

# Extracción de metales pesados por *Lolium perenne* en residuos de mina

Esther Jannet Bautista-Gabriel<sup>1</sup>, Elizabeth Hernández-Acosta<sup>1</sup>, David Cristóbal-Acevedo<sup>1</sup>, Roberto Quintero-Lizaola<sup>2</sup>, Procoro Díaz-Vargas<sup>1</sup> y Edmundo Robledo-Santoyo<sup>1</sup>

Departamento de Suelos<sup>1</sup>, Edafología<sup>2</sup>  
Universidad Autónoma Chapingo<sup>1</sup>, Colegio de Postgraduados<sup>2</sup>  
Texcoco, Méx.; México  
elizahac@yahoo.com.mx

**Abstract**— Mining has generated tailings with high contents of metals that are exposed to runoff, leaching and dispersion of particles, conditions affecting biotic components and human health. An alternative to this environmental problem is the use of plants. In this study the extraction of heavy metals was evaluated by ryegrass (*Lolium perenne*) in biosolid treated tailings, compost and urea, for an alternative reclamation. This required a greenhouse experiment that was established using an experimental design in three randomized complete blocks for 60 days. One to two destructive samplings 30 and 60 days were carried out. The results showed that the establishment of ryegrass and incorporation of biosolid and compost in tailings; improved physical and chemical characteristics and decreased the concentration of metals. The highest concentration of metals was found in the roots, exceeding maximum tolerable limits in plants and animal consumption. The establishment of ryegrass is recommended in mine tailings for their reclamation.

**Keyword**— reclamation, biosolids, compost, urea, greenhouse, ryegrass.

**Resumen**— La minería ha generado jales con altos contenidos de metales que son expuestos a deslave, lixiviación y dispersión de partículas, condiciones que afectan componentes bióticos y la salud humana. Una alternativa a esta problemática ambiental es el uso de plantas. En este estudio se evaluó la extracción de metales pesados por raigrás (*Lolium perenne*) en jales tratados con biosólido, compost y urea, para obtener una alternativa de reclamación. Para ello se estableció un experimento en invernadero aplicando un diseño experimental en tres bloques completamente aleatorio, durante 60 días. Se realizaron dos muestreos destructivos, uno a los 30 y otro a los 60 días. Los resultados mostraron que el establecimiento de raigrás y la incorporación de biosólido y compost en los jales; mejoraron las características físicas y químicas y disminuyeron la concentración de metales. La mayor concentración de metales se encontró en las raíces, superando los límites máximos tolerables en plantas y consumo animal. Se recomienda el establecimiento de raigrás en jales de mina, para su reclamación.

**Palabras claves**—reclamación, biosólido, compost, urea, invernadero, raigrás.

## I. INTRODUCCIÓN

En México, la explotación de yacimientos ricos en metales se ha realizado desde el siglo XVI. Los principales metales que se extraen son la plata y el oro (Contreras, Ortiz y Padilla, 2000). Como resultado de dicha actividad, se generaron materiales de desechos llamados “jales”, los cuales se depositan en áreas aledañas a los sitios de extracción. Estos sitios tienen con frecuencia altos contenidos de metales pesados que se acumularon y concentraron en los residuos de mina y están expuestos a deslave y lixiviación con alto riesgo de exposición a los diferentes componentes bióticos de las cadenas tróficas (Semarnat, 2000).

El estado de Hidalgo es rico en yacimientos de oro, plata, plomo, zinc y manganeso, que se envían a otras entidades de México y al extranjero, para su industrialización. Las compañías mineras más importantes por la producción que generan, son compañía Nuevo Monte y Real del Monte y Pachuca S. A. de C. V (Servicio Geológico Mexicano, 2014). La ciudad de Pachuca, tiene jales de mina que resultaron de la acumulación de más de 200 años; el método de beneficio empleado en este distrito minero para la extracción del oro y plata fue principalmente por amalgamación con mercurio y por

cianuración. Muchos habitantes de la ciudad no perciben el problema ambiental; considerando que las condiciones meteorológicas favorecen la dispersión de partículas finas que se encuentran en la superficie de los jales (COREMI, 1992; Romero y Gutiérrez 2010).

En respuesta a una creciente necesidad de hacer frente a la contaminación ambiental, se han desarrollado muchas tecnologías de remediación para el tratamiento de suelos contaminados (Riser-Roberts, 1998). La fitorremediación hace uso de los procesos que ocurren de forma natural por el cual las plantas y sus organismos rizosféricos y microbianos secuestran, degradan o inmovilizan los contaminantes para la limpieza de los suelos (Pilon-Smits, 2005). En este sentido, la especie *Lolium perenne* es una gramínea que se ha utilizado en estudios de fitorremediación, tanto como fitoextractora (Kulli, Balmer, Krebs, Lothenbach, Geiger and Schulin, 1999; Gunawardana, Shingal y Johnson, 2010) como fitoestabilizadora (Bidar et. al., 2009).

Aunado a esta técnica, se pueden utilizar una gama de compuestos orgánicos e inorgánicos de bajos costos como biosólidos, basura, compost y estiércol (Adriano, Wenzel, Vangronveld y Bolan, 2004).

En la presente investigación, se estudió la capacidad fitoextractora de metales pesados (MP) de la especie *Lolium perenne* crecida en residuos de mina acondicionados con biosólidos, compost y fertilizante inorgánico (Urea).

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en el invernadero del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. El residuo de mina se obtuvo del jal “Dos Carlos” ubicado en la Ciudad de Pachuca, Hidalgo, dentro del Distrito Minero: Pachuca-Real del monte.

El compost utilizado está compuesto por estiércol de bovino y residuos de alfalfa, el biosólido se obtuvo de una laguna de estabilización en una planta de tratamiento de aguas residuales de Tlaxcala. Para la obtención del sustrato de cada tratamiento se mezclaron las cantidades de los materiales propuestos que se especifican en la Tabla I.

Tabla I. Tratamientos aplicados en el experimento.

Tratamiento	Descripción
T	Testigo; 1 500 g de residuos de mina
B	1 350 g de residuos de mina + 150 g de biosólido
C	1 350 g de residuos de mina + 150 g de compost
B-C	1 200 g de residuos de mina + 150 g de biosólido + 150 g de compost
U	1 495 g de residuos de mina + 0.5 g de urea
U-B	1 345 g de residuos de mina + 0.5 g de urea + 150 g de biosólido
U-C	1 345 g de residuos de mina + 0.5 g de urea + 150 g de compost
U-B-C	1 195 g de residuos de mina + 0.5 g de urea + 150 g de biosólido + 150 g de compost

El experimento se realizó bajo invernadero en condiciones ambientales heterogéneas con un diseño experimental en tres bloques completamente aleatorio durante 60 días. El riego se hizo a capacidad de campo una vez al día y/o de acuerdo a las necesidades de la planta. A los 30 días después de la siembra (dds) se hizo un primer muestreo destructivo (recolección total del material vegetativo: follaje y raíz) y un segundo muestreo destructivo a los 60 dds.

De acuerdo a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, se determinó la densidad aparente (método de la probeta), textura (Hidrómetro de Bouyoucos), pH (potenciómetro relación suelo: agua 1:2), porcentaje de M.O. (método de Walkley y Black). Para la caracterización química del suelo se evaluó el Nitrógeno inorgánico (Ni): extraído con cloruro de potasio 2 N y

determinado por arrastre de vapor, fósforo (P): Bray P1, Olsen; potasio, sodio (K, Na): se extrajeron con acetato de amonio 1.0 N pH 7.0 y se determinaron por espectrofotometría de emisión de flama; calcio, magnesio (Ca, Mg): se extrajeron con acetato de amonio 1.0 N pH 7.0 y se determinaron por absorción atómica.

Para evaluar la presencia de los MP en el tejido vegetal, las plantas se dividieron en parte aérea y raíz para secarse a una Temperatura de 70°C durante 24 horas, ya deshidratadas, se molieron y enseguida se pasó por un tamiz de malla 60. Las muestras se sometieron a una digestión con una mezcla diácida de ácido perclórico (HClO<sub>4</sub>) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en proporción 1:4. Posteriormente, se cuantificaron los siguientes metales: Cd, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn por espectrofotometría de absorción atómica. Se tomaron también datos de peso húmedo, volumen radical, número de hojas por unidad experimental y peso seco. La presencia de los MP en los residuos de mina se hizo mediante extracción con ácido dietilentriamino pentaacético (DTPA) relación 1:4 y se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica.

Los resultados físico-químicos y el contenido de MP se interpretaron con las tablas propuestas en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Para el análisis estadístico, se utilizó el programa SAS, en el cual se obtuvo el análisis de varianza y la agrupación de medias por el método de Tukey ( $\alpha$  0.05).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Características físicas y químicas de los residuos de mina, antes de establecer el experimento.

La interpretación de los resultados se realizó consultando la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. La densidad aparente en los residuos de mina fue de 1.47, que de acuerdo con la Norma y Castellanos, Uvalle y Aguilar (2000) se puede considerar como alta y corresponde a suelos arenosos, la textura fue franco arenosa. El jal presentó un pH fuertemente ácido, contenidos de: materia orgánica muy baja, el nitrógeno inorgánico (Ni) bajo y fósforo (P) medio. En el caso de los cationes intercambiables el contenido de potasio (K) fue muy bajo, el magnesio (Mg) fue bajo y el calcio (Ca) alto (Tabla II).

Tabla II. Características físicas y químicas de los residuos de mina antes del experimento.

Parámetro	pH	M.O %	Ni	P	K	Na	Ca cmol(c) kg <sup>-1</sup>	Mg
Valor	4.74	-	14.8	10.03	0.138	0.313	35.185	1.213
Categoría	Fuertemente ácido	No Detectado	Bajo	Medio	Muy baja	No Detectado	Alta	Baja

En el 2009, Hernández, Mondragón, Cristóbal, Rubiños y Robledo realizaron un estudio de la vegetación, los residuos de mina y los elementos potencialmente tóxicos que se encuentran en el jal de mina Dos Carlos en Pachuca, Hidalgo. En sus resultados obtuvieron valores similares a este estudio en contenidos de P (8.9 mg kg<sup>-1</sup>), K (0.22 cmol (c) kg<sup>-1</sup>), Na (0.34 cmol (c) kg<sup>-1</sup>), Ca (29.8 cmol (c) kg<sup>-1</sup>), y Mg (0 a 3.2 cmol (c) kg<sup>-1</sup>) y valores superiores en contenido de Ni (21 mg kg<sup>-1</sup>) y pH (7). Lo que significa que las características físicas y químicas del jal de mina varían a través del tiempo.

#### B. Contenido de metales pesados en los residuos de mina, antes de establecer el experimento.

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los contenidos de MP en los residuos de mina fueron los siguientes: adecuado para Cu, Zn y Mn, y normal para Cd, Ni y Pb. El metal que presentó

mayor concentración fue el Zn con un contenido de 46.99 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de Mn con 38.46 mg kg<sup>-1</sup>. El menor contenido lo presentaron el Cd con 0.93 mg kg<sup>-1</sup>, y Ni con 1.06 mg kg<sup>-1</sup> (Tabla III). De acuerdo a la legislación internacional (EPA, 2000) los contenidos de MP en los residuos de mina no superan el valor límite de concentración de MP en suelos.

Tabla III. Concentración de metales pesados en el jal de mina "Dos Carlos" 2014.

Metal	Cobre	Zinc	Manganeso	Cadmio	Níquel	Plomo
mg kg <sup>-1</sup>	10.757	46.99	38.46	0.93	1.06	3.06

En el 2009, Hernández, Mondragón, Cristóbal, Rubiños y Robledo realizaron un estudio en jales de mina de Pachuca, y encontraron concentraciones de MP poco inferiores a los reportados en esta investigación: Cd 0.5 mg kg<sup>-1</sup>, Cu 7 mg kg<sup>-1</sup>, Mn 15 mg kg<sup>-1</sup>, Ni 0.2 mg kg<sup>-1</sup>, Pb 4 mg kg<sup>-1</sup> y Zn 0.4 a 91 mg kg<sup>-1</sup>. Lo que significa que las concentraciones aumentaron con los años. Por su parte Ramos y Siebe (2006) encontraron valores superiores a éstos en jales de Guanajuato: Cu de 49.3 a 387 mg kg<sup>-1</sup>, Pb de 13 a 178 mg kg<sup>-1</sup>, Zn de 36 a 448 mg kg<sup>-1</sup>. También Santibáñez, Verdugo y Ginoccio (2008) en un trabajo que realizaron en relaves mineros de Chile, evaluaron el uso de biosólidos y la especie *L. perenne* para su fitoestabilización, presentaron datos de concentraciones superiores a los aquí encontrados en los relaves mineros: Cu de 485 mg kg<sup>-1</sup>, Zn de 41 mg kg<sup>-1</sup> y de Cd <0.02 mg kg<sup>-1</sup>.

### C. Características del biosólido y compost utilizados en el experimento.

Los biosólidos utilizados presentaron un pH moderadamente ácido y muy alto contenido de M.O., en cuanto a los nutrimentos, éstos fueron de concentraciones muy altas a excepción de Mg donde se encontró en concentraciones medias. El compost por su parte, presentó pH fuertemente alcalino, muy alto contenido de M.O, Ni muy bajo, P muy bajo, K y Ca en concentraciones altas y Mg en concentración media.

Muñoz, Polo y Giráldez (1999) estudiaron la modificación de algunas propiedades físicas de un suelo del Valle del Guadalquivir enmendado con dos dosis de lodos de depuradora, dichos lodos presentaron un pH muy similar a los encontrados en este estudio de 6.3 a 6.8 y un contenido de M.O alto: 34.1 a 65.5 %. Alvarenga et al. (2009) en su estudio de fitoestabilización de suelos contaminados por actividades mineras utilizando *L. perenne*, enmendaron suelos con residuos orgánicos a 25, 50 y 100 Mg ha<sup>-1</sup> (en peso seco). Dichos lodos de depuradora presentaron contenidos de similares a los obtenidos en esta investigación para Mg 3.4 g kg<sup>-1</sup> y K 1.3 g kg<sup>-1</sup>, contenidos muy inferiores de P total (1.36 %), Na (4.6 g kg<sup>-1</sup>), y Ca (21.7 g kg<sup>-1</sup>); así como un pH medio de 6.5, muy similar a conseguidos en este trabajo.

De acuerdo con la clasificación nacional (NOM-004-SEM-2002) e internacional (USEPA 503), por su contenido total de MP, los biosólidos utilizados en este estudio son de tipo EXCELENTE (Tabla IV).

Tabla IV. Concentración de metales pesados en el biosólidos y compost utilizados.

Tratamiento	Cobre	Cadmio	Níquel	Plomo	Zinc
Compost	3.434	0.054	1.302	1.402	19.642
Biosólido	3	0.4	0.1	2	17.2

Illera, Walter y Cala (2001) reportaron en un estudio desarrollado en parcelas experimentales de un área degradada del sur de Madrid, bajo ambiente semiárido, contenidos de MP en el biosólido utilizado para enmendar los suelos muy superiores a los trabajados en esta investigación: Cd (0.61 mg kg<sup>-1</sup>); Cu (174 mg kg<sup>-1</sup>); Ni (15.3 mg kg<sup>-1</sup>); Pb (252 mg kg<sup>-1</sup>) y Zn (445 mg kg<sup>-1</sup>).

Alvarenga et al. (2009) reportaron concentraciones de MP en los lodos de depuradora utilizados en su estudio de fitoestabilización: Cd  $1.46 \text{ mg kg}^{-1}$ ; Cu  $98 \text{ mg kg}^{-1}$ ; Ni  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ ; Pb  $37 \text{ mg kg}^{-1}$  y Zn  $491 \text{ mg kg}^{-1}$ , valores muy superiores a los obtenidos en este estudio.

*D. Características físicas y químicas de los residuos de mina a los 0, 30 y 60 dds.*

La densidad aparente (DAP) disminuyó a través del tiempo, lo que significa que los tratamientos mejoraron la calidad del suelo, principalmente el tratamiento Compost. El tratamiento que disminuyó la DAP a los 0 y 30 dds fue Biosólido-Compost, a los 60 dds fue el tratamiento Compost, seguido del Testigo y la combinación Urea-Biosólido. Para la mayoría de las especies vegetales el pH óptimo del suelo es 6-7 (Bernal, Clemente, Vazquez y Walker, 2007). Con base en los datos anteriores, a los 0 dds los tratamientos Biosólido-Compost y Urea-Biosólido-Compost tienen un pH óptimo (6.27). A los 30 dds, únicamente el tratamiento Compost presentó pH de 6.23, a los 60 dds el tratamiento Urea-Compost alcanza un pH de 6. El comportamiento del pH con relación al tiempo varió constantemente (Figura 1).

En general, el comportamiento del contenido de M.O. varió a través del tiempo. El contenido de M.O. aumentó de muy bajo a bajo con la adición de Biosólido. El tratamiento Urea fue el que presentó menor contenido de M.O, seguido del Testigo. Los contenidos de M.O más altos se encontraron a los 0 dds en los tratamientos Biosólido-Compost y Urea-Biosólido-Compost. El contenido de Ni aumentó de bajo a medio con la adición de Compost, de bajo a alto con la adición de Biosólido, de bajo a muy alto con Compost-Biosólido-Urea. El comportamiento del Ni respecto al tiempo mostró, de igual forma un comportamiento irregular en todos los tratamientos, excepto el Testigo y Compost, aumentó a los 30 dds y disminuyó a los 60 dds. Los tratamientos que presentaron menor Ni fueron Compost y Urea-Compost seguido de Biosólido-Compost (Figura 1).

La incorporación de Urea en los tratamientos no tuvo gran efecto en los contenidos de P, ya que disminuyó poco a través del tiempo. Los tratamientos con los más altos contenidos de P fueron Biosólido-Compost y Urea-Biosólido-Compost, seguido de Compost y Urea-Compost, siendo el testigo, el que presentó el contenido más bajo de P. El contenido de Na disminuyó a través del tiempo. Los tratamientos con los más altos contenidos de Na fueron Compost, Biosólido-Compost, Urea-Compost y Urea-Biosólido-Compost. La incorporación de Urea en los tratamientos Biosólido, Compost y Biosólido-Compost no mostró diferencias en el contenido de Na. El testigo presentó los más bajos contenidos de Na. El contenido de K en todos los tratamientos, a excepción de Urea-Compost y Urea-Biosólido-Compost, disminuyó a los 30 dds y aumentó a los 60 dds. Los contenidos de K más altos se encontraron en Compost y Urea-Compost a 0 dds (Figura 1).

El contenido de Ca aumentó a través del tiempo. El mayor contenido de Ca se encontró en el tratamiento Urea-Compost a los 60 dds. Los tratamientos Biosólido-Urea, Compost-Urea y Biosólido-Compost-Urea, aumentaron significativamente el contenido de Ca. Los tratamientos Testigo y Urea presentaron la menor cantidad de Ca. El contenido de Mg aumentó de bajo a medio con los tratamientos Compost y Biosólido, de bajo a alto con Compost-Biosólido. La aplicación de Urea en los tratamientos no mostró diferencias en el contenido de Mg. El testigo presentó los más bajos contenidos de Mg. En general el Mg disminuyó a través del tiempo. El comportamiento de los elementos anteriores se ilustra en la figura 1.

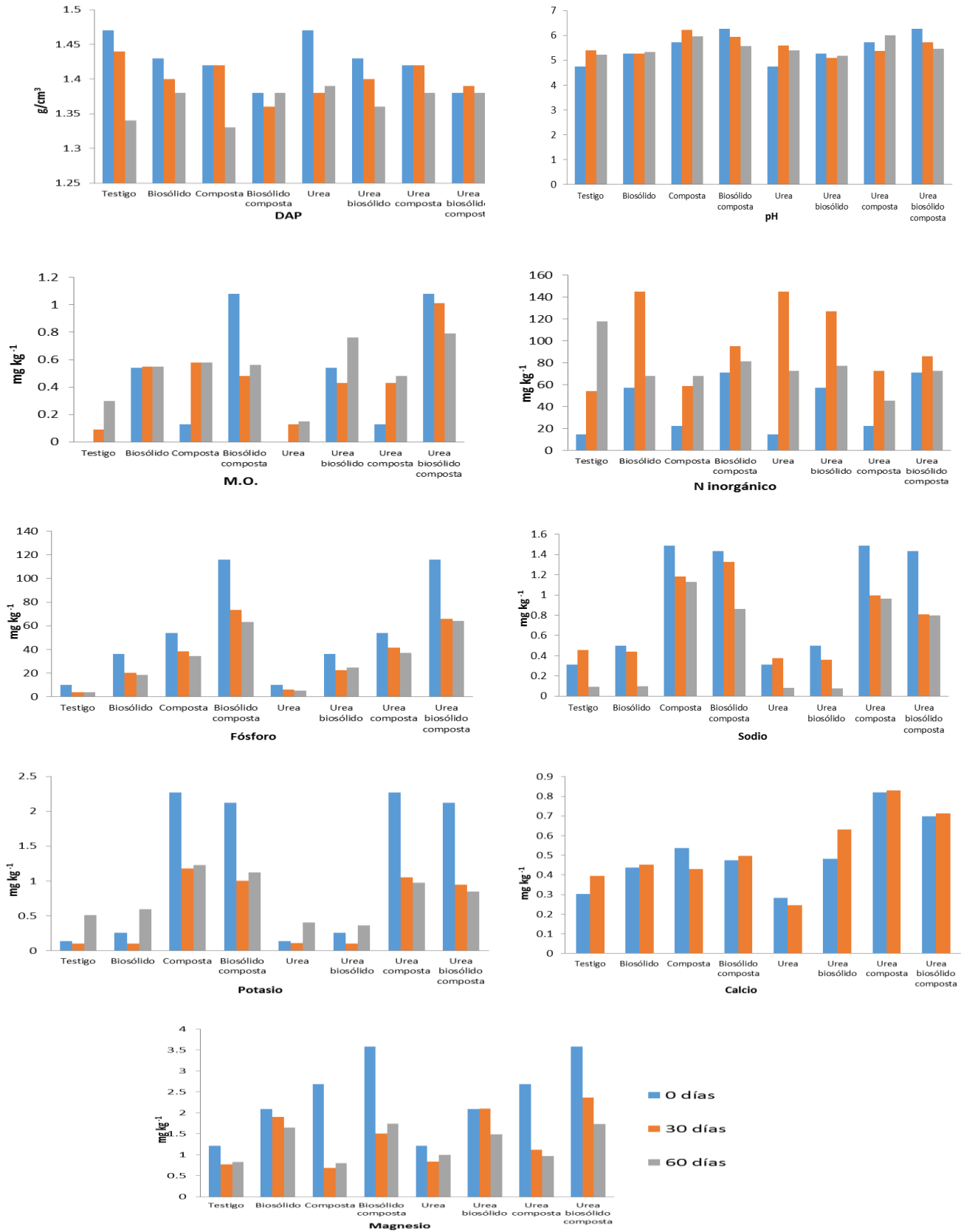


Fig. 1. Características físicas químicas de los residuos de mina a 0, 30 y 60 dds.

*E. Contenido de metales pesados en los residuos de mina a 0, 30 y 60 dds.*

A los 30 dds los elementos siguientes presentaron menor concentración en los tratamientos: Cu, Mn y Zn en Compost, Ni en el Testigo, Pb en Biosólido-Compost, Cd en Urea-biosólido. El tratamiento Biosólido presentó los mayores contenidos de los MP aquí estudiados. A los 60 dds los siguientes elementos presentaron menor concentración en los tratamientos: Mn y Zn en Compost, Cu y Ni en el testigo, Cd en Biosólido-compost, Pb en Urea Biosólido. El tratamiento Urea-Biosólido presentó los mayores contenidos de los MP (Figura 2).

El efecto de los tratamientos sobre la concentración de Cu en los residuos de mina a 60 dds fue altamente significativo ( $P=0.0001$ ) pues al adicionar Biosólido, Compost y Urea en el sustrato la concentración de Cu aumentó. Bernal, Clemente, Vazquez y Walker (2007) en su estudio basado en el uso de enmiendas orgánicas a suelos contaminados por MP en un yacimiento minero de Aznalcóllar, España encontraron que la M.O del suelo condiciona la solubilidad y disponibilidad del Cu, así en su estudio, la concentración de Cu disponible disminuyó en un 20% del valor inicial en el testigo, mientras que los valores aumentaron con el uso de estiércol y permanecieron prácticamente constantes en los suelos con compost, debido a que el estiércol es más rico que el compost en compuestos solubles, capaz de formar quelatos solubles con el Cu.

Alvarenga et al. (2009) En un experimento en invernadero que duró 60 días evaluaron lodos de depuradora (SS) como agentes de inmovilización en la fitoestabilización de suelos contaminados, afectado por las actividades mineras utilizando *L. perenne*, los resultados mostraron que en el suelo testigo se concentraron  $525 \text{ mg kg}^{-1}$  de Cu, y en los suelos enmendados con SS se concentraron de  $444$  a  $493 \text{ mg kg}^{-1}$ . Lo que significó que con la incorporación de lodos, el contenido de Cu, disminuyó.

El efecto de los tratamientos sobre la concentración de Mn en los residuos de mina a 30 y 60 dds fue significativo ( $P=0.0098$ ) ( $P=0.01$ ); la concentración de Mn en los residuos de mina disminuyó con la adición de Compost. En el tratamiento Biosólido-Compost, el Mn aumentó conforme se incrementaron las dosis respectivas. En estudios realizados por Bernal, Clemente, Vazquez y Walker (2007) de fitorremediación a suelos contaminados por MP en un yacimiento minero de Aznalcóllar, las enmiendas orgánicas disminuyeron las formas disponibles de Mn en el suelo, debido a los cambios en el pH del suelo, el aporte de sales inorgánicas (principalmente P) con el estiércol, y la transformación de la M.O (Clemente, Walker y Bernal, 2004). En el mismo estudio, Bernal, Clemente, Vazquez y Walker (2007) encontraron en el testigo que las concentraciones disponibles de Mn disminuyeron, gracias a la fijación sobre óxidos amorfos de Fe y Mn formados (Clemente, Almela y Bernal, 2006; Kraus y Wiegand, 2006).

El efecto de los tratamientos sobre la concentración de Cd en los residuos de mina a 30 y 60 dds fue altamente significativo ( $P=0.0014$ ) ( $P<0.0001$ ); la concentración de Cd disminuyó con la adición de Biosólido. Caso contrario con Illera, Walter y Cala (2001) que reportaron en un estudio desarrollado en parcelas experimentales de un área degradada del sur de Madrid, bajo ambiente semiárido, contenidos de Cd en el Testigo de  $1.7$  a  $2.55 \text{ mg kg}^{-1}$  y en suelos enmendados con Biosólido de  $2.66$  a  $3.32 \text{ mg kg}^{-1}$ , lo que significa que con la incorporación de Biosólido, el contenido de Cd aumentó. Junkang, Renwei, Yongzhen y Ruigang (2014) en su estudio de fitorremediación con *L. perenne* crecida en suelos contaminados con MP en China, encontraron las siguiente concentraciones disponibles de Cd: de  $0.93$  a  $1.25 \text{ mg kg}^{-1}$  en pH de  $3.92$  a  $4.25$ , valores similares a los obtenidos en este estudio.

El efecto de los tratamientos sobre la concentración de Ni en los residuos de mina a 60 dds fue altamente significativo ( $P<0.0001$ ); la concentración de Ni aumentó conforme se adicionó Biosólido, Compost y Urea. Illera, Walter y Cala (2001) reportan valores más altos en un estudio desarrollado en parcelas experimentales de un área degradada del sur de Madrid, contenidos de Ni en el Testigo de  $23.3$  a  $24.8 \text{ mg kg}^{-1}$  y en suelos enmendados con Biosólido aumentó a  $29 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Cuevas y Walter (2004) en su estudio de absorción y distribución de MP en plantas de maíz (*Zea mays* L.) cultivadas en un suelo calcáreo enmendado con compost de lodo residual. Las concentraciones de Ni en los tratamientos con compost al año 0 fueron 0.84 mg kg, al año 1 variaron de 0.80 a 1.3 mg kg, por su parte, el Testigo (fertilización mineral N, P, K: 8, 15, 15 y nitrato amónico cálcico 27% N) concentró 1.3 mg kg, valores similares a este estudio a pesar de tratarse de otra especie. Estos resultados muestran que con la incorporación de Compost y los fertilizantes, incluido el nitrógeno, aumenta el contenido de Ni en el suelo.

La concentración de Pb disminuyó al adicionar Biosólido, sin embargo, al adicionar Compost, éste se mantuvo casi constante, disminuyó poco. Caso contrario de Illera, Walter y Cala (2001) quienes encontraron contenidos de Pb en el Testigo de 50.5 a 60.4 mg kg<sup>-1</sup> y en suelos enmendados con biosólido de 97.1 a 98.3 mg kg<sup>-1</sup>, lo que significa que con la incorporación de Biosólido, el contenido de Pb aumentó. Alvarenga et al. (2009) En su estudio de inmovilización en fitoestabilización en suelos contaminados, afectado por las actividades mineras, utilizando *L. perenne* encontraron en el suelo testigo concentraciones de 5491 mg kg<sup>-1</sup> y en los suelos enmendados con lodos de depuradora encontraron concentraciones de 5310 a 5640 mg kg<sup>-1</sup> de Pb, lo que significa que en ciertos tratamientos el contenido de Pb disminuyó y en otros aumentó con la incorporación de los lodos.

Recientemente Junkang, Renwei, Yongzhen and Ruigang (2014) estudiaron la fitorremediación de suelos contaminados con MP por *L. perenne* en China, los investigadores encontraron concentraciones de Pb de 7.84 a 15.92 mg kg<sup>-1</sup>, similares a los obtenidos en este estudio.

El efecto de los tratamientos sobre la concentración de Zn en los residuos de mina a 30 dds fue significativo (P= 0.0015); a 60 dds fue altamente significativo (P<0.0001); las concentraciones de Zn aumentaron al adicionar Biosólido, el Compost causó el efecto contrario. Bidar et al. (2009) estudiaron la bioacumulación de metales, transferencia y fitotoxicidad en *L. perenne* cultivadas en un suelo contaminado de Francia, a los cinco meses encontraron concentraciones de Zn en el suelo de 1192 mg kg<sup>-1</sup> los cuales fueron superiores a los obtenidos en esta investigación. Es importante resaltar que los investigadores mantuvieron el experimento por más tiempo. El comportamiento de los contenidos de MP en cada tratamiento se muestra en la figura 2.

Los biosólidos aportaron metales pesados a los residuos de mina, lo anterior se concluye al observar que a los 0 dds se obtuvo la mayor concentración de metales pesados en los sustratos con el tratamiento Compost-Biosólido, a los 30 dds con el tratamiento Biosólido y a los 60 dds con Urea-Biosólido.

La



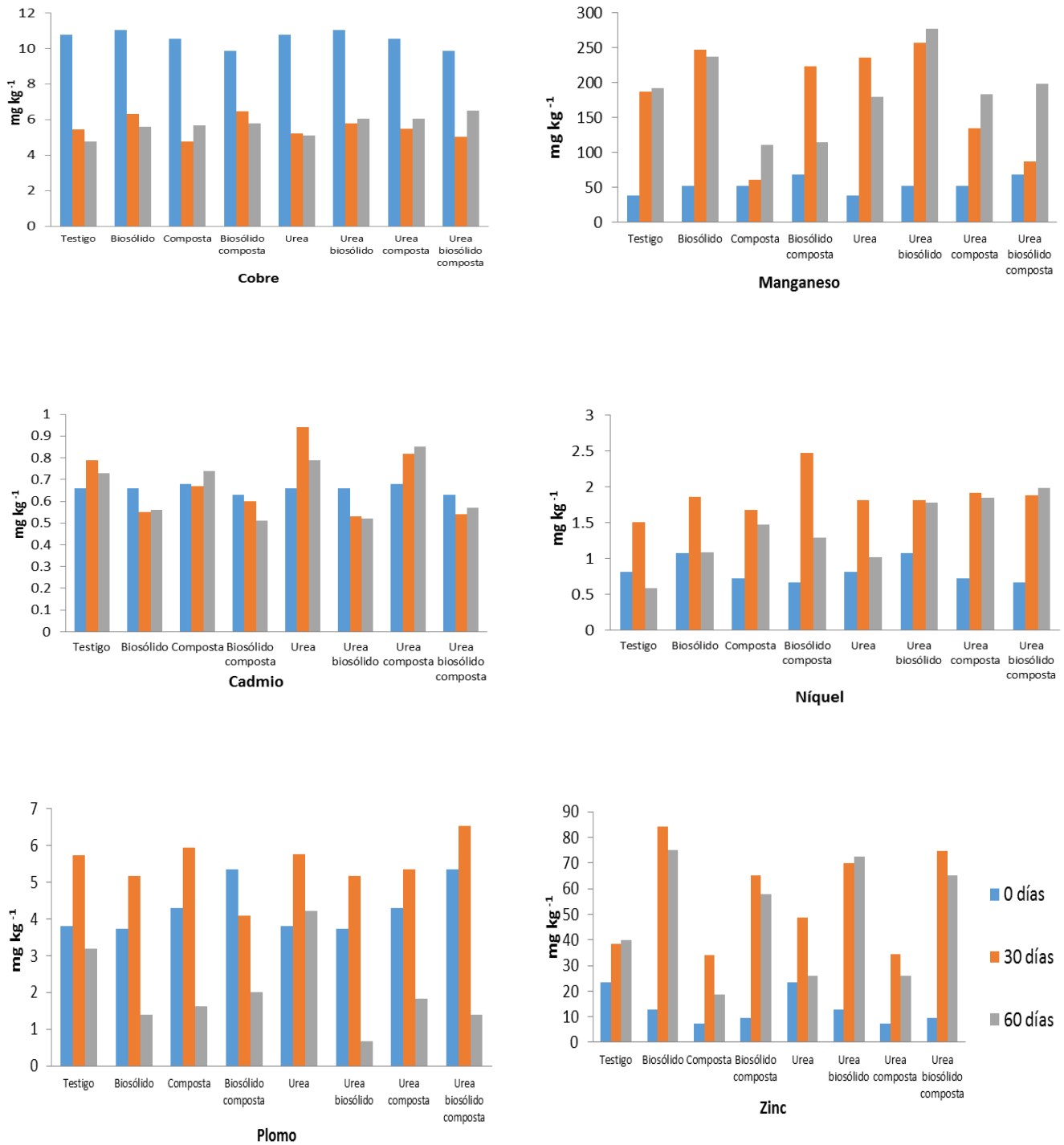


Fig. 2. Concentraciones de metales pesados en los residuos de mina a los 0, 30 y 60 dds.

F. *Biomasa, volumen radical y núm. de hojas de Lolium perenne.*

A los 30 dds el tratamiento Biosólido-Compost concentró la mayor producción de biomasa en la parte aérea (1.73 g), en contraste con el tratamiento Urea que presentó la menor producción con 0.33 g. A los 60 dds también el tratamiento Biosólido-Compost concentró la mayor producción de biomasa (21.29 g), contrario al Testigo que presentó la menor producción con 4.46 g. A los 30 dds el tratamiento biosólido presentó el mayor volumen radical (0.68 cm<sup>3</sup>), en comparación con el tratamiento Urea que presentó el menor con 0.17 cm<sup>3</sup>. A los 60 dds, el testigo presentó el mayor volumen radical (8.16 cm<sup>3</sup>), a diferencia del tratamiento Urea que presentó 1.33 cm<sup>3</sup>. A los 30 dds el tratamiento Biosólido presentó el mayor número de hojas (204.33), en contraste con el tratamiento Urea que presentó 87.33 hojas, a los 60 días el tratamiento Urea-Biosólido presentó el mayor número de hojas (567), en comparación con el Testigo que presentó 174 (Figura 3).

De manera similar, Arienzo, Adamo y Cozzolino (2004) realizaron un estudio en invernadero para determinar la posibilidad de utilizar *L. perenne* para la revegetación de los suelos de una antigua planta metalúrgica ferrosa por MP. La biomasa total en seco de brotes por unidad experimental resultó en promedio 15 g y en la raíces en promedio 7 g, valor promedio cercano a los obtenidos en este estudio. Alvarenga et al. (2009) en su estudio de inmovilización en fitoestabilización en suelos contaminados, afectado por las actividades mineras, utilizando *L. perenne* reportaron valores que demuestran que la incorporación de lodos de depuradora en los suelos favoreció significativamente el crecimiento de las plantas (118 a 277 %), un comportamiento similar a éste estudio.

Santibáñez, Verdugo y Ginoccio (2008) en un trabajo realizado en relaves mineros de Chile, donde evaluaron el uso de biosólidos y la especie *L. perenne* para su fitoestabilización, encontraron datos de biomasa seca en la parte aérea de las plantas Testigo de 3.2 g y en las raíces de 1 g, mientras que las plantas cultivadas en los tratamientos enmendados con biosólidos dispararon la producción de biomasa seca en la parte aérea a 7.5 a 12 mg kg<sup>-1</sup> y en las raíces de 1 a 1.5 mg kg<sup>-1</sup>, lo que demuestra que, la incorporación de biosólido favoreció la producción de biomasa tanto en la parte aérea como en las raíces. Junkang, Renwei, Yongzhen and Ruigang (2014) en su estudio de fitorremediación de suelos contaminados con MP por *L. perenne* en China encontraron a los 60 días de haber establecido el experimento, peso de biomasa seca en las raíces de las plantas en todos los tratamientos de 0.3 a 1.7 g, en contraste con la parte aérea de las plantas de 2.2 a 2.8 g, esto muestra que es mayor la producción de biomasa en la parte aérea que en las raíces, el mismo comportamiento obtenido en éste estudio. En la figura 3, se ilustra el crecimiento y producción de biomasa en las plantas experimentadas.

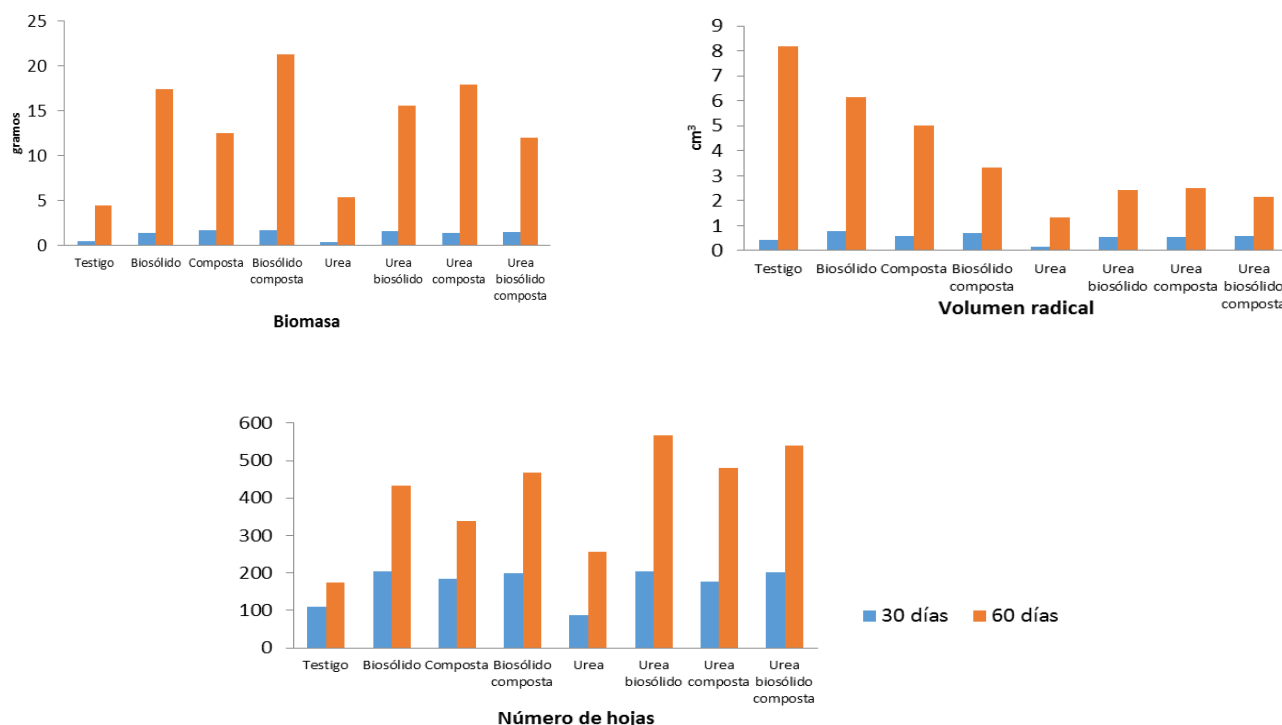


Fig. 3. Variables agronómicas evaluadas en *Lolium perenne* a 30 y 60 dds.

### G. Contenidos de metales pesados en *Lolium perenne*

El tratamiento que mostró la mayor concentración de Cu en la parte aérea de las plantas a los 30 dds fueron las dosis (80 t ha) de biosólido y (219 kg ha) de Urea, en las raíces fue (219 kg ha) de Urea. A 60 dds fue (80 t ha) de Compost y (219 kg ha) de Urea y en las raíces fue el testigo. La concentración de Cu en las raíces fue en promedio 4.3 veces mayor que en la parte aérea de las plantas. El efecto de los tratamientos sobre la concentración de Cu en la parte aérea y raíces a 30 y 60 dds no fue significativo. Gunawardana, Shingal y Johnson (2010) en su investigación evaluaron el efecto de varias modificaciones químicas al suelo en el crecimiento de plantas *L. perenne* y en la concentración de MP absorbidos por dichas plantas durante un periodo de 30 días en Auckland, Nueva Zelanda, encontraron resultados en las raíces de 0.5 a 1.6 mg kg, ligeramente más alto que en la parte aérea: 0.6 a 1.3 mg kg (Figura 4).

Santibáñez, Verdugo y Ginoccio (2008) en un trabajo realizado en relaves mineros de Chile, donde evaluaron el uso de biosólidos y la especie *L. perenne* para su fitoestabilización, en la parte aérea de la planta testigo encontraron concentraciones de Cu de 21 mg kg<sup>-1</sup> y en las raíces 3500 mg kg<sup>-1</sup> mientras que los tratamientos enmendados con biosólidos dispararon la concentración del mismo en la parte aérea de 35 a 54 mg kg<sup>-1</sup> y en las raíces de 800 a 5500 mg kg<sup>-1</sup>, aunque las concentraciones en la parte aérea de la planta son muy similares a este estudio, en las raíces se presentaron valores muy altos, sin embargo, siguen el mismo patrón, en las raíces se concentraron las mayores concentraciones de Cu.

El tratamiento que mostró la mayor concentración de Mn en las plantas a 30 dds fue Biosólido (80 t ha)-Urea (219 kg ha), y a 60 dds fue Biosólido (80 t ha). La concentración de Mn en la parte aérea a los 30 dds disminuyó conforme se adicionaron Biosólido y Compost, por su parte, Urea tuvo un efecto

contrario (Figura 4). Al adicionarse Biosólido-Compost, la concentración de Mn se mantuvo constante. A los 60 dds la concentración de Mn aumentó conforme se adicionaron Compost y Urea y en las raíces disminuyó conforme se adicionó Biosólido. Caggiano, D’Emilio, Macchiato y Ragosta (2005) en su estudio de fiabilidad de la especie *L. perenne* como biomonitor activo mediante la evaluación de las concentraciones de metales atmosféricos al sur de Italia obtuvieron concentraciones de Mn en las plantas de 74 a 447 mg kg, valores poco inferiores a los obtenidos en este estudio (Figura 4).

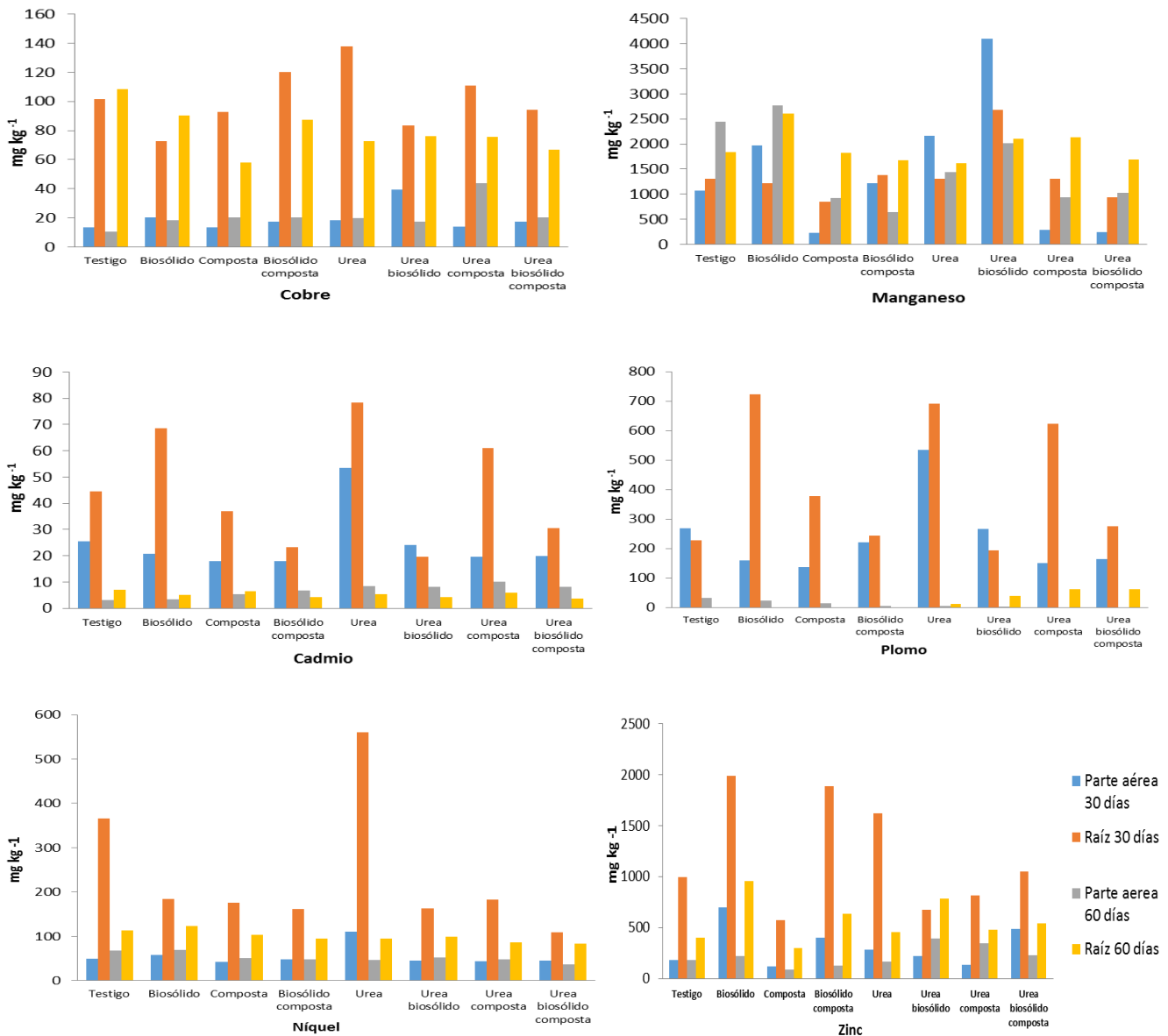


Fig. 4. Concentración de MP en parte aérea y raíz de *Lolium perenne* a 30 y 60 dds.

El tratamiento que mostró la mayor concentración de Cd en la parte aérea y raíz de las plantas a 30 dds fue Urea (219 kg ha), a 60 dds el tratamiento con mayor concentración en la parte aérea existió en

Compost (80 t ha)-Urea (219 kg ha) y en las raíces fue el Testigo. La concentración de Cd disminuyó conforme se adicionó Compost. En casi todos los tratamientos, la concentración de Cd en las raíces fue mayor que en la parte aérea de las plantas, a excepción del tratamiento Urea-Biosólido (Figura 4).

Estudios similares a éste trabajo lo hicieron Santibáñez, Verdugo y Ginoccio (2008) en relaves mineros de Chile, dónde evaluaron el uso de biosólidos y la especie *L. perenne* para su fitoestabilización, en la parte aérea de la planta testigo encontraron concentraciones de Cd de 0.02 mg kg<sup>-1</sup> y en las raíces 0.5 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que los tratamientos enmendados con biosólidos dispararon la concentración en la parte aérea de 0.32 a 0.43 mg kg<sup>-1</sup> y en las raíces de 6 a 11 mg kg<sup>-1</sup>, sus resultados muestran que la incorporación de Biosólido incrementa los contenidos de Cd. Bidar et al. (2009) en suelos contaminados de Francia, a los cinco meses encontraron concentraciones de Cd en la parte aérea de las plantas de *L. perenne* de 10.4 mg kg<sup>-1</sup>, y en las raíces de 115 mg kg<sup>-1</sup>. En los dos casos, la concentración de Cd fue mayor en las raíces que en la parte aérea de la planta, un comportamiento muy similar a los obtenidos en el presente estudio.

El tratamiento que mostró la mayor concentración de Pb en la parte aérea de las plantas a 30 dds fue el tratamiento Urea (219 kg ha), en las raíces fue el tratamiento con 80 t ha de Biosólido. A 60 dds el testigo mostró la mayor concentración en la parte aérea y en las raíces fue Urea-Biosólido-Compost (219 kg ha, 80 t ha, 80 t ha respectivamente). La concentración de Pb disminuyó conforme se adicionó Compost y Biosólido. Por el contrario, al adicionar Urea y Biosólido-Compost la concentración de Pb aumentó. Al incrementar las dosis de Compost-Urea, la concentración de Pb disminuyó en la parte aérea (Figura 4).

Junkang, Renwei, Yongzhen and Ruigang (2014) encontraron valores muy similares a los obtenidos en este trabajo, en su estudio de fitorremediación de suelos contaminados con MP por *L. perenne* en China en 60 dds, concentraciones de Pb en las raíces de las plantas de 85 a 140 mg kg<sup>-1</sup> y en la parte aérea de 15 a 40 mg kg<sup>-1</sup>. Bidar et al. (2009) Estudiaron la bioacumulación de metales, transferencia y fitotoxicidad en *L. perenne* cultivadas en un suelo contaminado de Francia, a los cinco meses encontraron concentraciones de Pb en la parte aérea de las plantas de 25.3 mg kg<sup>-1</sup>, y en las raíces de 149 mg kg<sup>-1</sup>, valores que muestran que el Pb se concentró en mayor cantidad en las raíces de las plantas.

El tratamiento que mostró la mayor concentración de Ni en la parte aérea y raíces de las plantas a 30 dds fue el tratamiento Urea (219 kg ha), a 60 días fue el tratamiento biosólido (80 t ha). Las mayores concentraciones de Ni se encontraron en las raíces de las plantas a los 30 dds, principalmente en el tratamiento Urea. La concentración de Ni disminuyó conforme se adicionaron Compost y Urea (Figura 4). Caggiano, D'Emilio, Macchiato y Ragosta (2005) en su estudio de fiabilidad de la especie *L. perenne* al sur de Italia obtuvo concentraciones inferiores a este estudio, en las plantas de 2 a 14 mg kg. Por otra parte Hernández y Pastor (2005) encontraron valores similares en un entorno de una mina contaminada en la Sierra de Guadarrama, concentraciones de Ni en especies gramíneas: *Lolium multiflorum* (2,9 mg kg); *Vulpia myuros* (0,1 mg kg); *Agrostis castellana* (3,6 mg kg); *Arrhenaterum bulbosus* (1,7 mg kg); *Bromus hordaceus* (1,2 mg kg) y *Koeleria caudata* (0,3 mg kg).

El tratamiento que mostró la mayor concentración de Zn en la parte aérea y raíces de las plantas a 30 dds fue el tratamiento biosólido (80 t ha), a los 60 dds fue el tratamiento Biosólido (80 t ha)-Urea (219 kg ha), en las raíces fue en la concentración de 80 t ha de Biosólido. La concentración de Zn en la parte aérea a los 30 dds aumentó con la adición de Biosólido y disminuyó conforme se añadió Biosólido-Urea. La concentración de Zn en las raíces de las plantas aumentó al agregar biosólido a los 60 dds (Figura 4).

Valores similares encontraron Bidar et al. (2009) quienes estudiaron la bioacumulación de metales, transferencia y fitotoxicidad en *L. perenne* cultivadas en un suelo contaminado de Francia, a los cinco

meses encontraron concentraciones de Zn en la parte aérea de las plantas de  $213 \text{ mg kg}^{-1}$ , y en las raíces de  $1477 \text{ mg kg}^{-1}$ . Santibáñez, Verdugo y Ginoccio (2008) en relaves mineros de Chile evaluaron el uso de biosólidos y la especie *L. perenne* para su fitoestabilización, en la parte aérea de la planta testigo encontraron concentraciones de Zn de  $33 \text{ mg kg}^{-1}$  y en las raíces  $50 \text{ mg kg}^{-1}$  mientras que los tratamientos enmendados con biosólidos aumentaron la concentración en la parte aérea hasta 129-198  $\text{mg kg}^{-1}$  y en las raíces de 510 hasta 950  $\text{mg kg}^{-1}$ . En ambos estudios se muestra que las concentraciones de Zn fueron mayores en las raíces de las plantas.

#### IV. CONCLUSIONES

La aplicación de composta, biosólidos y urea en los residuos de mina favorecieron el establecimiento de *Lolium perenne*. Además, originaron una mayor producción de biomasa (Biosólido-Compost) y número de hojas (Urea-Biosólido). Los metales pesados se acumularon principalmente en las raíces, superando los límites máximos tolerables para el consumo animal y la concentración crítica en plantas.

Por su capacidad de extracción de metales pesados, se recomienda la aplicación conjunta de Compost-Biosólido y el uso de *Lolium perenne* en la reclamación de jales de mina.

#### RECONOCIMIENTOS

La presente investigación fue realizada con el apoyo de la Universidad Autónoma Chapingo a través de la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) y el Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos.

#### REFERENCIAS

- [1] Contreras, D. F. J., R. J. R. Ortiz, M. Padilla. 2000. Unidad Académica de Economía de la Universidad Autónoma de Zacatecas. <<http://www.ciu.reduaz.mx/Pruebas.nsf/b4c56a1adbc9e5f86256ac3006148168ad4c2450a00aeab86256ec8a2?openDocument>>
- [2] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2000.
- [3] Consejo de recursos minerales (COREMI). 1992. Monografía geológico-minera del Estado de Hidalgo, Serie monografías geológico-mineras. México: Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.
- [4] Secretaría de Economía. Servicio Geológico Mexicano. 2014. Panorama Minero del Estado de Hidalgo. 58 p.
- [5] Romero, F. M., y R. M. Gutiérrez. 2010. Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62(1): 43-53.
- [6] Riser-Roberts, E. 1998. Remediation of petroleum contaminated soils. Lewis Publishers. 542 pp.
- [7] Pilon-Smits, E. 2005. Phytoremediation. Annu. Rev. Plant Biol. 56: 15-39.
- [8] Kulli B, Balmer M, Krebs R, Lothenbach B, Geiger G, Schulin R. 1999. The influence of nitrilotriacetate on heavy metal uptake of lettuce and ryegrass. J Environ Qual., 28 (6):1699–1705.
- [9] Gunawardana, B., N. Singhal, A. Johnson. 2010. Amendments and their combined application for enhanced copper, cadmium, lead uptake by *Lolium perenne*. Plant Soil, 329 (1-2): 283-294. Auckland, New Zealand.
- [10] Bidar, G., C. Pruvot, G. Garçon, A. Verdín, P. Shirali, F. Douay. 2009. Seasonal and annual variations of metal uptake, bioaccumulation, and toxicity in *Trifolium repens* and *Lolium perenne* growing in a heavy metal-contaminated field. Environ Sci Pollut Res, 16 (1): 42-53.
- [11] Adriano DC, Wenzel WW, Vangronveld J y Bolan NS. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. Geoderma, 122: 121-142.

- [12] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2000. NOM-021-RECNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. 31 de diciembre de 2002: Diario Oficial de la Federación.
- [13] Castellanos, J.Z., Uvalle, B.J.X. y Aguilar, S.A. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Colección INCAPA. Colección INCAPA. Segunda Edición 226 p.
- [14] Hernández, E., Mondragón, E., Cristobal, D., Rubiños, J. E., Robledo, E. 2009. Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 15(2):109-114.
- [15] Environmental Protection Agency (EPA). 2000. Introduction to Phytoremediation. National Risk Management Research Laboratory, Ohio, Estados Unidos.
- [16] Ramos, Y., y Siebe, C. 2006. Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. Revista mexicana de ciencias geológicas, v.23, núm. 1, 2006, p.54-74.
- [17] Santibáñez C., Verdugo, C. y Ginocchio, R. 2008. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: Implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. Science Of The Total Environment: 395 (2008) 1–10. Santiago, Chile.
- [18] Santibáñez, C., C. Verdugo, R. Ginocchio. 2008. Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. Sci. Total Environ. 395, 1–10.
- [19] Muñoz, F; Polo, M., Giráldez, C. 1999. Modificación de algunas propiedades físicas en un suelo del Valle del Guadalquivir enmendado con lodos de depuradora. ICIA: Tenerife. 1999 ISBN 84-699-1258-5.
- [20] Alvarenga P, Gonçalves AP, Fernandes RM, de Varennes A, Vallini G, Duarte E, Cunha-Queda AC. 2009. Organic residues as immobilizing agents in aided phytostabilization: (I) Effects on soil chemical characteristics. Chemosphere, 74; 1292-1300.
- [21] Illera, V., Walter, I., Cala, V. 2001. Niveles de metales pesados en *Thymus Zygis* desarrollado en suelos enmendados con residuos orgánicos urbanos. Rev. Int. Contam. Ambient. 17 (4) 179186, 2001.
- [22] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 13 de agosto de 2003.
- [23] United States Environmental Protection Agency (EPA). Biosolids Rule. Part. 503.
- [24] Illera, V., Walter, I., Cala, V. 2001. Niveles de metales pesados en *Thymus Zygis* desarrollado en suelos enmendados con residuos orgánicos urbanos. Rev. Int. Contam. Ambient. 17 (4) 179186, 2001.
- [25] Bernal M.P., Clemente R., Vazquez S., Walker D.J. 2007. Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar . Revista científica y tecnica de ecología y medio ambiente: Ecosistemas, vol. 16, núm.2, 2007, pp.1-14. Asociación española de ecología terrestre. España.
- [26] Clemente, R., Walker, D.J., Bernal, M.P. 2004. Uso de enmiendas orgánicas en la fitorrecuperación de suelos contaminados por metales pesados. CEBAS-CSIC, Murcia, España.
- [27] Clemente, R., Almela, C., Bernal, M.P. 2006. A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste. Environ. Pollut. 143: 397-406.
- [28] Kraus, U., Wiegand, J. 2006. Long-term effects of the Aznalcóllar mine spill – heavy metal content and mobility in soils and sediments of the Guadiamar river valley (SW Spain). Sci. Total Environ. 367: 855-871.
- [29] Junkang, G., Renwei, F., Yongzhen, D. and Ruigang, W. 2014. Applying carbon dioxide, plant growth-promoting rhizobacterium and EDTA can enhance the phytoremediation efficiency of ryegrass in a soil polluted with zinc, arsenic, cadmium and lead. Journal of Environmental Management 141. 1e8.
- [30] Cuevas, G; Walter, I. (2004). Metales pesados en Maíz (*Zea mays L.*) cultivado en un suelo enmendado con diferentes dosis de compost de lodo residual. Madrid, España.

- [31] Arienzo, M., P. Adamo, V. Cozzolino. 2004. The potential of *Lolium perenne* for revegetation of contaminated soil from a metallurgical site. *The science of the total environment*, 319: 13-25. Italia
- [32] Caggiano, R., D'Emilio, M., Macchiato, M. and Ragosta, M. 2005. Heavy Metals In Ryegrass Species Versus Metal Concentrations In Atmospheric Particulate Measured In An Industrial Area Of Southern Italy. *Environmental Monitoring and Assessment* 102: 67–84. DOI: 10.1007/s10661-005-1595-7.
- [33] Hernández, A. y J. Pastor. 2005. Incidencia conjunta de metales pesados en pastos de vacuno ubicados en el entorno de una mina abandonada en la Sierra de Guadarrama. *Producciones agroganaderas: Gestión eficiente y conservación del medio natural (Vol. II)*. Madrid, España.
- [34] National Research Council Nutrient requirements of domestic animals. 1984. 7th ed. National Academy of Science, National Academy Press, Washington, DC.
- [35] Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2001. *Trace Elements in Soils and Plants*, Third Edition. CRC Press, Boca Raton, USA.
- [36] ICME, International Council for Metals and the Environment. 1996. *Heavy metals in the environment: a geosciences perspective*, Ottawa, Ontario, Canadá.