

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**FITOEXTRACCIÓN DE CADMIO (Cd) Y PLOMO (Pb) CON NOPAL
[*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller] EN ASOCIACIÓN CON MICORRIZAS Y
FERTILIZACIÓN NITROGENADA**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES
Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DIRECCION DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

JESÚS JOSAFATH QUEZADA RIVERA

Bermejillo, Durango. México. Junio de 2014



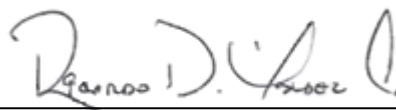
**FITOEXTRACCIÓN DE CADMIO (Cd) Y PLOMO (Pb) CON NOPAL
[*Opuntia ficus-indica* (L.) Miller] EN ASOCIACIÓN CON MICORRIZAS
Y FERTILIZACIÓN NITROGENADA**

Tesis realizada por Jesús Josafath Quezada Rivera bajo la dirección del Dr. Ricardo David Valdez Cepeda, la cual ha sido revisada y aprobada por el Comité Asesor como requisito para obtener parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN
ZONAS ÁRIDAS**

COMITÉ ASESOR

DIRECTOR



Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

ASESOR



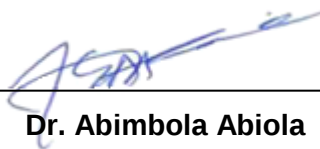
Dr. Ricardo Trejo Calzada

ASESOR



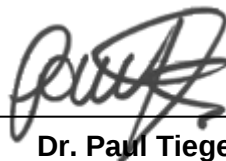
Dr. Jesús Guadalupe Arreola Ávila

ASESOR



Dr. Abimbola Abiola

ASESOR



Dr. Paul Tiege

DATOS BIOGRÁFICOS

Jesús Josafath Quezada Rivera

Candidato a Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas

Formación Académica

Técnico Agropecuario, egresado en 2003 del Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 172; Biólogo egresado de la Escuela Superior de Biología de la Universidad Juárez del Estado de Durango (ESB – UJED).

Cursos, Diplomados y Participaciones

ACREDITACIÓN DE CURSOS Y DIPLOMADOS. Prácticas profesionales en Centro acuícola “La Rosa” enfatizando actividades de selección, manejo, desove e incubación de carpa, tilapia, bagre y lobina negra, en 2007. Teórico-Práctico “Análisis de la expresión genética; Técnicas básicas de DNA recombinante, RT-PCR convencional y RT-PCR semicuantitativa” en 2008. “Diplomado en Competencias Académicas para el Nuevo Modelo Educativo” 2009-2010. Seminario–taller “Métodos para el aprendizaje basado en competencias” en 2010. Curso-taller “La tutoría académica en la ESB” en 2011. Curso teórico “Aplicaciones y manejo de la Biología Molecular en la Biología” en 2011.

PONENCIAS. Durante la Expobiología 2003, con el tema: “Solo se aprende biología haciendo biología”. Durante la Expobiología 2006, con el tema: “Resistencia a antibióticos y metales pesados en cepas clínicas de *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas* spp.”. Durante la Expobiología 2007, con el tema: “Producción de biogás en condiciones de laboratorio mediante la utilización de un biodigestor”. Durante el 1er Congreso de Diversidad Biológica de la Comarca Lagunera, con el tema: “Resistencia a antibióticos en cepas clínicas de *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas* spp.”

ASISTENCIA A CONGRESOS. Jornadas Académico-Culturales 2004, 2005, 2006; Expobiologías 2004, 2005, 2006, 2007; XXXVI Congreso Nacional de Microbiología; Foro “El futuro de la Zona Metropolitana” de la Comarca Lagunera; “Primer Congreso Internacional de Tutoría, Orientación y Docencia”

DEDICATORIA

A mi esposa: Nancy Yadira Meza Treviño

Por ser la mujer y el amor de mi vida, quien me alienta para ser mejor persona y profesionalista, por todo su amor y apoyo incondicional...

A mis padres: Jesús Oscar y Ma. del Carmen

Por darme la vida y por apoyarme en todo momento. Gracias por todo papá y mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre me han apoyado y me han brindado todo su amor...

A mis hermanos: Diana y César

Por estar conmigo y apoyarme siempre, por la alegría que cada día me dan con sus sonrisas y compañía, por ser mis mejores amigos...

A mi: Escuela, Maestros, Amigos y Compañeros, quienes de alguna u otra forma, contribuyeron en mi formación académica...

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de la presente tesis se llevó a cabo con el esfuerzo y cooperación de un gran número de personas, que con su colaboración la hicieron posible.

Primeramente quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por elegirme como becario en pro de mi formación profesional como investigador con el fin de promover y estimular el desarrollo de la ciencia y la tecnología en nuestro país.

Al Dr. Ricardo David Valdez Cepeda por compartir sus conocimientos y por su apoyo y asesoría en la realización de esta investigación.

Al Dr. Ricardo Trejo Calzada por su apoyo incondicional y asesoría en la realización de esta investigación.

Al Dr. Abimbola Abiola por darme la oportunidad de emprender una maravillosa aventura en Canadá; por permitirme ser parte de su grupo de trabajo.

Al Dr. Paul Tiege por compartir sus conocimientos y ser parte esencial de nuestra estancia de investigación en Olds, Ca.

Al Dr. José Antonio Cueto Wong y a la M.C. María del Rosario Jacobo Salcedo por las facilidades concedidas en la realización de los análisis por espectrofotometría de esta investigación.

Al equipo de docentes de posgrado por compartir sus conocimientos en pro de la formación de profesionistas competentes.

A mis compañeros de posgrado, por su apoyo y ayuda brindada en cada una de las etapas experimentales de esta investigación. Por los buenos y malos momentos...

A Margarita, por ser una parte de vital del programa de Posgrado, y por su apoyo y amistad...

**FITOEXTRACCIÓN DE CADMIO (Cd) Y
PLOMO (Pb) CON NOPAL [*Opuntia ficus-
indica* (L.) Miller] EN ASOCIACIÓN CON
MICORRIZAS Y FERTILIZACIÓN
NITROGENADA**

¹ Jesús Josafath Quezada Rivera

² Ricardo David Valdez Cepeda

RESUMEN

La minería es una de las actividades económicas que contribuye con el desarrollo económico de México. Desafortunadamente, todas las etapas del proceso minero generan contaminación de suelo por metales pesados. Una de las soluciones a este problema es la fitorremediación, en la cual se utilizan plantas para restaurar suelos contaminados con estos agentes. En este estudio se evaluó la capacidad de *Opuntia ficus-indica* L. Miller para extraer plomo (Pb) y cadmio (Cd) de suelo contaminado, al adicionar una mezcla de micorrizas arbusculares y fosfonitrato de amonio como fuente de N. El experimento comprendió 12 tratamientos con un diseño de bloque al azar con 5 repeticiones. Los tratamientos fueron producto de la combinación de 4 concentraciones de micorrizas (0,4,8 y 12 g·UE) y 3 concentraciones de fertilizante (0, 90 y 180 mg·kg⁻¹). Las fuentes de contaminación utilizadas fueron concentraciones únicas de plomo (800 mg·kg⁻¹) y cadmio (74 mg·kg⁻¹). La cuantificación de la concentración de los metales en los distintos órganos del nopal se realizó mediante absorción atómica. *Opuntia ficus-indica* tiene la capacidad de extraer plomo y cadmio de suelos contaminados y translocarlo a sus demás órganos, siendo la raíz la que concentra la mayor cantidad del contaminante seguido de la penca madre y después brotes. Su capacidad fitoextractora no se ve condicionada por los factores micorrizas y fertilizante, ya que en tratamientos carentes de estos factores las concentraciones de ambos metales estuvieron por arriba de las obtenidas con concentraciones de micorrizas y fertilizante. Se obtuvieron diferencias significativas entre los tratamientos para la variable producción de biomasa, siendo la concentración 4 g·UE la que mayor biomasa produjo. Respecto al Índice de Bioacumulación (IBA) se obtuvo que para plomo el tratamiento que mayor IBA registro fue el desprovisto de micorrizas y fertilizantes (1.04), mientras que para cadmio el tratamiento 8-90 fue el mejor (3.16). *Opuntia ficus-indica* tiene la capacidad natural para retener y remover metales pesados contenidos en el suelo.

Palabras clave: *Opuntia ficus-indica*, fitoextracción, metales pesados, bioacumulación

**PHYTOEXTRACTION OF CADMIUM (Cd) AND
LEAD (Pb) WITH CACTUS [*Opuntia ficus-
indica* (L.) Miller] IN ASSOCIATION WITH
MYCORRHIZAE AND NITROGEN
FERTILIZATION**

¹ Jesús Josafath Quezada Rivera

² Ricardo David Valdez Cepeda

ABSTRACT

Mining is an economic activity that contributes to economic development of Mexico. Unfortunately, all stages of the mining process generate soil contamination by heavy metals. A solution for this problem is phytoremediation, in which plants are used to restore soil contaminated with these agents. In this study the ability of *Opuntia ficus-indica* L. Miller was assessed to extract lead (Pb) and cadmium (Cd) from contaminated soil by adding a mixture of arbuscular mycorrhizae and ammonium fosfonitrate as N source. The experiment involved 12 treatments with a randomized block design with 5 replications. Treatments were derived from a combination of four concentrations of micorrizae (0,4,8 y 12 g·EU) and three fertilizer concentrations (0, 90 y 180 mg·kg⁻¹). The pollution sources used were unique concentrations of lead (800 mg·kg⁻¹) and cadmium (74 mg·kg⁻¹). The quantification of the content of metals in different organs of the cactus was performed by atomic absorption. *Opuntia ficus-indica* has the ability to extract lead and cadmium from contaminated soils and translocate them to other organs, being the root the one that has the highest concentration of the contaminant followed by the 'penca madre' and the shoots. His phytoextractor ability is not conditioned by the mycorrhizal and fertilizer factors, being that in treatments devoid of these factors both metal concentrations were above of those obtained with concentrations of micorrizae and fertilizer. Significant differences between treatments for the biomass production were obtained, the concentration 4 g·EU was the one that produced more biomass. Regarding to the Bioaccumulation Index (BAI) for the lead, the treatment with the highest BAI was devoid of mycorrhizae and fertilizer (1.04) while for cadmium the treatment 8-90 was the best (3.16). *Opuntia ficus-indica* has the natural ability to retain and remove heavy metals from soil.

Keywords: *Opuntia ficus-indica*, phytoextraction, heavy metals, bioaccumulation.

¹ Tesista

² Director de tesis

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	vi
INDICE DE CUADROS	ix
INDICE DE FIGURAS	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVO GENERAL	5
III. HIPÓTESIS	5
IV. REVISIÓN DE LITERATURA	6
4.1. Generalidades	6
4.2. Estudios relacionados con la fitoextracción en suelos contaminados con metales pesados	7
4.3. Metales pesados	10
4.3.1. Plomo (Pb)	11
4.3.1.1. El plomo en la corteza terrestre	11
4.3.1.2. Daños a la salud humana	12
4.3.2. Cadmio (Cd)	13
4.3.2.1. El cadmio en la corteza terrestre	14
4.3.2.2. Daños a la salud humana	14
4.4. Fitorremediación	15
4.4.1. Fitodegradación o Fitotransformación	16
4.4.2. Fitoestimulación	16
4.4.3. Fitovolatilización	17
4.4.4. Fitoestabilización	17
4.4.5. Fitoextracción o fitoacumulación	18
4.4.6. Rizofiltración	18
4.5. Nopal <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller	19
4.5.1. Clasificación taxonómica	20
4.5.2. Descripción física	20
4.5.3. Longevidad	21
4.5.4. Condiciones de desarrollo	21
V. METODOLOGÍA	22
5.1. Localización del Área experimental	22
5.2. Procedencia del material vegetal y sustrato	22

5.3.	Diseño experimental	23
5.4.	Establecimiento del experimento	24
5.5.	Colecta y análisis de las muestras.....	24
5.6.	Análisis de las variables de estudio. Cuantificación de Cd y Pb en raíz y cladodios de nopal 25	
5.7.	Análisis estadístico.....	26
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
6.1.	RAÍZ	27
6.1.1.	Concentración de Plomo.....	27
6.1.2.	Concentración de Cadmio.....	30
6.1.3.	Biomasa	34
6.1.3.1.	Peso fresco	34
6.1.3.2.	Peso seco.....	38
6.2.	CLADODIO O PENCA MADRE	43
6.2.1.	Concentración de Plomo.....	43
6.2.2.	Concentración de Cadmio.....	46
6.2.3.	Biomasa	51
6.2.3.1.	Peso Fresco	51
6.2.3.2.	Peso Seco	55
6.3.	BROTES.....	59
6.3.1.	Concentración de Plomo.....	59
6.3.2.	Concentración de Cadmio.....	63
6.3.2.1.	Primer Brote	63
6.3.2.2.	Segundo Brote	66
6.3.3.	Biomasa	69
6.4.	FACTOR DE BIOACUMULACIÓN.....	82
6.4.1.	Factor de Bioacumulación de Plomo	82
6.4.2.	Factor de Bioacumulación de Cadmio	85
6.5.	FACTOR DE TRANSLOCACIÓN	86
6.5.1.	Factor de translocación de Plomo.....	86
6.5.2.	Factor de translocación de cadmio	88
VII.	CONCLUSIONES	91
VIII.	LITERATURA CITADA.....	92

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Matriz de tratamientos.....	23
Cuadro 2. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Pb (mg·kg ⁻¹) encontrada en la raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	28
Cuadro 3. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Cd (mg·kg ⁻¹) encontrada en la raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	31
Cuadro 4. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la concentración de Cd (mg·kg ⁻¹) encontrada en la raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.....	32
Cuadro 5. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa radical (peso fresco) de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.....	36
Cuadro 6. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa radical (peso seco) de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.....	41
Cuadro 7. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Pb (mg·kg ⁻¹) encontrada en la penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	44
Cuadro 8. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la concentración de Cd (mg·kg ⁻¹) encontrada en penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	47
Cuadro 9. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Fertilizante respecto a la concentración de Cd (mg·kg ⁻¹) encontrada en penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	48
Cuadro 10. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Cd (mg·kg ⁻¹) encontrada en la penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	49
Cuadro 11. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa (peso fresco) en penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.....	53
Cuadro 12. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa (peso seco) en penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.....	57
Cuadro 13. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Pb (mg·kg ⁻¹) encontrada en los brotes de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.....	60

Cuadro 14. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la concentración de Plomo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en brotes de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	62
Cuadro 15. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en el primer brote de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	64
Cuadro 16. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en el segundo brote de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	67
Cuadro 17. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa (peso fresco) en brotes de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	70
Cuadro 18. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa (peso seco) en brotes de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller.	74
Cuadro 19. Factor de bioacumulación de plomo por parte de <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller contrastado con la concentración del contaminante en el suelo.	84
Cuadro 20. Factor de bioacumulación de cadmio por parte de <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller contrastado con la concentración del contaminante en el suelo.	85
Cuadro 21. Factor de translocación de plomo por parte de <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller.....	87
Cuadro 22. Índice de translocación de cadmio por parte de <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller.	88

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Concentraciones de Pb ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.....	29
Figura 2. Concentraciones de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.....	33
Figura 3. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de la raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.	35
Figura 4. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de la raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.	37
Figura 5. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de la raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.	40
Figura 6. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de la raíz de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.	42
Figura 7. Concentraciones de Pb ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.	45
Figura 8. Concentraciones de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.	50
Figura 9. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de la penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.	52
Figura 10. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de la penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.....	54
Figura 11. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de la penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras	

diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.	56
Figura 12. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de la penca madre de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.....	58
Figura 13. Concentraciones de Pb ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en brotes <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.....	61
Figura 14. Concentraciones de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el primer brote <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.....	65
Figura 15. Concentraciones de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en segundos brotes <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.....	68
Figura 16. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de los brotes de <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.	71
Figura 17. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de los brotes de <i>Opuntia ficus-indica</i> (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.....	72
Figura 18. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de los brotes de <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.	75
Figura 19. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de los brotes de <i>O. ficus-indica</i> (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.	76

I. INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, pues contribuye en gran medida con el desarrollo económico del país al suministrar insumos a una serie de industrias (construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica). Debido al desarrollo y modernización de los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en México ha generado durante decenios una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país (Volke-Sepulveda y Velasco-Trejo, 2002).

En general, todas las etapas que incluye un proceso minero (exploración, explotación, beneficio, fundición y refinación), con excepción de la prospección, la cual implica estudios preliminares, generan problemas ambientales de impacto fuerte. En todas las etapas se generan aguas residuales, residuos peligrosos y, en algunos casos, emisiones a la atmósfera (Volke-Sepulveda y Velasco-Trejo, 2002).

La producción minera en México se concentra en doce entidades: Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco (Volke-Sepulveda y Velasco-Trejo, 2002). En particular la Comarca Lagunera (varios municipios de Coahuila y Durango) se caracteriza por ser una región donde la industria minera

contribuye de manera importante en la economía estatal. A ella se asocia un aporte al Producto Interno Bruto (PIB) del 3.8% en el estado de Coahuila para el año 2009; mientras que a nivel nacional su aporte llegó a ser de 8% para el mismo periodo (INEGI, 2011).

De acuerdo al área de influencia de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo (URUZA-UACH) ubicada cerca del poblado de Bermejillo Durango, es de particular interés el impacto ambiental ocasionado por la deposición de residuos de los procesos de explotación de la Planta Minera “La Platosa”, establecida a 5 km al NE del poblado consignado. Dicha planta tiene una producción de entre 25,000 y 50,000 ton de mineral y los registros de fundición indican leyes de 0.35 a 1.75 g ton⁻¹ de Oro; 3,000 a 3,750 g/t de Plata; 30% a 40% de Plomo y 2% a 12% de Zinc (EIA “La Platosa”, 2004).

Por ello, la explotación de los recursos mineros y la consiguiente deposición irregular de los residuos producto de los procesos de extracción y refinación trae como consecuencia la extracción de cantidades grandes de materiales potencialmente tóxicos para la biota en general, además de la contaminación del suelo por esos agentes.

Una práctica efectiva en la extracción y remoción de cualquier tipo de elemento potencialmente tóxico es la llamada biorremediación. Esta se realiza en sitios contaminados con cualquier tipo de elemento potencialmente tóxico. El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias entre otros) para degradar,

transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos y, por consiguiente, de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía (van Deuren *et al.*, 1997).

El proceso de biorremediación incluye reacciones de óxido-reducción, sorción e intercambio iónico e, incluso, reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales (Eweis *et al.*, 1998).

La biorremediación puede involucrar organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), realizarse *in situ* o *ex situ*, así como en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis *et al.*, 1998)

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos. También puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*. Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación y la fitoestabilización (van Deuren *et al.*, 1997; Hutchinson *et al.*, 2001).

Por la problemática de contaminación edáfica y mal manejo de residuos por parte de la actividad minera, es de importancia vital realizar prácticas de descontaminación y recuperación de los suelos aledaños a la planta minera “La Platosa” con el fin de restaurar y preservar el equilibrio ambiental, así como la prevención de riesgos de envenenamiento o intoxicación de la población que habita cerca de la Planta; ello puede lograrse por medio del uso de recursos

fitogenéticos adaptados a las condiciones de aridez, herbivoría y enfermedades que se presentan en el área de estudio y que, además, presenten un crecimiento rápido y una producción alta de biomasa. En este contexto, *Opuntia ficus-indica* L. reúne todas las características anteriormente mencionadas y puede fungir como una planta modelo con capacidad de acumular o extraer aquellos compuestos potencialmente tóxicos contenidos en los suelos contaminados, lo cual se traduce como una práctica ambientalmente amigable.

II. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller para extraer plomo (Pb) y cadmio (Cd) de suelo contaminado, al adicionar una mezcla de micorrizas arbusculares comerciales y fosfonitrato de amonio como fertilizante.

III. HIPÓTESIS

Los individuos de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller al crecer en suelos tratados con concentraciones mayores de micorrizas y de fertilizante inorgánico nitrogenado (NH_4NO_3) presentan una capacidad de bioacumulación de metales pesados (Cd y Pb) mayor que los tratados con concentraciones menores.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Generalidades

La actividad minera produce prosperidad en las zonas donde se lleva a cabo, pero indudablemente tiene un impacto ambiental considerable, siendo el suelo el ente natural que sufre el mayor impacto debido a la alteración a la que es sujeto como resultado de dicha actividad.

Una de las anomalías biogeoquímicas, que se genera al momento de la extracción, es el aumento de la cantidad de microelementos en el suelo convirtiéndolos a niveles de macroelementos los cuales afectan negativamente la biota y calidad de suelo; así se afecta también el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo y se inhibe la descomposición de la materia orgánica del suelo (Wong, 2003).

Los suelos afectados por una explotación minera contienen todo tipo de materiales residuales, escombros estériles, elementos potencialmente tóxicos, entre otros. Esto representa problemas graves para el desarrollo de la cubierta vegetal. Dentro de los principales impactos a los que es sometido el suelo por la actividad minera son: clase textural desequilibrada, ausencia de agregados (sin estructura edáfica), propiedades químicas anómalas, disminución o desequilibrio del contenido de nutrientes elementales, ruptura de los ciclos biogeoquímicos, profundidad efectiva limitada, dificultad de enraizamiento,

capacidad de cambio reducida, retención de agua limitada y presencia de compuestos tóxicos (García y Dorronsoro, 2002).

Concentraciones excesivas de metales en el suelo podrían tener impactos sobre la calidad de los alimentos, seguridad de la producción de cultivos y salud del medio ambiente, ya que se mueven a través de la cadena alimenticia vía consumo de plantas por animales y humanos. Los metales acumulados en la superficie del suelo se reducen lentamente mediante la lixiviación, el consumo por las plantas, la erosión y dispersión por corrientes de aire (Gulson *et al.*, 1996; citado por Puga *et al.*, 2006).

4.2. Estudios relacionados con la fitoextracción en suelos contaminados con metales pesados

En general, el uso de tecnologías de biorremediación para el tratamiento de sitios contaminados con metales pesados es reciente y, por lo tanto, el conocimiento que se tiene acerca de plantas que puedan ser utilizadas para este propósito además de que estén adaptadas a zonas áridas es aún muy limitado, en particular especies vegetales del género *Opuntia*. A continuación se hará una breve mención solo de aquellas investigaciones en las que se ha utilizado especies adaptadas a zonas áridas.

Castillo-Bravo *et al.* (2006) al estudiar la absorción de metales pesados (Hg, Cd, Pb, Cr, As y Fe) por *O. ficus-indica* en suelos de Tlaxcala contaminados,

obtuvieron que esta planta es capaz de acumular arsénico, cromo, cadmio, plomo. Para los casos de mercurio y fierro, ellos concluyeron que no existe una absorción eficiente.

Ortiz-Cano *et al.* (2009) evaluaron la capacidad fitoextractora del quelite (*Amaranthus hybridus* L.) al adicionar concentraciones graduales de un consorcio micorrízico en suelos contaminados con plomo y cadmio. Ellos encontraron que la adición de micorrizas incrementó significativamente ($P<0.05$) la concentración de Pb y Cd en raíz, tallo y hoja de quelite. Las concentraciones de estos metales se incrementaron significativamente conforme la edad de la planta.

Landeros-Márquez *et al.* (2011) estudiaron el uso potencial del huizache (*Acacia farnesiana* L. Will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo. Ellos consideraron en sus tratamientos diversas dosis de nitrógeno en forma de fosfonitrato. Encontraron que las dosis de nitrógeno y las concentraciones de plomo en tratamientos separados no produjeron diferencias significativas en la tasa fotosintética de las plantas de huizache, pero la interacción entre esos dos factores fue estadísticamente significativa ($P=0.0074$); la mayor acumulación de plomo ocurrió en la parte aérea de la planta con una media de $352.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Trejo-Calzada *et al.* (2006) evaluaron los niveles de contaminación con plomo en suelos aledaños a una planta fundidora de metales en Bermejillo, Dgo. Ellos encontraron que las concentraciones de este metal en el suelo estuvieron dentro del rango de 24 a 1774 mg·kg⁻¹ suelo. Así, ellos definieron que estos suelos tienen problemas serios de contaminación.

Trejo-Calzada *et al.* (2009) analizaron la capacidad fitoextractora del trompillo (*Solanum elaeagnifolium*) en suelos contaminados con plomo y cadmio al adicionar fertilizante nitrogenado. Ellos encontraron que la fertilización nitrogenada no tuvo un efecto importante sobre la acumulación de plomo o cadmio en los órganos de trompillo (hoja, tallo, raíz y fruto). La concentración de plomo en los tejidos de la planta estuvo entre 3.83 y 6.92 ppm, en tanto que la concentración de cadmio varió de 0.21 a 0.32 ppm.

Sánchez-Viveros *et al.* (2004) estudiaron la tolerancia adaptativa de Hongos Micorrízicos Arbusculares (HMA) al crecer en sustratos contaminados con As y Cu. Ellos concluyeron que las esporas pueden participar en la disminución de biodisponibilidad y estabilización de Cu en el suelo, además de las hifas y sus compuestos como la glomalina. Los resultados muestran que los HMA son componentes microbianos que influyen la biodisponibilidad de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) y son afectados por estos, por lo que es importante que se consideren dentro de los estudios de tolerancia de plantas y

en las prácticas de recuperación biológica de suelos contaminados por EPT, después de una selección de especies adaptadas.

Ramos-Cortez (2012) estudió la capacidad fitoextractora de *Opuntia ficus-indica* con respecto a plomo y cadmio en tratamientos adicionados con micorrizas y nitrato de amonio. Ella encontró que el potencial fitoextractor de la planta aumenta cuando al sistema radicular de la planta está asociado con micorrizas.

Hernández-Herrera (2010) estudió la capacidad fitoextractora de *Opuntia megacantha* con respecto a plomo en tratamientos adicionados con fosfonitrato. Encontró que la fertilización nitrogenada no incide de forma significativa en el incremento en las concentraciones de este metal por parte de cladodios jóvenes. Aunado a esto, hace mención a que *O. megacantha* es una planta exclusora.

4.3. Metales pesados

Los metales pesados se definen como un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta (igual o mayor a $5 \text{ g}\cdot\text{cm}^3$) y cierta toxicidad para el ser humano (Lozet y Mathieu, 1991; citados por Duffus, 2002). Lo que hace tóxicos a los metales pesados no son sus características esenciales, sino las concentraciones en las que pueden presentarse y, aún más

importante, el tipo de compuesto que forman en un medio determinado. Es importante mencionar que los seres vivos “necesitan” (en pequeñas concentraciones) muchos de éstos elementos para funcionar adecuadamente. Ejemplos de metales requeridos por el organismo incluyen al cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio y zinc ya que son componentes indispensables de sistemas bioquímicos (Lemke, 1993; citado por Garza-González, 2005). También participan en algunas funciones celulares como cofactores enzimáticos, colaboradores en el proceso de estabilización de ribosomas y como parte de la estructura de algunos polímeros celulares (Shankar y Prasad, 1998) pero a concentraciones elevadas presentan efectos tóxicos, causan daño e incluso muerte celular (Volesky, 2001).

4.3.1. Plomo (Pb)

El plomo (Pb) es un metal pesado (densidad relativa o gravedad específica de 11.4 s a 16°C) de color gris azulado, suave y maleable. El Pb posee gran densidad y punto de fusión pequeño y es usado en varios procesos industriales. También, el Pb posee una densidad de 11.4 g·ml lo que lo convierte en un metal denso, tóxico y acumulativo; su número atómico es 82, mientras que su peso atómico es 207.19 g·mol (Ubillus-Limo, 2003; Lenntech, sf).

4.3.1.1. El plomo en la corteza terrestre

El plomo existe naturalmente en la corteza terrestre, de donde es extraído y procesado para usos diversos.

La corteza terrestre contiene cantidades muy pequeñas de plomo, aproximadamente $2 \times 10^{-5}\%$. El Pb se encuentra en forma especial, principalmente en los depósitos minerales. El mineral principal del plomo es la galena o sulfuro de plomo, del que se concentra y luego se refina el plomo metálico.

Otra fuente importante de plomo en la atmosfera es el depositado por las expulsiones de lava meteórica, cuerpos que producen gran cantidad de partículas y aerosoles. Todos estos materiales se consideran fuentes naturales de Pb ya que no interviene la acción del hombre (Ubillus-Limo, 2003).

4.3.1.2. Daños a la salud humana

Cuando el plomo es ingerido, inhalado o absorbido por la piel resulta ser muy tóxico para los seres vivos en general y para los humanos en particular. Se sospecha que es tóxico para los sistemas endócrino, cardiovascular, respiratorio, inmunológico, neurológico y gastrointestinal; además puede afectar la piel y los riñones. El plomo no es biodegradable y persiste en el suelo, aire, agua y hogares. Nunca desaparece sino que se acumula en los sitios en los que se deposita y puede llegar a envenenar a generaciones de niños y adultos a menos que sea retirado (Valdés-Perezgasga y Cabrera-Morelos, 1999).

La exposición al plomo, aún a niveles pequeños, afecta a cualquier ser vivo. Particularmente en los humanos, el plomo en cantidades muy pequeñas interfiere con el desarrollo del sistema neurológico, causa crecimiento retardado

y problemas digestivos. En casos extremos causa convulsiones, colapsos e incluso la muerte (Valdés-Perezgasga y Cabrera-Morelos, 1999).

Las fuentes de contaminación por plomo son múltiples e incluyen a las fundidoras, fábricas de baterías, algunas pinturas, la loza de barro vidriado cocida a cierta temperatura y las gasolinas con tetraetilo de plomo (las cuales se dejaron de usar en México en 1997). En nueve sistemas de clasificación de riesgo citados por el Fondo para la Defensa Ambiental (Environmental Defense Fund), el plomo aparece como un material más peligroso que la mayoría de los productos químicos. El Pb se considera dentro del 10% de los materiales más peligrosos para la salud humana (Valdés-Perezgasga y Cabrera-Morelos, 1999).

4.3.2. Cadmio (Cd)

El Cadmio (Cd) es un elemento químico relativamente raro con número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil de color blanco con un ligero matiz azulado. Es más blando y maleable que el zinc, pero poco más duro que el estaño. Su peso atómico es de 112.40 g·mol y su densidad relativa de 8.65 g·ml a 20°C (68°F). Su punto de fusión de 320.9°C (610°F) y de ebullición de 765°C (1410°F) son menores a los del zinc (Lenntech, sf).

4.3.2.1. El cadmio en la corteza terrestre

El cadmio no se encuentra en estado libre en la naturaleza. La greenockita (sulfuro de cadmio) es el único mineral de cadmio y no es una fuente comercial de este metal. Casi todo el Cd que se produce es obtenido como subproducto de la fundición y refinamiento de los minerales de zinc, los cuales contienen de 0.2 a 0.4%. Aunque el cadmio se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre, sus proporciones son pequeñas. La actividad volcánica es la mayor fuente natural de liberación de cadmio hacia la atmosfera (Lenntech, sf).

4.3.2.2. Daños a la salud humana

El cuerpo humano no necesita cadmio en forma alguna. El cadmio es dañino en dosis muy pequeñas. El envenenamiento por cadmio produce osteoporosis, enfisema pulmonar, cáncer de pulmón, cáncer de próstata, hipertensión, diversas cardiopatías y retraso en la habilidad verbal de los niños (Valdés-Perezgasga y Cabrera-Morelos, 1999).

El cadmio está presente en suelos contaminados, algunas tuberías antiguas, pinturas (sobre todo de color rojo, amarillo y naranja) y plásticos. El cadmio puede ser adquirido al comer polvo contaminado, usar utensilios de plástico en la alimentación, inhalar humo de tabaco e ingerir agua contaminada (Valdés-Perezgasga y Cabrera-Morelos, 1999).

Las medidas preventivas contra el envenenamiento por cadmio giran en torno a evitar su ingesta. Es recomendable incrementar los hábitos de higiene en las zonas donde exista este metal en el polvo, no fumar, beber

preferentemente agua purificada y usarla para cocinar y lavarse los dientes, evitar el uso de utensilios de plástico para preparar, guardar o servir alimentos, evitar el consumo de mariscos y vísceras pues acumulan cadmio. También es conveniente ingerir megadosis de vitamina C (varios gramos al día), alimentos ricos en bioflavonoides (centeno germinado, polen de abeja, por ejemplo), levadura de cerveza que contiene el complejo B y selenio (Valdés-Perezgasga y Cabrera-Morelos, 1999).

4.4. Fitorremediación

El término fitorremediación hace referencia a una serie de tecnologías que se basan en el uso de plantas para limpiar o restaurar ambientes contaminados, como aguas, suelos e incluso aire. Es un término relativamente nuevo, acuñado en 1991. Se compone de dos palabras: *fito*, que en griego significa planta o vegetal, y *remediar* (del latín *remediare*), que significa poner remedio al daño, corregir o enmendar algo. Fitorremediación significa remediar un daño por medio de plantas o vegetales (Núñez-López *et al.*, 2004).

De manera que la fitorremediación puede definirse como una tecnología sustentable que se basa en el uso de plantas para reducir *in situ* la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos de suelos, sedimentos, agua y aire. Esta reducción de contaminantes puede ser a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización,

degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes (Núñez-López *et al.*, 2004).

En los últimos años se ha generado una terminología nueva basada en el papel que tienen las plantas durante el proceso de remediación, así como de los principales mecanismos involucrados (Núñez-López *et al.*, 2004).

4.4.1. Fitodegradación o Fitotransformación

La fitodegradación se basa en el uso de plantas para degradar o transformar diversos tipos de contaminantes orgánicos como hidrocarburos aromáticos polinucleares, hidrocarburos totales del petróleo, plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), compuestos clorados, explosivos y surfactantes (detergentes) a sustancias menos tóxicas. A través de reacciones enzimáticas que llevan a cabo las plantas y microorganismos en la rizósfera, dichos contaminantes son parcial o completamente degradados o transformados. De esta manera son asimilados por las plantas y secuestrados en sus vacuolas o fijados en estructuras celulares insolubles, como la lignina (Núñez-López *et al.*, 2004).

4.4.2. Fitoestimulación

En el caso de la fitoestimulación, los exudados de las raíces de las plantas estimulan el crecimiento de microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos. Como parte de sus actividades metabólicas y fisiológicas, las plantas liberan azúcares simples, aminoácidos, compuestos

alifáticos y aromáticos, nutrientes, enzimas y oxígeno. Luego los transportan desde sus partes superiores hasta sus raíces para favorecer el desarrollo de comunidades microbianas en el suelo circundante; en particular hongos y bacterias, cuyas actividades metabólicas causan la mineralización de los contaminantes (Núñez-López *et al.*, 2004).

4.4.3. Fitovolatilización

Algunas plantas son capaces de volatilizar ciertos contaminantes, como mercurio y selenio contenidos en suelos, sedimentos o agua. Tales contaminantes son absorbidos, metabolizados, transportados desde su raíz a sus partes superiores y liberados a la atmósfera en formas volátiles, menos tóxicas o relativamente menos peligrosas en comparación con sus formas oxidadas. La transformación de dichos elementos se efectúa básicamente en la raíz y su liberación se lleva a cabo durante la transpiración (Núñez-López *et al.*, 2004).

4.4.4. Fitoestabilización

En la fitoestabilización, se involucran plantas que desarrollan un sistema radicular denso para reducir la biodisponibilidad de metales y otros contaminantes en el ambiente por medio de mecanismos de secuestro, lignificación o humidificación. Las plantas ejercen un control hidráulico en el área contaminada, es decir, actúan como una bomba solar que succiona humedad de los suelos debido a sus tasas elevadas de evapotranspiración. Puesto que este proceso mantiene también una humedad constante en la zona

de la rizósfera, se presentan las condiciones adecuadas para la inmovilización de los metales (Núñez-López *et al.*, 2004).

Esto ocurre a través de reacciones químicas como la precipitación o formación de complejos insolubles o por mecanismos físicos, como la adsorción. En la rizósfera, los metales se fijan fuertemente en las raíces de las plantas o en la materia orgánica de los suelos, limitando así su biodisponibilidad y su migración vertical hacia los mantos freáticos (Núñez-López *et al.*, 2004).

4.4.5. Fitoextracción o fitoacumulación

En la fitoextracción o fitoacumulación se explota la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje, las cuales pueden ser cosechadas fácilmente. Los contaminantes extraídos son principalmente metales pesados, aunque también puede extraerse cierto tipo de contaminantes orgánicos y elementos e isótopos radiactivos. En general, los sistemas de fitoextracción se implementan para extraer metales de suelos contaminados por medio de plantas conocidas como metalofitas, es decir, acumuladoras de metales; sin embargo, también pueden implementarse para tratar aguas residuales (Núñez-López *et al.*, 2004).

4.4.6. Rizofiltración

La rizofiltración se basa exclusivamente en hacer crecer, en cultivos hidropónicos, raíces de plantas terrestres con una tasa importante de crecimiento y un área superficial grande para absorber, concentrar y precipitar

metales pesados de aguas residuales contaminadas (Núñez-López *et al.*, 2004).

Como se puede apreciar, las estrategias de fitorremediación hacen referencia a los mecanismos predominantes realizados por las propias plantas, pero también, en algunos casos, indican el papel que tienen las comunidades microbianas durante el proceso de remediación. Así, es evidente que la fitorremediación es un proceso complejo que involucra la participación de la comunidad microbiana asociada a su sistema radicular (Núñez-López *et al.*, 2004).

Cada una de las estrategias tiene condiciones particulares, determinadas principalmente por el tipo de contaminante y el sustrato a tratar: suelos, sedimentos o agua. En general, las medidas correctivas para contaminantes orgánicos incluyen la fitodegradación (o fitotransformación) y la fitoestimulación; mientras que para los metales pesados, incluidos los metaloides, radionúclidos y ciertos tipos de contaminantes orgánicos, se aplican la fitovolatilización, la fitoestabilización, la fitoextracción y la rizofiltración (Núñez-López *et al.*, 2004).

4.5. Nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller

Opuntia ficus-indica es la especie de cactácea más importante en la economía mexicana. El nopal (*O. ficus-indica*) se cultiva con diversos propósitos en el mundo, mientras que en México, principal productor y consumidor mundial, particularmente se consume como verdura (nopalitos). En México se

cultivan alrededor de 11,000 ha con esta especie (Vanegas-Rico *et al.*, 2010), obteniendo rendimientos de cerca de 683 000 ton de nopalitos por año (SIAP, 2008).

4.5.1. Clasificación taxonómica

El nopal pertenece a la familia Cactaceae comúnmente conocidas como cactáceas o cactus. Las cactáceas son plantas que caracterizan los paisajes mexicanos, se distribuyen principalmente en las zonas áridas aunque una gran diversidad de especies se encuentra en las zonas tropicales, subtropicales y templadas. En México se encuentra el mayor número de géneros y especies de toda América; vale la pena mencionar que de las 1600 especies que forman esta familia, en México habitan 1088 (Ríos-Ramos y Quintana Miranda, 2004).

4.5.2. Descripción física

Opuntia ficus-indica casi no tiene espinas. Es un vegetal arborescente de 3 a 5 m de alto, su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de diámetro. Forma artículos oblongos (Pencas o Cladodios) de 30 a 60 cm de largo x 20 a 40 cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor (Ríos-Ramos y Quintana Miranda, 2004). Los cladodios del nopal y especialmente los brotes tiernos o nopalitos, por lo general, tienen un contenido elevado de agua que es lo que conforma los rendimientos grandes; por ello, los cladodios son considerados como una fuente importante de agua para la fauna en las nopaleras silvestres. El contenido de agua puede variar dependiendo de la variedad, las condiciones ambientales y/o

del manejo del cultivo, pero en términos generales es 95% de agua (i.e. 5% de materia seca). Los cladodios presentan de 20 a 30 estomas por mm^2 , fijando el CO_2 durante la noche vía el metabolismo ácido de las crasuláceas (Pimienta *et al.*, 1992; citado por Vázquez-Alvarado *et al.*, 2008).

4.5.3. Longevidad

La longevidad promedio de las plantaciones de nopal es de 5 a 7 años y alcanzan, algunas veces, hasta 10 años con rendimientos aceptables. En terrenos apropiados y suelos con pH neutro y prácticas constantes de cultivo, sin problema de plagas, el nopal puede llegar a vivir hasta 80 años con rendimientos de 80 a 90 $\text{t ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Ríos-Ramos y Quintana Miranda, 2004).

4.5.4. Condiciones de desarrollo

El cultivo de nopal es tolerante a sequías. Además, requiere una temperatura media anual de 16-28°C, una precipitación pluvial media anual de 150-1800 mm y altitud de 800- 1800 msnm. En general, los rangos mencionados se refieren a condiciones óptimas de desarrollo del nopal; sin embargo, el nopal puede proliferar en otras condiciones ambientales (Ríos-Ramos y Quintana Miranda, 2004).

V. METODOLOGÍA

5.1. Localización del Área experimental

El experimento se estableció en el vivero de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo (URUZA-UACH) en Bermejillo, Durango. Sus coordenadas geográficas son 25° 53' 31.99" latitud norte, 103° 36' 11.23" longitud oeste; mientras que su altitud media es de 1,117 msnm.

5.2. Procedencia del material vegetal y sustrato

Sesenta cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) fueron colectados en el predio del Centro Regional Universitario del Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicado en Zacatecas, Zac., México. Antes de ser plantados, los cladodios fueron colocados en un lugar al aire libre y protegidos de la incidencia directa de los rayos del sol durante un periodo de 2 semanas; esto con el fin de permitir que la herida del corte cicatrizara y así evitar una infección del tejido vegetal por medio de hongos y bacterias presentes en el ambiente.

También se colectó suelo superficial (0-30 cm) del ejido "La Victoria" ubicado en el municipio de Mapimí, Dgo., México.

5.3. Diseño experimental

Los 12 tratamientos involucrados se establecieron al considerar un diseño de bloques al azar, con cinco repeticiones. Los tratamientos fueron el producto de los factores dosis de micorrizas y dosis de fertilizante nitrogenado. Como fuente de micorrizas se utilizó el producto comercial PHC ORTIC PLUS® que contiene la mezcla de micorrizas (*Entrophospora columbiana*, *Glomus intraradices*, *G. etunicatum* y *G. clarum*). Los niveles del factor dosis de micorrizas fueron: 0, 4, 8 y 12 g·UE. Mientras que la fuente de fertilizante usada fue fosfonitrato [(90% Nitrato de amonio (NH_4NO_3) + 10% de Ácido Fosfórico (H_3PO_4))]; sus niveles fueron: 0, 90 y 180 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Como fuente contaminante del suelo se utilizaron las sales metálicas nitrato de plomo [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] con una única dosis de 800 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y cloruro de cadmio (CdCl_2) con una dosis de 74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Los tratamientos se conformaron como se aprecia en el cuadro 1 [60 unidades experimentales (UE)].

Cuadro 1. Matriz de tratamientos.

Tratamiento	Micorrizas (g·UE)	NH_4NO_3 ($\text{mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$)
1	0	0
2	0	90
3	0	180
4	4	0
5	4	90
6	4	180
7	8	0
8	8	90
9	8	180
10	12	0
11	12	90
12	12	180

5.4. Establecimiento del experimento

Para la preparación de cada una de las unidades experimentales (UE), 11 kg de suelo fueron colocados en cada maceta. Inmediatamente después, un cladodio fue plantado al enterrar la tercera parte de su longitud en cada maceta. Una semana después, el suelo se contaminó con las sales metálicas de Cloruro de Cadmio y Nitrato de Plomo. Luego que transcurrieron 3 semanas, tiempo suficiente para que los cladodios produjeran raíces, las dosis de micorrizas se aplicaron alrededor de los cladodios a una distancia de 2 cm y una profundidad de 5 a 10 cm. Una semana después, las dosis de fertilizante fueron aplicadas en la periferia interior de las macetas a una profundidad de 5 a 10 cm. Los riegos se aplicaron dos veces por semana, al considerar un litro de agua en cada ocasión en cada una de las UE.

5.5. Colecta y análisis de las muestras

El experimento se mantuvo durante un periodo de 14 meses. Transcurrido este tiempo, las plantas fueron extraídas y separadas en raíz, penca madre, primeros y segundos brotes. Cada parte de la planta fue lavada con agua destilada para los análisis posteriores.

Una vez limpias, el peso fresco de cada parte de la planta fue registrado. Hecho esto, cada sección de la planta se dejó secar al aire libre por un periodo de 3 días, para posteriormente deshidratarlas totalmente en la estufa a 65°C hasta llegar a peso constante y así obtener el valor de la materia seca. Una vez

que las muestras estuvieron secas, se molieron en licuadora, lavando los utensilios entre muestras para evitar una contaminación.

5.6. Análisis de las variables de estudio. Cuantificación de Cd y Pb en raíz y cladodios de nopal

El proceso de cuantificación se desarrolló con base en la NOM-117-SSA1-1994, la cual establece los métodos de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica. Para ello se pesa 1 g de muestra previamente secada y molida, 10 mL de ácido nítrico concentrado son añadidos y se inicia la digestión de las muestras, las cuales se llevan a sequedad en placa de calentamiento hasta cenizas para luego ser calcinadas en mufla a una temperatura de 550°C durante toda la noche o como mínimo 6 horas. Transcurrido este tiempo, las paredes del crisol son lavadas con 2 mL de ácido nítrico al 50% para luego colocarse nuevamente en placa de calentamiento a 120°C con el fin de remover el exceso de ácido. Las cenizas son re disueltas completamente en 5 mL de ácido clorhídrico 1 N y los crisoles enjuagados con dos alícuotas de 5 mL de ácido clorhídrico 1 N. Las muestras son filtradas con papel Whatman No. 2, antes de la determinación.

La cuantificación de los metales pesados se realizó por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica *FAAS Perkin Elmer AAnalyst 700*, por medio de método de flama en los laboratorios de Agua, Suelo y Planta del

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmosfera del INIFAP (CENID-RASPA-INIFAP).

5.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el Paquete Estadístico SPSS v. 18 y el Paquete Estadístico FAUANL de Diseños Experimentales versión 1.0. Los análisis de varianza y pruebas de medias de Tukey fueron efectuados para los tratamientos y cada una de las variables (concentración de Cd, Pb, peso fresco y peso seco) presentes en raíz, cladodio madre y brotes.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. RAÍZ

6.1.1. Concentración de Plomo

Según los análisis de varianza y pruebas de medias (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$), las diferencias entre los 12 tratamientos fueron no significativas estadísticamente en cuanto a la concentración del metal. No se observa una tendencia clara de si las micorrizas y/o fertilizante promueven la concentración. No obstante, resulta importante mencionar que la concentración mayor de Pb en la raíz de *O. ficus-indica* se asocia al tratamiento 1 o control ($731.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), es decir a las unidades experimentales sin suministro de micorrizas y fertilizante (Cuadro 2, Figura 1).

Ramos-Cortez (2012) en un estudio similar, encontró una tendencia clara de que a mayor adición de micorrizas y fertilizante, mayor sería la extracción del metal contaminante. Por otro lado, las concentraciones máximas de Pb en raíz de *O. ficus-indica* reportadas por esta autora las produjo el tratamiento 5-150 (micorrizas-fertilizante), con una concentración mayor a los $0.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Asimismo, Ortiz-Cano *et al.* (2009) encontraron que la adición de micorrizas incrementó significativamente ($P<0.05$) las concentraciones de Pb y Cd en raíz, tallo y hoja de quelite (*Amaranthus hybridus* L.).

Cuadro 2. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Pb ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en la raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat	Tratamiento (Pb-Cd-Mico-Fert)	n	$\bar{x}$	DE	ES	Min	Max
1	800-74-0-0	5	731.8	284.84	127.73	307.7	1012.95
2	800-74-0-90	5	456	239.32	107.32	119	678.45
3	800-74-0-180	5	467.41	174.48	78.24	299.95	735.45
4	800-74-4-0	5	263.68	303.29	136	0	751.95
5	800-74-4-90	5	508.38	194.56	87.25	288.3	787.95
6	800-74-4-180	5	489.93	154.99	69.50	341.05	737.95
7	800-74-8-0	5	555.7	197.20	88.43	375.9	791.95
8	800-74-8-90	5	472.12	167.49	75.11	305.25	748.95
9	800-74-8-180	5	681.94	232.66	104.33	454.4	1039.95
10	800-74-12-0	5	508.11	263.49	118.16	230.05	941.45
11	800-74-12-90	5	553.33	298.57	133.89	146.8	902.95
12	800-74-12-180	5	536.46	119.38	53.54	414.45	666.95

n= tamaño de muestra; $\bar{x}$ = media; DE= Desviación Estándar; ES= Error Estándar; Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo

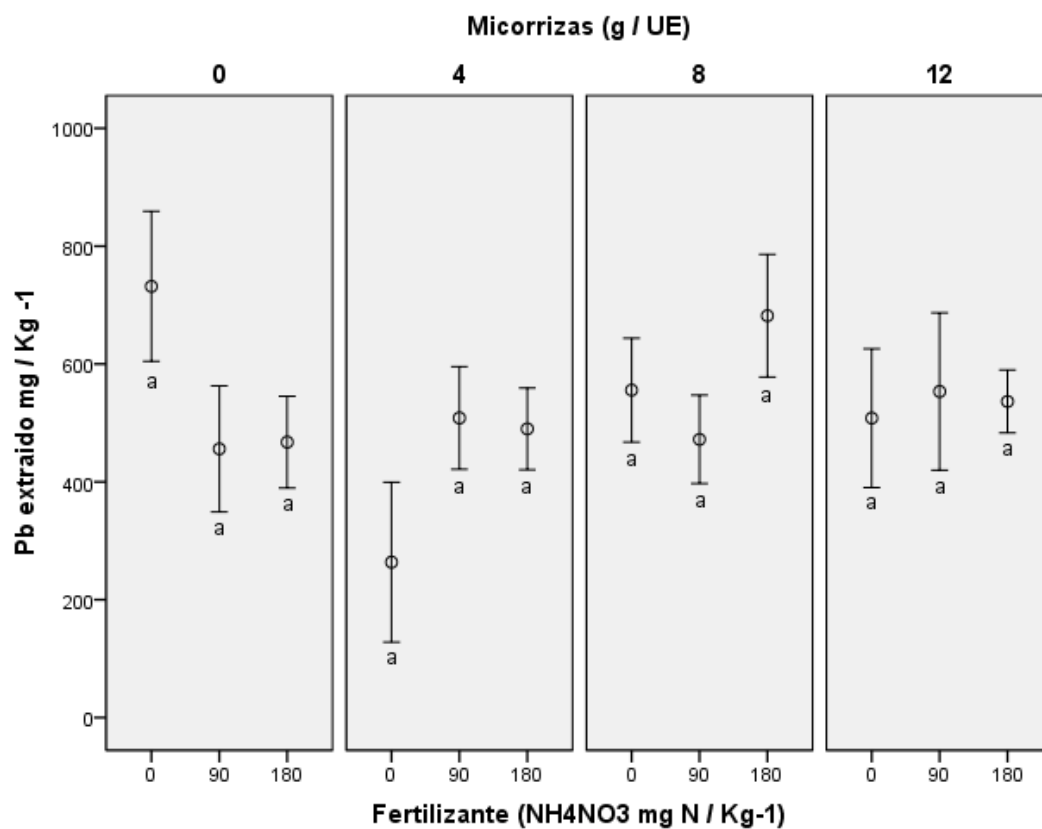


Figura 1. Concentraciones de Pb ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) en raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.

6.1.2. Concentración de Cadmio

Según los análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$), las diferencias entre tratamientos fueron no significativas en cuanto a la concentración del metal (Cuadro 3, Figura 2). Sin embargo, específicamente para el factor micorrizas si se registraron diferencias significativas ($F=7.018$, g.l.=3, 48, $P=0.001$). A las dosis de 12, 0 y 8 g·UE se asociaron las concentraciones mayores (187.47, 183.63 y 182.38 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente) (Cuadro 4). Es importante mencionar que tanto en los tratamientos desprovistos de micorrizas como en aquellos con la máxima concentración de estas, los valores fueron similares; ello sugiere que la adición de micorrizas no favorece, en gran medida, la extracción de cadmio por parte de la raíz de *O. ficus-indica*, pues su concentración no se incrementa de manera significativa. Por su parte, al factor dosis de fertilizante no se asociaron diferencias significativas ($F=0.350$, g.l.=2,48, $P=0.706$).

Ramos-Cortez (2012) en su estudio con *O. ficus-indica* encontró diferencias significativas entre sus tratamientos, obteniendo un valor máximo de concentración de Cd de aproximadamente 100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ registrado para el tratamiento de 2.5 g (micorrizas) y 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (fertilizante). Aunado a esto, es importante hacer mención que en los tratamientos desprovistos de micorrizas los rangos de extracción obtenidos por esta autora oscilan entre 60 y 80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, valores menores a los obtenidos en este estudio. Lo anterior puede ser atribuido a las condiciones en las que se estableció el experimento, ya que ella

mantuvo su ensayo en condiciones de invernadero, diferentes a las condiciones de este trabajo realizado al aire libre.

Cuadro 3. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en la raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat	Tratamiento (Pb-Cd-Mico-Fert)	n	$\bar{x}$	DE	ES	Min	Max
1	800-74-0-0	5	176.55	89.54	40.15	79.85	316.25
2	800-74-0-90	5	172.57	91.24	40.91	89.7	325.65
3	800-74-0-180	5	201.77	96.58	43.31	96.75	360.7
4	800-74-4-0	5	68.74	46.82	20.99	3.45	122.75
5	800-74-4-90	5	93.98	50.59	22.69	59.9	181.25
6	800-74-4-180	5	98.7	9.58	4.29	86.75	110.8
7	800-74-8-0	5	139.16	82.67	37.07	71.7	243.8
8	800-74-8-90	5	214.75	107.63	48.22	99.7	377.2
9	800-74-8-180	5	193.23	67.90	30.45	123.05	296.35
10	800-74-12-0	5	212.8	27.17	12.18	180.6	253.6
11	800-74-12-90	5	184.37	59.66	26.76	81.9	232.15
12	800-74-12-180	5	165.26	55.51	24.89	87.6	238.55

n= tamaño de muestra; $\bar{x}$ = media; DE= Desviación Estándar; ES= Error Estándar; Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo

Cuadro 4. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en la raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto	
		1	2
4	15	87.14	
8	15		182.38
0	15		183.63
12	15		187.47

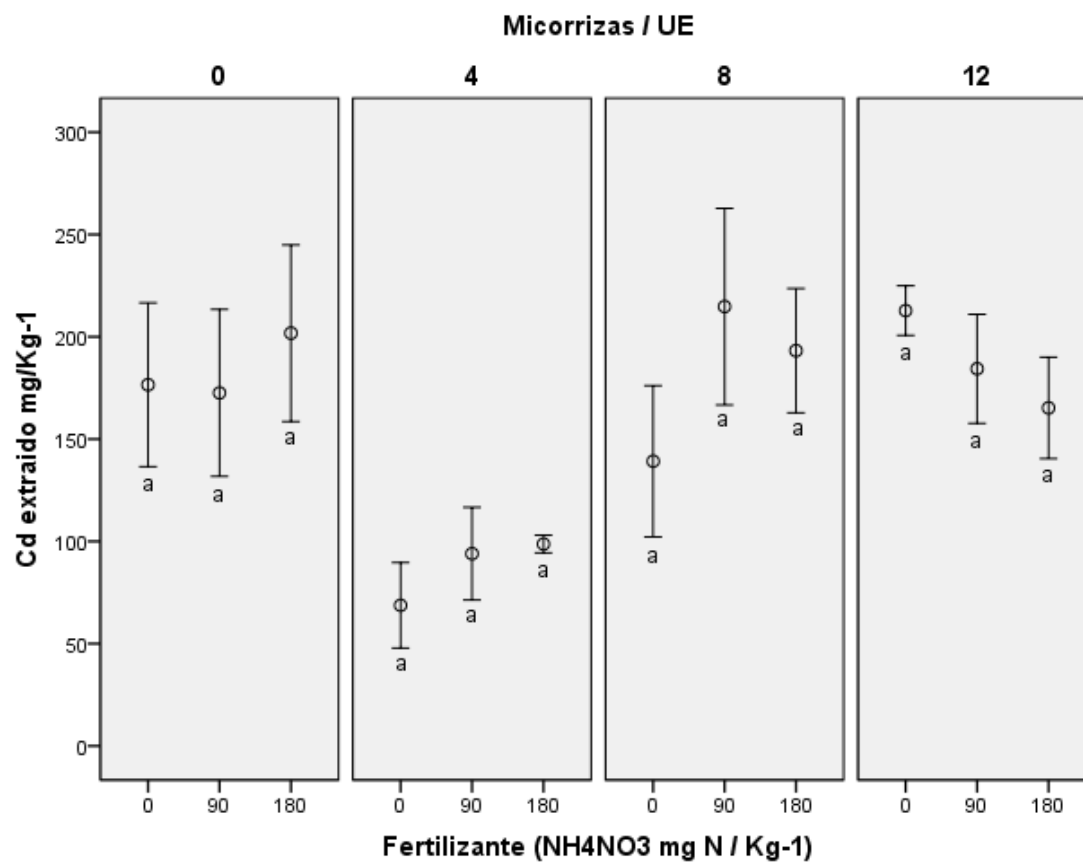


Figura 2. Concentraciones de Cd ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) en raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.

6.1.3. Biomasa

6.1.3.1. Peso fresco

Con respecto a la producción de biomasa radical al menos hubo dos tratamientos con efectos medios diferentes estadísticamente (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$). Tres grupos de tratamientos fueron identificados (Figura 3). El factor micorrizas presentó deferencias significativas en la prueba de comparación de medias ($F=7.713$, g.l.=3, 48, $P = 0.0001$) (Cuadro 5); es decir, incide de forma importante en el desarrollo del sistema radical. Por su parte, el factor dosis de fertilizante no indujo diferencias significativas ($F=0.626$, g.l.=2,48, $P=0.539$). La carencia de un efecto significativo de interacción indica que el efecto de las diferentes dosis de micorrizas sobre la producción de biomasa radicular fue el mismo para las cantidades de fertilizante involucradas ($F=0.466$, g.l.=6,48, $P=0.83$).

Los tratamientos cuya concentración de micorrizas fue de 4 g·UE en cualquiera de sus combinaciones con el fertilizante propiciaron una producción de biomasa radical mayor a 70 g (Figura 4). Por su parte, Ramos-Cortez (2012), no encontró efectos apreciables de las dosis de micorrizas sobre el incremento de biomasa radical, e inclusive, la producción mayor (mayor a 30 g de peso fresco) se asoció al tratamiento testigo.

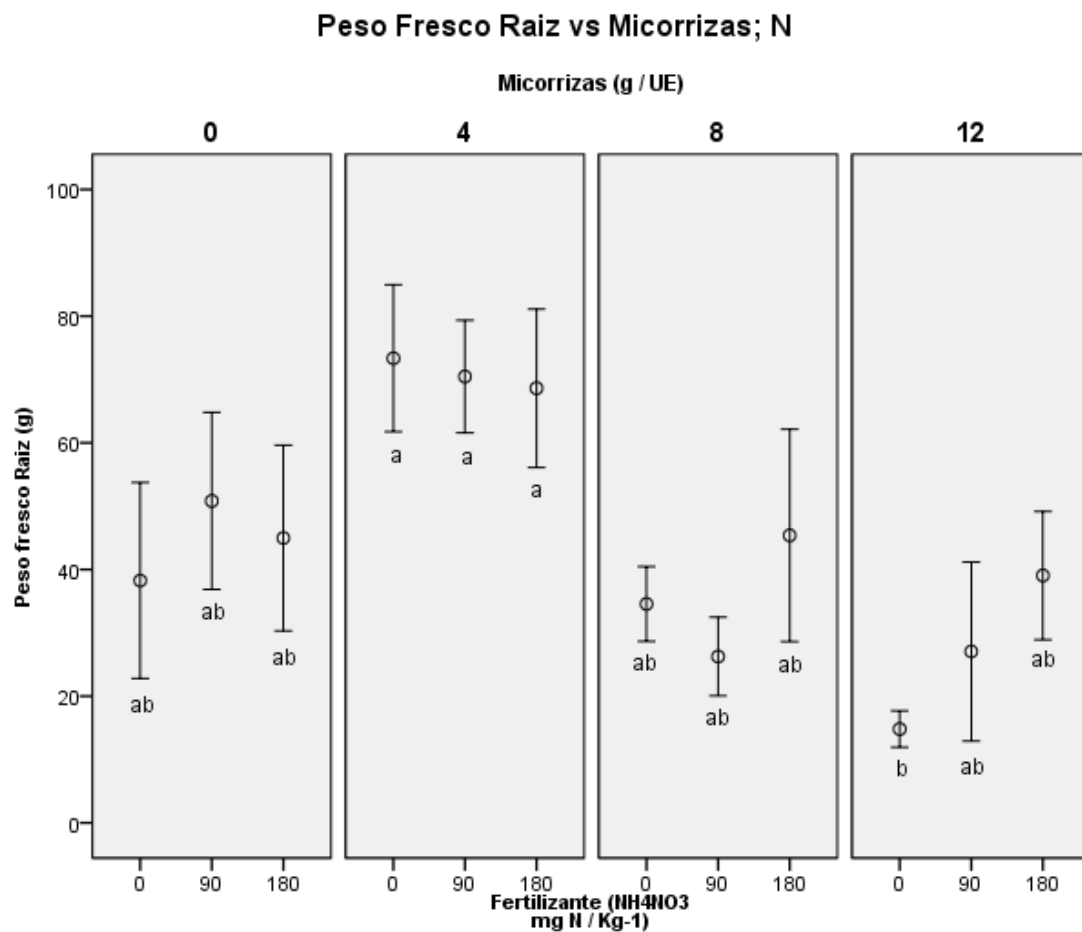


Figura 3. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de la raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha= 0.05$) entre los tratamientos.

Cuadro 5. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa radical (peso fresco) de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto	
		1	2
12	15	26.97	
8	15	35.40	
0	15	44.68	
4	15		70.81

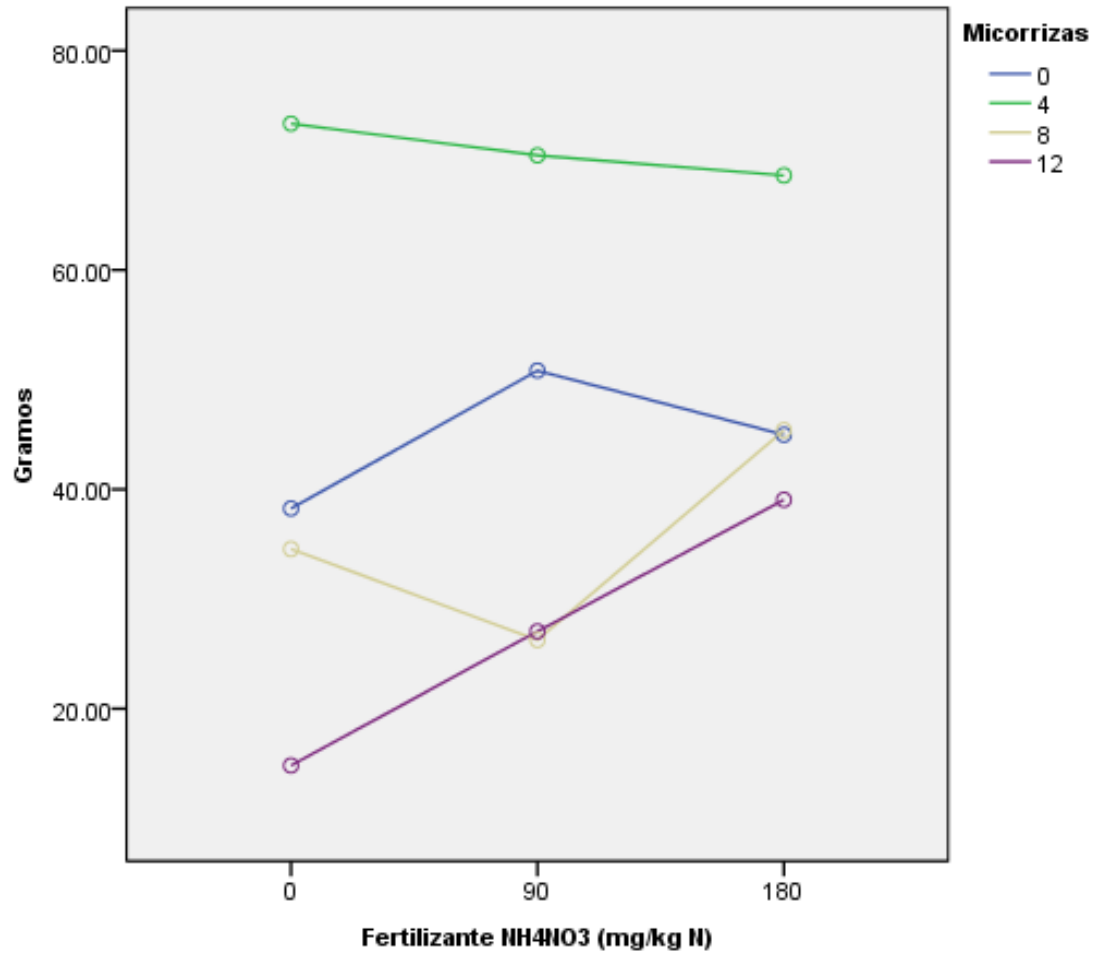


Figura 4. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de la raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presenta diferencias significativas entre sus dosis.

El efecto de los tratamientos provistos con la concentración 4 g·UE de micorrizas sobre la producción de biomasa coincide con lo reportado por Díaz-Franco *et. al.* (2008), quienes al estudiar el efecto de la micorriza *Glomus intraradices* sobre la productividad de sorgo encontraron un 18% más de biomasa producida por unidades experimentales tratadas con micorrizas que con respecto al testigo (sin micorriza).

6.1.3.2. Peso seco

El análisis de varianza sugiere que al menos dos tratamientos tuvieron efectos diferentes con respecto a la producción de biomasa radical con base en peso seco. La prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) identifica a 5 grupos de tratamientos (Figura 5). Una tendencia clara de que el factor micorrizas incide en una mayor producción de biomasa radical es apreciable ($F=13.04$, g.l.=3, 48, $P = 0.000$) (Cuadro 6). Ramos-Cortez (2012) mencionó que, en su caso, el factor nitrógeno fue el que presentó diferencias y atribuyó el incremento de la cantidad de peso seco a las dosis de fertilizante incorporado al suelo más que a la adición de micorrizas.

A la concentración de 4g de micorrizas se asocian los valores mayores de biomasa (con base en peso seco) (Figura 6). Ello sugiere que esta cantidad incidió de forma significativa sobre el desarrollo del sistema radical, mientras que al factor dosis de fertilizante no se asociaron diferencias significativas

($F=0.884$, g.l.=2,48, $P=0.420$). La carencia de un efecto significativo de interacción indica que el efecto de las diferentes dosis de micorrizas sobre la producción de biomasa radical fue prácticamente el mismo al considerar las cantidades de fertilizante involucradas ($F=0.519$, g.l.=6,48, $P=0.791$).

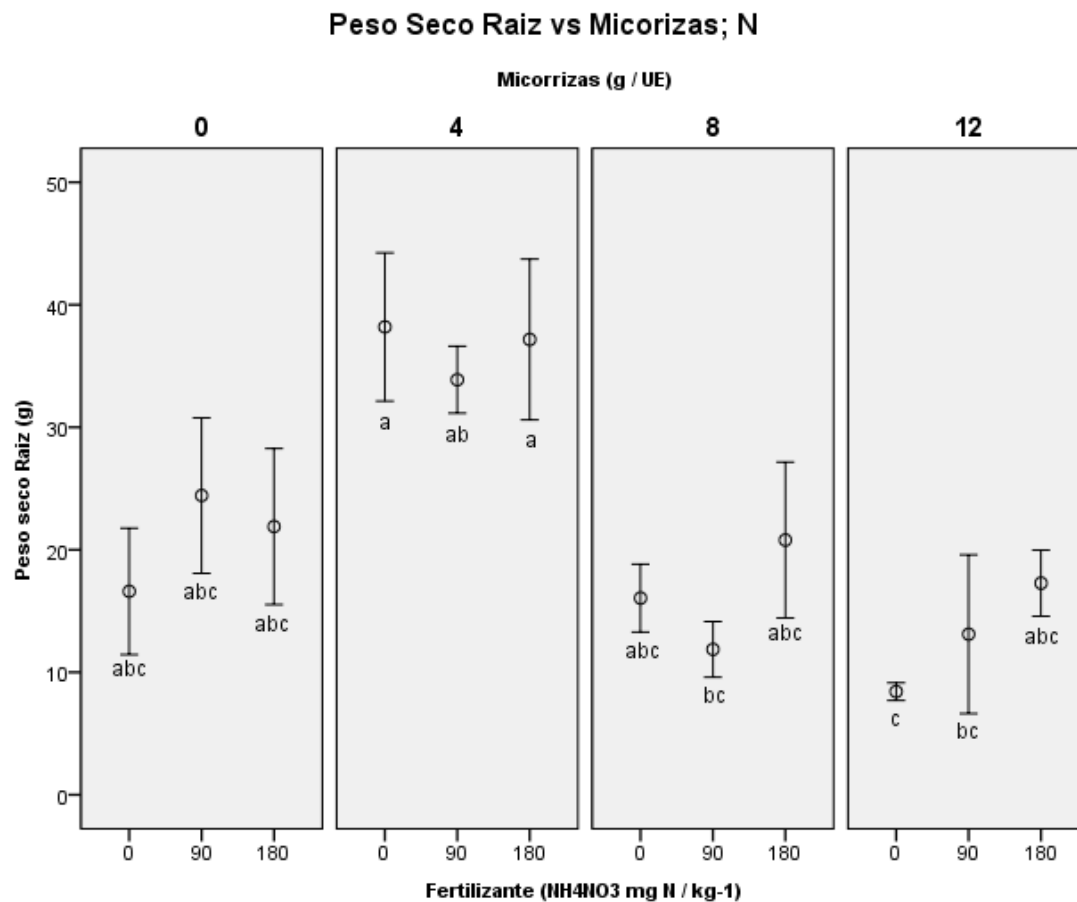


Figura 5. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de la raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.

Cuadro 6. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa radical (peso seco) de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto	
		1	2
12	15	12.94	
8	15	16.24	
0	15	20.98	
4	15		36.41

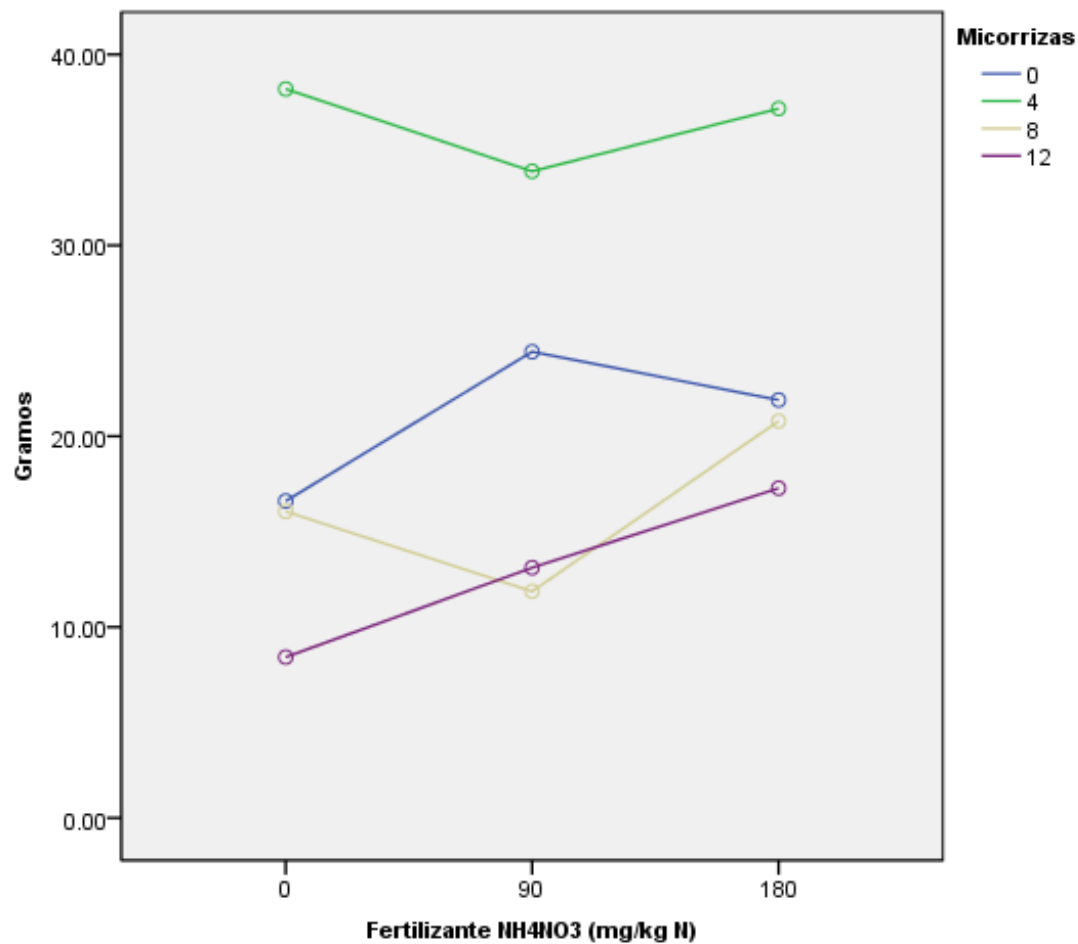


Figura 6. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de la raíz de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.

6.2. CLADODIO O PENCA MADRE

6.2.1. Concentración de Plomo

Según los análisis de varianza y pruebas de medias (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$), las diferencias entre los 12 tratamientos fueron no significativas estadísticamente en cuanto a la concentración del plomo (Figura 7). No se observa una tendencia clara de si el factor micorrizas y/o el factor fertilizante promueven incremento de la concentración. No obstante, resulta importante mencionar que los tratamientos que carecían del factor micorrizas registraron las medias con las concentraciones mayores (Cuadro 7). En particular, el tratamiento 3 presentó la concentración mayor en penca madre de *O. ficus-indica* ($90.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), es decir, a las unidades experimentales sin suministro de micorrizas pero con la concentración mayor de fertilizante. Lo anterior, sugiere que *O. ficus-indica* posee una capacidad natural para absorber y retener plomo en la penca madre, lo cual la hace una planta modelo atractiva con fines de remediación de sitios contaminados con plomo.

Ramos-Cortez (2012) en un estudio similar mencionó que las diferencias entre sus tratamientos fueron no significativas estadísticamente en cuanto a la concentración del plomo en penca madre de *O. ficus-indica*.

Cuadro 7. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Pb ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en la penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	n	$\bar{x}$	DE	ES	Min	Max
1	800- 74- 0- 0	5	87.45	30.19	13.54	48.45	133.15
2	800- 74- 0-90	5	86.41	17.36	7.79	68.95	112.2
3	800- 74- 0-180	5	90.96	21.86	9.80	53.7	109.7
4	800- 74- 4-0	5	73.46	6.75	3.03	65.85	84.1
5	800- 74- 4-90	5	73.01	5.52	2.48	65.2	80.3
6	800- 74- 4-180	5	72.87	29.72	13.33	31.75	106.95
7	800- 74- 8-0	5	62.7	36.63	16.43	0	94
8	800- 74- 8-90	5	54.32	32.30	14.48	0	86.4
9	800- 74- 8-180	5	74.89	12.17	5.46	60.1	94
10	800- 74- 12-0	5	83.8	23.92	10.72	53.95	115.85
11	800- 74- 12-90	5	63.93	13.33	5.96	54.15	86.55
12	800- 74- 12-180	5	85.5	48.99	21.97	43.3	163.35

n= tamaño de muestra; $\bar{x}$ = media; DE= Desviación Estándar; ES= Error Estándar; Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo

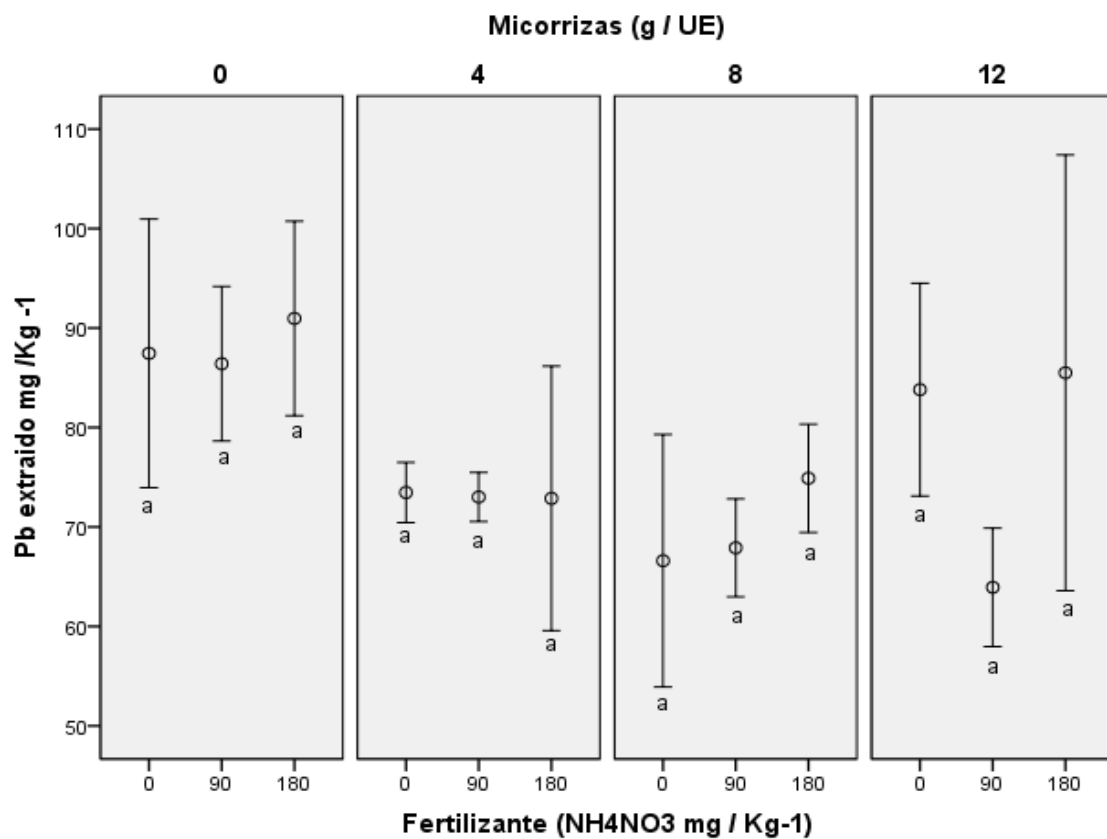


Figura 7. Concentraciones de Pb ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) en penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.

6.2.2. Concentración de Cadmio

Los análisis de varianza y pruebas de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$), sugieren que al menos dos tratamientos tuvieron efectos medios diferentes estadísticamente. Cinco grupos de tratamientos fueron identificados (Figura 8). El factor micorrizas presentó diferencias significativas en la prueba de comparación de medias ($F=8.286$, g.l.=3,48, $P=0.0001$) (Cuadro 8); es decir, incide de forma importante en la concentración de cadmio encontrada en la penca madre.

Por su parte, el factor dosis de fertilizante también presentó diferencias significativas ($F=3.408$, g.l.=2,48, $P=0.041$) (Cuadro 9). Las diferencias estadísticas entre las dosis de ambos factores sugieren que en las concentraciones mayores de fertilizante y micorrizas la concentración encontrada en la penca madre resultó ser mayor que en aquellas con dosis inferiores (Cuadro 10). Por otra parte, se observó una tendencia de las dosis de micorrizas a incrementar la concentración de cadmio presumiblemente con dosis mayores de fertilizante.

Cuadro 8. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto		
		1	2	3
4	15	6.80		
0	15	8.07	8.07	
8	15		9.90	9.90
12	15			11.06

Cuadro 9. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Fertilizante respecto a la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Fertilizante $\text{mg N}\cdot\text{kg}^{-1}$	n	Subconjunto	
		1	2
0	20	8.10	
90	20	8.64	8.64
180	20		10.13

Cuadro 10. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en la penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	n	$\bar{x}$	DE	ES	Min	Max
1	800- 74- 0- 0	5	7.41	1.39	0.62	6.05	8.85
2	800- 74- 0-90	5	8.02	1.27	0.57	5.85	8.95
3	800- 74- 0-180	5	8.79	3.93	1.76	5.6	14.6
4	800- 74- 4-0	5	5.95	1.49	0.67	3.4	7.05
5	800- 74- 4-90	5	6.93	1.42	0.64	5.35	8.8
6	800- 74- 4-180	5	7.51	2.05	0.92	4.75	10.35
7	800- 74- 8-0	5	7.6	2.38	1.07	5.1	11.45
8	800- 74- 8-90	5	10.04	2.83	1.27	6.7	13.45
9	800- 74- 8-180	5	12.06	1.84	0.83	9.5	13.9
10	800- 74- 12-0	5	11.44	4.52	2.03	6.85	17.3
11	800- 74- 12-90	5	9.58	2.23	1	7.65	12.25
12	800- 74- 12-180	5	12.17	2.84	1.27	8.6	15.8

n= tamaño de muestra; $\bar{x}$ = media; DE= Desviación Estándar; ES= Error Estándar; Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo

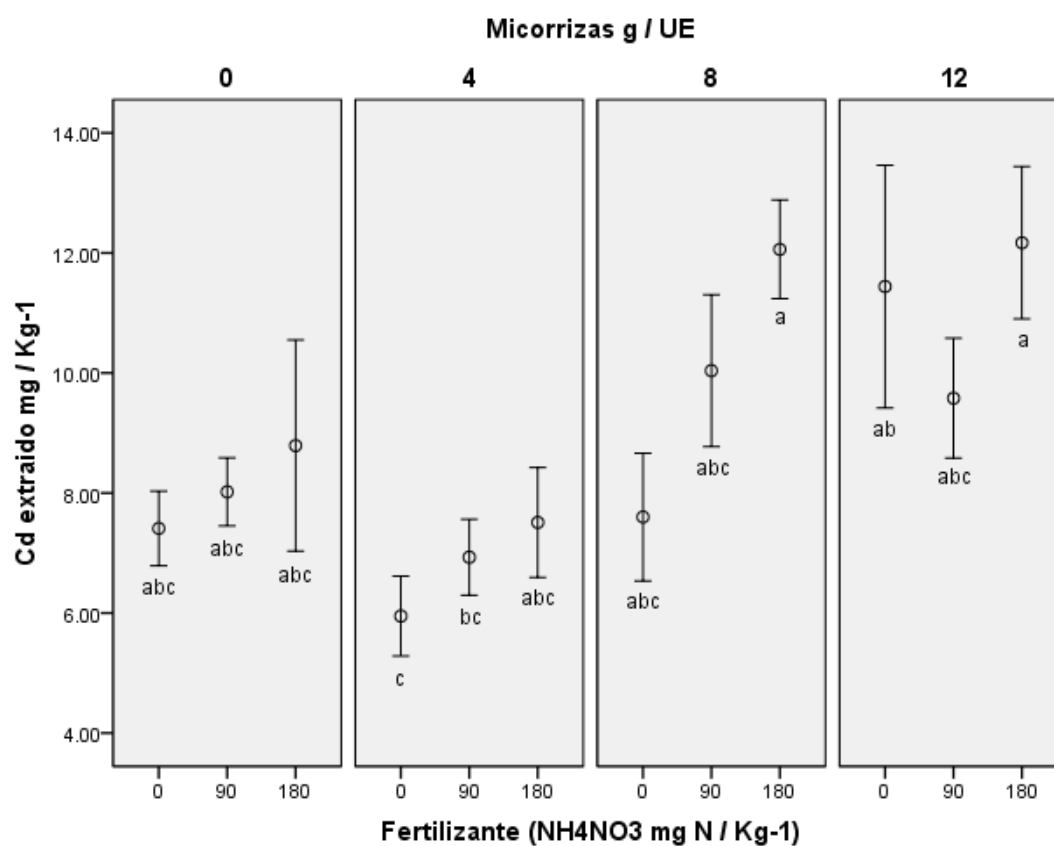


Figura 8. Concentraciones de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.

6.2.3. Biomasa

6.2.3.1. Peso Fresco

Según el análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$), las diferencias entre tratamientos fueron no significativas con respecto a la producción de biomasa en penca madre de *O. ficus-indica* (Figura 9). Sin embargo, específicamente para el factor micorrizas si se registraron diferencias significativas ($F=5.271$, g.l.=3, 48, $P=0.003$) (Cuadro 11), siendo la dosis 4 g·UE la que incidió de manera importante en la producción de biomasa. Por su parte, al factor fertilizante no se asociaron diferencias significativas ($F=0.582$, g.l.=2,48, $P=0.563$). La carencia de un efecto significativo de interacción indica que el efecto de las diferentes dosis de micorrizas sobre la producción de biomasa en penca madre fue el mismo para las cantidades de fertilizante involucradas ($F=0.667$, g.l.=6,48, $P=0.83$).

Los tratamientos cuya concentración de micorrizas fue de 4 g·UE en cualquiera de sus combinaciones con el fertilizante (Figura 10) propiciaron una producción de biomasa en penca madre mayor a 1200 g. Por su parte, Ramos-Cortez (2012) al igual que en esta investigación, no encontró efectos apreciables de sus tratamientos sobre la producción de biomasa en cladodios madre.

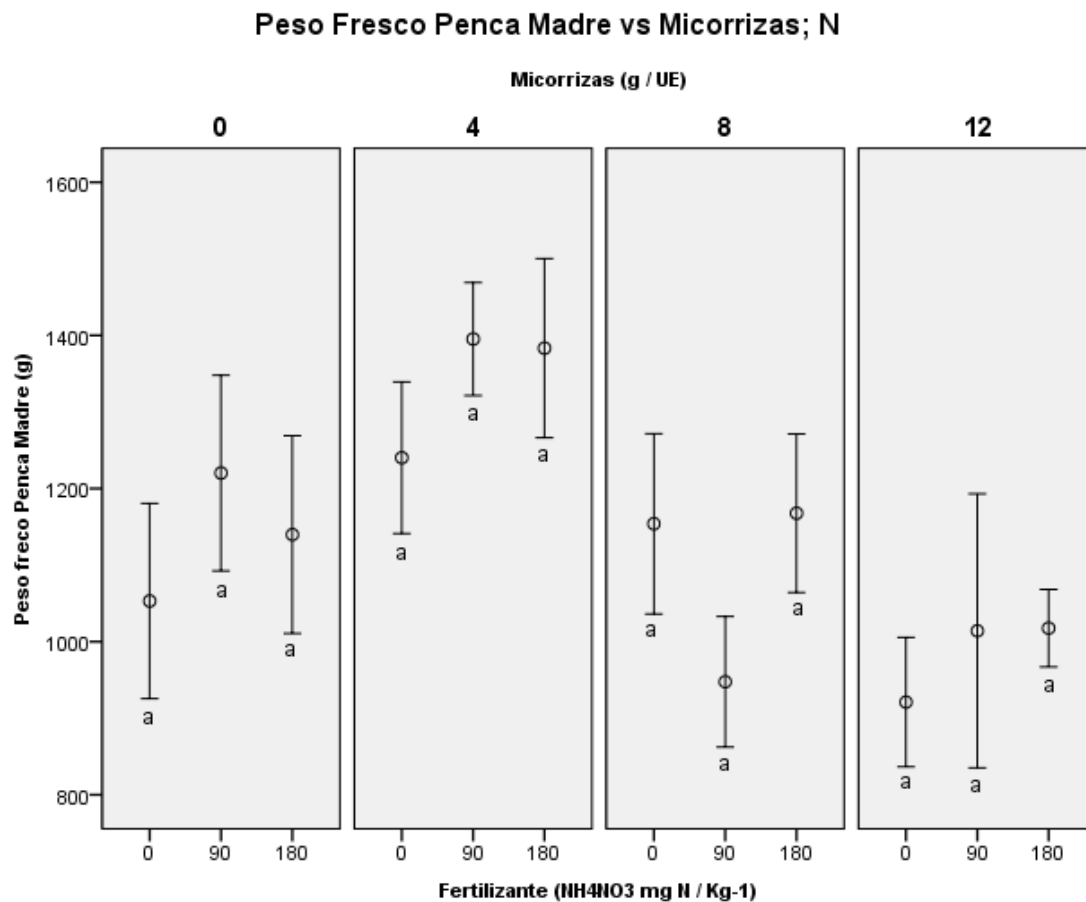


Figura 9. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de la penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.

Cuadro 11. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa (peso fresco) en penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto	
		1	2
12	15	984.26	
8	15	1089.78	
0	15	1137.71	1137.71
4	15		1339.60

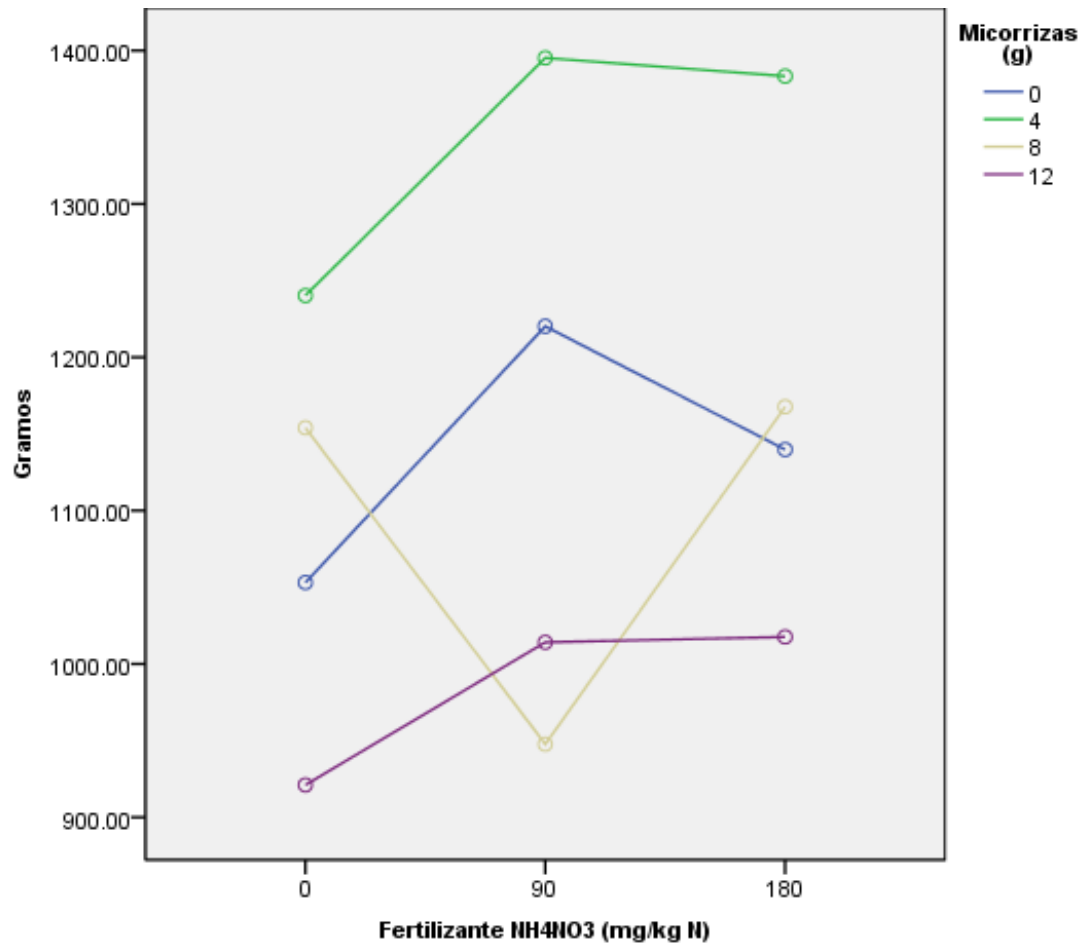


Figura 10. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de la penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.

6.2.3.2. Peso Seco

El análisis de varianza sugiere que al menos dos tratamientos tuvieron efectos diferentes con respecto a la producción de biomasa en peso seco de la penca madre. La prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) identifica a 5 grupos de tratamientos (Figura 11). Una tendencia clara de que el factor micorrizas incide en una mayor producción de biomasa es apreciable ($F = 13.26$, g.l. = 3, 48, $P = 0.0001$) (Cuadro 12).

A la concentración de micorrizas 4g·UE se asocian los valores mayores de biomasa (con base en peso seco) (Figura 12). Ello sugiere que esta cantidad incidió de forma significativa sobre el crecimiento de la penca madre, mientras que al factor dosis de fertilizante no se asociaron diferencias significativas ($F = 0.433$, g.l. = 2, 48, $P = 0.651$). La carencia de un efecto significativo de interacción indica que el efecto de las diferentes dosis de micorrizas sobre la producción de biomasa fue el mismo para las concentraciones de fertilizante ($F = 0.298$, g.l. = 6, 48, $P = 0.935$).

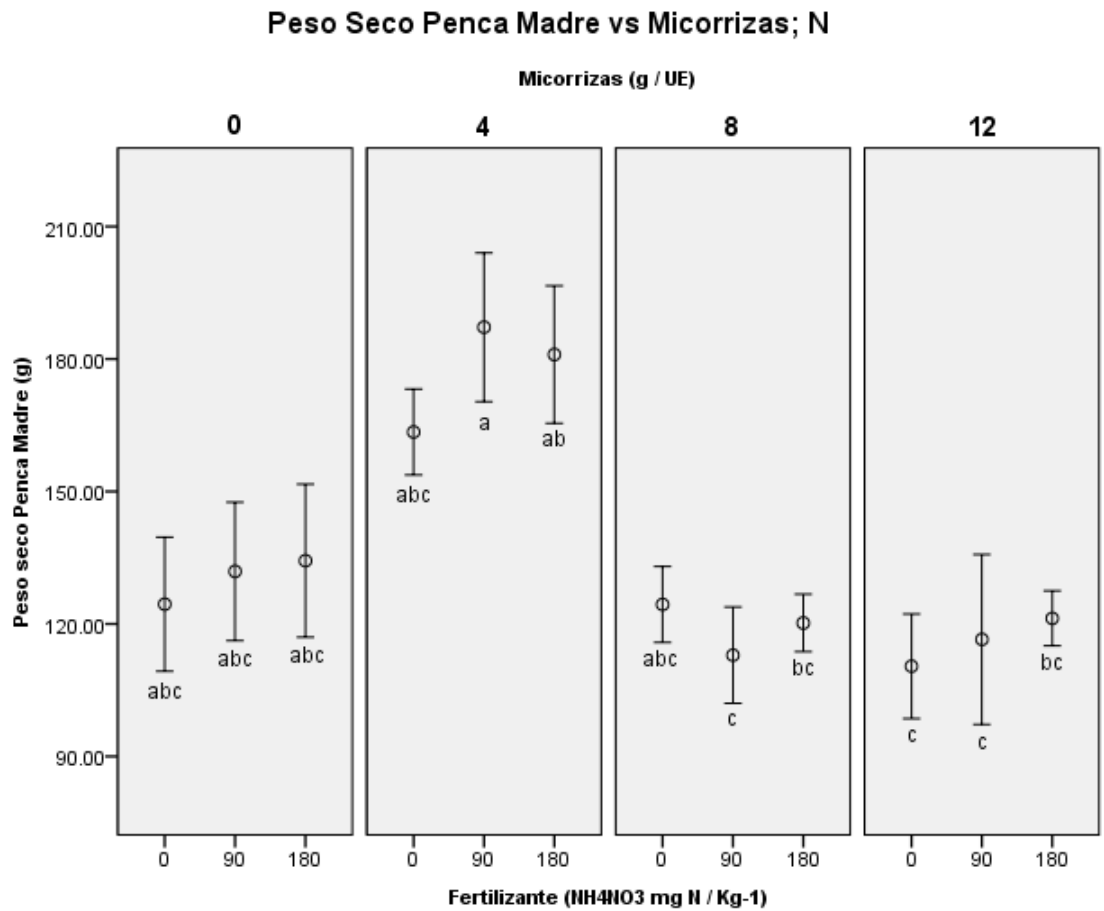


Figura 11. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de la penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.

Cuadro 12. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa (peso seco) en penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto	
		1	2
12	15	116.06	
8	15	119.18	
0	15	130.23	
4	15		177.22

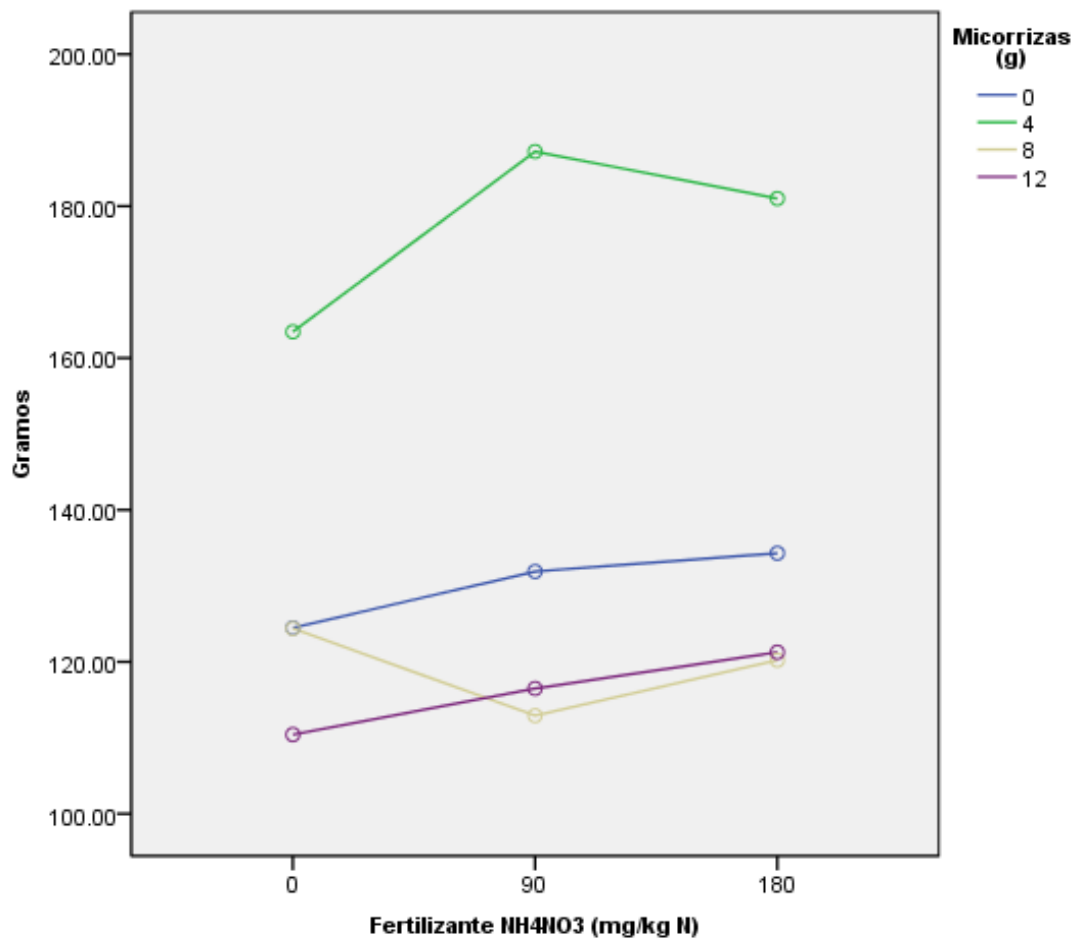


Figura 12. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de la penca madre de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.

6.3. BROTES

6.3.1. Concentración de Plomo

Según los análisis de varianza y pruebas de medias (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$), las diferencias entre tratamientos fueron no significativas en cuanto a la concentración del plomo (Figura 13 y Cuadro 13). Sin embargo, para el factor micorrizas sí se registraron diferencias significativas ($F=6.463$, g.l.= 3,48, $P=0.001$). A las dosis 4 y 0 g·UE se asociaron las concentraciones medias mayores de plomo en brotes (28.04 y 21.18 mg·kg⁻¹, respectivamente) (Cuadro 14). Lo anterior sugiere que la concentración de micorrizas 4 g·UE es la ideal para promover acumulación de plomo en brotes de *O. ficus-indica*, mientras que a mayores dosis la concentración de este metal tiende a disminuir.

Cuadro 13. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Pb ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en los brotes de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	N	$\bar{X}$	DE	ES	Min	Max
1	800- 74- 0- 0	5	13.09	12.71	5.70	0	25.5
2	800- 74- 0-90	5	31.47	20.87	9.36	13.95	64.3
3	800- 74- 0-180	5	18.97	14.01	6.28	0	39.25
4	800- 74- 4-0	5	29.94	32.85	14.73	0	84.95
5	800- 74- 4-90	5	28.35	8.22	3.69	15.85	38.75
6	800- 74- 4-180	5	25.83	32.82	14.72	0	80
7	800- 74- 8-0	5	10.98	10.65	4.77	0	23.65
8	800- 74- 8-90	5	9.6	10.11	4.53	0	23.67
9	800- 74- 8-180	5	2.69	6.02	2.70	0	13.45
10	800- 74- 12-0	5	3.38	7.56	3.39	0	16.9
11	800- 74- 12-90	5	3.24	7.24	3.25	0	16.2
12	800- 74- 12-180	5	6.56	8.99	4.03	0	16.8

n= tamaño de muestra; $\bar{X}$ = media; DE= Desviación Estándar; ES= Error Estándar; Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo

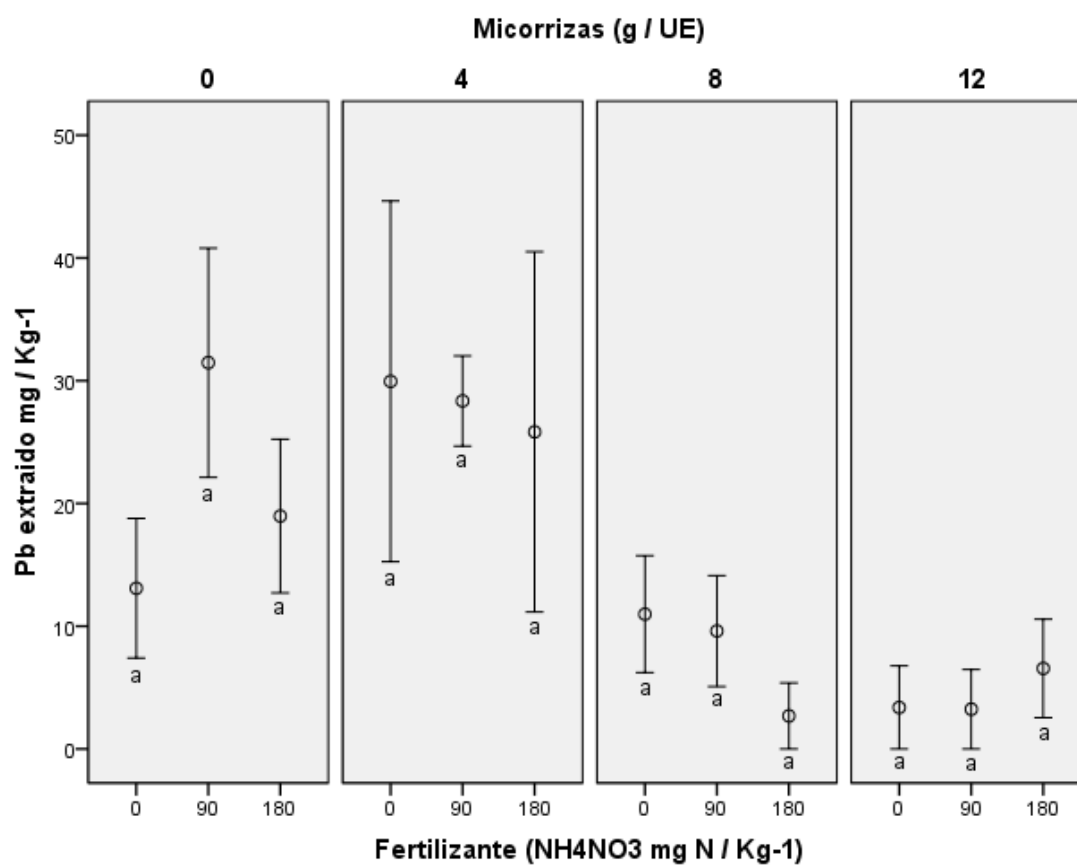


Figura 13. Concentraciones de Pb ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) en brotes *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.

Cuadro 14. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la concentración de Plomo ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en brotes de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto		
		1	2	3
12	15	4.39		
8	15	7.76	7.76	
0	15		21.18	21.18
4	15			28.04

6.3.2. Concentración de Cadmio

6.3.2.1. Primer Brote

Según los análisis de varianza y pruebas de medias (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$), las diferencias entre tratamientos fueron no significativas en cuanto a la concentración del cadmio (Figura 14). No obstante, es importante mencionar que de acuerdo a las medias, conforme las dosis de micorrizas aumentaron, la concentración de este metal en el primer brote también se incrementó (Cuadro 15). A las dosis de micorrizas 12 y 8 g·UE se asociaron las concentraciones mayores de cadmio con 9.09 y 8.15 mg·kg⁻¹, respectivamente.

Cuadro 15. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en el primer brote de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	n	$\bar{x}$	DE	ES	Min	Max
1	800- 74- 0- 0	5	5.13	2.61	1.17	2.85	9.6
2	800- 74- 0-90	5	7.75	4.13	1.85	3.75	14.75
3	800- 74- 0-180	5	7.65	1.61	0.72	5.15	9.6
4	800- 74- 4-0	5	7.07	1.35	0.61	4.9	8.25
5	800- 74- 4-90	5	6.76	2.99	1.34	2.5	9.45
6	800- 74- 4-180	5	9.18	3.92	1.76	4.75	14.85
7	800- 74- 8-0	5	6.87	2.95	1.32	3	10.5
8	800- 74- 8-90	5	9.31	2.55	1.15	7.05	13.45
9	800- 74- 8-180	5	8.29	1.07	0.48	6.75	9.65
10	800- 74- 12-0	5	9.37	1.91	0.85	6.25	11.3
11	800- 74- 12-90	5	6.98	3.23	1.45	3.55	12.3
12	800- 74- 12-180	5	10.92	4.80	2.15	6.1	17.65

n= tamaño de muestra; $\bar{x}$ = media; DE= Desviación Estándar; ES= Error Estándar; Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo

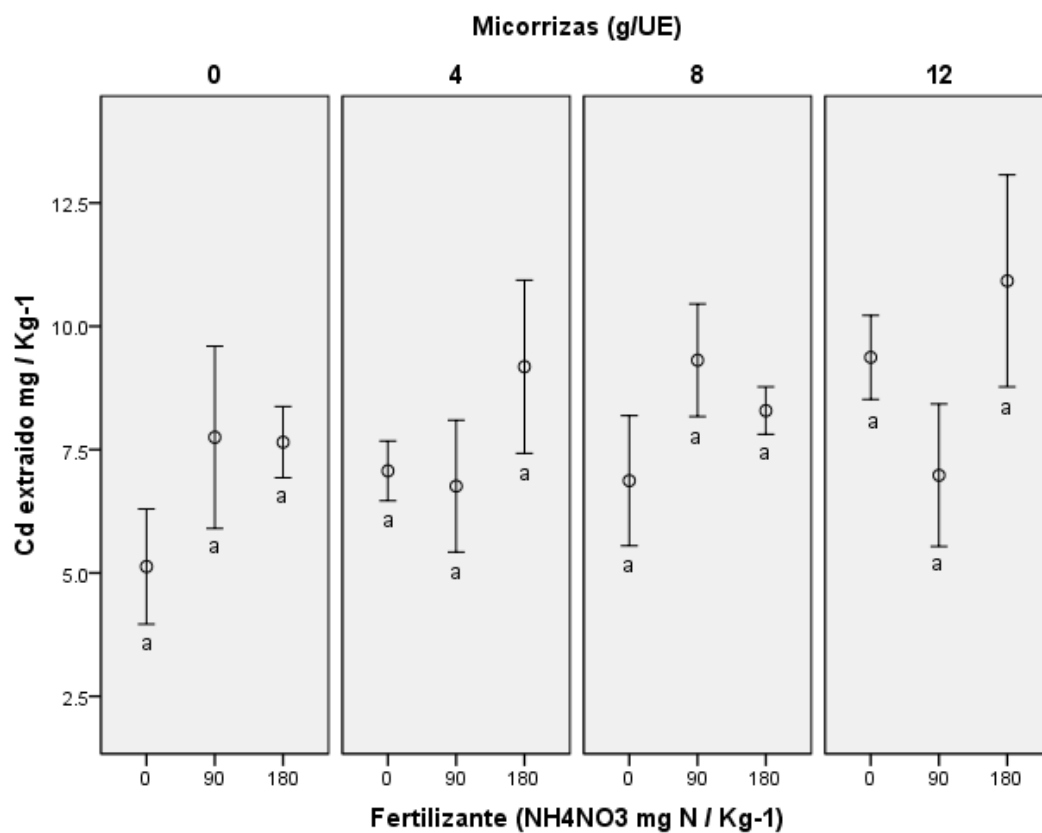


Figura 14. Concentraciones de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el primer brote *O. ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$) entre los tratamientos.

6.3.2.2. Segundo Brote

Según los análisis de varianza y pruebas de medias (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$), las diferencias entre tratamientos fueron no significativas en cuanto a la concentración del cadmio (Figura 15). No obstante, es importante mencionar que al igual que en el primer brote, de acuerdo a las medias, conforme las dosis de micorrizas aumentaron, la concentración de este metal en el segundo brote también se incrementó (Cuadro 16). A las dosis de micorrizas 12 y 8 g·UE se asociaron las concentraciones mayores de cadmio con 5.14 y 4.98 mg·kg⁻¹, respectivamente.

Cuadro 16. Estimadores estadísticos descriptivos de la concentración de Cd ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) encontrada en el segundo brote de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	n	$\bar{X}$	DE	ES	Min	Max
1	800- 74- 0- 0	5	4.36	0.81	0.36	3.55	5.7
2	800- 74- 0-90	5	4.68	0.90	0.40	3.3	5.5
3	800- 74- 0-180	5	4.08	2.13	0.96	2.45	7.7
4	800- 74- 4-0	5	2.88	1.02	0.46	1.75	3.95
5	800- 74- 4-90	5	2.92	1.03	0.46	2.1	4.1
6	800- 74- 4-180	5	3.69	0.71	0.32	2.65	4.6
7	800- 74- 8-0	5	4.73	2.85	1.28	1.5	8.35
8	800- 74- 8-90	5	5.52	1.97	0.89	2.3	7.3
9	800- 74- 8-180	5	4.7	2.12	0.95	2.85	7.6
10	800- 74- 12-0	5	5.53	1.97	0.88	3.65	7.8
11	800- 74- 12-90	5	4.47	1.80	0.81	1.9	7
12	800- 74- 12-180	5	5.45	1.87	0.84	4.05	8.45

n= tamaño de muestra; $\bar{X}$ = media; DE= Desviación Estándar; ES= Error Estándar; Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo

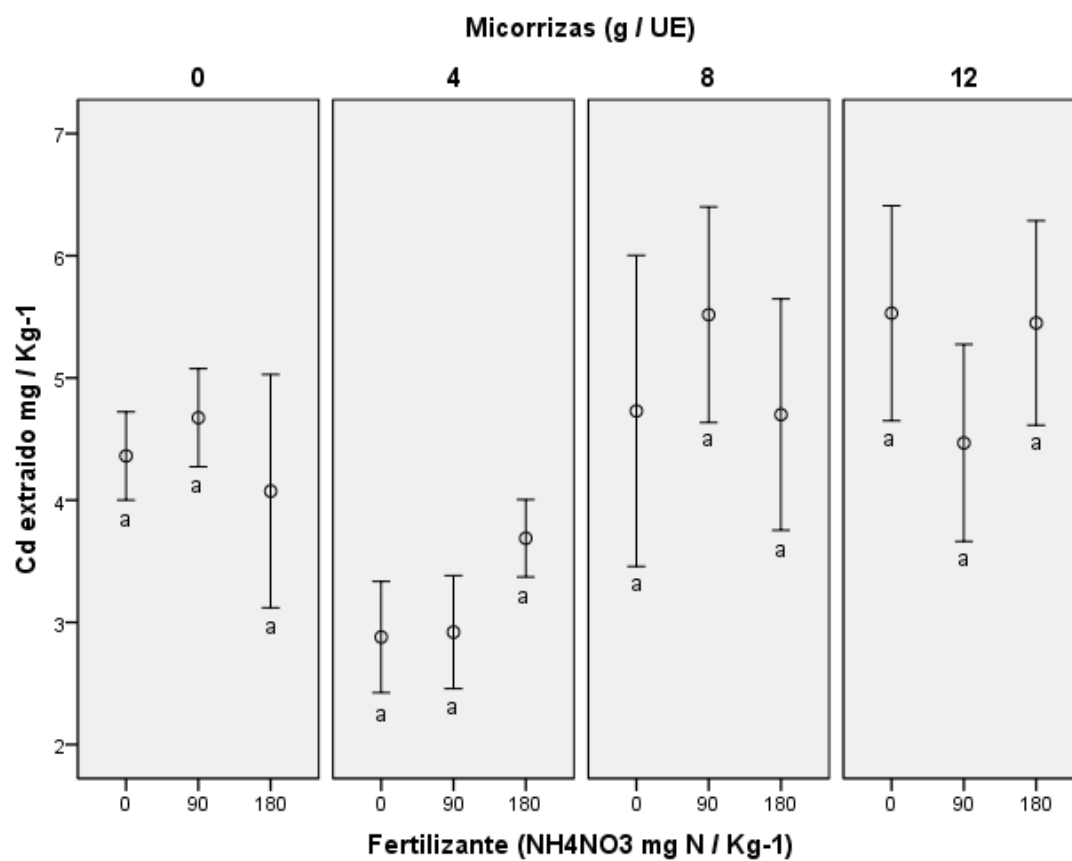


Figura 15. Concentraciones de Cd ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) en segundos brotes *O. ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) entre los tratamientos.

6.3.3. Biomasa

6.3.3.1. Peso fresco

Con respecto a la producción de biomasa en brotes de *O. ficus-indica*, al menos hubo dos tratamientos con efectos medios diferentes estadísticamente (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$). Cinco grupos de tratamientos fueron identificados (Figura 16). El factor micorrizas presentó deferencias significativas en la prueba de comparación de medias ($F=9.552$, g.l.=3, 48, $P = 0.0001$) (Cuadro 17); es decir, incide de forma importante en el desarrollo y crecimiento de nuevos brotes. Por su parte, el factor dosis de fertilizante no indujo diferencias significativas ($F=0.825$, g.l.=2,48, $P=0.444$). La carencia de un efecto significativo de interacción indica que el efecto de las diferentes dosis de micorrizas sobre la producción de biomasa en nuevos brotes fue el mismo para las cantidades de fertilizante involucradas ($F=0.209$, g.l.= 6,48, $P=0.972$). Los tratamientos cuya concentración de micorrizas fue de 4 g·UE en cualquiera de sus combinaciones con el fertilizante incidieron de manera importante en la producción de biomasa de nuevos brotes, siendo esta mayor a 1500 g (Figura 17).

Cuadro 17. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa (peso fresco) en brotes de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto	
		1	2
12	15	847.20	
8	15	1034.51	
0	15	1175.61	
4	15		1697.68

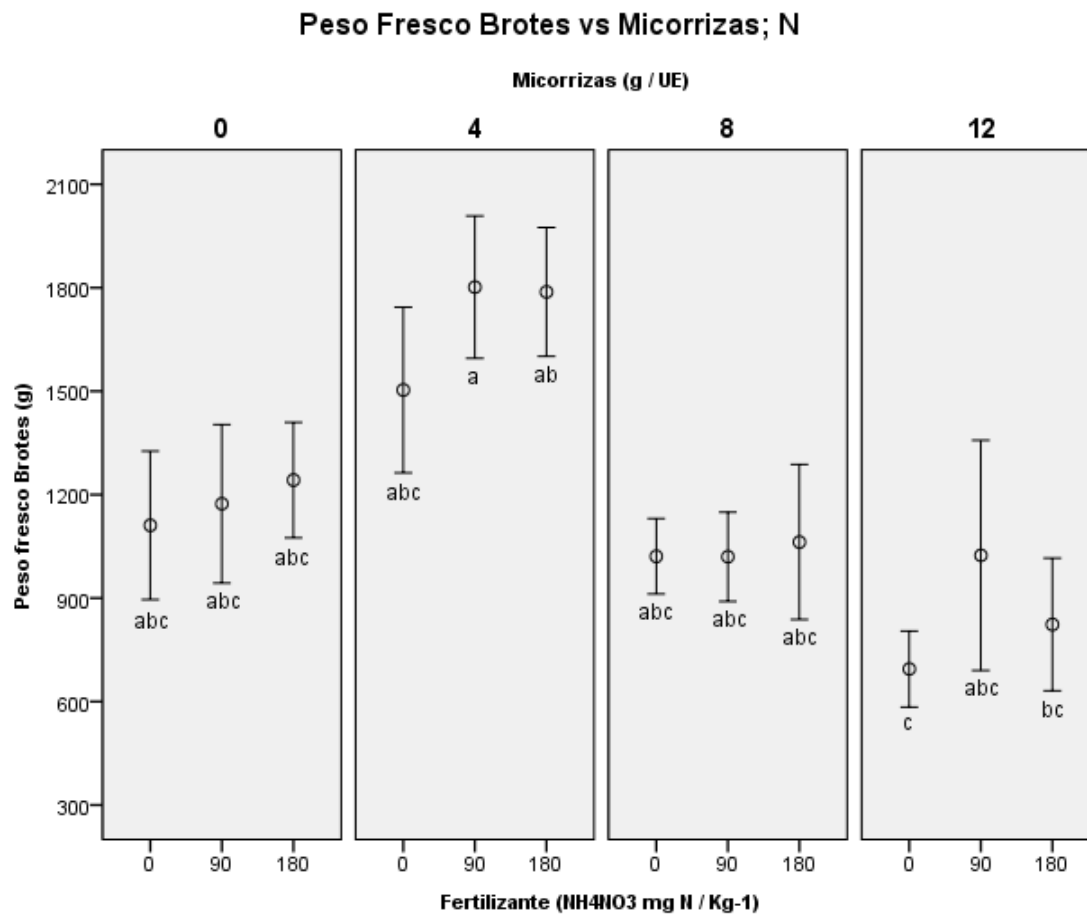


Figura 16. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de los brotes de *O. ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha= 0.05$) entre los tratamientos.

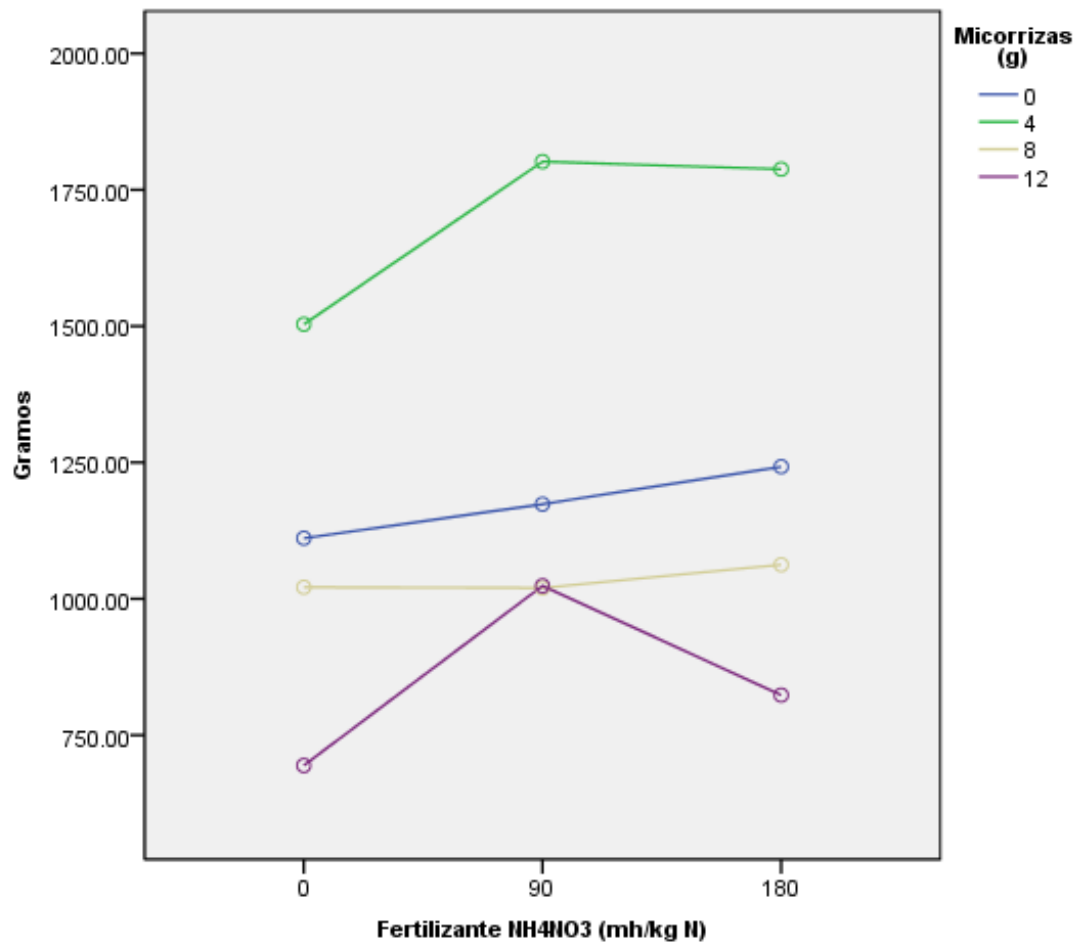


Figura 17. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso fresco de los brotes de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presento diferencias significativas entre sus dosis.

6.3.3.2. Peso Seco

Según los análisis de varianza y pruebas de medias (HSD de Tukey a $\alpha=0.05$), al menos hubo dos tratamientos con efectos medios diferentes estadísticamente en la producción de biomasa (peso seco) en los brotes de *O. ficus-indica*. Siete grupos de tratamientos fueron identificados (Figura 18). El factor micorrizas presentó deferencias significativas en la prueba de comparación de medias ($F=15.17$, g.l.=3,48, $P=0.0001$) (Cuadro 18); es decir, incide de forma importante en el desarrollo y crecimiento de nuevos brotes. Por su parte, el factor dosis de fertilizante no indujo diferencias significativas ($F=1.55$, g.l.=2,48, $P=0.223$). La carencia de un efecto significativo de interacción indica que el efecto de las diferentes dosis de micorrizas sobre la producción de biomasa (peso seco) en nuevos brotes fue el mismo para las cantidades de fertilizante involucradas ($F=0.225$, g.l.=6,48, $P=0.955$). Los tratamientos cuya concentración de micorrizas fue de 4 g·UE en cualquiera de sus combinaciones con el fertilizante incidieron de manera importante en la producción de biomasa de nuevos brotes, siendo esta mayor a 150 g (Figura 19).

Cuadro 18. Análisis de varianza y prueba de medias (HSD de Tukey a $\alpha = 0.05$) del factor Micorrizas respecto a la producción de biomasa (peso seco) en brotes de *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller.

Concentrac. Micorrizas g·UE	n	Subconjunto		
		1	2	3
12	15	73.26		
8	15	88.91	88.91	
0	15		109.61	
4	15			151.83

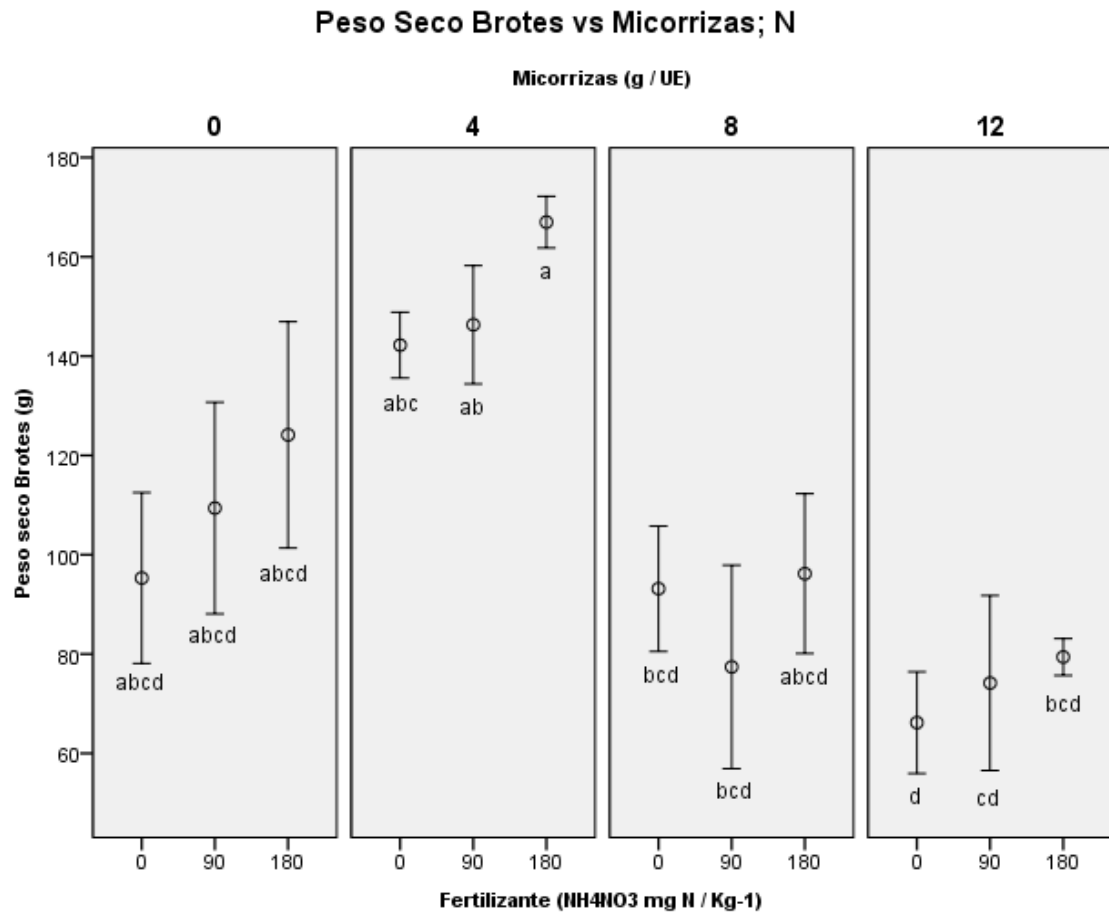


Figura 18. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de los brotes de *O. ficus-indica* (L.) Miller. Las barras se definieron por media $\pm$ error estándar; letras diferentes entre barras indican diferencia significativa (HSD de Tukey a $\alpha= 0.05$) entre los tratamientos.

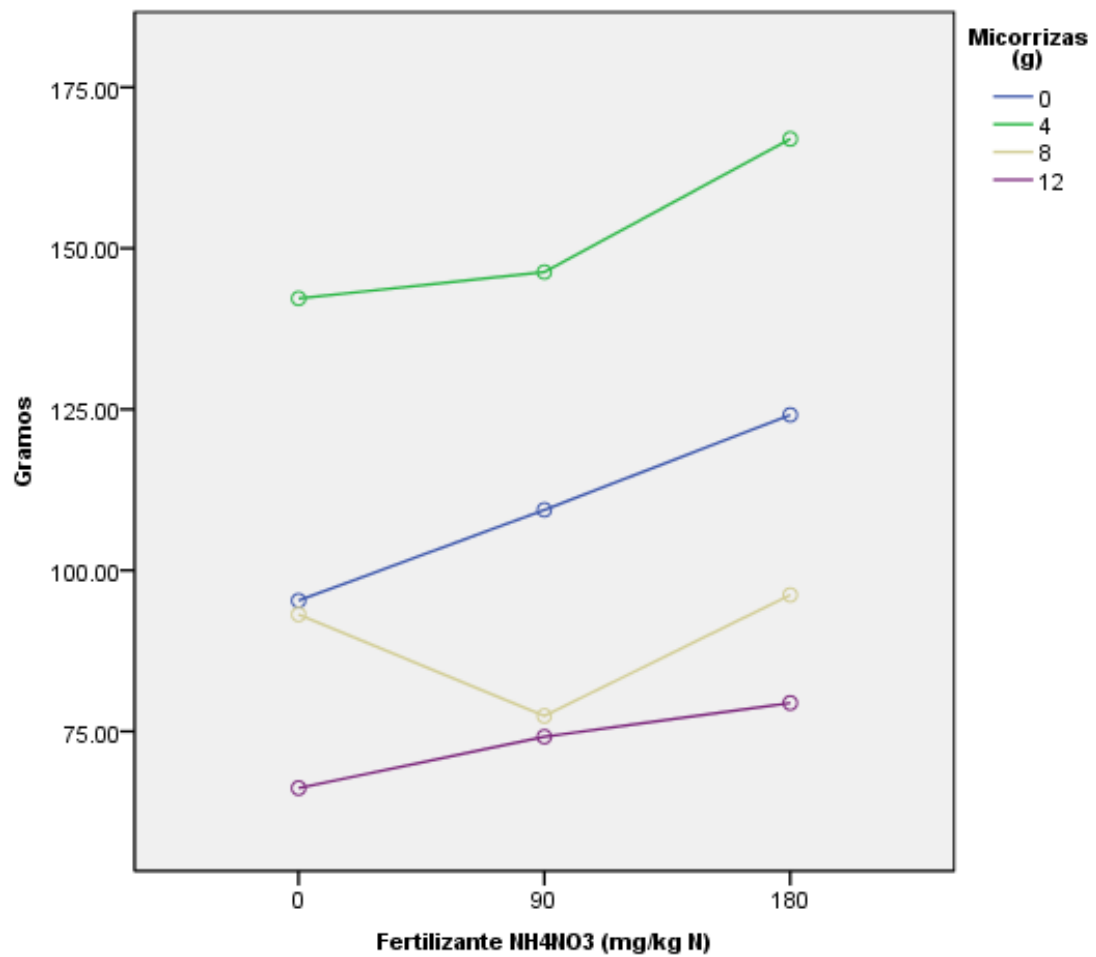


Figura 19. Efectos medios de los tratamientos sobre el peso seco de los brotes de *O. ficus-indica* (L.) Miller, con énfasis en el factor micorrizas el cual presenta diferencias significativas entre sus dosis.

Efecto de la fertilización nitrogenada y de la adición de micorrizas en la extracción y producción de biomasa en *O. ficus-indica*

El efecto de la fertilización nitrogenada en comparación con el provocado por las micorrizas ciertamente fue menor tanto en la concentración de plomo y cadmio como en la producción de biomasa en cualquiera de los órganos de *O. ficus indica*. Lo anterior presumiblemente se debió a que solo se aplicó un solo tipo de fertilizante (nitrato de amonio); este fenómeno ha sido documentado en estudios de fitoextracción. Por ejemplo, Li *et al.* (2013) mencionan en su estudio de fitorremediación con *Amaranthus hypochondriacus* que la sola aplicación de fertilizantes nitrogenados y/o fosforados no aumentan significativamente la absorción de cadmio por esta planta; pero por el contrario, con la aplicación de fertilizantes complejos (NPK) obtuvieron una absorción significativamente mayor a la mostrada con el control y fertilizantes simples. Lo cual indica que la fertilización NPK juega un papel muy importante en el aumento de la biomasa y mejoramiento de la acumulación de Cd en las plantas. Por su parte, Tu y Ma (2003) reportaron que la adición de fosfatos es una importante estrategia en el mejoramiento de la extracción de As de suelos contaminados por parte de *Pteris vittata* L.

Si bien, en los análisis de varianza el efecto de la fertilización registró diferencias no significativas entre las dosis, es preciso mencionar que para el caso de la extracción de cadmio si hubo un incremento gradual en la extracción a medida que las concentraciones de fertilizante se incrementaban. Lo cual coincide con lo encontrado por Schwartz *et al.* (2003), quienes reportaron que

Thlaspi caerulescens aumenta su extracción de cadmio con dosis mayores de fertilizantes nitrogenados (N-nitrato ó N-amonio). A pesar de esto, las tasas de acumulación y/o extracción obtenidas por estos autores fueron mucho menores a las reportadas en esta investigación, ya que ellos mencionan concentraciones mayores a los 0.09 mg Cd-planta, mientras que en este estudio, haciendo la conversión la concentración corresponde a >200 mg Cd por planta en los tratamientos que no contenían micorrizas pero si las 3 dosis con fertilizante.

Si bien es cierto que las plantas de *O. ficus-indica* no presentaron efectos fitotóxicos visibles por parte de los metales, es claro que su producción de biomasa fue reducida en comparación con cultivares destinados a la producción de nopalitos, en los cuales se han registrado producciones medias mensuales de 4.36 kg·m⁻² de biomasa fresca y 0.271 kg·m⁻² de biomasa seca (Almaguer-Sierra, 2010). Lo anterior acentúa que posiblemente los metales pesados contenidos en el suelo redujeron su capacidad de crecimiento, lo cual coincide con lo señalado por Peterson (1980), quien menciona que aun en suelos con concentraciones pequeñas de As, éste metal puede limitar el rendimiento de los cultivos.

En lo que respecta a la actividad mostrada por las micorrizas, la adición de la mezcla micorrízica (*Entrophospora columbiana*, *Glomus intraradices*, *G. etunicatum* y *G. clarum*) al sustrato mejoró significativamente la producción de biomasa vegetal. En particular, la dosis de 4 g·UE fue la que mejores resultados indujo en lo que respecta a este rubro. Este efecto estimulador de las micorrizas sobre el crecimiento y producción de biomasa en plantas sujetas a estrés por

metales pesados también ha sido documentado por Garg y Chandel (2012), quienes mencionan que el hongo micorrízico *Glomus mosseae* resultó ser eficaz con respecto a la estimulación del crecimiento y la mitigación del efecto salino y de metales pesados tóxicos a través de una mayor síntesis de osmolitos en varios genotipos de *Cajanus cajan* (L.) Millsp.

Extracción y acumulación de plomo y cadmio por parte de *O. ficus-indica*

En lo que respecta a la acumulación de ambos metales en los diferentes órganos de *O. ficus-indica*, se encontró un gradiente de acumulación decreciente a medida que los órganos se alejan del suelo, registrándose mayores concentraciones de plomo y cadmio en raíz, seguido de penca madre y después primeros y segundos brotes. Este mismo patrón de acumulación de Cd fue encontrado en *Fragaria ananassa* (Ciéslínski *et al.*, 1996), así como en *Pteridium aquilinum* y *Humus scandens* (Wang *et al.* 2008); de acumulación de Pb en arroz (Liu *et al.*, 2003) y *Sporobolus indicus* (Franco-Hernández *et al.* 2010); y de acumulación de As en *Zea mays* (Ruiz-Huerta y Armienta-Hernández, 2012). Este comportamiento se debe a que algunas especies basan su resistencia a los metales en la estrategia de una eficiente exclusión del metal, restringiendo su transporte hacia la parte aérea (Memon *et al.* 2001).

Kabata-Pendias (2010) menciona que la absorción de metales pesados por parte de las raíces puede efectuarse tanto de forma pasiva (no metabólica) como de forma activa (metabólica). La absorción pasiva es la difusión de iones

desde la solución externa en la endodermis de la raíz. La absorción activa requiere energía metabólica y se lleva a cabo en contra de un gradiente químico. Estos mecanismos de captación difieren dependiendo del metal. El Pb y el Ni son absorbidos pasivamente, mientras que el Cu, Mo y Zn son absorbidos activamente.

Por otra parte, de acuerdo a los estudios de Hernández-Herrera (2010) y Ramos-Cortez (2012), referentes a fitoextracción con 2 especies del género *Opuntia* (*O. megacantha* y *O. ficus-indica*, respectivamente), muestran que el pH del suelo del área donde fue obtenido el usado en esta investigación es de entre 8.1 y 8.2 lo cual lo cataloga como un suelo moderadamente alcalino. Referente a esto, en publicaciones acerca de este tema mencionan que el pH del suelo aparece como el principal factor que controla la absorción del cadmio del suelo, tanto total como relativo. Por ejemplo, Kitagishi y Yamane (1981) mencionan que dentro del rango de pH de 4.5 a 5.5 se registró la mayor absorción relativa de Cd por parte de plántulas de arroz. Por su parte, Bingham *et al.* (1980), también encontraron que el contenido de Cd en el grano de arroz depende en gran medida del pH del suelo, obteniendo la absorción mayor a un pH de 5.5.

La solubilidad del Cd está estrechamente relacionada con la acidez del suelo. A pH >7.5 el Cd contenido en suelos no es fácilmente móvil; por otra parte, la capacidad de adsorción del Cd disminuye en presencia de otros metales (e.g. Cu, Zn, Pb) debido a la sorción competitiva del metal (Corami *et al.*, 2008).

Respecto al plomo, Huang y Cunninham (1996) mencionan que aunque es un metal ligeramente fitodisponible y, por lo tanto, difícil de fitoextraer, hay varias plantas que acumulan grandes cantidades de Pb, especialmente en las raíces (por ejemplo, *Thlaspi sp.*, *Zea mays*, *Ambrosia artemissifolia*). Es por esto que se busca estimular su movilidad y disponibilidad para ser extraído por las plantas mediante el uso de quelatos (HEDTA, EDTA, DTPA) o electroósmosis (Jarvis y Leung, 2002; Lim *et al.*, 2004; Chandra-Sekhar *et al.*, 2005). Además de los agentes quelantes, otros compuestos que pueden aumentar la disponibilidad de metales traza en los suelos son: 1) ácidos minerales en diversas concentraciones; 2) sales tamponadas, por ejemplo, NH_4OAc ; y 3) sales neutras, tales como CaCl_2 , MgCl_2 , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, y NH_4NO_3 (Houba *et al.* 2000).

Por otra parte, Meyers *et al.* (2008) observaron que la absorción de Pb en tejidos de la raíz es principalmente intracelular y que el metal puede ser almacenado en las vacuolas. Por su parte, Malone *et al.* (1974) identificaron los depósitos de Pb en las paredes celulares fuera del plasmalema como precipitados y cristales de Pb. Depósitos similares de Pb observados en las raíces, tallos y hojas sugieren que el Pb se transporta y deposita de una manera similar en todos los tejidos de una planta.

6.4. FACTOR DE BIOACUMULACIÓN

La capacidad de una planta para extraer y acumular elementos químicos potencialmente tóxicos y almacenarlos en sus tejidos se conoce como Factor de Bioacumulación (FBA), Coeficiente Biológico de Absorción (CBA) o Índice de Bioacumulación (IBA) y se expresa por la relación entre la cantidad total de un contaminante en un organismo vivo y la concentración de ese contaminante en el suelo (Kabata-Pendias, 2010). El FBA se calculó a partir de la formula siguiente (Zhou y Song, 2004; Sun *et al.*, 2007):

$$FBA = \frac{\text{Concentración total del metal en la planta}}{\text{Concentración de metal en el suelo}}$$

6.4.1. Factor de Bioacumulación de Plomo

De acuerdo al FBA calculado, el valor mayor se asocia al tratamiento testigo (1.04), es decir, al que no se le suministró cantidad alguna de micorrizas y fertilizante. Es importante destacar que de acuerdo a su media, el FBA mayor lo registraron los tratamientos desprovistos de micorrizas (Cuadro 19), lo cual pone de manifiesto la enorme capacidad de *O. ficus-indica* como planta

acumuladora de plomo sin necesidad de requerir suplementos o aditivos en grandes concentraciones que potencien esta capacidad.

Cuadro 19. Factor de bioacumulación de plomo por parte de *O. ficus-indica* (L.) Miller contrastado con la concentración del contaminante en el suelo.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	Plomo en Planta (mg·kg ⁻¹)	Plomo en suelo (mg·kg ⁻¹)	FBA
1	800- 74- 0- 0	832.34	800	1.0404
2	800- 74- 0-90	573.88	800	0.7173
3	800- 74- 0-180	577.74	800	0.7216
4	800- 74- 4-0	367.08	800	0.4588
5	800- 74- 4-90	609.74	800	0.7621
6	800- 74- 4-180	588.63	800	0.7357
7	800- 74- 8-0	633.28	800	0.7916
8	800- 74- 8-90	549.63	800	0.6870
9	800- 74- 8-180	759.52	800	0.9494
10	800- 74- 12-0	595.29	800	0.7441
11	800- 74- 12-90	620.5	800	0.7756
12	800- 74- 12-180	628.52	800	0.7856

6.4.2. Factor de Bioacumulación de Cadmio

Con respecto al FBA del cadmio se muestran valores mayores a la unidad en todos los tratamientos, siendo los tratamientos provistos con la dosis 8-90 y 12-0 (micorrizas-fertilizante, respectivamente) los que presentaron los valores mayores (3.16 y 3.15 respectivamente) (Cuadro 20).

Cuadro 20. Factor de bioacumulación de cadmio por parte de *O. ficus-indica* (L.) Miller contrastado con la concentración del contaminante en el suelo.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	Cadmio en Planta (mg·kg ⁻¹)	Cadmio en suelo (mg·kg ⁻¹)	FBA
1	800- 74- 0- 0	189.09	74	2.550
2	800- 74- 0-90	188.34	74	2.524
3	800- 74- 0-180	218.21	74	2.925
4	800- 74- 4-0	81.76	74	1.077
5	800- 74- 4-90	107.67	74	1.429
6	800- 74- 4-180	115.39	74	1.522
7	800- 74- 8-0	153.63	74	2.062
8	800- 74- 8-90	234.1	74	3.138
9	800- 74- 8-180	213.58	74	2.862
10	800- 74- 12-0	233.61	74	3.131
11	800- 74- 12-90	200.93	74	2.698
12	800- 74- 12-180	188.35	74	2.508

6.5. FACTOR DE TRANSLOCACIÓN

Para evaluar la habilidad de las plantas para translocar los metales desde la raíz hacia la parte aérea fue calculado el Factor de Translocación (FT) a partir de la formula siguiente (Tu *et al.*, 2003; Rizzi *et al.*, 2004; Wang *et al.* 2008; Rezvani y Zaefarian, 2011; Hung-Yu *et al.*, 2011):

$$FT = \frac{\text{Concentración del metal en la parte aérea (penca madre y brotes)}}{\text{Concentración de metal en la raíz}}$$

6.5.1. Factor de translocación de Plomo

Los resultados sugieren que la translocación del plomo hacia los brotes y la penca madre es pequeña. Por ello, se puede aseverar que el órgano vegetal que absorbe la mayor cantidad del metal es la raíz (Cuadro 21). Es importante destacar que el FT mayor corresponde al tratamiento 4-0 (Micorrizas-fertilizante) con 0.392. Es importante destacar que de acuerdo a su media, el FT mayor corresponde a los tratamientos con la dosis de micorrizas 4 g·UE.

Cuadro 21. Factor de translocación de plomo por parte de *O. ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	Plomo en parte aérea (mg·kg ⁻¹)	Plomo en raíz (mg·kg ⁻¹)	FT
1	800- 74- 0- 0	100.54	731.8	0.137
2	800- 74- 0-90	117.88	456	0.259
3	800- 74- 0-180	109.93	467.41	0.235
4	800- 74- 4-0	103.4	263.68	0.392
5	800- 74- 4-90	101.36	508.38	0.199
6	800- 74- 4-180	98.7	489.93	0.201
7	800- 74- 8-0	73.68	555.7	0.133
8	800- 74- 8-90	118.21	377.7	0.313
9	800- 74- 8-180	77.58	681.94	0.114
10	800- 74- 12-0	87.18	508.11	0.172
11	800- 74- 12-90	67.17	553.33	0.121
12	800- 74- 12-180	92.06	536.46	0.172

6.5.2. Factor de translocación de cadmio

Los resultados indican que la translocación del cadmio hacia los brotes y la penca madre es pequeña. Por lo tanto, se puede aseverar que el órgano vegetal que absorbe la mayor cantidad del metal es la raíz (Cuadro 22). Es importante destacar que al igual que en plomo, el tratamiento con FT mayor fue el 4-0 (Micorrizas-fertilizante) con un valor de 0.231. Al igual que en el caso del plomo, el FT mayor corresponde a los tratamientos con la dosis de micorrizas 4 g·UE.

Cuadro 22. Índice de translocación de cadmio por parte de *O. ficus-indica* (L.) Miller.

Núm. Trat.	Tratamiento (Pb-Cd-Mico -Fert)	Cadmio en parte aérea (mg·kg ⁻¹)	Cadmio en raíz (mg·kg ⁻¹)	FT
1	800- 74- 0- 0	12.16	176.55	0.069
2	800- 74- 0-90	14.23	172.57	0.082
3	800- 74- 0-180	14.65	201.77	0.073
4	800- 74- 4-0	10.93	68.74	0.159
5	800- 74- 4-90	11.77	93.98	0.125
6	800- 74- 4-180	13.94	98.7	0.141
7	800- 74- 8-0	13.4	139.16	0.096
8	800- 74- 8-90	17.45	214.75	0.081
9	800- 74- 8-180	18.56	193.23	0.096
10	800- 74- 12-0	18.89	212.8	0.089
11	800- 74- 12-90	15.3	184.37	0.083
12	800- 74- 12-180	20.36	165.26	0.123

Diversos autores han mencionado que la acumulación y la exclusión son dos estrategias básicas de tolerancia que las plantas han desarrollado para hacer frente a concentraciones elevadas de metales pesados contenidos en el medio (Baker, 1981, 1987; Taylor, 1987; Baker y Walker, 1990). Las plantas acumuladoras de metales se caracterizan por poseer un Factor de Translocación mayor a 1 ($FT > 1$), mientras que en plantas exclusoras el transporte del metal hacia la parte aérea se ve restringida, mostrando valores de FT menores a 1 ($FT < 1$) (Baker, 1981; Baker y Whiting, 2002). La translocación de metal a brotes no sólo depende de las plantas, sino también a la naturaleza del elemento.

De acuerdo a lo anterior, *O. ficus-indica* podría ser catalogada como una planta exclusora, en la cual el transporte de metal hacia los brotes no es importante, en comparación con la acumulación del metal en la raíz. Sin embargo, aunque el FT para ambos metales es pequeño, la gran capacidad de producción de biomasa podría suplir esta tasa de translocación, debido a que las especies de plantas hiperacumuladoras, la producción de biomasa es muy limitada.

Wang *et al.* (2008) encontraron valores pequeños de bioconcentración para Mn, Cd, Cu y Zn, todos inferiores a 1 y valores mayores en la translocación principalmente para Cd (*Cynodon dactylon* con 6.72) y Cu (*Humulus scandens* con 2.20), especies de plantas que crecen en las ceracnías de minas. Maldonado-Magaña *et al.* (2011), en un estudio con *Acacia farnesiana in vitro* reportaron valores grandes de bioconcentración (8.5 a 53.5) y valores pequeños

de translocación (0.028 a 0.032) para el Pb, lo que indica que la bioacumulación y la translocación dependen más de la eficiencia de cada especie.

Por otra parte, Baker y Brooks (1989) y Greger (1999) definieron las concentraciones umbral para plantas hiperacumuladoras de metales en los siguientes niveles (en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$): >100 -Cd; >1000 de Co, Cu, Ni, Pb; >10.000 Mn, Zn.

VII. CONCLUSIONES

- La planta *Opuntia ficus-indica* tiene la capacidad de acumular cantidades grandes de plomo y cadmio en su raíz.
- *Opuntia ficus-indica* mostró ser una planta exclusora de plomo y cadmio según lo obtenido por los factores de bioacumulación y de translocación.
- Contrario a lo que se pensaba, la capacidad de acumulación de los metales no fue potenciada por parte de la adición de micorrizas y fertilizante.
- La dosis de micorrizas ideal para lograr un mayor factor de translocación resultó ser la de 4 g·UE; a ella se asociaron los valores mayores de producción de biomasa y factores de translocación.
- La adición de micorrizas mejoró la producción de biomasa vegetal, lo que indica una mejora de la tolerancia al estrés por las plantas con micorrizas.

VIII. LITERATURA CITADA

1. Almaguer-Sierra, P. (2010). Relación entre la producción de biomasa de *Opuntia ficus-indica* (L.) y el índice térmico grados-día. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
2. Baker, A. J. M. (1981). Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*, 3(1-4), 643-654. doi: 10.1080/01904168109362867
3. Baker, A. J. M. (1987). Metal Tolerance. *New Phytologist*, 106, 93-111. doi: 10.1111/j.1469-8137.1987.tb04685.x
4. Baker, A. J. M., & Brooks, R. R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements- a review of their distribution, ecology and phytochemistry. In: Peer, W. A., Baxter, I.R., Richards, E. L., Freeman, J. L., & Murphy, A. S. (2006). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. In Tamas, M., & Martinoia, E. (Eds.), *Molecular Biology of Metal Homeostasis and Detoxification* (Vol. 14, pp. 299-340): Springer Berlin Heidelberg.
5. Baker, A. J. M., & Walker, P. L. (1990). Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In: Shaw, A. J. (Ed.). 1990. Heavy metal tolerance in plants: Evolutionary aspects. CRC Press, Boca Raton, FL.
6. Baker, A. J. M., & Whiting, S. N. (2002). In search of the Holy Grail – a further step in understanding metal hyperaccumulation? *New Phytologist*, 155(1), 1-4. doi: 10.1046/j.1469-8137.2002.00449_1.x
7. Bingham, F. T., Page, A. L. & Strong, J. E. (1980). Yield and cadmium content of rice grain in relation to addition rates of cadmium, copper, nickel and zinc with sewage sludge and liming. In: Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants. Fourth ed., pp. 93-121. CRC Press. Boca Raton, FL.
8. Castillo-Bravo, A., Netzahual-Nava, M., Pérez-Pérez, F., Guevara-García, J.A. (2006). Estudio de la absorción de metales pesados por la planta de nopal *Opuntia ficus indica*. In: Memoria del V Congreso Internacional y XI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Oaxtepec, Morelos, México.

9. Chandra-Sekhar, K., Kamala, C. T., Chary, N. S., Balaram, V., & Garcia, G. (2005). Potential of *Hemidesmus indicus* for phytoextraction of lead from industrially contaminated soils. *Chemosphere*, 58(4), 507-514. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.09.022
10. Cieřliński, G., Neilsen, G. H., & Hogue, E. J. (1996). Effect of soil cadmium application and pH on growth and cadmium accumulation in roots, leaves and fruit of strawberry plants (*Fragaria × ananassa* Duch.). *Plant and Soil*, 180(2), 267-276. doi: 10.1007/BF00015310
11. Corami, A., Mignardi, S., & Ferrini, V. (2008). Cadmium removal from single- and multi-metal (Cd + Pb + Zn + Cu) solutions by sorption on hydroxyapatite. *Journal of colloid and interface science*, 317(2), 402-408.
12. Díaz-Franco, A., Jacques-Hernández, C. & Peña del Río, M.A. (2008). Productividad de sorgo en campo asociada con micorriza arbuscular y *Azospirillum brasilense*. *Universidad y ciencia*, 24, 229-237.
13. Duffus, J. H. (2002). "Heavy metals" a meaningless term? IUPAC Technical Report. *Pure Appl. Chem.* 74(5), 793-807.
14. EIA. Estudio de Impacto Ambiental Mina "La Platosa", Bermejillo Durango. 2004. Recuperado el 22 de abril de 2012, de:
http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/dgo/estudios/2004/1_0DU2004MD013.pdf
15. Eweis, J. B., Ergas, S. J., Chang, D. P., & Schroeder, E. D. (1998). Bioremediation principles. In: Volke-Sepulveda, T., & Velasco-Trejo, J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT. México. 66 pp
16. Franco-Hernández, M. O., Vásquez-Murrieta, M. S., Patino-Siciliano, A., & Dendooven, L. (2010). Heavy metals concentration in plants growing on mine tailings in Central Mexico. *Bioresour Technol*, 101(11), 3864-3869. doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.013
17. García, I., & Dorronsoro C. (2002). Contaminación por metales pesados. Departamento de edafología y química agrícola de España.
18. Garg, N. & Chandel, S. (2012). Role of Arbuscular Mycorrhizal (AM) fungi on growth, cadmium uptake, osmolyte, and phytochelatin synthesis in *Cajanus cajan* (L.) Millsp. under NaCl and Cd stresses. *Journal of Plant Growth Regulation*, 31(3), 292-308. doi: 10.1007/s00344-011-9239-3
19. Garza-González, M. T. (2005). Aislamiento de microorganismos con alta capacidad de tolerar y remover Pb (II), Cr (IV), Cd (II), Cu (II), Zn (II) y Ni (II). Tesis inédita de doctorado. Universidad de la Habana, Cuba.

20. Greger, M. (1999). Metal Availability and Bioconcentration in Plants. *Heavy Metal Stress in Plants* (pp. 1-27): Springer Berlin Heidelberg.
21. Hernández-Herrera, J. A. (2010). El nopal *Opuntia megacantha* Salm-Dyck en la fitoextracción de plomo (Pb) en suelos contaminados. Tesis inédita de Maestría. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas URUZA-UACH, Bermejillo, Durango, México.
22. Houba, V. J. G., Temminghoff, E. J. M., Gaikhorst, G. A., & van Vark, W. (2000). Soil analysis procedures using 0.01 M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31(9-10), 1299-1396. doi: 10.1080/00103620009370514
23. Huang, J. W., & Cunningham, S. D. (1996). Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologist*, 134(1), 75-84. doi: 10.1111/j.1469-8137.1996.tb01147.x
24. Hung-Yu, L., Shaw-Wei, S., Horng-Yuh, G., & Zueng-Sang, C. (2011). Heavy Metals Contaminated Soils and Phytoremediation Strategies in Taiwan. In: Pascucci, S. (Ed.) 2011. Soil contamination,. Recuperado el 4 de enero de 2014, de:
<http://www.intechopen.com/books/soil-contamination/heavy-metals-contaminated-soils-and-phytoremediation-strategies-in-taiwan>
25. Hutchinson, S. L., Banks, M. K., & Schwab, A. P. (2001). Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer. *J Environ Qual*, 30(2), 395-403.
26. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2011. Producto Interno Bruto del Estado de Coahuila de Zaragoza 2005-2009.
27. Jarvis, M. D., & Leung, D. W. M. (2002). Chelated lead transport in *Pinus radiata*: an ultrastructural study. *Environ. Exp. Bot.* 48 (1), 21-32.
28. Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Plants. *Trace Elements in Soils and Plants*. (Fourth ed., pp. 93-121). Boca Raton, FL.: CRC Press.
29. Kitagishi, K. & Yamane, I. eds., (1981). Heavy metal pollution in soils of Japan. In: Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants. Fourth ed., pp. 93-121. Boca Raton, FL. CRC Press.
30. Landeros-Márquez, O., Tejo-Calzada, R., Reveles-Hernández, M., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Pedroza-Sandoval, A. & Ruíz-Torres, J. (2011). Uso potencial del huizache (*Acacia farnesiana* L. Will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 17, 11-20.

31. Li, N., Li, Z., Fu, Q., Zhuang, P., Guo, B., & Li, H. (2013). Agricultural technologies for enhancing the phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Amaranthus hypochondriacus* L. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(9), 1-8. doi: 10.1007/s11270-013-1673-3
32. Lim, J-M., Salido, A., L., & Butcher, D. (2004). Phytoremediation of lead using Indian Mustard (*Brassica juncea*) with EDTA and electrocids. *Microchem J*, 76(1-2), 3-9.
33. Liu, J., Li, K., Xu, J., Zhang, Z., Ma, T., Lu, X., Yang, J. & Zhu, Q. (2003). Lead toxicity, uptake, and translocation in different rice cultivars. *Plant Science*, 165 (4), 793-802.
34. Maldonado-Magaña, A., Favela-Torres, E., Rivera-Cabrera, F., & Volke-Sepulveda, T. (2011). Lead bioaccumulation in *Acacia farnesiana* and its effect on lipid peroxidation and glutathione production. *Plant and Soil*, 339(1-2), 377-389. doi: 10.1007/s11104-010-0589-6
35. Malone, C., Koeppe, D. E., & Miller, R. J. (1974). Localization of lead accumulated by corn plants. *Plant Physiol*, 53 (3), 388-394.
36. Memon A.R., Aktoprakligil D., Özdemir A. y Vertii A. (2001). Heavy metal accumulation and detoxification mechanisms in plants. *Turk J Bot.* 25, 111-121.
37. Meyers, D. E., Auchterlonie, G. J., Webb, R. I., & Wood, B. (2008). Uptake and localisation of lead in the root system of *Brassica juncea*. *Environ Pollut*, 153(2), 323-332. doi: 10.1016/j.envpol.2007.08.029
38. NOM-117-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica.
39. Núñez-López, R. A., Meas-Vong, Y., Ortega-Borges, R. & Olguín, E. J. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. *Ciencia, Revista de la Academia Mexicana de Ciencias* 55 (3), 69-82.
40. Ortiz-Cano, H. G., Trejo-Calzada, R., Valdez-Cepeda, R. D., Arreola-Ávila, J. G., Flores-Hernández, A., & López-Ariza, B. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 15, 161-168.
41. Peterson P. & Girling, C. (1980). Other trace metals. Impact of heavy metal pollution on plants. Vol.1. Effects of trace metals on plant function. N. Lepp, Ed. London: Applied Science Publishers.

42. Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología Aplicada*, 5, 149-155.
43. Ramos-Cortez, E. (2012). Fitoextracción de plomo y cadmio con *Opuntia ficus-indica* L. en asociación con micorrizas y adicionando nitrato de amonio. Tesis inédita de Maestría. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas URUZA-UACH, Bermejillo, Durango, México.
44. Rezvani, M., & Zaefarian, F. (2011). Bioaccumulation and translocation factors of cadmium and lead in *Aeluropus littoralis*. *AJAE*, 2 (4), 114-119.
45. Ríos-Ramos, J. & Quintana-Miranda, V. (2004). Curso-Taller "Manejo general del cultivo de nopal". Manual del participante. Secretaria de la Reforma Agraria-Colegio de Postgraduados. México.
46. Rizzi, L., Petruzzelli, G., Poggio, G., & Guidi, G. V. (2004). Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test of phytostabilization. *Chemosphere*, 57(9), 1039-1046. doi: 0.1016/j.chemosphere.2004.08.048
47. Ruiz-Huerta, E. A. & Armienta-Hernández, M. A. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28 (2), 103-117.
48. Sánchez-Viveros, G., Carrillo-González, R., Martínez-Garza, A. & González-Chávez, M. d. C. (2004). Tolerancia adaptativa de hongos micorrízicos arbusculares al crecer en sustratos contaminados con As y Cu. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(4), 147-158.
49. Schwartz, C., Echevarria, G. & Morel, J. L. (2003). Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 249(1), 27-35. doi: 10.1023/A:1022584220411
50. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2008). Recuperado el 30 de junio de 2009, de:
<http://www.siap.sagarpa.gob.mx/ventana.php?idLiga=1043&tipo=1>
51. Shankar, A. H., & Prasad, A. S. (1998). Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection. *Am J Clin Nutr*, 68(2 Suppl), 447S-463S.
52. Sun, Y., Zhou, Q., Wei, S., & Ren, L. (2007). Growth responses of the newly-discovered Cd-hyperaccumulator *Rorippa globosa* and its accumulation characteristics of Cd and As under joint stress of Cd and As. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, 1(1), 107-113. doi: 10.1007/s11783-007-0020-6

53. Taylor, G. J. (1987). Exclusion of metals from the symplasm: A possible mechanism of metal tolerance in higher plants. *Journal of Plant Nutrition*, 10(9-16), 1213-1222. doi: 10.1080/01904168709363649
54. Trejo-Calzada, R., Esquivel-Arriaga, O., Pedroza-Sandoval, A., Arreola-Ávila, J., Flores-Hernández, A., Ruíz-Torres, J. & Valdez-Cepeda, R. D. (2009). Evaluación d trompillo (*Solanum elaeagnifolium*) en la fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados. *Revista Chapingo. Serie Zonas Áridas*, 8, 247-253.
55. Trejo-Calzada, R., García-Olvera, N. C., Flores-Hernández, A., Arreola-Ávila, J., Santamaría-César, E. & Gutiérrez-Acosta, G. (2006). Evaluación de los niveles de contaminación con plomo en suelos de Bermejillo, Dgo. *Revista Chapingo. Serie Zonas Áridas*, 5 (2), 225-229.
56. Tu, C., Ma, L. Q. & Bondada, B. (2002). Arsenic accumulation in the hyperaccumulator Chinese brake and its utilization potential for phytoremediation. *J Environ Qual*, 31(5), 1671-1675.
57. Tu, C. & Ma, L. Q. (2003). Effects of arsenate and phosphate on their accumulation by an arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Plant and Soil*, 249(2), 373-382. doi: 10.1023/A:1022837217092
58. Ubillus-Limo, J. (2003). Estudio sobre la presencia de plomo en el medio ambiente de Talara en el año 2003. Monografía para obtener el título de Ingeniero Químico. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú.
59. van Deuren, J., Wang, Z., & Ledbetter, J. (1997). Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide. (Third Ed.) Technology Innovation Office, EPA. Recuperado el 3 de marzo de 2014, de:
<http://www.epa.gov/tio/remed.htm>
60. Vanegas-Rico, J. M., Lomelí-Flores, J. R., Rodríguez-Leyva, E., Mora-Aguilera, G., & Valdez, J. M. (2010). Enemigos naturales de *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) en *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller en el centro de México. *Acta zoológica mexicana*, 26, 415-433.
61. Valdés-Perezgasga, F., Cabrera-Morelos, V. M. (1999). La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México.
62. Vázquez-Alvarado, R. E., Valdez-Cepeda, R. D. & Blanco-Macías, F. (2008). Riego y fertilización del nopal verdura. VII Simposium-Taller "Producción y aprovechamiento del nopal en el Noreste de México". RESPYN (2)

63. Volesky, B. (2001). Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century. *Hydrometallurgy*, 59 (2), 203-216.
64. Volke-Sepulveda, T., & Velasco-Trejo, J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. INE-SEMARNAT. México. 66 pp
65. Wang, X., Liu, Y., Zeng, G., Chai, L., Xiao, X., Song, X. & Min, Z. (2008). Pedological characteristics of Mn mine tailings and metal accumulation by native plants. *Chemosphere*, 72 (9), 1260-1266.
66. Wong, M. H. (2003). Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere*, 50(6), 775-780.