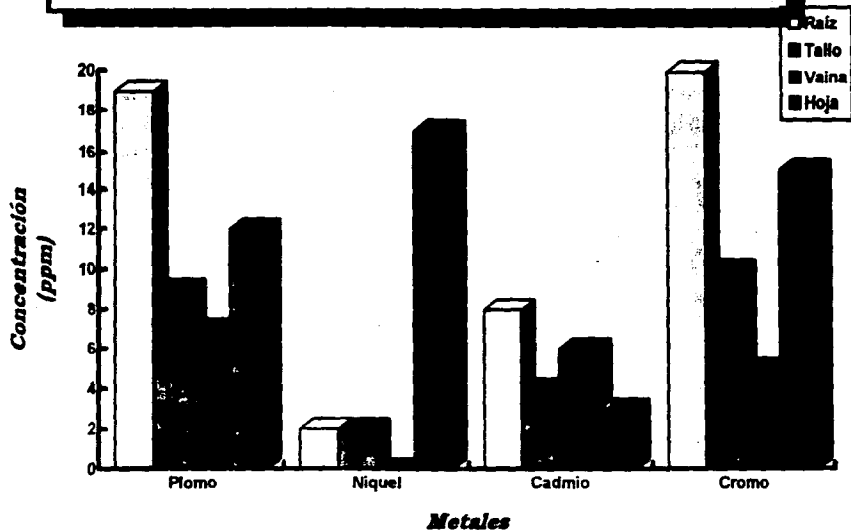


Gráfica 10. Niveles de metales contaminantes en brócoli.

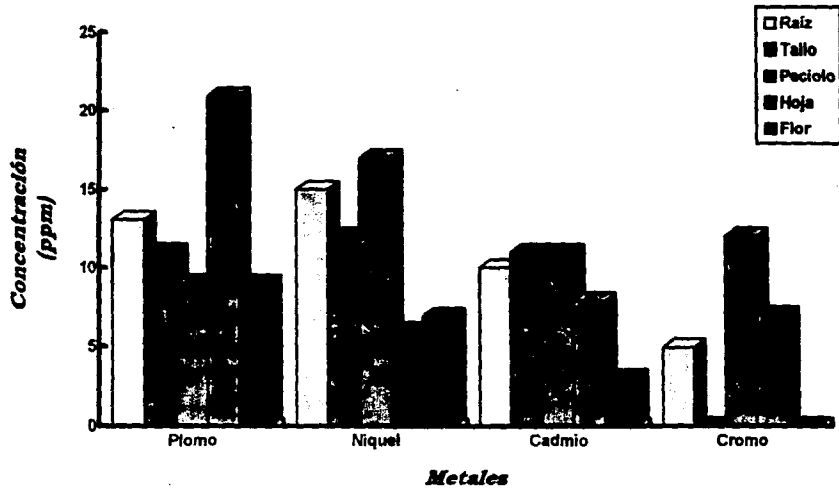


Gráfica 11. Niveles de metales contaminantes en calabaza.

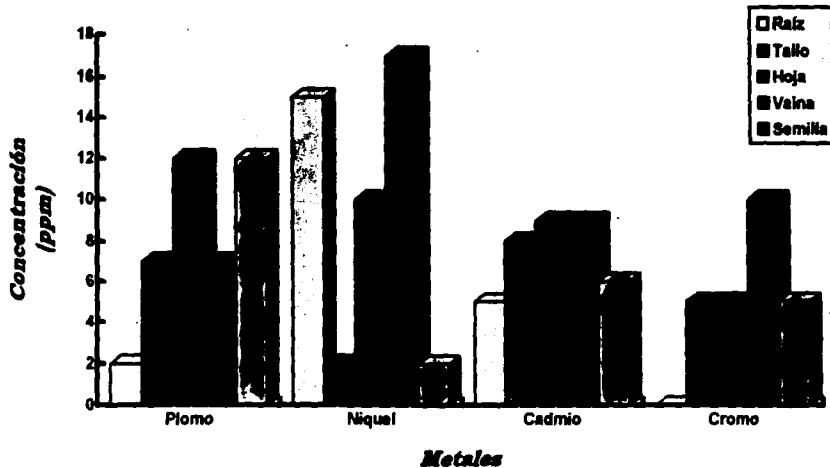


Gráfica 12. Niveles de metales contaminantes en cebolla

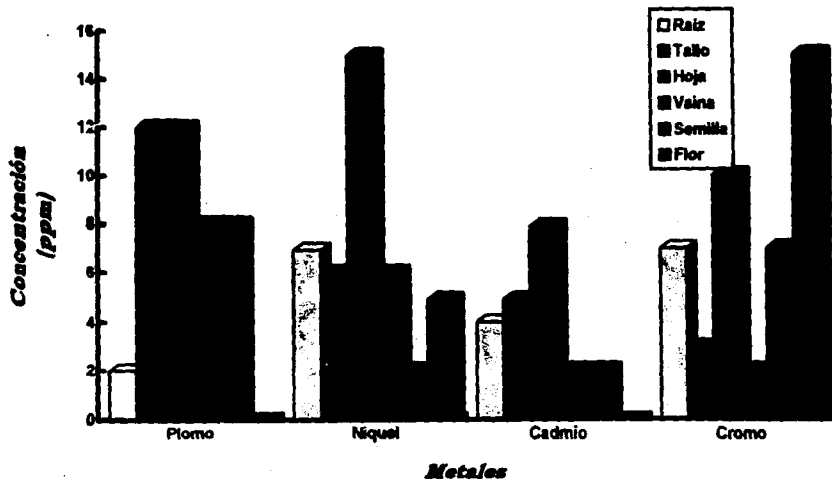
Gráfica 13. Niveles de metales contaminantes en coliflor.



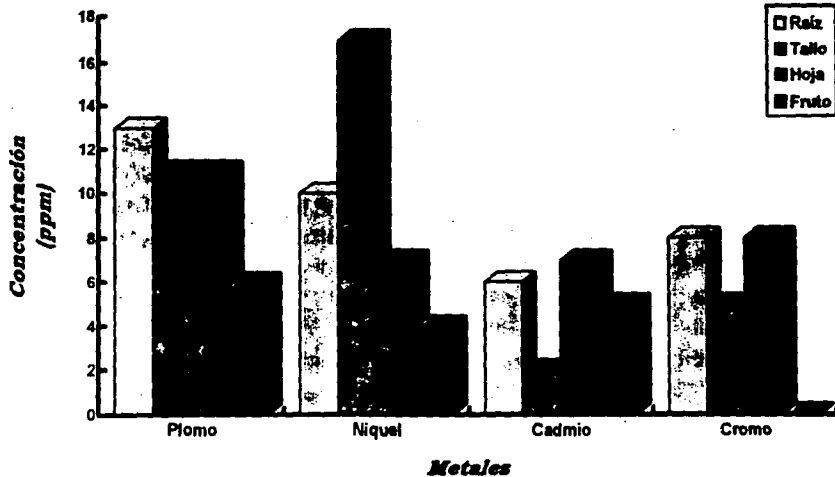
Gráfica 14. Niveles de metales contaminantes en garbanzo



Gráfica 15. Niveles de metales contaminantes en haba



Gráfica 16. Niveles de metales contaminantes en tomate



ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A los resultados analíticos obtenidos se les aplico un análisis de varianza seguido de una prueba de Tukey. Así como también un análisis de correlación. Para esto se utilizo un paquete estadístico (SAS). Las probabilidades asociadas obtenidas se presentan en la tabla VII, y los resultados obtenidos por la prueba de Tukey en la tabla VIII.

Tabla VII. Probabilidades asociadas (Pr) obtenidas en el análisis de varianza para estructuras dentro de cada especie.

Elemento	Ajo	Brocoli	Calabaza	Cebolla	Coliflor	Garbanzo	Haba	Tomate
Cu	0.8256	0.6194	0.4608	0.0944	0.0036*	0.4594	0.0034*	0.0092*
Zn	0.0687*	0.0001*	0.1328	0.1325	0.0001*	0.1317	0.0112*	0.0941
Fe	0.0001*	0.0737	0.0004*	0.0011*	0.0001*	0.0589	0.0001*	0.0001*
K	0.0001*	0.0002*	0.0123*	0.0059*	0.0001*	0.1599	0.0032*	0.0017*
Na	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.1120	0.0001*	0.0001*	0.0012*	0.0001*
Mg	0.0001*	0.0001*	0.1168	0.0848	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*
Ca	0.0001*	0.0001*	0.0008*	0.0195*	0.0001*	0.0203*	0.0001*	0.0001*
Pb	0.0122*	0.0053*	0.1178	0.6475	0.0019*	0.1453	0.0005*	0.1658
Ni	0.1982	0.1109	0.2749	0.0275*	0.0020*	0.1010	0.0077*	0.0016*
Cd	0.0210*	0.0302*	0.0994	0.2807	0.0001*	0.3292	0.0043*	0.0001*
Cr	0.1702	0.4380	0.2427	0.5000	0.0693	0.8299	0.4234	0.0664

*Si hay diferencia significativa entre las medias.

$\alpha=0.05$

H_0 =No hay diferencia significativa entre las medias

H_a =Si hay diferencia significativa entre las medias

Si $Pr > 0.05$; se acepta H_0

Si $Pr < 0.05$; se rechaza H_0

Tabla VIII. Medias significativamente diferentes dentro de cada especie (Prueba de Tukey).

Elemento	Ajo	Brocoli	Calabaza	Cebolla	Coliflor	Garbanzo	Haba	Tomate
Cu					hoja-pecíolo tallo-pecíolo		vaina-tallo -raíz -flor	hoja-fruto
Zn	raíz-tallo	fruto-tallo -hoja -raíz -pecíolo pecíolo-tallo -hoja -fruto			tallo-hoja pecíolo-raíz -fruto -tallo		tallo-semilla -hoja	
Fe	raíz-vaina -tallo hoja-vaina -tallo		raíz-hoja -tallo -pecíolo -fruto	raíz-vaina -tallo -hoja vaina-tallo	raíz-tallo -fruto -hoja -pecíolo pecíolo-tallo	raíz-semilla	raíz-hoja -tallo -vaina -flor -semilla hoja-tallo -flor -semilla -vaina tallo-semilla	hoja-tallo -fruto raíz-tallo -fruto

Tabla VIII. Medias significativamente diferentes dentro de cada especie (Prueba de Tukey) (Continuación).

Elemento	Ajo	Brocoli	Calabaza	Cebolla	Coliflor	Garbanzo	Haba	Tomate
K	hoja-vaina -raiz -tallo	tallo-hoja -fruto -raiz raiz-fruto -peciolo hoja-fruto -peciolo	peciolo-hoja	hoja-raiz -tallo vaina-raiz -tallo	tallo-peciolo raiz-fruto -hoja -tallo		vaina-hoja -tallo -semilla	tallo-raiz
Na	raiz-hoja -tallo -vaina	hoja-raiz -peciolo -tallo -fruto raiz-peciolo -tallo -fruto	raiz-tallo -peciolo -hoja -fruto		peciolo-tallo -raiz fruto-peciolo -hoja -tallo -raiz hoja-tallo -raiz	raiz-tallo -fruto -hoja	tallo-vaina -flor -semilla	raiz-tallo -fruto -hoja
Mg	hoja-raiz -vaina -tallo raiz-vaina -tallo	hoja-raiz -fruto			fruto-peciolo -hoja -raiz -tallo peciolo-raiz -tallo hoja-tallo	hoja-tallo -raiz -fruto fruto-tallo -raiz	hoja-tallo -flor -vaina -raiz -semilla	hoja-tallo -raiz fruto-tallo -raiz

Tabla VIII. Medias significativamente diferentes dentro de cada especie (Prueba de Tukey) (Continuación).

Elemento	Ajo	Brocoli	Calabaza	Cebolla	Coflor	Garbanzo	Haba	Tomate
Ca	hoja-raiz -tallo -vaina raiz-tallo -vaina	hoja-tallo -raiz -fruto peciolo-tallo -raiz -fruto	hoja-tallo -raiz -fruto	hoja-vaina -tallo	peciolo-raiz -tallo fruto hoja-raiz -tallo -fruto	hoja-tallo -raiz -semilla	tallo-vaina -semilla hoja-vaina -semilla raiz-vaina -semilla	hoja-tallo -raiz fruto-hoja -tallo -raiz
Pb	raiz-tallo hoja-tallo	fruto-raiz			hoja-raiz -tallo -peciolo -fruto		tallo-raiz -flor hoja-raiz -flor	
Ni				hoja-tallo -vaina	peciolo-fruto -hoja raiz-hoja		hoja-tallo -semilla	tallo-hoja -fruto
Cd	raiz-vaina	hoja-raiz			fruto-tallo -peciolo -raiz -hoja		hoja-semilla -vaina -flor	hoja-fruto tallo-raiz -hoja -fruto

NOTA: Para el caso del Cr no hubo diferencias significativas entre las medias.

Tabla IX. Interacciones entre los elementos obtenidas del análisis de correlación.

Estructura vegetal	Negativa	Positiva	Estructura vegetal	Negativa	Positiva
Flor		Zn-K Mg-Fe Mg-Ca	Raíz	Na-K Cr-Ni	Cu-Zn Cu-Pb Cu-K Pb-Zn Zn-K Mg-Zn Mg-Fe Ca-Zn Ca-Pb Cd-Ni Mg-Pb Mg-Ca
Fruto		Na-K Mg-K Na-Mg Mg-Ca	Semilla	Pb-Cu Cd-Na	
Hoja	Pb-Fe Ca-Cu Ca-Fe Na-Mg	Zn-Cu Cu-Fe Fe-Zn Na-Pb Mg-Ni Mg-K Ca-Pb Cd-Pb Cr-Ni Mg-Cr Ca-Cd Cr-Mg	Tallo	Cr-Ni Cd-Cr	Zn-Pb Zn-K Ni-K K-Pb Na-Fe Mg-Zn Mg-Pb Mg-Ni Mg-K Ca-Pb Ca-Ni Ca-Mg
Pecíolo	Ni-K Na-K Mg-Pb Ca-Pb Ca-K Cd-K Cu-Cr Zn-Ca	Zn-Fe Zn-K Fe-K Na-Ni Ca-Ni Na-Ca Ca-Cd	Vaina	Cr-K	Fe-K K-Cu K-Fe Na-Cu Na-K Cu-Na K-Na Mg-Ca Cd-Cr

Interacción negativa= comportamiento antagónico

Interacción positiva= comportamiento sinérgico

10. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente estudio se seleccionó el análisis de hortalizas, ya que se encuentran dentro de la cadena alimenticia y cualquier efecto que altere los niveles normales de sus nutrientes podrá afectar la salud de los seres vivos que las consumen.

Los elementos analizados fueron Cu, Zn, Fe, K, Na, Mg, Ca, Pb, Ni, Cd y Cr en las estructuras y especies que se presentan en la tabla IV.

Las medias de los resultados analíticos obtenidos para elementos constituyentes se presentan de la gráfica 1 a la gráfica 8 y los contaminantes de la gráfica 9 a la gráfica 16. En éstas se observa que de los nutrientes esenciales estudiados el K es el que se presentó en mayor cantidad para todos los cultivos, eso se explica dado que:

1. Se trata de un macronutriente que regula el equilibrio hídrico en el tejido vegetal,
2. Existe un elevado contenido de K en los suelos de todo el país, a consecuencia del aporte de minerales feldespáticos, con orígenes principalmente volcánicos, y
3. Cuando existe mucho K en el suelo, las plantas lo absorben sin establecer límite en su metabolismo, fenómeno que se conoce como "consumo de lujo" del K.

Para los elementos analizados considerados como contaminantes (Pb, Cd, Cr y Ni), el Pb presentó el más alto nivel para todos los cultivos, sin embargo no rebasa los límites de toxicidad de acuerdo a Kabata-Pendias, *et al.* (1992); el Cd aún cuando su concentración no es la más alta para todos los cultivos este elemento rebasa el límite de toxicidad.

En la tabla VIa-4 aparecen las concentraciones de los metales constituyentes para los cultivos hortícolas. Se observa que para Cu el nivel de concentración es adecuado (tabla I) con poca variación en un rango de 1.95 a 12.92 ppm. En las diferentes estructuras, el análisis de varianza de los datos señala diferencias entre coliflor, haba y tomate con el resto de las especies (tabla VII), por su parte la prueba de Tukey señala para estos tres cultivos, medias significativamente diferentes entre hoja-pecíolo y tallo-pecíolo para coliflor; entre la vaina-tallo, raíz y flor para haba y entre hoja-fruto para el tomate. Se observa que el Cu se encuentran dentro del rango de niveles de concentración adecuados (tabla I).

El Zn se encuentra en un nivel de bajo (Prével, *et al.* 1987) a normal (Kabata-Pendias, *et al.* 1992); para todos los cultivos, se observa una mínima diferencia en concentración. El análisis de varianza señala dos grupos uno formado por calabaza,

cebolla, garbanzo y tomate y otro compuesto por ajo, brócoli, coliflor y haba, el primero a diferencia del segundo no presenta. De acuerdo a la prueba de Tukey (Tabla VII) hay diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% para brócoli y coliflor entre el fruto y peciolo en relación con diferentes órganos de la planta.

En el caso del Fe se encontraron para **ajo (tabla VI_a), cebolla (tabla VI_d), coliflor (tabla VI_e), haba (tabla VI_f) y tomate (tabla VI_h)** concentraciones por arriba de las descritas en la literatura (25-1200 ppm según Prével, *et al.* 1987) en algunos órganos de las plantas (tabla VI_{a-d}). Por su parte el análisis de varianza (tabla VII) señala diferencias significativas para todos los cultivos excepto brócoli (tabla VI_g), la prueba de Tukey confirma lo anteriormente citado para diferentes estructuras vegetales de esta especie (tabla VII).

Para los tres anteriores nutrimentos una comparación más específica de acuerdo a algunas especies reportadas por la literatura nos da que; de acuerdo a la tabla II_a el **garbanzo (tabla VI_g, gráfica 6)** presenta valores de Cu que se encuentran en una concentración adecuada muy cercano al límite marcado como inferior.

La **cebolla (tabla VI_d, gráfica 4)** en comparación con lo reportado en la tabla II_b el Cu se encuentra en concentraciones adecuadas; mientras que para el Zn en raíz y tallo se presentan concentraciones adecuadas y en vaina y hoja son ligeramente bajas.

Finalmente el **tomate (tabla VI_h, gráfica 8)** en comparación con la tabla II_c se observa que el Cu presenta concentraciones adecuadas y el Fe presenta valores altos a excepción del tallo y fruto.

De acuerdo a SARH (1985) se reportan valores para **haba (tabla VI_f, gráfica 7)** que comparándolos con los obtenidos, se observa que el Cu se encuentra en un nivel bajo a excepción de la vaina, donde el rango reportado en la literatura es de 10-20 ppm. Para Zn reportan valores de 21-50 ppm observándose valores ligeramente altos en semilla, flor y hoja. Para Fe marca una concentración de 51-350 ppm presentándose valores altos a excepción de semilla y flor que presenta valores dentro del rango establecido.

De acuerdo al nivel de concentración reportado por la literatura para las plantas en forma general (Tabla I). Se observa que los valores obtenidos para K, Na, Mg y Ca son adecuados.

Una comparación más detallada por especie es la siguiente:

Los valores de haba (tabla VI₉, gráfica 7) en comparación con los reportados en la tabla II₅ presentan niveles de K adecuados a excepción de la vaina que es ligeramente alta; el Na presenta valores normales a excepción de raíz, tallo y hoja que de acuerdo a Yousef, 1983 presentan valores tóxicos, arriba de 0.69 % el dato está reportado en una etapa de desarrollo de 28 a 56 días. En SARH (1985) se reportan valores para haba que comparándolos con los obtenidos se observa que Mg presentan valores adecuados al igual que Ca, en este a excepción de vaina, semilla y flor que fueron inferiores a los requeridos por la planta.

Para brócoli (tabla VI₄, gráfica 2) se observa que K en raíz y flor el contenido es bajo, la concentración en peciolo es adecuada, y en tallo es alta. El Ca en raíz, tallo y flor es bajo y en hoja y peciolo tiene valores altos (tabla II₂).

La coliflor (tabla VI₆, gráfica 6) de acuerdo con la tabla II₄ los niveles de K y Ca se encuentran en concentraciones adecuadas.

La cebolla (tabla VI₄, gráfica 4) en comparación con lo reportado en la tabla II₂ se observa que el K presenta valores alto a excepción del tallo que presenta valores adecuados. En el caso del Ca los valores son adecuados a excepción de la vaina que esta alto. El Mg presenta valores altos. En lo que se refiere al Na son altos a excepción del tallo que es adecuado.

Para la calabaza (tabla VI₆, gráfica 3) de acuerdo a la tabla II₄ el K, Ca y Mg presentan concentraciones altas (reportadas en etapa de cosecha para el fruto).

Finalmente el tomate (tabla VI₄, gráfica 8) en comparación con la tabla II₉ se observa que el K presenta niveles adecuados. El Ca es alto a excepción del fruto que presenta un nivel de concentración adecuado. El Mg presenta niveles altos al igual que el Na.

Para estos cuatro nutrimentos el análisis de varianza muestra diferencias significativas en los diferentes cultivos (tabla VII) lo cual se confirma por la prueba de Tukey cuyos resultados de las medias con diferencias estadísticamente significativas se reportan para los distintos órganos en la tabla VIII para cada cultivo.

En la tabla VI₄₋₉ y gráfica 9-16 aparecen las concentraciones de los metales Pb, Ni, Cd y Cr encontradas en los diferentes órganos de los cultivos. Se observa una tendencia general de los cuatro elementos para acumularse en la hoja y fruto. Asociando a la etapa fenológica del cultivo los valores cuantitativos de cada órgano para cada especie se encontró que cuanto más joven es la planta la raíz tiende a ser el órgano de acumulación y a medida que la edad del cultivo avanza se registran mayores concentraciones en tallo para finalmente pasar a la hoja, órgano final de

acumulación. Desde luego esto se explica dado que por estrategia las especies vegetales almacenan nutrimentos para ser aprovechados durante momentos del desarrollo de gran relevancia como lo es la floración y fructificación, en donde la hoja juega un papel importante, pues en ella se lleva a cabo la síntesis de biomoléculas para el desarrollo normal de la planta. Pese a que estos no son elementos necesarios, su acumulación tiene lugar dado las interacciones sinérgicas con nutrimentos esenciales; sin embargo, algunos de ellos pueden interferir o competir con los esenciales en los procesos metabólicos de la planta causando trastornos fisiológicos.

Es importante señalar que en las especies estudiadas de fruto suculento (tomate y calabaza) el Cr es el único metal pesado que no fue detectado, ambos frutos están en fructificación 1, pensamos que el metal esta siendo translocado hacia esta estructura vegetal sin que halla llegado aún, se cree que en etapas posteriores de desarrollo del fruto podrá registrarse dado que está asociado (tabla IX) a nutrimentos muy móviles (K y Mg) que regularmente están presentes en cantidades altas en estos frutos.

Se practicó un análisis de correlación con la finalidad de conocer las interacciones entre los nutrimentos para los diferentes órganos de las especies estudiadas, en la tabla IX, aparecen dichas interacciones entre los elementos analizados se observan un mayor número de correlaciones positivas en raíz, tallo, hoja y vaina, y un número más reducido de interacciones negativas en estos mismos órganos; esto indica claramente que estos órganos son los reservorios temporales o finales permanentes de los nutrimentos.

El Cd y Pb en peciolo cuenta con un número de interacciones negativas mayor que las positivas esto señala que esta estructura no funciona como sitio de almacén de este nutrimento si no únicamente como vía de conducción hacia la lámina foliar.

En general el comportamiento de los metales contaminantes en el tejido vegetal es el siguiente:

Por lo que respecta al Pb se encuentra dentro de los límites reportados por Prével, *et al.* (1987) (<0.001-20 ppm) a excepción de raíz de brócoli (tabla VI₁, gráfica 10) y hoja de coliflor (tabla VI₂, gráfica 13) que se encuentran altos, pero aún así los valores se encuentran muy cercanos al límite superior. Atendiendo a Pettygrove (1985), se observó que el Pb en forma general se encuentra arriba de la concentración típica 0.1-5 ppm, a excepción de tallo de ajo (tabla VI₄, gráfica 9), raíz de garbanzo (tabla VI₅, gráfica 14) y raíz y flor de haba (tabla VI₆, gráfica 15) que están dentro de las concentraciones típicas.

Si se compara lo reportado por Kabata-Pendias, *et al.* (1992), con los resultados obtenidos en este estudio observamos que el Pb presentan valores altos en raíz y hoja de ajo (tabla VI₁, gráfica 9); raíz, hoja, tallo y peciolo de brócoli (tabla VI₂, gráfica 9); raíz, tallo, peciolo y hoja de calabaza (tabla VI₄, gráfica 11); raíz y hoja de cebolla (tabla VI₁, tabla 12); raíz, tallo y hoja de coliflor (tabla VI₃, gráfica 13); hoja y semilla de garbanzo (tabla VI₅, gráfica 14); tallo y hoja de haba (tabla VI₆, gráfica 15); raíz, tallo y hoja de tomate (tabla VI₇, gráfica 16) no llegando al nivel tóxico marcado de 30-300 ppm. Los demás presentan valores suficientes o normales (5-10 ppm) en forma general en la parte del fruto a excepción del garbanzo.

La concentración típica reportada por Pettygrove (1985), para el Ni es de 1-10 ppm que en comparación con lo obtenido se observa que para raíz y hoja de ajo, tallo de brócoli, hoja de calabaza y de cebolla, tallo y peciolo de coliflor, raíz y vaina de garbanzo, hoja de haba y tallo de tomate, son valores altos sin llegar a ser tóxicos, ya que este último autor menciona que la toxicidad se presenta a concentraciones mayores a 50 ppm, para los restantes se encuentra dentro de las concentraciones típicas.

El rango que se establece por Prével, *et al.* (1987) para el Ni es muy amplio (0.1-300 ppm) que comprende todos los valores obtenidos en este estudio.

Por su parte Kabata-Pendias, *et al.* (1992), reporta para este elemento un rango de 10 a 100 ppm como tóxico o excesivo ubicándose dentro de este raíz y hoja de ajo (tabla VI₁, gráfica 9); tallo de brócoli (tabla VI₂, gráfica 10); raíz, tallo y hoja de calabaza (tabla VI₄, gráfica 11); hoja de cebolla (tabla VI₁, gráfica 12); raíz, tallo y peciolo de coliflor (tabla VI₃, gráfica 13); raíz, hoja y vaina de garbanzo (tabla VI₅, gráfica 14); hoja de haba; raíz y tallo de tomate (tabla VI₇, gráfica 16). El rango normal reportado por este autor es de 0.1-5 ppm presentándose en tallo de ajo, hoja y flor de brócoli, raíz, tallo y vaina de cebolla, tallo y semilla de garbanzo, semilla de haba y fruto de tomate, los restantes se salen de este rango no llegando a ser tóxicos.

En lo que respecta al Cd el rango que reporta Prével, *et al.* (1987), es de 0.1-5 ppm y los datos obtenidos van desde 0-12.5 ppm, ubicándose dentro de este rango vaina de ajo, raíz de brócoli, tallo y hoja de cebolla, flor de coliflor, raíz de garbanzo, toda el haba (a excepción de la hoja) y tallo de tomate y los restantes caen por encima, clasificándose como altos.

Pettygrove (1985), reporta para este elemento una concentración típica de 0.2-0.8 ppm con lo que los niveles encontrados aquí se encuentran muy por encima por lo

cual se considera que estas concentraciones son tóxicas, razón por la que no se recomienda el consumo de estas hortalizas.

De acuerdo con Kabata-Pendias, *et al.* (1992), el Cd se presenta para vaina de ajo (tabla VI₄, gráfica 9); raíz de brócoli (tabla VI₅, gráfica 10); tallo y hoja de cebolla (tabla VI₆, gráfica 12); flor de coliflor (tabla VI₇, gráfica 13); raíz, tallo, vaina y semilla de haba (tabla VI₈, gráfica 15) y tallo de tomate (tabla VI₉, gráfica 16), con valores altos ya que están por encima del valor normal que es de 0.05-0.2 ppm y los restantes presentan valores tóxicos o excesivos (5-30 ppm) a excepción de la flor de haba en donde no se detectó su presencia.

Pettygrove (1985), menciona que la concentración de Cr en el tejido vegetal es de 0.2-1.0 presentándose por lo tanto valores altos a excepción de tallo, hoja y flor de brócoli (tabla VI₅, gráfica 10); fruto de calabaza (tabla VI₆, gráfica 11); tallo y flor de coliflor (tabla VI₇, gráfica 13); raíz de garbanzo (tabla VI₈, gráfica 14) y fruto de tomate (tabla VI₉, gráfica 16).

Sin embargo para Prével, *et al.* (1987), los valores obtenidos de Cr se encuentran dentro de los límites establecidos (0.03-250 ppm). No obstante para Kabata-Pendias, *et al.* (1992), el Cr presenta valores desde 0.1-0.5 ppm, de donde se presentan valores altos en tallo de ajo (tabla VI₄, gráfica 9); raíz de calabaza (tabla VI₅, gráfica 11); tallo y vaina de haba (tabla VI₈, gráfica 15), mientras que no se detectó su presencia en tallo, hoja y flor de brócoli (tabla VI₅, gráfica 10); fruto de calabaza; tallo y flor de coliflor (tabla VI₇, gráfica 13); raíz de garbanzo (tabla VI₈, gráfica 14) y fruto de tomate (tabla VI₉, gráfica 16); finalmente los restantes presentaron valores tóxicos o excesivos (5-30 ppm).

Analizando los niveles obtenidos para los metales contaminantes en las estructuras comestibles se tiene que el Pb y el Ni se encuentran bajos, el Cd en general presenta valores tóxicos y para el Cr se encuentran tóxico a excepción de ajo en donde se presenta alto, y brócoli, calabaza, coliflor y tomate en donde no se detectó su presencia.

Por otro lado los niveles deficientes que se presentaron en algunos nutrimentos se deben posiblemente a que en la superficie radicular existe competencia por los sitios de absorción con los metales contaminantes, o bien puede ser también a la formación en el suelo de carbonatos y sulfatos metálicos aunque estos últimos son más solubles, y aún así alguna parte queda retenida en el suelo, no estando disponibles para la planta (Market, 1993; Kabata-Pendias, *et al.* 1992, Barbour, *et al.* 1987, Jeng, *et al.* 1993).

Una posible explicación fisiológica de la entrada de los metales contaminantes a la planta, esta acorde al mecanismo de absorción general de iones. El cual nos dice que los mecanismos de transporte que facilitan la incorporación de los nutrientes a las raíces están sincronizados, de tal modo que la incorporación más rápida corresponde al K^+ por transporte activo. Luego por otros mecanismos, se desencadena la incorporación del resto de cationes (Fergusson, 1990).

Por otra parte, es razonable suponer que los mecanismos naturales de incorporación de nutrientes están estrechamente relacionados con los procesos fisico-químicos de la dinámica de nutrientes en el suelo, por lo que se espera que la incorporación de Pb, Ni, Cd y Cr sea una respuesta de la planta para no permitir que se altere dicha dependencia de la solución del suelo-raíz y/o consecuentemente alterarse la incorporación de iones y otros procesos fisiológicos vitales en el crecimiento y desarrollo. Así mismo, una vez que los metales pesados han sido incorporados, cada especie vegetal crea un mecanismo para que no se afecte su metabolismo, quizá por medio de translocarlos vía corriente transpiratoria a las hojas, sin ser asimilados puesto que no son elementos esenciales y de ahí por vía floema transportados a otra parte de la planta (Wild, 1992; Heckman, 1987).

Las movilidades fueron muy variables entre las diferentes especies ya que como lo menciona la literatura el desarrollo de las interacciones depende del estado fisiológico interno de la planta, lo cual es influenciado por el genotipo, estado de crecimiento y factores ambientales, y esto finalmente afecta la distribución dentro de la planta, presentándose por lo tanto diferencias en su movilidad (Markert, 1993).

La poca movilidad o inmovilidad de algunos de los elementos analizados además de deberse a las interacciones negativas con otros elementos, se puede deber también a ciertas reacciones que impiden su movimiento dentro de la planta por ejemplo por insolubilización en la raíz o por combinación con otro elemento o radical por el cual tiene alta afinidad (Wild, 1992).

Como se menciono anteriormente es por todos conocido el papel fisiológico del K para regular el equilibrio hidrico, cofactor de enzimas para la síntesis de carbohidratos y que se trata de un nutriente no estructural razón por la cual es un nutriente muy móvil en la planta, ello explica que su concentración este determinada por la fisiología o por el metabolismo que cada órgano de la planta realiza. Del mismo modo el Mg cuya función principal en la planta es formar parte del núcleo de la molécula de clorofila, y al ser esta un compuesto orgánico susceptible a descomposición, el Mg es translocado de las partes viejas a las partes fisiológicamente activas de la planta, ello explica por que encontramos en las hojas los más altos niveles de este elemento (Clarkson, 1980).

Un análisis del comportamiento del Na en los diferentes cultivos y conociendo la función que este nutrimento tiene en la planta (regular el equilibrio hídrico y no ser estructural), es un nutrimento móvil y su concentración, al igual que la del K, será mayor en aquel órgano de la planta dedicado a la absorción y/o almacenamiento de agua, ello explica por que para las especies estudiadas la raíz presenta los mas altos niveles de este elemento siguiendole la hoja, sitio estructural que lleva a cabo la síntesis del mayor número de compuestos orgánicos de la planta en donde el agua es necesaria para todas las reacciones implicadas, así mismo es a través de este órgano que la planta elimina su agua a fin de proveerse de nutrimentos desde la raíz (Markert, 1993).

El Ca es un nutrimento esencial no móvil, dado que forma parte de moléculas orgánicas componentes de la pared celular (pectato de calcio), y una vez que forman parte de la pared quedan inmovilizadas; sin embargo, es incorporado a la planta y se distribuye en los diferentes órganos a través de los vasos conductores, al ser la hoja el órgano de síntesis, la mayor cantidad viaja hasta esta estructura favoreciendo la presencia de los más altos niveles. El Ca que es registrado en el resto de los órganos de la planta es no estructural que viaja a través de los vasos conductores o bien que se encuentra con la función de regular el equilibrio hídrico de la planta pero que puede distribuirse con facilidad a aquella parte de la planta en donde sea demandada (Wild, 1992).

Los oligoelementos esenciales Fe, Cu y Zn tienen como función preponderante activar enzimas en el metabolismo general de la planta por lo tanto son nutrimentos no estructurales durante la mayor parte del tiempo y que, pueden translocarse de una a otra laminas foliares para cumplir eficientemente su función; por esta razón los tres oligoelementos son moderadamente móviles en la planta y es la hoja el tejido donde regularmente encontramos sus más altos niveles de concentración, esto se confirma por los resultados obtenidos (Clarkson, 1980; Sillanpää, 1985).

Haciendo alusión a los elementos contaminantes Pb, Ni, Cd y Cr, que se encuentran asociados sinérgicamente a otros elementos esenciales, que favorecen su concentración, explica al mismo tiempo su moderada movilidad y muestran una tendencia marcada de acumularse en la hoja en las especies hortícolas estudiadas (Heckman, 1987; Hardiman, *et al*, 1982). Es importante señalar que estos cuatro elementos son absorbidos como cationes divalentes con frecuencia al igual que los nutrimentos esenciales Cu, Zn, Fe, Mg y Ca por lo cual compiten con estos en algunos procesos metabólicos causando trastornos fisiológicos (Wild, 1992).

11. CONCLUSIONES

1. De acuerdo a los datos obtenidos se concluye que en forma global el Cu, Mg, K, Na y Ca mostraron niveles suficientes o normales, el Zn mostró niveles ligeramente bajos y el Fe presentó niveles altos.
2. Se presentaron cantidades considerables de Cr, Cd, Pb y Ni los cuales de acuerdo a la literatura para el caso de Cr y Cd presentan en forma general concentraciones tóxicas y/o excesivas.
3. Atendiendo los niveles de concentración reportados por Pettygrove (1985), Kabata-Pendias, *et al.* (1992) y Prével, *et al.* (1987) para los elementos Pb, Ni, Cd y Cr no se recomienda el consumo de estas hortalizas.
4. Los niveles críticos de deficiencia y toxicidad difieren entre especies cuando son comparados los órganos en la misma edad fisiológica.
5. Raíz y tallo son órganos de acumulación temporal para los metales contaminantes: Pb, Ni, Cd y Cr estas son estructuras del vegetal a través de las cuales se distribuyen a la hoja y fruto, órganos de acumulación final de estos elementos.
6. El peciolo es para calabaza y coliflor, un órgano que permite la translocación del Pb y Cd hasta la lamina foliar.
7. Se encontró que en los cuatro elementos contaminantes (Pb, Ni, Cd y Cr), existe una tendencia de acumularse hacia las hojas, frutos y semillas.
8. El Ca favorece la acumulación del Pb en raíz, hoja y tallo, para Ni en peciolo y tallo y para Cd en hoja y peciolo de las especies estudiadas.
9. En las especies estudiadas se observó mayor número de interacciones positivas en relación a las interacciones negativas entre los nutrimentos, especialmente en hoja tallo y raíz.
10. El desarrollo de las interacciones negativas o positivas es influenciado por la especie, estructura vegetal, genotipo y condiciones ambientales.

RECOMENDACIONES

En virtud de que en los elementos contaminantes se observo una tendencia de distribuirse en la planta hacia las hojas, frutos y semillas, por lo tanto, sería recomendable hacer estudios a lo largo de las etapas fenológicas de los cultivos a fin de determinar los órganos de acumulación temporal y final para cada uno de los elementos contaminantes.

Debe señalarse que estas comparaciones se hicieron en el mismo órgano pero no en la misma especie, por lo que queda abierta la investigación a este nivel, sobre todo por que la literatura señala que la incorporación y toxicidad dependen de la especie.

También es importante tomar en cuenta que para un entendimiento más claro del efecto de aguas residuales sobre las plantas, se necesita observar los niveles de nutrimentos en cada uno de los órganos de cada especie, desde la etapa de plántula llegando hasta la madurez fisiológica y comparar con las mismas especies cultivadas con aguas de primer uso.

12. LITERATURA CITADA

- Abdel-Sabour, M. N.; Morvendt, J. G. and Kelsoe J. L. 1988. "Cadmium-Zinc Interactions in Plants and Extractable Cadmium and Zinc fractions in soil". *Soil Science*. 145(6):424-431.
- Akhter, S. E. and Madany, I. 1993. "Heavy Metals in Street and House Dust in Bahrain". *Water, Air and Soil Pollution*. 66:111-119.
- Albert, A. 1988. "Curso Básico de Toxicología Ambiental". 2da., Noriega Editores, México. pp. 101-183.
- Alloway, B. 1990. "Heavy Metals in Soils". Blackie London. USA pp. 19-28.
- Alvarez, G. y Silva, S. 1993. "Aguas residuales". Boletín IIE 17(2) pp. 88-93.
- Barceló, J. y Poschenrieder, C. 1989. "Estrés vegetal inducido por metales pesados". *Investigación y Ciencia*. 154:54-62.
- Barke, R. 1984. Queensland Department of Primary Industries, Brisbane, Australia. Personal communication. (Citado por Reuter y Robinson, 1988).
- Barrón, M.; Sánchez, B.; Hernández G.; Villarreal, G. y Guajardo R. 1990. "Metales pesados en maíz (*Zea mays L.*) y alfalfa (*Medicago sativa L.*) y su correlación con los extractables en suelos del DDR 063, Hgo." Ier. Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Inst. Geol. UNAM. pp. 42-43.
- Barbour, G.; Burk J. and Pitts, W. 1987. "Terrestrial Plant Ecology". 2da. The Benjamin, Cummings Publishing Company, Inc. USA pp. 424-429.
- Bauer, A. 1971. "Considerations in the development of soil tests for "available Zn". *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2(3):161-193.
- Bishop, R.; Walker, V.; Stevenson F. and Mills J. 1976. "Effect of Nitrogen, Phosphorus and Potassium on Yields, Protein Contents and Nutrients Levels in Soybean, Field Peas and Faba Beans". *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 7:383-404.
- Boon, Y. and Soltanour, N. 1992. "Lead, Cadmium and Zinc Contamination of Aspen Garden Soils and Vegetation". *J. Environ. Qual.* 21:82-86.

Carolus, R. 1975. "Calcium relationships in vegetable nutrition and quality". *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 6(3):285-298.

Carrol, E. 1983. Queensland Department of Primary Industries, Applethorpe, Queensland, Australia, Personal communication. (Citado por Reuter y Robinson, 1988).

Carson, B.; Harry, V. and Joy, L. 1986. "Toxicology and Biological Monitoring of metals in human. Including Feasibilidad and Need". Lewis Publishers. Inc. Michigan U.S.A. pp. 51-297.

Castillo, G. L.; Arteaga, M.M. y Castillo G. J. L. 1993. "Fundamentos y Aplicaciones de la Absorción Atómica". D.F. México.

Chapman, H. 1966. "Diagnostic Criteria for plants and Soil". Univ. Calif. Div. Agric. Sciences: Berkeley (Citado por Reuter y Robinson, 1988).

Clarkson, D. and Hanson, J. 1980. "The mineral Nutrition of Higher plants". *Annual Review of Plant Physiology.* 31:247-278.

Cortés, A. 1985. "Plan de desarrollo urbano y arquitectónico en Ixmiquilpan, Hgo". Tesis de licenciatura, UNAM. pp. 12-23.

Davidescu, D. and Davidescu, V. 1982. "Evaluation of Fertility by Plant and Soil Analysis". ABACUS Press: Tunbridge Wells, Kent. (Citado por Reuter y Robinson, 1988).

Delgadillo, F. 1990. "Algunos metales pesados en suelos regados con aguas residuales". 1er. Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Inst. Geol. UNAM. pp. 40-41.

Duffus H. 1983. "Toxicología ambiental". Omega Barcelona, España. pp. 24-94.

Dudka, S.; Piotrowska, M. and Chlopecka, A. 1994. "Efect of Elevated Concentrations of Cd and Zn in Soil on Spring Wheat Yield and the Metal Contents of the Plant". *Water, Air and Soil Pollution* 76:333-341.

Edwards, D. and Asher, C. 1979. Department of Agriculture, Univ. of Queensland, Australia. Unpublished data. (Citado por Reuter y Robinson, 1988).

Fergusson, J. 1991. "The Heavy Metals". Pergamon Press. Gran Bretaña. 614 pp.

Fernández, J. and Henriquez, F. 1991. "Biochemical, Physiological, and Structural Effects of Excess Copper in Plants". *The Botanical Review*. 57(3):246-273.

Filardo, S.; Rabling, J. P. y Zuñiga, E. A. 1994. "Cuantificación de cadmio y plomo en leche bronca en 9 municipios del Estado de Hidalgo en donde se utilizan aguas residuales para regar los forrajes." *Rev. Soc. Quím. Méx.* 38(3):117-128.

García, M.; Guajardo, R. y Hernández, L. 1990. "Impacto en los suelos del DDR 063 por el efecto de detergentes, boro, grasas y aceites presentes en las aguas residuales de la zona metropolitana de la ciudad de México". 1er. Simposio Nacional de Degradación del Suelo. Inst. Geol. UNAM. pp. 48-49.

Geiger, G.; Federer, D. and Sticher, H. 1994. "Reclamation of Heavy Metal-Contaminated Soils Field Studies and Germination Experiments". *J. Environ. Qual.* 22:201-207.

Glynn, H. 1989. "Environmental Science and Engineering". Prentice Hall. New Jersey U.S.A. pp. 409-417.

González, V. 1986. "Germinación y desarrollo de las leguminosas chicharo, frijol y haba con aguas residuales" *Documentos Básicos*. 23:51-61.

Guggenberger, G.; Glase, B. and Zech, W. 1994. "Heavy Metal Binding by Hydrophobic and Hydrophilic Dissolved Organic Carbon Fractions in a Spodosol A and B Horizon". *Water, Air, and Soil Pollution* 72:111-127.

Gupta, U. 1979. "Copper in agricultural crops. In Copper in the Environment". (Ed. J. D. Nriagu.) (J. Wiley and Sons Inc.: New York) pp 255-258 (Citado por Reuter y Robinson 1988).

Gutiérrez, R.; Villalobos, M.; González, M.; Kobashi, E. y Bazúa, E. 1990. "Reducción Química: una alternativa para prevenir la contaminación de suelos y aguas profundas con residuos industriales ricos en Cromo hexavalente." 1er. Simposio Nacional de degradación del Suelo. Inst. Geol. UNAM. pp. 52-53.

Hardman, R.; Hinesly, T.; Mathor, J. and McCalla, T. 1982. "Residual Effects of Sewage Sludge on Soybean: And Accumulation of Heavy Metals". *J. Environ. Qual.* 16(2):113-117.

Hassanin, A.; Labib, T. and Dobra, A. 1993. "Potential Pb, Cd, Zn and B Contamination of Sandy Soils after Different Irrigation Periods with Sewage Effluent". *Water, Air and Soil Pollution*. 66:239-249.

Heckman, J.; Angle, J. and Chaney, R. 1987. "Cadmium Absorption and Translocation by bush beans at low External Concentration". Plant Nutrition Colloquial Warwick University. England. Common Wealth Agricultural Bureau. (Congresses). pp. 10-12.

Jing, J. and Logan J. 1992. "Effects of Sewage Sludge Cadmium Concentration on Chemical Extractability and Plant Uptake". *J. Environ. Qual.* 21:73-81.

Jeng, A. and Singh, B. 1993. "Partitioning and Distribution of Cadmium and Zinc in Selected Cultivated Soils in Norway". *Soil Science.* 156(4):240-250.

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. 1992. "Trace Elements in Soils and Plants". 2da. Lewis Publishers Inc. USA. pp 22-253.

Lorenz, O. and Tyler, K. 1978. "Plant tissue analysis of vegetable crops; soil and plant-tissue testing in California." Ed. H. Reisenauer. Univ. Calif. Bull. No. 1879. pp. 22-23.

Markert, B. 1993. "Plants as Biomonitors Indicators for Heavy Metals in the Terrestrial Environment". VCH USA. pp. 31-62.

Meyer, R. 1993. "Chemical Time Bombs Related to Forestry Practice: Distribution and Behaviour of Pollutants in Forest Soils". *Land Degradation & Rehabilitation.* 4:275-279.

Misset, C. 1990. "Remoción de metales pesados y otros compuestos en un tipo de suelo del DDR 03, Hgo. México." 1er. Simposio Nacional de la Degradación del Suelo. Inst. Geol. UNAM. pp. 50-51.

Mora, L. 1984. "Análisis de residuos de plomo en repollo en Costa Rica" *Agronomía Costarricense.* 8(2):161-165.

Morvedt, J. 1987. "Cadmium Levels in Soils and Plants from some Long-term, Soil Fertility Experiments in the United States of America". *J. Environ. Qual.* 16(21):137-142.

Mortvedt, J. 1983. "Micronutrientes en Agricultura". Ed. AGT México. 742 pp.

Müller, H.; Schwaighofer, B. and Kalman, W. 1994. "Heavy Metals Contents in River Sediments". *Water, Air and Soil Pollution.* 72:191-203.

Pettygrove, G. 1985. "Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater". Lewis Publishers Inc. USA pp. 13-1, 13-13.

Piggot, T. Summary of permanent fertiliser trial (1966-1976) for a range of vegetables crops. In preparation. Tables available from Department of Primary Production, Northern Territory, Australia. (Citado por Reuter y Robinson, 1988).

Prével, M.; Gagnard, J. and Gautier, P. 1987. "Plant Analysis. As a guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crops". Lavosier Publishing Inc. N.Y. USA. pp. 14-59.

Petruzzelli, G. 1989. "Recycling Wastes in Agriculture: Heavy Metal Bioavailability". *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 27: 493-503.

Polic, P. and Pfend, P. 1994. "Alluvial Aquifer contamination: Exchangeable Heavy Metals and Factor Affecting their Spatial Distribution". *Water, Air, and Soil Pollution*. 74:155-167.

Quadri, G. 1989. "Aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Impactos y Perspectivas". Departamento del Distrito Federal.

Reuter, D. and Robinson, J. 1988. "Plant Analysis an Interpretation Manual" Inkata Press Australia. pp. 1-183.

Rojas, M. 1985. "Fisiología vegetal aplicada". 3ra. McGraw Hill. México. pp. 130-141.

Rozema, J. and Verkleij, A. 1991. "Ecological responses to Enviromental Stresses". Netherlands Kluwer Academic Publishers USA. 311 pp.

Salisbury, F. and Ross, C. 1978. "Plant Physiology" 2da. Wadsworth Publishing Company Inc. USA. pp. 64-92.

Sánchez-Martín, J. and Sánchez-Camazano, L. 1993. "Adsorption and Mobility of Cadmium in Natural Uncultivated Soils". *J. Environ. Qual.* 22:737-742.

SARH 1985. Avances de Investigación en Hortalizas en el Estado de Sinaloa. Publicación Especial No. 6

Satinder, D. and Girodano, M. 1983. "Relationship between P and Mn in Chickpea (*Cicer arietinum*)" *Plant Soil*. 72:85-90.

Scholten, M. and Szabolcs, I. 1993. "Salinization of Groundwater and the Mobilization of Micropollutants: Effect on the Food Chain". *Land Degradation & Rehabilitation*. 4:253-256.

Silva, H.; Maples, M.; Hernández, D.; Solorio, G. y Villareal, G. 1990. "Tendencias en la acumulación de metales pesados en los suelos del DDR 063, Edo. de Hgo., por efecto del riego con aguas negras." 1er. Simposio Nacional de la Degradación del Suelo. Inst. Geol. UNAM. pp. 52-53

Sillanpää, M. 1985. "Micronutrients and the Nutrients Status of Soils: a global study". FAO SOILS BULLETIN FINNIDA Food and Agriculture Organization of the United Nations. Washignton. pp. 54-82.

Singh, J.; Karwasra, P. and Sing, M. 1988. "Distribution and forms of Copper, Iron, Manganese and Zinc in calcareous Soils of India". *Soil Science*. 146(5):359-356.

Stanley, E. 1993. "Fundamentals of Enviromental Chemistry". Lewis Publishers. Michigan. U.S.A. pp. 515-531.

Varela, P.; Cruz, A.; Ticante, J. A. y García, J. L. 1990. "Modificación de la propiedades de un suelo por la adición de agua contaminada con grasas y aceites". 1er. Simposio Nacional de la Degradación del Suelo. Inst. Geol. UNAM. pp. 36-37.

Velázquez, H. 1992. "Evaluación del contenido de metales pesados en la relación agua-suelo-planta del DDR Mixquihuala" Pachuca, Hidalgo .

Wallace, A. 1989. "Effect of liming on trace-element interactions in Plants". *Soil Science*. 147(6):416-421.

Weir, R. 1980 Results from plant analyses (1960-1980). Department of Agriculture New South Wales, Sydney, Australia. Personal communication. (Citado por Reuter y Robinson, 1988).

Weir, R. and Mutton, L. 1982. "Survey of 25 crops, Tumut, Bathurst, Yanco, Australia, Department of Agriculture New South Wales, Sydney, australia, Unpublished data. (Citado por reuter y Robinson, 1988).

Wild, A. 1992. "Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel". Ediciones Mundi-Prensa. España. 860 pp.

Willard, H.; Merrit, L.; Dean, A. y Settle, A. 1981. "Métodos instrumentales de análisis". Compañía Editorial Continental S.A. de C.V. México. pp. 383-450.

Yousef, A. and Sprent, J. 1983 "Effect of NaCl on Growth, Nitrogen, Incorporation and Chemical Composition of inoculated and Ammonium Nitrate Fertilized *Vicia faba* (L.) Plants". *J. Exp. Bot.* 34:941-950.

Zink, F. 1962. "Growth and nutrient absorption of green buching onions". *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 180:430-435.

Zuñiga, G.; Cruz, J. y Cajuste, L. 1990. "Contaminación por Pb, Cd y Cr en suelos y tejidos vegetales de Tlaxcoapan, Tlahuelilpan y Atitalaquia, Hidalgo." 1er, Simposio Nacional de la Degradación del Suelo. Inst. Geol. UNAM. pp. 48-49.