Relaciones entre Cd, Pb y elementos esenciales en el proceso de fitoacumulación en *Nicotiana tabacum* L.

J. C. Rodríguez Ortiz[1], R. D. Valdez Cepeda[2] J. A. Alcalá Jáuregui J.[1*]. L. García Hernández[3], H. Rodríguez Fuentes[4], J. J. Tapia Goné[1], J. A. Pérez Moreno[1] y J. L. Woo Reza[1]

[1]*Facultad de Agronomía, UASLP. Carr. San Luis- Matehuala Km. 14.5, Soledad de G. S. S. L. P. México,*
[2]*Centro Regional Universitario Centro-Norte Zacatecas, UACh y Unidad Académica de Matemáticas, UAZ,*
[3]*Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, B. C. S.,*
[4]*Facultad de Agronomía, UANL.*

Cd, Pb and Essential Elements Relationships in the Phytoaccumulation Process in Nicotiana tabacum L.

Abstract
This research work was carried out with the aim of identifying important relationships between Cadmium (Cd), lead (Pb) and other essential elements, and their effects on the accumulation capacity in *Nicotiana tabacum* L. (tobacco). Under greenhouse conditions, a group of plants was established in pots containing no-contaminated soil (treatment 1), whereas another group was established in pots filled with Cd- and Pb-contaminated soil using 10 and 500 ppm, respectively (treatment 2). Fifty days after plantation, above ground biomass in each pot was harvested and then dried to get constant weight. Additionally, Cd, Pb, N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn and Zn were determined. Each heavy metal accumulation was estimated by using biomass dry weight and element concentration. Results suggest that P and Ca concentration were diminished, while Cu and Zn concentrations were increased due to Cd and Pb effects. Bivariate relationships allowed us to appreciate a K-Pb antagonism, and Cu-Cd and Cu-Cd synergisms. Ratios affected by both heavy metals were: Ca/Mn, Mg/Cu, Fe/Cu, Ca/Cu. However, there are no enough evidences to conclude these ratios affect element accumulations, because none of the ratios are related to above ground dry mass.

Keywords: Phytoremediation, antagonism, synergism, nutrition, heavy metals.

Resumen
El presente trabajo fue realizado con el objetivo de identificar relaciones importantes entre Cadmio (Cd) y Plomo (Pb) con elementos esenciales y su efecto en la capacidad fitoacumuladora de *Nicotiana tabacum* L. (tabaco). En condiciones de invernadero se estableció un grupo de plantas bajo suelo sin contaminar (tratamiento 1); y otro grupo en suelo artificialmente contaminado con Cd y Pb en dosis de 10 y 500 mg kg^{-1} de suelo (tratamiento 2). A los 50 días del transplante se obtuvo el peso seco de la parte aérea y se determinó la concentración de Cd y Pb, y de los elementos esenciales N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn y Zn. La acumulación de metales pesados se calculó con el peso seco y la concentración de los elementos. Los resultaron muestran que los elementos esenciales P y Ca redujeron su concentración en plantas debido a los metales pesados Cd y Pb, mientras que Cu y Zn mostraron un efecto contrario. Por medio de las correlaciones bivariables se evidenció una importante relación negativa entre K y Pb, además un sinergismos entre Cu y ambos metales pesados. Las proporciones entre elementos esenciales que se afectaron por los metales aplicados al suelo fueron: Ca/Mn, Mg/Cu, Fe/Cu, Ca/Cu. Sin embargo, dichas relaciones no afectaron el proceso de acumulación en *N. tabacum* debido a que estas no tuvieron relación con la producción de materia seca de las partes aéreas de las plantas.

Palabras clave: Fitorremediación, antagonismo, sinergismo, nutrición vegetal, metales pesados.

* Autor de correspondencia
E-mail: jorge.alcala@uaslp.mx Tel:+ 52-444 8524060

Introducción

La fitoacumulación es una técnica que pretende la extracción de metales pesados del suelo mediante el uso de especies vegetales. Los elementos cadmio (Cd) y plomo (Pb), son citados con frecuencia por estar presentes en suelos en cantidades excesivas, debido principalmente a fuentes antropogénicas (Alloway, 1990). Ambos pueden ser extraídos del suelo por esta tecnología (Lasat, 2000). El problema de contaminación con estos metales en suelo llega a ser serio si se toma en cuenta el tiempo de permanencia en suelos de clima templado, que es de 75 a 380 años en el caso del Cd; y de 1000 a 3000 años en Pb (Bowen, 1979). Estos metales se asocian a enfermedades en el humano como enfisema pulmonar (Cd) (Wagner, 1993); y saturnismo (Pb) (Sola, 2004). Los niños son los más susceptibles al ingerir polvo contaminado de parques, escuelas o fábricas cercanas al lugar donde habitan (PNUMA-UNICEF, 1990). Algunas investigaciones en fitorremediación han estudiado el efecto de solo un metal pesado. Sin embargo, el 70% de los suelos contaminados involucran dos o más metales (Förstner, 1995). Es evidente que para un buen funcionamiento de las plantas remediadoras se debe de tener un estado nutricional que pueda dar soporte a las funciones de absorción, translocación y acumulación de los contaminantes. Es ampliamente conocido que el contenido excesivo de un ión en el suelo afectará a otros elementos, esto es, se tendrán interacciones entre ellos que pueden ser sinergismo o antagonismo. El sinergismo ocurre cuando el efecto combinado es mayor que la suma de los efectos independientes. El antagonismo ocurre cuando el efecto fisiológico combinado de dos o más elementos es negativo. Estas interacciones pueden también referirse a la habilidad de un elemento para inhibir o estimular la absorción de otros elementos en las plantas. Todas estas interacciones son muy variables y pueden ocurrir dentro de las células, dentro de las membranas, y también alrededor de las raíces de las plantas (Kabata-Pendias y Pendias, 1992).

Ebbs y Kochian (1997) mencionan que la posibilidad de generar efectos sinérgicos deben ser considerados de suma importancia en algunos sitios contaminados con metales pesados pudiendo ser aprovechados para establecer tecnologías de remediación que impliquen la fitoextracción. Ebbs *et al*., (1997) encontraron que *Brassicas* spp. presenta deficiencias de Fe y Mn debido a Zn y Cu. Sin embargo, estas deficiencias no se correlacionaron con los patrones observados de clorosis en hojas. La inhibición de Fe y Mn por los metales pesados pueden haber sido un factor significativo en la reducción del crecimiento de las plantas. Por su parte Brown *et al*., (1994) mencionan que en *T. caerulescens* los elementos Cu, Mn, Ca, Mg, K, P, Mo y Fe estuvieron aparentemente en una adecuado nivel nutricional según normas convencionales después de ser cultivado en suelo contaminado por Zn y Cd. Reportan que el tomate y bladder campion mostraron hojas color púrpura en ciertos tratamientos indicando posibles deficiencia de P por el Zn. Un buen diagnóstico nutricional en plantas debe de considerar las relaciones que guardan entre sí los elementos esenciales de las plantas ya que pueden darse casos de antagonismos que afecten la biomasa vegetal (Gutiérrez, 2006). Altas concentraciones de algún elemento puede reducir la porción absorbida de otro causando así una deficiencia de forma indirecta o inducida. Su detección a tiempo es con el fin de corregir desórdenes nutricionales y evitar pérdida de biomasa (Bierman y Rosen, 2006). La presente investigación se realizó con el objetivo de identificar relaciones importantes entre los metales pesados Cd y Pb con elementos esenciales y su efecto en la capacidad fitoacumuladora de *N. tabacum* L.

Material y Métodos

El trabajo de investigación fue realizado en condiciones de invernadero en las instalaciones de la Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, en Marín, N. L. México. Se utilizaron plantas de *N. tabacum* L. (tabaco) como especie indicadora. Esta fue elegida por ser una especie ampliamente estudiada por su capacidad de tolerar metales pesados (Maiti *et al.*, 1991; Mench e*t al.*, 1989). Las plantas se transplantaron a los dos meses de emergidas en macetas de 7.57 l de volumen llenadas con suelo de textura migajón arenosa. Un grupo de plantas se estableció en macetas con suelo sin contaminar (tratamiento 1); y

otro grupo en macetas con suelo artificialmente contaminado con Cd y Pb en dosis de 10 y 500 mg kg^{-1} de suelo, respectivamente (tratamiento 2). Estas cantidades son diez veces más que en suelo no contaminado (Temmerman *et al.*, 1984). Se utilizó CdCl y $PbNO_3$ como fuentes de Cd y Pb, respectivamente. Las características físico-químicas del suelo se muestran en la tabla 1. Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones (cada repetición se conformó por tres macetas). En total se tuvieron 24 unidades experimentales. Las plantas se regaron diariamente manteniendo un abatimiento máximo de humedad del 20%, lo que permitió evitar un exceso de agua que lixiviara los metales. A los 50 días del transplante se cosecharon las plantas. Se separó raíz de parte aérea, y se colocaron en estufa de aire forzado a 75 º C hasta obtener un peso constante.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo utilizado

Propiedad	Valor
Textura (hidrómetro)	migajón arenoso
Arena	50 %
Limo	23 %
Arcilla	27 %
Conductividad eléctrica (puente de Wheastone)	1.5 mS cm^{-1}
pH (potenciómetro)	7.2
Materia orgánica (Walkley-Black)	0.65%
Cadmio total (mg kg^{-1})*	No detectado
Plomo total (mg kg^{-1})*	35

La concentración de los elementos en hojas se realizó con los siguientes métodos: N, Kjeldhal; P, amarillo vanadato-molibdato; Cd, Pb, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn and Zn por digestión seca a 450ºC y lectura en absorción atómica (modelo UNICAM-SOLAAR 969). Para los metales pesados se determinó la acumulación de Cd y Pb en parte aérea. En este contexto, y de acuerdo a Depledge *et al*., 1984, la acumulación se refiere a la cantidad de Cd y Pb que permanece en la plantas de tabaco después de cierto tiempo de exposición, en este caso cincuenta días. Esta variable toma en cuenta el patrón de absorción del metal (es), así como el efecto negativo que las cantidades excesivas que los metales en el suelo tienen sobre la biomasa de las plantas. Se calculó multiplicando concentración (de los metales pesados) por peso seco de parte aérea. Por lo tanto, se considera que cualquier cambio que altere dichos factores, afectará la acumulación de los metales pesados. Reeves y Baker (2000) usaron esta variable para describir el níquel total en parte aérea de un estudio sobre acumulación en *T. goesingense*, mientras que Brown *et al*. (1994) lo usaron en un estudio con la especie *T. caerulescens.* Los análisis estadísticos fueron realizados usando el software STATISTICA, Kernel release 5.5 (StatSoft Inc., 2004). Los datos fueron procesados para análisis de varianza (ANAVA), estimación de correlaciones de Pearson y prueba de F para las proporciones entre elementos.

Resultados y discusión

Análisis de las relaciones entre metales pesados y elementos esenciales por comparación de medias

No se observaron síntomas de deficiencia o toxicidad en el grupo de plantas cultivadas en macetas con suelo contaminado con dosis altas de Cd y Pb. El peso seco de las plantas fue igual en ambos tratamientos, lo que es coincidente con la observación visual. Cuatro elementos esenciales fueron diferentes a niveles estadísticos significativos (P, Ca, Cu y Zn; $P \leq 0.05$) al comparar ambos tratamientos de contaminación (Tabla 2). Los macroelementos P y Ca disminuyeron su concentración en las plantas por efecto de los metales, mientras que cobre y zinc tuvieron un efecto contrario (Tabla 2). En cuanto a la disminución de la concentración de P por Cd y Pb presente en el suelo, Kabata-Pendias y Pendias (1992) mencionan que los fosfatos son componentes del suelo que están involucrados en la adsorción de elementos traza. Por su parte Alloway (1990) menciona que cuando un suelo contiene cantidades excesivas de cadmio se pueden formar fosfatos de cadmio, que es un material altamente insoluble. McGrath (1998) reporta que uno de los problemas nutricionales encontrados sobre suelos contaminados con plomo es la falta de fosfato, lo cual es debido a la formación de fosfatos de plomo insolubles (piromorfita). También menciona que la falta de fósforo se puede sobrellevar con la aplicación de fosfatos a través de las partes aéreas de las plantas. Huang *et al*. (1997) al aplicar el fósforo vía foliar, incrementaron la producción de materia seca y la acumulación de plomo en partes aéreas por más de 400% y 115%, respectivamente, aunque la concentración de plomo se redujo. Por otro lado, la disminución de la concentración de Ca por Cd y Pb es explicada por el fenómeno de competencia que se dio en las plantas de tabaco

entre el propio Ca y los metales pesados, la cual fue desfavorable para el calcio, debido a las cantidades excesivas de cadmio y plomo en el suelo. Mengel y Kirkby (1982) mencionan, que, como regla general, al incrementar el suplemento de un catión (como se tuvo en éste experimento con el Cd y el Pb) se reducirá la concentración de otros cationes (como resultó con el Ca). Marschner (1986) menciona que esta competencia ocurre particularmente entre iones con propiedades fisicoquímicas similares (como por ejemplo valencia y diámetro de ión). Esta competencia es posible que se haya dado más con el cadmio que con el plomo ya que Mengel y Kirkby (1982) mencionan que el movimiento de cadmio en la planta es parecido al del calcio. Por su parte, Kabata-Pendias y Pendias (1992) mencionan que el cadmio es un elemento isotípico del calcio. Sin embargo, ellos mismos señalan que el plomo también interfiere con el calcio. El incremento de Cu en las plantas por los metales pesados aplicados al suelo es difícil de explicar, se reportan tanto sinergismos como antagonismos en la absorción. Al respecto Kabata-Pendias y Pendias (1992) solo se concretan a mencionar que la relación Cd-Cu es muy compleja. El sinergismo puede ser un efecto secundario del daño a las membranas debido al desbalance de las proporciones de los metales. Reportes de la relación del Cu con Pb no fueron encontrados. Consideramos que el sinergismo de Cu es un efecto indirecto de las relaciones con el P, ya que tanto Olsen (1983) como Mengel y Kirkby (1982) reportan una relación entre ambos elementos tanto sinérgica como antagónica en el sentido de que al aplicar uno de ellos en el suelo el otro se reduce en la planta y viceversa. En este trabajo P se redujo en la planta de manera significativa como se menciona anteriormente, esto pudo dar lugar a un mejor lugar del Cu en el sistema suelo-planta. El incremento de la concentración de Zn en plantas por Cd y Pb aplicado al suelo coincide con Alloway (1990), quien menciona que cuando el cadmio se encuentra en altas concentraciones en el suelo ocurre un sinergismo con el zinc o simplemente no se tienen ningún efecto. Este elemento esencial tiene una estrecha relación con el cadmio, ambos están fuertemente asociados en su geoquímica. Se ha reportado, entre estos elementos, tanto sinergismos como antagonismos ya sea en el proceso de absorción o en el transporte dentro de las plantas. Kabata-Pendias y Pendias (1992) reportan efectos de sinergismo entre cadmio y zinc en la zona adyacente a las raíces, y posibles sinergismos o antagonismos en la planta. Al parecer cuando en el suelo se tienen altas cantidades de zinc con respecto al cadmio, se inhibe la absorción de éste último (Haghiri, 1973; EPA, 1995). Otros estudios han demostrado que la presencia de Cd puede incrementar la concentración de Zn en algunas especies (Turner, 1973). Es posible también que el incremento en la concentración de zinc en las partes aéreas de las plantas fue provocado por decremento del Ca anteriormente expuesto ya que estos elementos compiten comúnmente para ocupar los sitios de adsorción, lo anterior pudo haber facilitado

Tabla 2. Comparación de medias de biomasa, metales pesados y elementos esenciales en *N. tabacum* L. en suelo sin contaminar y contaminado con Cd y Pb.

	Suelo sin contaminar	Suelo contaminado con Cd y Pb	P>F
Peso seco (g planta^{-1})	12.00 ± 0.73a	12.30±0.39 a	0.561
Concentración Cd (mg kg^{-1} de material seca)	1.11±0.09b	30±1.82 a	0.000
Concentración Pb (mg kg^{-1} de material seca)	20±1.54 b	170±15 a	0.000
Acumulación de Cd (mg planta^{-1})	13.40±1.60 b	371±25 a	0.000
Acumulación Pb (mg planta^{-1})	240±20 b	2097±152 a	0.000
Nitrógeno (%)	2.02± 0.18 a	2.35± 0.21 a	0.059
Fósforo (%)	0.17 ±0.008 a	0.14 ±0.008 b	0.003
Potasio (%)	6 ± 0.54 a	5.3 ±0.33 a	0.073
Calcio (%)	3.5 ±0.33 a	2.7 ±0.21 b	0.008
Magnesio (%)	0.83 ±0.02 a	0.87 ±0.03 a	0.112
Fierro (mg kg^{-1} de material seca)	629 ±56 a	622 ±39 a	0.840
Cobre (mg kg^{-1} de material seca)	7.22 ±0.40 b	10.75 ±0.58 a	0.000
Manganeso (mg kg^{-1} de material seca)	44 ± 4.16 a	43 ±2.74 a	0.702
Zinc (mg kg^{-1} de material seca)	34 ±3.08 b	43 ±3.62 a	0.009

Medias con la misma letra en filas son iguales ($P < 0.05$)

el movimiento de los iones de zinc en el suelo, y por lo tanto, su absorción y transporte por parte de las plantas (Alloway, 1990). Kabata-Pendias y Pendias (1992) reportaron un incremento en la concentración de zinc en plantas de cereales a medida que la relación Ca/Zn, en la solución del suelo, se redujo de 4 a 2, lo que tuvo que tener una disminución del calcio soluble respecto al zinc.

Análisis de las relaciones entre metales pesados y elementos esenciales por correlaciones bivariadas de Pearson

Las correlaciones bivariables de Pearson arrojaron 24 relaciones significativas cuando se consideró la base total de datos (Tabla 3). P y Ca volvieron a evidenciar una relación negativa o antagónica con la concentración tanto de Cd y Pb, así como sus respectivas acumulaciones. También se repitieron las relaciones positivas o sinérgicas de los microelementos Cu y Zn con ambos metales pesados tanto en concentración como acumulación en las plantas de tabaco. Se encontró una correlación negativa entre el macroelemento K, pero sólo con la concentración y acumulación de Pb, no fue así con Cd. Reportes de la relación del K con Pb no fueron encontrados en la literatura especializada. Especial atención merece las relaciones positivas encontradas entre Cd y Pb, tanto en concentraciones como en acumulaciones. Esto muestra que los metales pesados en conjunto tienen una actividad conjunta muy particular que debe ser tomada en cuenta. Kabata-Pendias y Pendias (1992) reportan este sinergismo en plantas, así como que el efecto estimulatorio de Pb sobre Cd en la zona de raíces puede ser un efecto secundario de disturbio en el transporte transmembrana de iones. Con el grupo de plantas cultivadas en suelo sin contaminar se evidenciaron nueve relaciones significativas (Tabla 3). Se observa que P tuvo una relación positiva con la acumulación de Pb, situación contraria a lo señalado anteriormente con la base total de datos. Por su parte el Cu también mostró un comportamiento contrario a lo ya consignado, puesto que presentó un efecto antagónico con la concentración de Cd. Es evidente que las bajas concentraciones de metales pesados alteran las relaciones entre estos y los elementos esenciales. El peso seco se correlacionó positivamente con el N, situación normal y ampliamente conocida (Tisdale y Nelson, 1977). Es importante mencionar que el peso seco no se relaciona con algún otro elemento tanto en este grupo de datos como en los demás, ya que es parte fundamental en la capacidad acumuladora de las plantas de tabaco. Cuatro correlaciones significativas son evidenciadas en el grupo de las plantas cultivadas con suelo contaminado por Cd y Pb (Tabla 3). Ninguna de ella se repite al comparar con las obtenidas en el grupo de plantas cultivadas en suelo sin contaminar y todas son negativas. Sobresale la relación antagónica de K con la acumulación de Pb, la cual se presentó cuando se analizó la base total de datos. Esta relación, que demostró consistencia, merece ser estudiada en futuros estudios de fitoacumulación, ya que el K puede limitar ampliamente el crecimiento de la plantas por su condición de macroelemento, y por no ser mencionada en la literatura especializada Entre los metales pesados se observan un antagonismo en la concentración de Pb con la acumulación de Pb y otro entre la acumulación de Cd y la acumulación de Pb. Estos resultados son contrarios a los mencionados anteriormente para la base total de datos. Tal comportamiento hace pensar que el sinergismo, entre estos metales pesados, se da cuando los niveles de ambos en el suelo son de bajos a moderados, y conforme se incrementan pasan a ser antagónicos.

Análisis de las proporciones entre nutrientes

La Tabla 4 sumariza las intercorrelaciones significativas entre elementos esenciales identificadas anteriormente, expresadas en proporción de nutrientes. La prueba de F se realizó con el fin de comprobar si esas expresiones son importantes para diferenciar entre plantas cultivadas en suelo sin contaminar y las establecidas en suelo contaminado con Cd y Pb. Sólo cuatro proporciones fueron significativas, lo que permite diferenciar entre ambos grupos de plantas. La proporción Ca/Cu ha sido reportada por Alloway (1990) quien menciona que Ca puede reducir la absorción de Cu. Benton-Jones *et al.* (1991) menciona que esta reducción se puede dar cuando el Ca se encuentra en forma de carbonatos y que en herbáceas parece tomar lugar cuando el Cu esta en cantidades limitadas. Benton-Jones *et al.* (1991) también consigna que es necesario poco Ca en las plantas cuando Cu, y otros metales pesados, están ausentes o presentes en bajas concentraciones en el substrato, e indica que la concentración en las plantas puede reducirse, en tales circunstancias,

Tabla 3. Interacciones evidenciadas usando coeficientes de correlación de Pearson con la base total de datos (n=8), en suelo sin contaminar (n=4) y en suelo contaminado (n=4).

Base total de datos (n=8)		
Correlación bivariable	r	P
N-Pb acumulación.	0.718	0.045
P-Cd concentración	-0.880	0.004
P-Pb concentración	-0.916	0.001
P- Cd acumulación	-0.882	0.004
P- Pb acumulación	-0.921	0.001
K-Pb concentración	-0.695	0.050
K-Pb acumulación	-0.697	0.050
Ca- Cd concentración	-0.851	0.007
Ca-Pb concentración	-0.862	0.006
Ca-Cd acumulación	-0.845	0.008
Ca-Pb acumulación	-0.856	0.007
Cu-Cd concentración	0.966	0.000
Cu-Pb acumulación	0.978	0.000
Cu-Cd acumulación	0.961	0.000
Cu-Pb acumulación	0.975	0.000
Zn-Cd concentración	0.824	0.012
Zn-Cd acumulación	0.837	0.010
Zn-Pb acumulación	0.839	0.009
Cd concentración-Pb concentración	0.982	0.000
Cd concentración- Cd acumulación	0.999	0.000
Cd concentración- Pb acumulación	0.985	0.000
Pb concentración- Cd acumulación	0.979	0.000
Pb concentración- Pb acumulación	0.999	0.000
Cd acumulación- Pb acumulación	0.983	0.000
Base de datos en suelo sin contaminar (n=4)		
Peso seco-N	0.988	0.012
P-Pb acumulación	0.992	0.008
Ca-Mn	0.988	0.002
Mg-Fe	-0.997	0.003
Mg-Cu	0.985	0.015
Mg-Cd concentración	-0.974	0.026
Fe-Cu	-0.971	0.029
Fe- Cd concentración	0.970	0.030
Cu- Cd concentración	-0.980	0.020
Base de datos en suelo contaminado con Cd y Pb (n=4)		
K-Pb acumulación	-0.980	0.020
Ca-Cu	-0.960	0.040
Pb concentración-Cd acumulación	-0.944	0.056
Cd acumulación-Pb acumulación	-0.951	0.049

Tabla 4. Media, desviación estándar y prueba de F de las proporciones de las relaciones importantes obtenidas en *N. tabacum* L. cultivado en suelo sin contaminar y contaminado con Cd y Pb.

Relación	Sin contaminar	Contaminado	F de la proporción	P>F
Ca/Mn	0.077 (±0.005)	0.063 (±0.007)	11.09**	0.016
Mg/Fe	0.0013 (±0.001)	0.0014 (±0.0001)	0.31	0.602
Mg/Cu	0.115 (±0.003)	0.0811 (±0.007)	68.42**	0.000
Fe/Cu	87.625 (±12.41)	57.93 (±2.48)	22.02**	0.004
Ca/Cu	0.486 (±0.051)	0.253 (±0.034)	58.90**	0.001

hasta aproximadamente 800 mg kg^{-1} de materia seca. La proporción Fe/Cu ha sido reportada por Kabata-Pendias y Pendias (1992). Benton-Jones *et al.* (1991) menciona que el Cu puede interferir en el metabolismo del Fe, y puede resultar una deficiencia de Fe. La proporción Ca/Mn es poco común, ya que según Benton-Jones *et al*. (1991) el Mn no interfiere con el metabolismo de otros elementos esenciales. La proporción Mg/Cu no cuenta con bases fisiológicas para sustentarla.

Conclusiones

Los elementos esenciales P y Ca redujeron su concentración en plantas de tabaco debido a los metales pesados Cd y Pb presentes en suelo contaminado con 10 y 500 mg kg^{-1} de suelo respectivamente. Por el contrario, los microelementos Cu y Zn se incrementaron en las plantas de manera significativa. Las correlaciones bivariadas refuerzan estas relaciones y muestran, además, un antagonismo importante entre K y Pb. Las proporciones entre elementos esenciales que se afectaron por los metales aplicados al suelo fueron: Ca/Mn, Mg/Cu, Fe/Cu, Ca/Cu. Sin embargo, todas las relaciones evidenciadas en este estudio no demuestran que hayan afectado el proceso de acumulación en *N. tabacum* ya que ninguna tuvo relación significativa con la producción de materia seca de las partes aéreas de las plantas, la cual es componente de la capacidad acumuladora de las plantas de tabaco.

Bibliografía

Alloway B. J. 1990. Heavy metals in soils. John Wiley and Sons, Inc. New York. pp:114, 167.

Benton-Jones, Jr., B. Wolf, H. A. Mills. 1991. Plant analysis handbook. Micro-macro publishing. 116 p.

Bierman P. M. and Rosen, C. J. 2006. Nutrient Management for Fruit and Vegetable Crop Production. Diagnosing nutrient disorders. Extension service, University of Minnesota. http://www.extension.umn.edu/distribution/horticulture/components/M1190.pdf (12 septiembre 2006)

Bowen H J K. 1979. Environmental Chemistry of the Elements. Academic Press, New York. 333 p.

Brown R. L., J. S. Chaney Angle and A. J. M. Baker. 1994. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and *Bladder campion* for zinc and cadmium contaminated soil. Journal Environmental Quality. 23: 1151-1157.

Depledge M.H., J.M. Weeks, and P. Bjerregaard. 1984. Heavy metals. Handbook of Ecotoxicology. Edited by Peter Calow. pp. 79-105.

Ebbs S.D. and L..V. Kochian. 1997. Toxicity of zinc and copper to *Brassica species*: Implications for phytoremediation. Journal Environmental Quality. 26: 776-781.

Ebbs S. D., M. M. Lasat, D. J. Brady, J. E. Cornish, R. Gordon and L. V. Kochian. 1997. Phytoextraction of cadmium and zinc from contaminated soil. Journal Environmental Quality. 26: 1424-1430.

EPA, 1995. A guide to the biosolids risk assessments for the EPA part 503 rule. U. S. Environmental Protection Agency. U. S. A.

Förstner U. 1995. Land Contamination by metals: Global scope and magnitude of problem. p. 1–33. In H.E. Allen et al. (ed.). Metal speciation and contamination of soil. Lewis Publishers.

Gutiérrez C. M. A. 2006. ¿Cantidad y Calidad?. Nutrición vegetal y uso adecuado de fertilizantes en hortalizas contribuyen a la obtención de ambos aspectos. *In*: Productores de hortalizas. Año 15, Num. 8: 35-36.

Haghiri F. 1973. Cadmium uptake by plants. Journal Environmental Quality (4) 1: 92 – 95.

Huang J.W., J. Chen, and S.D. Cunningham. 1997. Phytoextraction of lead from contaminated soils. In E.L. Kruger et al.(ed.). Phytoremediation of soils and water contaminants. American Chemestry Society. Washington, D.C. USA. pp. 283-298.

Kabata Pendias A. y Henryk Pendias. 1992. Trace elements in soils and plants, 2nd edition. CRC Press.

Lasat M. M. 2000. Phytoextraction of metals from contaminated soil: a review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues. Journal of Hazardous Substance Research. Volume two. 1-25 p.

Maiti I. B. ., G. J. Wagner, and A. G. Hunt. 1991. Light-inducible and tissue-specific expression of a chrimeric mouse metallothionein cDNA gene in tobacco. Plant Sci 76:99- 107.

Marschner 1986. Mineral Nutrition of higher plants. Academic Press. London. 674p.

McGrath S. P. (1998). Phytoextraction for soil remediation. *In*: Plants that hyperacumulate heavy metals. Ed. Cad International. 261-287.

Mench M., J. Tancogne, A. Gomez and C. Juste. 1989. Cadmium bioavailability to *Nicotiana tabacum L., Nicotiana rustica L. and Zea mays L.* grown in soil amended or not amended with cadmium nitrate. Biology and fertility of soils. 8:1, 48-53.

Mengel Konrad and Ernest. A. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. International Potash institute. Bern, Switzeralnd. 655 p.

Olsen S. R. 1983. Interacciones de los micronutrients. In: Micronutrientes en agricultura. J. J. Mortvedt, P. M. Giordano y W. L. Lidsay (Comp.). AGT editor. Pp. 267-290.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). 1990. La calidad del medio ambiente y la infancia, en el presente y en el futuro. In: La infancia y el medio ambiente. Estado del medio ambiente-1990.pp. 17-46.

Reeves R.D., and A.J.M. Baker. 2000. Metal Accumulating Plants. *In*: Raskin, I., B.D. Ensley (Eds.). *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean up the Environment*. John Wiley. New York, NY. USA.

Sola V. B. 2004. Saturnismo o intoxicación por plomo. http://www.esmas.com/salud/enfermedades/ambientales/503652.html (16 octubre 2006).

Statsoft Inc. 2004. Statistica for windows (Computer Program Manual). StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA.

Temmerman L. O., M. Hoenig, and P. O. Scokart. 1984. Determination of "normal" levels and upper limit values of trace elements in soils. Z. Pflanzen. Bodenk. 147: 687-694.

Tisdale, S. L. y W. L. Nelson. 1977. El suelo y los fertilizantes nitrigenados. *In*: Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Tisdale, S. L. y W. L. Nelson. 1977. Montaner y Simón, S. A. Barcelona. 138-211.

Turner M. A. 1973. Effect of cadmium treatment on cadmium and zinc uptake by selected vegetable species. Journal Environmental Quality. 2: 118-119.

Wagner G. J. 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. Advances in Agronomy. 51: 173-212.