

Evaluación de dosis de biosólidos urbanos en maíz bajo condiciones de invernadero*

Evaluation of doses of urban biosolids in maize under greenhouse conditions

Eduardo González-Flores^{1§}, Jacqueline Esther Ramos-Barragán¹, Mario Alberto Tornero-Campante² y Misael Murillo-Murillo¹

¹Instituto Tecnológico de Puebla. Edif. 29, Avenida Tecnológico 420. Colonia Maravillas, Puebla, Puebla, México. C.P. 72220. (rbjacky@hotmail.com; premi168@yahoo.com.mx). ²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Edif. IC12, Ciudad Universitaria. Col. San Manuel, Puebla, Puebla. CP. 72570. (matorcam@hotmail.com). [§]Autor para correspondencia: edgon2010@hotmail.com.

Resumen

Los biosólidos poseen características que pueden mejorar la fertilidad de los suelos. Generalmente, las estrategias para el uso agrícola de biosólidos no están basadas en estudios que respalden las dosis aplicadas a cultivos específicos. Es necesario realizar investigación previa para aplicar biosólidos en un determinado cultivo; los efectos que se produzcan dependen del clima, tipo de suelo y calidad de los biosólidos. El objetivo de este estudio fue evaluar, bajo condiciones de invernadero, los efectos que diferentes dosis de biosólidos producen sobre la calidad de la planta de maíz, el contenido de metales pesados en la misma y las características químicas del suelo de la zona sur del municipio de Puebla. El estudio se desarrolló en 2013 bajo condiciones de invernadero; tuvo una duración de 120 días. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con seis tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron diferentes dosis de biosólidos: T1= 100 t ha⁻¹, T2= 200 t ha⁻¹, T3= 300 t ha⁻¹, T4= 400 t ha⁻¹, T5= 500 t ha⁻¹, TC= suelo sin biosólidos. Se midieron variables vegetativas, propiedades químicas del suelo y metales pesados en raíz, tallo y hojas de la planta. Para las variables vegetativas no existe diferencia estadística entre los tratamientos. Las propiedades químicas del suelo

Abstract

The biosolids have characteristics that can improve the fertility of soils. Generally, strategies for the agricultural use of biosolids are not based on studies that support the doses applied to specific crops. It is necessary to carry out previous research to apply biosolids in a given crop; the effects that are produced depend on the climate, type of soil and quality of the biosolids. The objective of this study was to evaluate, under greenhouse conditions, the effects that different doses of biosolids produce on the quality of the maize plant, the heavy metal content in it and the chemical characteristics of the soil of the southern zone of the municipality of Puebla. The study was developed in 2013 under greenhouse conditions; had a duration of 120 days. A completely randomized experimental design with six treatments and four replicates was used. The treatments were different doses of biosolids: T1= 100 t ha⁻¹, T2= 200 t ha⁻¹, T3= 300 t ha⁻¹, T4= 400 t ha⁻¹, T5= 500 t ha⁻¹, TC= soil without biosolids. The vegetative variables, soil chemical properties and heavy metals were measured in root, stem and leaves of the plant. For the vegetative variables, there is no statistical difference between treatments. The chemical properties of the soil improve and are adequate in the treatments with higher doses. The content of heavy

* Recibido: febrero de 2017
Aceptado: abril de 2017

mejoran y son adecuadas en los tratamientos con dosis más altas. Los contenidos de metales pesados en las diferentes partes de la planta son adecuados para su desarrollo y el contenido de plomo no representa riesgo de toxicidad.

Palabras claves: *Zea mays* L., lodos residuales, metales pesados.

Introducción

Los biosólidos son lodos residuales estabilizados, derivados de los procesos de tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales (SEMARNAT, 2002). Su disposición final se ha convertido en un problema ambiental que viene en aumento desde la última década del Siglo XX (Gavalda *et al.*, 2005). Las opciones para disponer los biosólidos incluyen la incineración, el depósito en rellenos sanitarios y el reciclaje como abonos orgánicos para uso agrícola (Alves *et al.*, 2006). La utilización de biosólidos como mejoradores de suelos agrícolas puede ser viable ambiental y económicamente, y se considera una opción sostenible para su disposición final. Los biosólidos pueden usarse como una fuente económica de nutrientes en la agricultura debido a que poseen características que mejoran la fertilidad de los suelos y que pueden incrementar los rendimientos y generar ganancias económicas a los productores (O'Connor *et al.*, 2005).

Los beneficios del uso agrícola de los biosólidos incluyen, el impacto positivo en las propiedades físicas y químicas del suelo, la reducción de la densidad del suelo y el aumento de la porosidad, lo que mejora la estabilidad estructural (Roig *et al.*, 2012). Estos cambios resultan generalmente en un incremento en la capacidad de retención de agua, sobre todo en suelos de textura gruesa y a largo plazo mejoran la movilidad de agua y la resistencia a la erosión del suelo (Samaras *et al.*, 2008). Los biosólidos tienen altos contenidos de materia orgánica, nitrógeno y potasio.

Las cantidades de nutrientes solubles son inicialmente pequeñas y la toma de nutrientes por la planta debe esperar la mineralización de los constituyentes orgánicos de los biosólidos (Guo *et al.*, 2012), lo cual posibilita la disponibilidad de nutrientes a mediano y largo plazo. Las principales restricciones para el uso agrícola de los biosólidos son, el contenido de metales pesados y la presencia de microorganismos patógenos. Los metales pesados, pueden ser

metals in the different parts of the plant are suitable for their development and the plumbum content does not represent risk of toxicity.

Keywords: *Zea mays* L., residual sludge, heavy metals.

Introduction

The biosolids are stabilized sewage sludge derived from urban and industrial wastewater treatment processes (SEMARNAT, 2002). Their final disposal has become an environmental problem that has been increasing since the last decade of the 20th century (Gavalda *et al.*, 2005). The options to dispose of biosolids include incineration, landfill and recycling as organic fertilizers for agricultural use (Alves *et al.*, 2006). The use of biosolids as agricultural soil improvers may be environmentally and economically viable and is considered a sustainable option for final disposal. The biosolids can be used as an economical source of nutrients in agriculture because they have characteristics that improve soil fertility and can increase yields and generate economic gains for producers (O'Connor *et al.*, 2005).

The benefits of the agricultural use of biosolids include, the positive impact on the physical and chemical properties of the soil, the reduction of the soil density and the increase of the porosity, which improves the structural stability (Roig *et al.*, 2012). These changes generally result in an increase in water retention capacity, especially in coarse textured soils and in the long term improve water mobility and resistance to soil erosion (Samaras *et al.*, 2008). The biosolids have high contents of organic matter, nitrogen and potassium.

The amounts of soluble nutrients are initially small and nutrient uptake by the plant must await the mineralization of the organic constituents of the biosolids (Guo *et al.*, 2012), which makes possible the availability of nutrients in the medium and long term. The main restrictions for the agricultural use of biosolids are the heavy metal content and the presence of pathogenic microorganisms. The heavy metals can be toxic to plants, animals or humans, due to possible transfer and bioaccumulation through the trophic networks. The risk depends on the concentration present in the soil, on the biosolids and their availability and mobility (Castro *et al.*, 2009). The strategies for the agricultural use of biosolids are generally not based on scientific studies that support the doses applied to specific crops.

tóxicos para plantas, animales o humanos, debido a la posible transferencia y bioacumulación a través de las redes tróficas. El riesgo depende de la concentración presente en el suelo, en los biosólidos y de su disponibilidad y movilidad (Castro *et al.*, 2009). Las estrategias para el uso agrícola de biosólidos, generalmente no están basadas en estudios científicos, que respalden las dosis aplicadas a cultivos específicos.

Por lo tanto, es necesario realizar investigación previa a la aplicación de biosólidos en campo para un determinado cultivo, porque los efectos que se produzcan dependerán de factores tales como el clima, el tipo de suelo, la calidad de la semilla, la calidad de los biosólidos y el manejo agrícola. La ciudad de Puebla (19° 02' 37" latitud norte, 98° 11' 53" longitud oeste), capital del estado del mismo nombre y ubicado en la región central de México, tiene una población cercana a dos millones de habitantes y cuenta con cinco plantas de tratamiento de aguas residuales que generan 200 t día⁻¹ de lodos residuales.

Estos residuos son estabilizados en las mismas plantas de tratamiento por medio de una digestión anaerobia, con lo cual se eliminan una gran cantidad de microorganismos patógenos (Pepper *et al.*, 2006); posteriormente son deshidratados para darles la calidad adecuada para emplearlos en suelos agrícolas (SEMARNAT, 2002). Los biosólidos producidos en la ciudad de Puebla son utilizados como enmiendas orgánicas en suelos agrícolas, con baja fertilidad y contenido bajo de materia orgánica, de comunidades rurales ubicadas al sur de la ciudad, en donde se cultiva principalmente maíz (*Zea mays* L.). El objetivo de este estudio fue evaluar, bajo condiciones de invernadero, los efectos que diferentes dosis de biosólidos producen sobre la calidad de la planta de maíz, el contenido de metales pesados en la misma y las características químicas del suelo de la zona sur del municipio de Puebla.

Materiales y métodos

El proyecto se desarrolló en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Puebla (19° 02' 37" latitud norte, 98° 11' 53" longitud oeste) en condiciones controladas de invernadero (excepto la temperatura). La humedad relativa promedio fue 48.5%; el riego fue manual, tres veces por semana. El experimento se desarrolló de septiembre a diciembre de 2013. La duración fue de 120 días. En este cultivo experimental se empleó suelo de la comunidad denominada La Paz Tlaxcolpan, en el municipio de Puebla, México (18° 54' 21"

Therefore, it is necessary to carry out research prior to the application of biosolids in the field for a given crop, because the effects that will occur will depend on factors such as the climate, the type of soil, the quality of the seed, the quality of the biosolids and agricultural management. The city of Puebla (19° 02' 37" north latitude, 98° 11' 53" longitude west), capital of the state of the same name and located in the central region of Mexico, has a population of two million inhabitants and counts with five wastewater treatment plants generating 200 t day⁻¹ of sewage sludge.

These residues are stabilized in the same treatment plants by means of anaerobic digestion, thereby eliminating a large number of pathogenic microorganisms (Pepper *et al.*, 2006); they are then dehydrated to give them the appropriate quality for use in agricultural soils (SEMARNAT, 2002). The biosolids produced in the city of Puebla are used as organic amendments in agricultural soils, with low fertility and low content of organic matter, of rural communities located south of the city, where maize (*Zea mays* L.). The objective of this study was to evaluate, under greenhouse conditions, the effects that different doses of biosolids produce on the quality of the maize plant, the heavy metal content in it and the chemical characteristics of the soil of the southern zone of the municipality of Puebla.

Materials and methods

The project was developed at the Technological Institute of Puebla (19° 02' 37" north latitude, 98° 11' 53" west longitude) under controlled greenhouse conditions (except temperature). The average relative humidity was 48.5%; the irrigation was manual, three times a week. The experiment was carried out from September to December 2013. The duration was 120 days. In this experimental crop, soil of the community called La Paz Tlaxcolpan was used in the municipality of Puebla, Mexico (18° 54' 21" north latitude, 98° 13' 16" longitude west), which is one of the places where the biosolids are applied to the corn crop. This soil is classified as a cambisol eutricto (FAO, 2014). The selected seed from local maize was used by producers.

The biosolids used were of urban origin. In the wastewater treatment plant are stabilized by means of anaerobic digestion and subsequently dehydrated. Samples were taken in the month of August 2013. The biosolids were dried at room temperature for 10 days. Once dried they were placed in

latitud norte, 98° 13' 16" longitud oeste), que es uno de los lugares donde se aplican los biosólidos al cultivo de maíz. Este suelo está clasificado como un cambisol éutrico (FAO, 2014). Se utilizó semilla seleccionada del maíz criollo de la zona, utilizado por los productores.

Los biosólidos usados fueron de origen urbano. En la planta de tratamiento de aguas residuales son estabilizados por medio de una digestión anaerobia y posteriormente deshidratados. Las muestras fueron tomadas en el mes de agosto de 2013. Los biosólidos se pusieron a secar a temperatura ambiente durante 10 días. Una vez secos se colocaron en bolsas de polietileno, para su posterior utilización en la formación de las distintas mezclas con el suelo. La determinación de metales pesados en biosólidos se realizó de acuerdo con lo establecido en la norma correspondiente (SEMARNAT, 2002); para la determinación de textura, pH, CE, MO y CIC en biosólidos se utilizaron los métodos aplicados a muestras de suelo (SEMARNAT, 2000).

Las dosis empleadas se determinaron tomando como base de cálculo la cantidad máxima de biosólidos que se aplican en los suelos de la comunidad de La Paz Tlaxcolpan, 400 t ha⁻¹. Para determinar las dosis se consideró para el suelo una densidad aparente de 1.2 t m⁻³ y una profundidad de la capa arable de 20 cm; para los biosólidos la densidad utilizada en los cálculos fue de 1 t m⁻³. Con estos datos se determinó que a 2 500 000 kg de suelo (correspondiente a una hectárea) se aplican 400 000 kg de biosólidos. La relación sería de 160 g de biosólidos por cada kilogramo de suelo en una dosis de 400 t ha⁻¹. A partir de estos datos se calcularon las relaciones suelo-biosólidos para las diferentes dosis.

Las unidades experimentales fueron macetas (bolsas de polietileno de 40 cm x 40 cm). En cada maceta se colocaron 10 kg de suelo y su correspondiente cantidad de biosólidos para las diferentes dosis (en base seca). El suelo y los biosólidos se mezclaron cinco días antes de la siembra. En cada maceta se sembraron tres semillas. La germinación ocurrió entre seis y 10 días después de la siembra. El porcentaje de germinación fue 94%. 15 días después de la siembra se realizó el deshijamiento en cada maceta con la finalidad de dejar una sola planta en cada maceta.

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con seis tratamientos y cuatro repeticiones, para un total de 24 unidades experimentales. Los tratamientos correspondieron con las diferentes dosis de biosólidos de la siguiente manera: tratamiento 1 (T1)= 100 t ha⁻¹, tratamiento 2 (T2)= 200 t

polyethylene bags, for later use in the formation of different mixtures with the soil. The determination of heavy metals in biosolids was performed according to the established standard (SEMARNAT, 2002); for the determination of texture, pH, CE, MO and CIC in biosolids were used the methods applied to soil samples (SEMARNAT, 2000).

The doses used were determined on the basis of the calculation of the maximum amount of biosolids applied in the soils of the community of La Paz Tlaxcolpan, 400 t ha⁻¹. To determine the doses were considered, an apparent density of 1.2 t m⁻³ and a depth of the arable layer of 20 cm for the soil; for biosolids the density used in the calculations was 1 t m⁻³. With these data it was determined that 2.5 million kg of soil (corresponding to one hectare) apply 400 000 kg of biosolids. The ratio would be 160 g of biosolids per kilogram of soil at a dose of 400 t ha⁻¹. From these data the soil-biosolid relationships were calculated for the different doses.

The experimental units were pots (polyethylene bags 40 cm x 40 cm). In each pot were placed 10 kg of soil and its corresponding amount of biosolids for the different doses (on a dry basis). The soil and biosolids were mixed five days prior to planting. In each pot three seeds were planted. The germination occurred between six and 10 days after sowing. The percentage of germination was 94%. 15 days after sowing the weeding was done in each pot with the purpose of leaving a single plant in each pot.

A completely randomized experimental design with six treatments and four replicates was used for a total of 24 experimental units. The treatments corresponded to the different doses of biosolids as follows: treatment 1 (T1)= 100 t ha⁻¹, treatment 2 (T2)= 200 t ha⁻¹, treatment 3 (T3)= 300 t ha⁻¹, treatment 4 (T4)= 400 t ha⁻¹, treatment 5 (T5)= 500 t ha⁻¹, control treatment (TC)= soil without biosolids. The vegetative variables and physico-chemical characteristics of the soil-biosolids mixture were measured in each experimental unit.

The vegetative variables measured in the maize plant were as follows (Avendaño-Arrazate *et al.*, 2008): plant height (AP) was recorded by measuring the total length from the base of the stem to the base of the spike; basal diameter of the stem (DBT), measured with a vernier base of the stem; number of leaves (NH); leaf area per plant (AFP), the area of one leaf per plant was determined by the equation: long leaf x width leaf x 0.75 (Montgomery, 1971) and multiplied by the number of leaves per plant.

ha⁻¹, tratamiento 3 (T3)= 300 t ha⁻¹, tratamiento 4 (T4)= 400 t ha⁻¹, tratamiento 5 (T5)= 500 t ha⁻¹, tratamiento control (TC)= suelo sin biosólidos. En cada unidad experimental se midieron variables vegetativas y características fisicoquímicas de la mezcla suelo-biosólidos.

Las variables vegetativas medidas en la planta de maíz fueron las siguientes (Avenida-Arrazate *et al.*, 2008): altura de planta (AP), se registró midiendo la longitud total desde la base del tallo hasta la base de la espiga; diámetro basal del tallo (DBT), medido con un vernier la base del tallo; número de hojas (NH); área foliar por planta (AFP), se determinó el área de una hoja por planta por medio de la ecuación: largo hoja x ancho hoja x 0.75 (Montgomery, 1971) y se multiplicó por el número de hojas por planta.

Se midió la variable de rendimiento, biomasa total (BT), pesando el peso seco de las plantas cosechadas en cada unidad experimental. Las variables determinadas en la mezcla suelo-biosólidos y en los biosólidos fueron: textura, pH, materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y metales pesados extraíbles (Cd, Cu, Fe Mn, Pb, Zn) con ácido dietilen-triaminopentacético (DTPA). Para estas variables solamente se realizó una determinación. Los métodos utilizados fueron los establecidos en la norma correspondiente (SEMARNAT, 2000).

Para el análisis de muestras de tejido vegetal, se empleó el método de digestión húmeda (López-Ritas y López-Mélida, 1978). Se determinaron las concentraciones de Cd, Cu, Pb y Zn en raíz, tallo y hoja de la planta. La cuantificación de las concentraciones de metales en todos los extractos obtenidos se realizó con un equipo (Varian Liberty Series II) de espectroscopia de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). Se realizó un análisis estadístico, aplicando un análisis de varianza a las variables medidas en la planta, utilizando la prueba de Tukey para realizar la comparación de medias entre tratamientos, con un nivel de significancia 95% y así determinar posibles efectos de las diferentes dosis de biosólidos. Se empleó el programa SPSS (Statistical Package for Social Sciences) 15.0.

Resultados y discusión

Las características fisicoquímicas del suelo y los biosólidos utilizados se muestran en el Cuadro 1. El suelo y los biosólidos tuvieron un pH ligeramente ácido. Por el valor obtenido de

The yield variable, total biomass (BT), was measured by weighing the dry weight of the plants harvested in each experimental unit. The variables identified in the mixture soil-biosolids and biosolids were: texture, pH, organic matter (MO), electrical conductivity (CE), cation exchange capacity (CIC) and heavy metals removable (Cd, Cu, Fe Mn, Pb, Zn) with diethylene triaminepentaacetic acid (DTPA). For these variables only one determination was made. The methods used were those established in the corresponding standard (SEMARNAT, 2000).

For the analysis of plant tissue samples, the wet digestion method was used (López-Ritas and López-Melida, 1978). The concentrations of Cd, Cu, Pb and Zn were determined in root, stem and leaf of the plant. The quantification of the metal concentrations in all extracts obtained was performed with an equipment (Varian Liberty Series II) of inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES). A statistical analysis was performed, applying an analysis of variance to the variables measured in the plant, using the Tukey test to perform the comparison of means between treatments, with a level of significance of 95% and thus to determine possible effects of the different doses of Biosolids. The SPSS program was used (Statistical Package for Social Sciences) 15.0.

Results and discussion

The physicochemical characteristics of the soil and the biosolids used are shown in Table 1. The soil and biosolids had a slightly acidic pH. By the value obtained from CE, the soil had negligible effects of salinity; in contrast, biosolids showed an CE that corresponds to the conditions of a saline soil. The MO content was low for soil and high for biosolids. The CIC was high for both, which is mainly due to the clay content that both present in its texture (Porta *et al.*, 2003), the high content of organic matter in the biosolids is the cause of its greater CIC due to the high surface area that it possesses and that results in a greater capacity of adsorption to retain metallic cations (Basta *et al.*, 2005).

The values of Fe, Mn, Cu and Zn (DTPA extractable) are adequate in the soil; the concentrations of Cd and Pb were found to be below what was considered normal (SEMARNAT, 2000). The concentrations of the heavy metals determined in the biosolids (Table 1), are below the established in the official Mexican norm in "permissible

CE, el suelo presentó efectos despreciables de salinidad; en cambio, los biosólidos mostraron una CE que corresponde a las condiciones de un suelo salino. El contenido de MO fue bajo para el suelo y alto para los biosólidos. La CIC fue alta para ambos, lo cual se debe principalmente al contenido de arcilla que ambos presentan en su textura (Porta *et al.*, 2003), el alto contenido de materia orgánica en los biosólidos es la causa de su mayor CIC debido a la elevada superficie específica que posee y que resulta en una mayor capacidad de adsorción para retener cationes metálicos (Basta *et al.*, 2005).

Los valores encontrados de Fe, Mn, Cu y Zn (extraíbles con DTPA) son adecuados en el suelo; las concentraciones de Cd y Pb se encontraron por debajo de lo considerado normal (SEMARNAT, 2000). Las concentraciones de los metales pesados determinados en los biosólidos (Cuadro 1), están por debajo de lo establecido en la norma oficial mexicana en cuanto a “límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos”, y de acuerdo con la misma, los biosólidos empleados se pueden clasificar en la categoría de “excelentes”, para su uso como mejoradores de suelos.

Las variables químicas medidas en la mezcla suelo-biosólidos (Cuadro 2), presentaron algunas tendencias importantes con respecto al incremento de la dosis de biosólidos aplicada. Se observó que el pH del TC fue ligeramente ácido y cuando los biosólidos fueron aplicados al suelo, el pH se elevó hasta ser ligeramente alcalino para T1 y T2; para T3, T4 y T5, el pH descendió hasta un valor considerado neutro (SEMARNAT, 2002). Los valores más altos de pH fueron de los tratamientos con menor dosis de biosólidos (100 t ha⁻¹ y 200 t ha⁻¹); a medida que la dosis aumentó el pH descendió.

La conductividad eléctrica (CE), presentó un comportamiento inverso al del pH; aumentó de manera directa con la dosis de biosólidos. El valor más bajo fue del TC y el valor más alto fue del T5. Schroeder *et al.* (2008), en un estudio de campo con trigo (*Triticum aestivum*) y Bañuelos *et al.* (2007), en un estudio de campo con chabacano (*Prunus armaniaca*), encontraron la misma tendencia en la CE respecto a la aplicación de biosólidos. Esta situación podría implicar un riesgo de salinidad para el suelo. Este fenómeno puede explicarse por dos efectos relacionados con la adición de los biosólidos al suelo; la primera involucra el contenido de MO aportada.

La conducción de la electricidad en los suelos se realiza principalmente a través de macro y micro poros continuos que están llenos de agua. La MO promueve la formación y

maximum limits for heavy metals in biosolids”, and according to the same, the biosolids used can be classified in the category of “excellent”, for use as soil improvers.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo y los biosólidos utilizados.

Table 1. Physical and chemical properties of soil and biosolids used.

Variable	Suelo	Biosólidos
Textura	Franco-arcillosa	Arcillosa
pH	6.19	6.56
CE (dS m ⁻¹)	0.38	4.5
MO (%)	1.4	3.7
CIC (cmol kg ⁻¹)	28.43	33.83
Cd (mg kg ⁻¹)	0.01	0.21
Cu (mg kg ⁻¹)	1.61	25.09
Fe (mg kg ⁻¹)	11.2	122.73
Mn (mg kg ⁻¹)	33.49	80.23
Pb (mg kg ⁻¹)	0.44	1.54
Zn (mg kg ⁻¹)	1.95	163.99

The chemical variables measured in the soil-biosolids mixture (Table 2), presented some important trends with respect to the increase of applied biosolids dose. It was observed that the pH of the TC was slightly acidic and when the biosolids were applied to the soil, the pH rose to be slightly alkaline for T1 and T2; for T3, T4 and T5, the pH dropped to a value considered neutral (SEMARNAT, 2002). The highest values of pH were from treatments with lower doses of biosolids (100 t ha⁻¹ and 200 t ha⁻¹); as the dose increased the pH dropped.

The electrical conductivity (CE) showed an inverse behavior to that of pH; increased directly with the dose of biosolids. The lowest value was TC and the highest value was T5. Schroeder *et al.* (2008), in a field study with wheat (*Triticum aestivum*) and Bañuelos *et al.* (2007), in a field study with apricot (*Prunus armaniaca*), found the same tendency in the CE regarding the application of biosolids. This situation could imply a risk of salinity for the soil. This phenomenon can be explained by two effects related to the addition of biosolids to the soil; the first involves the MO content contributed.

The conduction of electricity in soils is mainly done through continuous macro and micro pores that are filled with water. The MO promotes the formation

estabilización de agregados en el suelo, generando poros continuos, lo que aumenta la capacidad de conducción de electricidad en el suelo; la MO también produce una mayor retención de humedad en los suelos, lo cual también incide en una mayor CE (Zhang y Wienhold, 2002).

El otro factor que repercute en el aumento de la CE es la textura de la mezcla suelo-biosólidos. La textura franco arcillosa del suelo y la textura arcillosa de los biosólidos implican un alto contenido de partículas finas, las cuales tienen un contacto mucho más cercano partícula-partícula, lo cual produce una microporosidad alta, capaz de retener agua con más fuerza y en consecuencia se genera una mayor conducción eléctrica (Sudduth *et al.*, 2003).

Respecto al contenido de metales extractables con DTPA (Cuadro 2), el Cd tuvo bajas concentraciones en todos los tratamientos; el testigo la menor concentración y los tratamientos con biosólidos se incrementó al aumentar la dosis de biosólidos. Esto significa que el Cd es aportado por los biosólidos, puede ser atribuido a la formación de complejos entre la MO y los cationes metálicos. El Cd tiene una gran afinidad con la MO, específicamente con el grupo funcional tiol (-SH), presente en la MO humificada (Li *et al.*, 2001); Hettiarachchi *et al.*, 2003; Kukier *et al.*, 2010).

and stabilization of aggregates in the soil, generating continuous pores, which increases the conductivity of electricity in the soil; the MO also produces a greater moisture retention in the soils, which also implies a higher CE (Zhang and Wienhold, 2002).

The other factor that has an impact on the CE increase is the texture of the soil-biosolids mixture. The loamy clay texture of the soil and the clayey texture of the biosolids imply a high content of fine particles, which have a much closer particle-particle contact, which produces a high microporosity, able to retain water with more force and consequently greater electrical conduction is generated (Sudduth *et al.*, 2003).

Regarding the extractable metals content with DTPA (Table 2), the Cd presented low concentrations in all treatments. The control soil had the lowest concentration and in treatments with biosolids increased slightly with increasing biosolids dose. This means that the Cd is supplied by the biosolids. This can be attributed to the formation of complexes between organic matter and metal cations. The Cd has a high affinity with organic matter, specifically with the thiol functional group (-SH), present in the humid organic matter (Li *et al.*, 2001); Hettiarachchi *et al.*, 2003; Kukier *et al.*, 2010).

Cuadro 2. Propiedades químicas de los diferentes tratamientos (mezcla suelo-biosólidos).

Table 2. Chemical properties of the different treatments (soil-biosolids mixture).

Tratamiento	pH	CE (dS m ⁻¹)	MO (%)	CIC (cmol kg ⁻¹)	Cd (mg kg ⁻¹)	Cu (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Pb (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)
TC	6.19	0.38	1.4	28.43	0.01	1.61	11.2	33.49	0.44	1.95
T1	7.54	0.63	2.11	54.02	0.02	4.17	21.56	19.44	1.37	19.52
T2	7.52	0.69	2.04	51.1	0.03	5.26	30.16	21.12	1.57	26.01
T3	7.32	1.33	2.81	51.1	0.03	6.95	37.49	21.12	1.85	37.39
T4	7.31	1.39	3.06	58.4	0.03	6.9	35.95	27.69	1.85	35.21
T5	7.27	2.02	3.32	55.48	0.04	6.94	36.93	29.4	1.87	32.28

Los metales Cu, Fe, Pb y Zn incrementaron sus concentraciones y su disponibilidad en relación directa con el aumento de la dosis de biosólidos. La afinidad del Cu, Fe, Pb y Zn con la MO ha sido ampliamente documentada (Kabata-Pendias y Pendias, 2001; Basta *et al.*, 2005). El Cu y el Pb forman fuertes complejos de superficie de esfera interna con la materia orgánica y por lo tanto son aportados por los biosólidos al suelo (Adriano, 2001). En el suelo el Pb es relativamente inmóvil debido a que es fuertemente

The Cu, Fe, Pb and Zn metals increased their concentrations and their availability in direct relation with the increase of the dose of biosolids. The affinity of Cu, Fe, Pb and Zn with MO has been extensively documented (Kabata-Pendias and Pendias, 2001; Basta *et al.*, 2005). The Cu and Pb form strong inner-surface surface complexes with organic matter and are therefore contributed by biosolids to the soil (Adriano, 2001). In the soil, Pb is relatively immobile because it is strongly adsorbed by solid soil fractions such

adsorbido por las fracciones sólidas del suelo como las arcillas minerales, los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn y la materia orgánica del suelo y la aportada por los biosólidos (González-Flores *et al.*, 2011). El Pb mostró una baja disponibilidad, la cual aumentó en razón directa con la dosis de biosólidos.

Los resultados de la respuesta de las variables vegetativas de la planta de maíz a las diferentes dosis de biosólidos (Cuadro 3). Comparados con TC, respecto al cual existe una notable diferencia, todos los tratamientos con biosólidos incrementaron los valores de todas las variables medidas. En general se obtuvieron plantas más altas, con mayor número de hojas, con un tallo más grueso y en consecuencia una mayor producción de biomasa seca, pero los valores más altos corresponden a los tratamientos con dosis altas de biosólidos.

Cuadro 3. Variables vegetativas en función de la dosis de biosólidos aplicada (media \pm S, n = 4).

Table 3. Vegetative variables as a function of applied biosolid dose (mean \pm S, n = 4).

Tratamiento	Altura de planta (cm)	Número de hojas	Diámetro basal del tallo (cm)	Área foliar (m ²)	Biomasa total (g)
TC	34.22 \pm 23.64	14.8 \pm 1.26	1.3 \pm 0.55	0.4 \pm 0.07	8.73 \pm 1.58
T1	113.4 \pm 31.7	20 \pm 3.56	2 \pm 0.28	1.28 \pm 0.23	103.93 \pm 11.35
T2	123.5 \pm 15.27	17 \pm 1.15	2.2 \pm 0.41	1.29 \pm 0.09	125.63 \pm 18.12
T3	137.3 \pm 59.76	20.5 \pm 3.32	2.4 \pm 0.15	1.54 \pm 0.39	124.13 \pm 9.33
T4	126.85 \pm 13.7	19.5 \pm 2.08	2.2 \pm 0.1	1.63 \pm 0.47	129 \pm 11.05
T5	114.9 \pm 34.9	20.5 \pm 2.08	2.5 \pm 0.53	1.44 \pm 0.14	125.85 \pm 25.16

El valor de las variables tiende a incrementarse a mayor dosis de biosólidos. Estos resultados pueden atribuirse al gran aporte que hacen los biosólidos al suelo de materia orgánica y nitrógeno, lo que propicia un mejor desarrollo de la planta y una mayor producción de biomasa (Haynes, 2005; Van Wieringen *et al.*, 2005). El incremento en la producción de biomasa en función directa con la dosis de biosólidos también fue observado por Hernández *et al.* (2005) en un estudio bajo condiciones de invernadero sobre la producción de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare*). Resultados similares fueron encontrados por Wang *et al.* (2008) sobre la producción de pastizales (*Zoysia japonica*) al aplicar biosólidos. Jurado *et al.* (2007) y Delibacak *et al.* (2009) correlacionaron el incremento del nitrógeno total con el aumento de la dosis de biosólidos en la producción de pastizales semiáridos y cacahuete (*Arachis hypogaea*), respectivamente.

as mineral clays, Fe and Mn oxides and hydroxides and soil organic matter and biosolids (González-Flores *et al.*, 2011). The Pb showed low availability, which increased in direct ratio with the dose of biosolids.

The results of the response of the vegetative variables of the maize plant to the different doses of biosolids are shown in Table 3. Compared with the TC, for which there is a notable difference, all treatments with biosolids increased the values of all the measured variables. In general, higher plants with a larger number of leaves were obtained with a thicker stem and, consequently, a higher production of dry biomass, but higher values corresponded to treatments with higher doses of biosolids.

The value of the variables tends to increase to a higher dose of biosolids. These results can be attributed to the great contribution of biosolids to the soil of organic matter and nitrogen, which favors a better development of the plant and a higher production of biomass (Haynes, 2005; Van Wieringen *et al.*, 2005). The increase in biomass production in direct function with the dose of biosolids was also observed by Hernández *et al.* (2005) in a study under greenhouse conditions on the production of sorghum (*Sorghum vulgare*). Similar results were found by Wang *et al.* (2008) in a field study on grassland production (*Zoysia japonica*) when applying biosolids. Jurado *et al.* (2007) and Delibacak *et al.* (2009) correlated the increase of total nitrogen with the increase of the dose of biosolids in the production of semi-arid grasslands and peanut (*Arachis hypogaea*), respectively.

El T3 produjo una mayor altura de planta; en el T3 y en el T5 las plantas tuvieron un mayor número de hojas; el diámetro basal del tallo fue mayor en el T5; la mayor área foliar y la mayor producción de biomasa se dieron en el T4 (Cuadro 3). Sin embargo, el análisis de varianza y la prueba de Tukey, para la comparación de medias, indicaron que no existe una diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos con biosólidos. Es decir, manifestaron un comportamiento similar para todas las variables medidas.

A pesar del Cd que contenía el suelo y del aportado por los biosólidos (Cuadro 1), este metal no fue detectado en ninguna parte de la planta en ningún tratamiento. Torri y Lavado (2009), en un estudio a nivel de invernadero con pasto inglés (*Lolium perenne* L.), obtuvieron resultados similares; no detectaron Cd en el tejido vegetal cuando aplicaron diferentes dosis de biosólidos. Kukier *et al.* (2010) encontraron una muy baja disponibilidad de Cd en el suelo al aplicar biosólidos en un estudio con lechuga romana (*Lactuca sativa* L.).

Esto sugiere que el Cd queda fuertemente retenido en las fracciones sólidas de la mezcla suelo-biosólidos; como se mencionó anteriormente el Cd puede formar complejos muy estables con la materia orgánica. Otra fracción de la mezcla suelo-biosólidos que participa en la retención del Cd, es la de los óxidos de Fe y Mn, en donde el Cd queda fuertemente adsorbido (Hettiarachchi *et al.*, 2003). El pH ligeramente alcalino también influye en la baja disponibilidad del Cd.

En la Figura 1 se muestran los resultados encontrados para el contenido de Cu en la raíz, tallo y hojas de la planta de maíz en los diferentes tratamientos. La mayor concentración de Cu se encontró en la raíz, en todos los tratamientos; se obtuvieron menores concentraciones de este metal en las partes aéreas de la planta. La tendencia fue ascendente en función directa con la dosis de biosólidos. Este resultado concuerda con el obtenido por Hernández-Herrera *et al.* (2005), en su estudio con sorgo forrajero. De acuerdo con Kabata-Pendias y Pendias (2001); Baker (1990) los tejidos de la raíz poseen una poderosa capacidad para retener el Cu y evitar su transporte a las partes aéreas, por lo tanto la movilidad de este elemento es limitada.

Bañuelos y Ajwa (1999), reportan que el cobre es fuertemente quelado por los ácidos orgánicos presentes en el sistema radical. Mehra y Farago (1994) indican una concentración de 13 mg kg^{-1} de Cu en la planta de maíz como la adecuada para el desarrollo normal de la planta. Las concentraciones

The T3 produced higher plant height; in T3 and in T5 the plants had a greater number of leaves; the basal diameter of the stem was higher in T5; the largest leaf area and the highest biomass production occurred in T4 (Table 3). However, the analysis of variance and Tukey's test for mean comparison indicated that there is no significant statistical difference ($p \leq 0.05$) between biosolids treatments. That is, they showed a similar behavior for all measured variables.

In spite of the Cd that contained the soil and the one contributed by the biosolids (Table 1), this metal was not detected anywhere in the plant in any treatment. Torri and Lavado (2009), in a study at greenhouse level with english grass (*Lolium perenne* L.), obtained similar results; did not detect Cd in plant tissue when they applied different doses of biosolids. Kukier *et al.* (2010) found a very low availability of Cd in the soil when applying biosolids in a study with lettuce (*Lactuca sativa* L.).

This suggests that the Cd is strongly retained in the solid fractions of the soil-biosolids mixture; as mentioned above Cd can form very stable complexes with organic matter. Another fraction of the soil-biosolids mixture that participates in the retention of Cd is the Fe and Mn oxides, where Cd is strongly adsorbed (Hettiarachchi *et al.*, 2003). The slightly alkaline pH also influences the low availability of Cd.

In the Figure 1 shows the results found for the content of Cu in the root, stem and leaves of the maize plant in the different treatments. The highest concentration of Cu was found in the root, in all treatments; lower concentrations of this metal were obtained in the aerial parts of the plant. The trend was upward in direct function with the dose of biosolids. This result agrees with that obtained by Hernández-Herrera *et al.* (2005), in their study with forage sorghum. According to Kabata-Pendias and Pendias (2001); Baker (1990) the root tissues possess a powerful capacity to retain the Cu and avoid its transport to the aerial parts, therefore the mobility of this element is limited.

Bañuelos and Ajwa (1999) report that copper is strongly chelated by the organic acids present in the radical system. Mehra and Farago (1994) indicate a concentration of 13 mg kg^{-1} of Cu in the maize plant as adequate for the normal development of the plant. The concentrations in stem and leaf (Figure 1) were below 10 mg kg^{-1} and were lower than those found in the root; were almost constant in all treatments with biosolids. This could represent a nutritional

en tallo y hoja (Figura 1) se encontraron por debajo de los 10 mg kg^{-1} y fueron menores a las encontradas en la raíz; se mantuvieron casi constantes en todos los tratamientos con biosólidos. Esto podría representar una deficiencia nutricional de la planta. El pH ligeramente alcalino de todos los tratamientos con biosólidos también parece influir para una menor absorción de Cu, por parte de la planta.

Las concentraciones de Zn en las diferentes partes de la planta (Figura 2), siguieron la misma tendencia que las del cobre; más altas en la raíz y menores en el tallo. Aunque fueron, en general, más altas. En estudios similares con maíz, De las Heras *et al.* (2005) a nivel en invernadero y Kidd *et al.* (2007) en un trabajo de campo, obtuvieron resultados que concuerdan con los obtenidos en esta investigación, respecto a las concentraciones de Zn en la planta. El Zn presentó una elevada disponibilidad en la mezcla suelo-biosólidos, en todos los tratamientos (Cuadro 2).

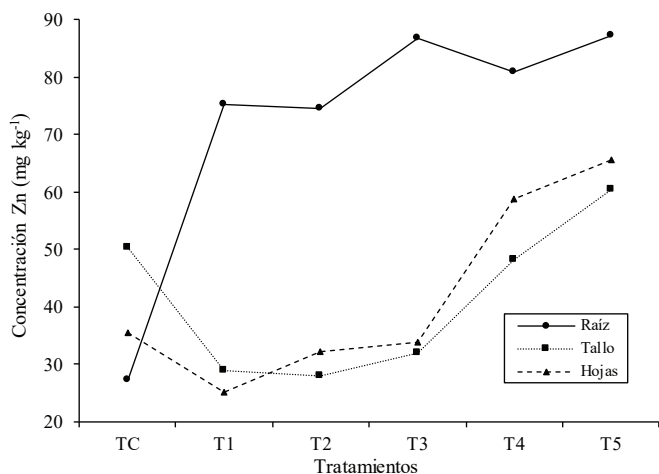


Figura 2. Concentración de zinc en las diferentes partes de la planta en función de la dosis de biosólidos.

Figure 2. Concentration of zinc in the different parts of the plant as a function of the biosolid dose.

De acuerdo con Mehra y Farago (1994), el Zn es un elemento que es fácilmente absorbido por la planta en diferentes formas químicas (Zn hidratado, Zn^{2+} , y en quelatos orgánicos). Bañuelos y Ajwa (1999), establecen que a diferencia del cobre, el zinc es débilmente quelado por los ácidos orgánicos presentes en la raíz, lo que ocasiona que sea considerado un elemento móvil y por lo tanto su traslocación a las partes aéreas de la planta ocurre con relativa facilidad. Esto explicaría las altas concentraciones encontradas en las hojas, sobre todo en los tratamientos con mayor dosis de

deficiency of the plant. The slightly alkaline pH of all biosolids treatments also appears to influence the lower absorption of Cu by the plant.

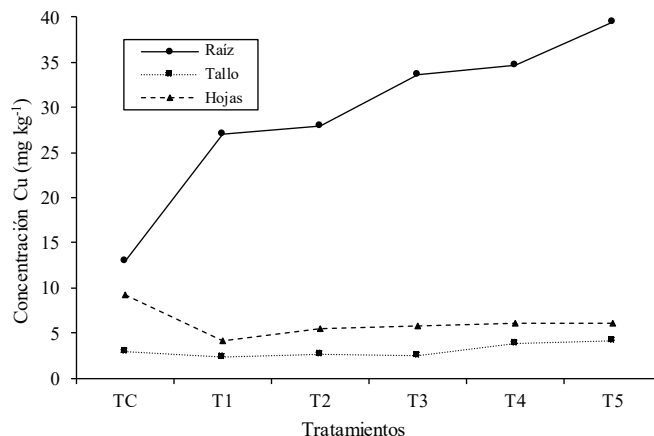


Figura 1. Concentración de cobre en las diferentes partes de la planta en función de la dosis de biosólidos.

Figure 1. Concentration of copper in the different parts of the plant as a function of the biosolid dose.

The concentrations of Zn in the different parts of the plant (Figure 2), followed the same trend as those of copper; higher in the root and smaller in the stem. Although they were, in general, higher. In similar studies with maize, De las Heras *et al.* (2005) at the greenhouse level and Kidd *et al.* (2007) in a field work, obtained results that agree with those obtained in this research, regarding the concentrations of Zn in the plant. The Zn presented high availability in the soil-biosolids mixture, in all treatments (Table 2).

According to Mehra and Farago (1994), Zn is an element that is easily absorbed by the plant in different chemical forms (Zn hydrated, Zn^{2+} , and in organic chelates). Bañuelos and Ajwa (1999) establish that unlike copper, zinc is weakly chelated by the organic acids present in the root, which causes it to be considered a moving element and therefore its translocation to the aerial parts of the plant occurs relatively easily. This would explain the high concentrations found in the leaves, especially in the treatments with higher doses of biosolids, T4 and T5. The concentrations of Zn found in stem and leaves are adequate to avoid the deficiency, which would present with levels below 20 mg kg^{-1} . On the other hand the same concentrations are below to cause a possible toxicity in the plant, which would be reached with levels of 300 mg kg^{-1} (Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007).

biosólidos, T4 y T5. Las concentraciones de Zn encontradas en tallo y hojas son adecuadas para evitar la deficiencia, la cual se presentaría con niveles por debajo de los 20 mg kg⁻¹. Por otra parte, las mismas concentraciones están por debajo de provocar una posible toxicidad en la planta, la cual se alcanzaría con niveles de 300 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

Las concentraciones de Pb en las diferentes partes de la planta de maíz tuvieron una tendencia descendente cuando la dosis de biosólidos aumentó (Figura 3). En general, las concentraciones fueron bajas con relación al Pb disponible en la mezcla suelo-biosólidos (Cuadro 2); el comportamiento del Pb en el tejido vegetal fue similar al del Cu y el Zn; es decir, mayor contenido en raíz y menor contenido en tallo. Kidd *et al.* (2007) en un estudio de cultivo de maíz en invernadero, aplicando varios tipos de biosólidos reportaron no haber detectado Pb en ninguna parte de la planta; sin embargo Intawongse y Dean (2006), al aplicar biosólidos a lechuga (*Latuca sativa* L.) y espinaca (*Spinacia oleracea* L.), en condiciones de invernadero, reportaron bajas concentraciones de Pb en general, pero la misma tendencia encontrada en este estudio para el maíz: mayor contenido en raíz y menor contenido en hojas.

El plomo es considerado uno de los elementos menos móviles en el suelo y por lo tanto de baja disponibilidad (Davies, 1990; Mehra y Farago, 1994; Kabata-Pendias y Pendias, 2001). Los datos del Cuadro 2, confirman este comportamiento, el cual puede atribuirse a la gran afinidad del Pb con la materia orgánica, con la cual puede formar complejos de adsorción específica (Basta *et al.*, 2005). Por eso a mayor dosis de biosólidos y mayor contenido de MO, puede ocurrir una mayor retención de Pb en el suelo. De esta manera, la absorción y posterior traslocación del Pb a las partes aéreas de la planta de maíz se ve limitada (Zimdahl y Hassett, 1977; Castro *et al.*, 2009). Esto explicaría porqué en los tratamientos con menor dosis de biosólidos (menor contenido de materia orgánica) se presenta menor retención de Pb en la mezcla suelo-biosólidos y, por lo tanto, causa que su presencia en las diferentes partes de la planta sea mayor. La materia orgánica tiene un papel primordial en la retención de Pb en el suelo.

Las concentraciones de los tres metales extraíbles están correlacionadas positivamente con las dosis de biosólidos aplicadas (Cuadro 4). Es decir que, a mayor dosis de biosólidos, mayor es la concentración disponible en la mezcla suelo biosólidos; esta correlación positiva entre dosis

The concentrations of Pb in the different parts of the corn plant had a downward trend when the biosolid dose increased (Figure 3). In general, the concentrations were low relative to the available Pb in the soil-biosolids mixture (Table 2); the behavior of Pb in the plant tissue was similar to that of Cu and Zn; that is, higher root content and lower stem content. Kidd *et al.* (2007) in a study of maize cultivation in greenhouse, applying several types of biosolids reported not having detected Pb in any part of the plant; however, Intawongse and Dean (2006) in applying biosolids to lettuce (*Latuca sativa* L.) and spinach (*Spinacia oleracea* L.), under greenhouse conditions, reported low concentrations of Pb in general, but the same trend found in this study for the maize: higher root content and lower leaf content.

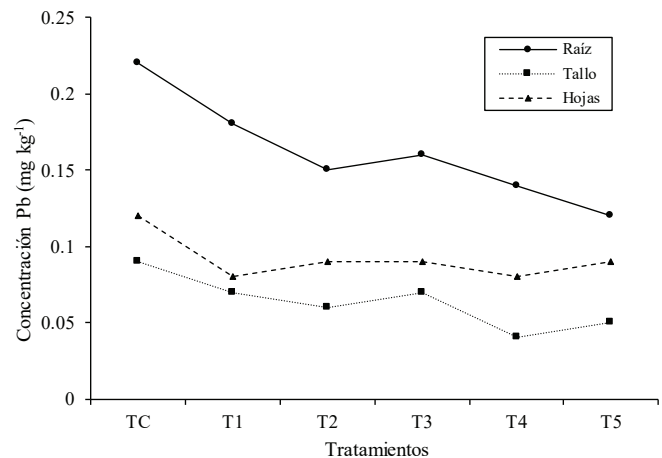


Figura 3. Concentración de plomo en las diferentes partes de la planta en función de la dosis de biosólidos.

Figure 3. Concentration of plumbum in the different parts of the plant as a function of the dosage of biosolids.

The plumbum is considered one of the least mobile elements in the soil and therefore of low availability (Davies, 1990; Mehra and Farago, 1994; Kabata-Pendias and Pendias, 2001). The data of Table 2 confirm this behavior, which can be attributed to the high affinity of Pb with organic matter, with which it can form specific adsorption complexes (Basta *et al.*, 2005). Therefore, the higher the amount of biosolids and higher MO content, the higher the retention of Pb in the soil. In this way, the absorption and subsequent translocation of Pb to the aerial parts of the maize plant is limited (Zimdahl and Hassett, 1977; Castro *et al.*, 2009). This would explain why the treatments with lower doses of biosolids (lower content of organic matter) present less retention of Pb in the mixture soil-biosolids and, therefore, cause that their

de biosólidos y concentración extraíble de Cu y Zn, es similar a la reportada por Lavado *et al.* (2007) en su investigación con maíz y trigo a nivel de campo.

Respecto a la correlación entre el contenido de metales en las diferentes partes de la planta y la concentración extraíble en la mezcla suelo-biosólidos, el Cu mostró correlación positiva en la raíz y las hojas (Cuadro 4). Esto sugeriría que si el contenido de Cu extraíble con DTPA se incrementa en la mezcla suelo-biosólidos se puede esperar que su concentración aumente en las raíces y las hojas de la planta de maíz. Para el Zn no se encontraron correlaciones, el Pb solo mostró una correlación negativa en las hojas. Este resultado podría significar que, si la disponibilidad de Pb en la mezcla suelo-biosólidos aumentara, esto no se vería reflejado en un incremento de su contenido en ninguna parte de la planta de maíz.

Cuadro 4. Correlaciones encontradas entre la concentración de metales extraíble del suelo y el contenido en la planta.

Table 4. Correlations between the concentration of extractable metals of the soil and the content of the plant.

Metal extraíble (DTPA)	Raíz	Tallo	Hojas	Dosis biosólidos aplicada
Cu	0.937**	0.418	0.902*	0.913*
Zn	0.798	-0.161	0.436	0.85*
Pb	-0.611	-0.786	-0.871*	0.932**

*= nivel de significancia ($p < 0.05$); **= nivel de significancia ($p < 0.01$).

Conclusiones

Las variables vegetativas tuvieron los valores más altos con dosis de 300 t ha⁻¹ a 500 t ha⁻¹; por lo tanto, con la aplicación de estas dosis de biosólidos se obtiene una planta de mejor calidad. De acuerdo con el análisis de varianza, estadísticamente no existe diferencia entre los tratamientos, lo que significa que con cualquiera de las dosis aplicadas se obtiene la misma calidad de planta. El pH, la MO y la CIC de la mezcla suelo-biosólidos, mostraron los valores más apropiados par el desarrollo de la planta con dosis de 400 t ha⁻¹ y 500 t ha⁻¹. La CE es adecuada en todas las dosis de biosólidos aplicadas.

presence in the different parts of the plant is greater. The organic matter has a primordial role in the retention of Pb in the soil.

The concentrations of the three extractable metals are positively correlated with the doses of biosolids applied (Table 4). That is to say, at a higher dose of biosolids, the higher the concentration available in the soil biosolids mixture; This positive correlation between doses of biosolids and extractable concentration of Cu and Zn is similar to that reported by Lavado *et al.* (2007) in their research with maize and wheat at the field level.

The correlation between the metal content in the different parts of the plant and the extractable concentration in the soil-biosolids mixture, Cu showed a positive correlation between roots and leaves (Table 4). This would suggest that if DTPA-extractable Cu content increases in the soil-biosolids mixture, its concentration can be expected to increase in the roots and leaves of the maize plant. For Zn no correlations were found, the Pb only showed a negative correlation in the leaves. This result could mean that if the availability of Pb in the soil-biosolids mixture increased, this would not be reflected in an increase in its content in any part of the maize plant.

Conclusions

The vegetative variables had the highest values with doses of 300 t ha⁻¹ to 500 t ha⁻¹; therefore, with the application of these doses of biosolids a better quality plant is obtained. According to the analysis of variance, statistically there is no difference between the treatments, which means that with any of the applied doses the same plant quality is obtained. The pH, MO and CIC of the soil-biosolids mixture showed the most appropriate values for the development of the plant with doses of 400 t ha⁻¹ and 500 t ha⁻¹. The CE is suitable in all doses of applied biosolids. The concentrations of essential micronutrients in the soil (Fe, Mn, Cu and Zn), present adequate values in all treatments.

The concentrations of metals in the plant tissue (Cu, Zn and Pb) indicate that there may be copper deficiency in the maize plant, because in all treatments were obtained values below 10 mg kg⁻¹. The Zinc showed satisfactory values for plant development in all treatments. The plumbum had very low values in all treatments and the risk of toxicity to the

Las concentraciones de micronutrientes esenciales en el suelo (Fe, Mn, Cu y Zn), presentan valores adecuados en todos los tratamientos.

Las concentraciones de metales en el tejido vegetal (Cu, Zn y Pb) indican que puede existir deficiencia de cobre en la planta de maíz, debido a que en todos los tratamientos se obtuvieron valores menores a los 10 mg kg⁻¹. El zinc mostró valores satisfactorios para el desarrollo de la planta en todos los tratamientos. El plomo presentó valores muy bajos en todos los tratamientos y el riesgo de toxicidad para la planta es reducido. La materia orgánica contenida en los biosólidos parece ser el factor principal que influye sobre el comportamiento de las otras variables.

Por los resultados encontrados en todas las variables medidas en esta investigación, y considerando la calidad de la planta obtenida, el mejoramiento de las propiedades químicas del suelo y el mínimo riesgo de toxicidad por presencia de metales pesados en la planta, la dosis de biosólidos más adecuada para el suelo Cambisol éutrico, ubicado en la zona sur del municipio de Puebla, es de 400 t ha⁻¹.

Literatura citada

- Adriano, D. C. 2001. Trace elements in the terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability, and risks of heavy metals. Springer-Verlag. 2nd. New York, N. Y., U. S. A. 867 p.
- Alves, M. C.; Paz, A.; Colodro, H.; Perecin, J. and Vidal, E. 2006. Influence of biosolids rate on chemical properties of an oxisol in Sao Paulo, Brazil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 37:2481-2493.
- Avendaño, A. C. H.; Molina, G. J. D.; Trejo, L. C.; López, C. C. y Cadena, I. J. 2008. Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agron. Mesoam.* 19(1):27-37.
- Baker, D. E. 1990. Copper. In: Alloway, B. J. (Ed.). *Heavy metals in soils*. Blackie and Son. Glasgow, Scotland. 151-176 pp.
- Bañuelos, G. S. and Ajwa, H. A. 1999. Trace elements in soils and plants: an overview. *J. Environ. Sci. Health.* 34(4):951-974.
- Bañuelos, G. S.; Pasakdee, H.; Benes, S. and Ledbetter, C. A. 2007. Long-term application of biosolids on apricot production. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 38:1533-1549.
- Basta, N. T.; Ryan, J. A. and Chaney, R. L. 2005. Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *J. Environ. Quality.* 34:49-63.
- Castro, E.; Mañas, P. and De las Heras, J. 2009. A comparison of the application of different waste products to a lettuce crop: effects on plant and soil properties. *Sci. Hortic.* 123:148-155.
- Davies, B. E. 1990. Lead. In: Alloway, B. J. (Ed.). *Heavy metals in soils*. Blackie and Son. Glasgow, Scotland. 177-196 pp.
- De las Heras, J.; Mañas, P. and Labrador, J. 2005. Effects of several applications of digested sewage sludge on soil and plants. *J. Environ. Sci. Health.* 40:437-451.

plant is low. The organic matter contained in the biosolids seems to be the main factor influencing the behavior of the other variables.

By the results found in all variables measured in this research, and considering the quality of the plant obtained, the improvement of the chemical properties of the soil and the minimum risk of toxicity due to the presence of heavy metals in the plant, the dose of biosolids more suitable for the soil cambisol eutrico, located in the southern part of the municipality of Puebla, is 400 t ha⁻¹.

End of the English version



- Delibacak, S.; Okur, B. and Ongun, A. R. 2009. Influence of treated sewage sludge applications on temporal variations of plant nutrients and heavy metals in a Typic Xerofluent soil. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 83:249-257.
- Food and Agriculture Organization of the Nations United (FAO). 2015. World reference base for soil resource. International soil classification system for naming soils and creating legends for soils maps. Rome, Italy. World Soils Resource Reports No. 106. 192 p.
- Gavalda, D.; Scheiner, J. D.; Revel, J. S.; Merlina, G.; Kaemmerer, M.; Pinnelli, E. and Giresse, M. 2005. Agronomic and environmental impacts of a single application of heat-dried sludge on an Alfisol. *Sci. Total Environ.* 343:97-109.
- González, F. E.; Tornero, C. M. A.; Sandoval, C. E.; Pérez, M. A. y Gordillo, M. A. J. 2011. Biodisponibilidad y fraccionamiento de metales pesados en suelos agrícolas enmendados con biosólidos de origen municipal. *Rev. Int. Cont. Amb.* 27(4):291-301.
- Guo, M.; Song, W. and Kazda, R. 2012. Fertilizer value of lime-stabilized biosolids as a soil Amendment. *Agron. J.* 104:1679-1686.
- Haynes, R. J. 2005. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils, an overview. *Adv. Agron.* 85:221-268.
- Hernández, H. J. M.; Olivares, S. E.; Villanueva, F. I.; Rodríguez, F. H.; Vázquez, A. R. y Pisaani, Z. J. F. 2005. Aplicación de lodos residuales, estiércol bovino y fertilizante químico en el cultivo de sorgo forrajero. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 21:31-36.
- Hettiarachchi, G. M.; Ryan, J. A.; Chaney, R. L. and LaFleur, C. M. 2003. Sorption and desorption of cadmium by different fractions of biosolids-amended soils. *J. Environ. Quality.* 32:1684-1693.
- Intawongse, M. and Dean, J. R. 2006. Uptake of heavy metals by vegetable plants grown on contaminated soil and their bioavailability in the human gastrointestinal tract. *Food Add. Contam.* 23(1):36-48.
- Jurado, P.; Arredondo, T.; Flores, E.; Olalde, V. y Frías, J. 2007. Efecto de los biosólidos sobre la humedad y los nutrimentos del suelo y la producción de forraje en pastizales semiáridos. *Terra Latinoam.* 25(2):211-218.
- Kabata, P. A. and Pendias, H. 2001. Trace elements in soil and plants. CRC Press. Boca Raton, Florida, USA. 413 p.

- Kabata, P. A. and Mukherjee, A. B. 2007. Trace elements from soils to human. Springer. Berlin, Germany. 550 p.
- Kidd, P. S.; Domínguez, R. M. J.; Díez, J. and Monterroso, C. 2007. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. *Chemosphere*. 66:1458-1467.
- Kukier, U.; Chaney, R. L.; Ryan, J. A.; Daniels, W. L.; Dowdy, R. H. and Granato, T. C. 2010. Phytoavailability of cadmium in long-term biosolids-amended soils. *J. Environmental Quality*. 39:519-530.
- Lavado, R. S.; Rodríguez, M.; Álvarez, R.; Taboada, M.A. and Zubillaga, M. S. 2007. Transfer of potentially toxic elements from biosolid-treated soils to maize and wheat crops. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118:312-318.
- Li, Z.; Ryan, J. A.; Chen, J. L. and Al-Abed, J. R. 2001. Cadmium adsorption on biosolids-amended soils. *J. Environ. Quality*. 30:903-911.
- López, R. J. y López, M. J. 1978. El diagnóstico de suelos y plantas. Mundi-Prensa. Madrid. 333 p.
- Mehra, A. and Farago, M. E. 1994. Metal ions and plant nutrition. In: plants and the chemical elements. Farago, M. E. (Ed.). VCH Verlagsgesellschaft. Weinheim, Federal Republic of Germany. 31-66 pp.
- Montgomery, A. A. 1971. Correlation studies of corn. Nebraska, Agr. Exp. Sta. Ann. Report. 24:109-159.
- Pepper, I. L.; Brooks, J. P. and Gerba, C. P. 2006. Pathogens in biosolids. *Adv. Agron.* 90:1-41.
- Porta, J.; López, A. M. y Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. Madrid. 929 p.
- Roig, N.; Sierra, J.; Martí, E.; Nadal, M.; Schuhmacher, M. and Domingo, J. L. 2012. Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: Effects on soil functioning. *Agric. Ecosyst. Environ.* 158:41-48.
- Samaras, V.; Tsadilas, C. D. and Stamatiadis, S. 2008. Effects of repeated application of municipal sewage sludge on soil fertility, cotton yield and nitrate leaching. *Agron. J.* 100:477-483.
- Schroeder, J. L.; Zhou, D.; Basta, N.; Raun, W. L.; Payton, M. E. and Zazulak, A. 2008. The effect of long-term annual application of biosolids on soil properties, phosphorus and metals. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72:73-82.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2000. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación.
- Sudduth, K. A.; Kitchen, N. R.; Bollero, G. A.; Bullock, D. G. and Wiebold, W. J. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agron. J.* 95:472-482.
- Torri, S. and Lavado, R. 2009. Plant absorption of trace elements in sludge amended soils and correlation with soil chemical speciation. *J. Hazardous Materials*. 166:1459-1465.
- Van Wieringen, L. M.; Harrison, J. H.; Nennich, T.; Davidson, D. L.; Morgan, L.; Chen, S.; Bueller, M. and Hoisington, F. 2005. Manure management effects on grass production, nutritive content, and soil nitrogen for a grass silage-based dairy farm. *J. Environ. Quality*. 34:164-173.
- Wang, X.; Chen, T.; Ge, Y. and Jia, Y. 2008. Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. *J. Hazardous Materials*. 160:554-558.
- Zhang, R. and Wienhold, B. J. 2002. The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity & pH. *Nutr. Cycling Agroecosy.* 63:251-254.
- Zimdahl, R. L. and Hassett, J. J. 1977. Lead in soil. In: Lead in the environment. Bogges, W. R. and Wixson, B. G. (Eds.). National Science Foundation. Washington, D.C. USA. 93 p.