



U. A.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

**MAESTRIA EN CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y GESTION**

**Translocación y concentraciones de metales
pesados en plantas de jitomate
(*Lycopersicum esculentum* Mill.)
cultivadas en hidroponía**

T E S I S

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
**Maestro en Ciencias Agropecuarias
y Gestión Local**

P R E S E N T A

Evelyn Rojas López

DIRECTOR DE TESIS:
M.C. SERGIO ADRIAN SALGADO SOUTO

CO-DIRECTOR DE TESIS:
DR. OSCAR TALAVERA MENDOZA



IGUALA, GRO.

JUNIO DE 2017

La presente tesis titulada: **Translocación y concentraciones de metales pesados en plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivadas en hidroponía**, realizada por la alumna **Evelyn Rojas López**, ha sido leída y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias Agropecuarias y Gestión Local. La dirección de la investigación estuvo integrada por el:

COMITÉ TUTORIAL

MC. Sergio Salgado Souto
Profesor- Investigador
DIRECTOR DE TESIS

Dr. Oscar Talavera Mendoza
Profesor- Investigador
CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Agustín Damián Nava
Profesor-Investigador
ASESOR

Dr. Jaime Olivares Pérez
Profesor-Investigador
ASESOR

Dr. Héctor Segura Pacheco
Profesor-Investigador
ASESOR

IGUALA DE LA INDEPENDENCIA GUERRERO, MÉXICO, JUNIO DE 2017

DEDICATORIA

Hoy en día estudiar no te asegura que tendrás mejores oportunidades de trabajo, ni una vida económicamente estable, ni que serás mejor ser humano... estudiar no te asegura absolutamente nada de eso pero... sí te asegura satisfacción personal, ver concretado un pequeño esfuerzo, te asegura conocer más y nada.

Alguna gente llega a decir ¿Para qué sigues estudiando? ¿De qué te sirve tanto estudio, sino tienes dinero? Tal vez tengan mucha razón pero creo que estudiar te asegura darles un gusto a tus padres, hermanos e hijos, te asegura haberte dado un lujo, un gusto, es que verás, hoy en día estudiar es un lujo muy necesario, mal valorado y menospreciado, sí, en muchos casos pero bueno, al final podre decir que me pude dar un gusto.

Especialmente para ti, ***José Manuel Soriano Rojas.***

Que encuentres ese “algo” que te apasione, que hagas con destreza, que te haga sentir el mejor y que seas el mejor, “algo” en lo que te sientas realizado y que te brinde felicidad.

Al ***Ing. José Guadalupe Rojas Astudillo*** y ***Luz María López Moyo*** por el apoyo incondicional, paciencia y amor que me demuestra día a día.

A mis hermanos el ***Ing. Arlae Rojas López***, al ***Lic. en Geología Miguel Rommel Rojas López*** y a mi pequeño hermano ***José Karel Rojas López*** por ser buenos hermanos, por bromear y discutir, por apoyarme y alentarme.

A mis tios ***Julián Rojas Astudillo*** y ***Marta Reyes*** porqué aunque no sea su obligación, muestran apoyo en tiempos difíciles y por esos enormes gestos me encuentro sumamente agradecida.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial para la **Dr. Elvia Día Villaseñor**, a la maestra que me mostró un mundo de oportunidades, que me enseñó el “mundo de la ciencia”, muchas gracias maestra.

Al **Dr. Oscar Talavera Mendoza** y al **Dr. Sergio Salgado Souto**, por su paciencia y apoyo a lo largo de este desesperante y estresante proceso.

Al **Dr. Agustín Damián Nava** por sus sugerencias y comentarios muy acertados para que este trabajo de investigación se concretara de manera exitosa.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	Página
Resumen	7
Abstract	8
I. INTRODUCCIÓN	9
II. MATERIALES Y MÉTODOS	11
2.1. Diseño experimental	12
2.2. Experimento en Bioespacio	12
2.3. Recolección y preparación de las muestras	14
2.4. Análisis de las muestras	17
2.5. Análisis de datos	17
III. RESULTADOS	19
3.1 Desarrollo	19
3.2 Peso húmedo y seco	20
3.3 Datos geoquímicos	24
IV. DISCUSIÓN	40
4.1 Concentraciones en raíces y parte aérea de la planta	41
4.2 Bioacumulación (FBC) y Factores de translocación (FT)	44
4.3 Fisiología vegetal	50
4.4 Inocuidad vegetal	52
V. CONCLUSIONES	55
VI. REFERENCIAS	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen del bioespacio en su parte exterior e interior y de las charolas utilizadas para la germinación de la semilla.....	11
Figura 2. Imagen de los 4 tratamientos de hidroponía y del nivel de crecimiento de las plantas de jitomate.....	13
Figura 3. Imágenes de raíz pesada para obtener el peso fresco, del aspecto de las plantas llegadas a senescencia y de sus frutos.....	15
Figura 4. Imagen de los equipos y materiales utilizados en el laboratorio utilizados para la deshidratación de las plantas de jitomate. También en la parte inferior se observa los equipos utilizados para la molienda de las muestras.....	16
Figura 5. Espectroscopio de plasma por acoplamiento inductivo (ICP-AES), con el cual se realizaron los análisis geoquímicos a las plantas de jitomate. El equipo esta localizados en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra.....	18
Figura 6. Peso húmedo de las plantas de jitomate de los tratamientos 1, 2, 3, y 4. Se observa el peso húmedo de la raíz, tallo hojas y fruto, respectivamente y se hace una comparación entre los cuatro tratamientos.....	22
Figura 7. Peso seco de las plantas de jitomate de los tratamientos 1, 2, 3, y 4. Se observa el peso seco de la raíz, tallo hojas y fruto, respectivamente y se hace una comparación entre los 4 tratamientos.....	23
Figura 8. Concentración (mg L^{-1}) de oligoelementos, metales y metales pesados en la solución nutritiva de los cuatro tratamientos. Las gráficas están en escala logarítmica para poder observar las diferencias entre las soluciones con baja y alta concentración de metales. El tratamiento IV es el control y la concentración de metales pesados en la solución fue menor al límite de detección del equipo (ICP-AES).....	26
Figura 9. Concentración de Al, Cu, Fe, y Zn (mg/kg) de las plantas de jitomate de los tratamientos I, II, III, y IV. Se observa una comparación entre la concentración de oligoelementos entre la raíz, el tallo, hojas y flores, observando que las concentraciones de los cuatro tratamientos son muy similares.....	36
Figura 10. Concentración de Sr, Ni, B, y Co (mg/kg) de las plantas de jitomate de los cuatro tratamientos. Se observa una comparación entre la concentración de metales entre la raíz, tallo hojas y flores, observando que las concentraciones de las diferentes partes de las plantas en los cuatro tratamientos son muy homogéneas.....	37
Figura 11. Concentración de As, Cd, Ni, Cr, y Pb (mg/kg) de las plantas de jitomate de los tratamientos I, II, III, y IV.....	38
Figura 12. Concentración (mg L^{-1}) de oligoelementos, metales y metales pesados en la solución nutritiva de los cuatro tratamientos.....	39
Figura 13. Patrones multi-elementales que permiten observar el comportamiento de oligoelementos y metales pesados en las diferentes partes de las plantas de los cuatro tratamientos.....	43
Figura 14. Factores de Bioacumulación (FBC) y Translocación (FT). Las gráficas están en escala logarítmica para poder observar las diferencias entre las soluciones con baja y alta concentración de metales.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Peso de los reactivos utilizados para la preparación de los tratamientos de hidroponía.....	13
Tabla 2. Peso(g) húmedo y seco de <i>Lycopersicum esculentum</i> Mill., cultivadas en hidroponía y contaminadas con As, Cd, Cr y Pb.....	21
Tabla 3. Concentraciones de metales t pesados en el agua de riego utilizados para el experimento de hidroponía.....	26
Tabla 4. Concentración de metales pesados, oligoelementos y metales (mg/kg peso seco) en raíz y parte aérea de las plantas de jitomate del tratamiento I (10 mg/kg).....	34
Tabla 5. Concentración de metales pesados, oligoelementos y metales (mg/kg peso seco) en raíz y partes aéreas de las plantas de jitomate del tratamiento II (1.0 mg/kg).....	34
Tabla 6. Concentración de metales pesados, oligoelementos y metales (mg/kg peso seco) en raíz y parte aérea de las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del tratamiento III (0.1 mg/kg).....	35
Tabla 7. Concentración de metales pesados, oligoelementos y metales (mg/kg peso seco) en raíz y parte aérea de las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del tratamiento IV (control).....	35
Tabla 8. Factores de bioacumulación (FBC) y translocación (FT) para las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del tratamiento I (10 mg/kg).....	47
Tabla 9. Factores de bioacumulación (FBC) y translocación (FT) para las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del tratamiento II (1.0 mg/kg).....	47
Tabla 10. Factores de bioacumulación (FBC) y translocación (FT) para las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del tratamiento III (0.1 mg/kg).....	48
Tabla 11. Factores de bioacumulación (FBC) y translocación (FT) para las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del tratamiento IV (control).....	48

Resumen

Se evaluó la capacidad de acumulación y translocación de metales pesados en plantas de jitomate, cultivadas en un sistema hidropónico cerrado. Las semillas de jitomate utilizadas fueron de la variedad Río Grande y fueron sembradas en un bioespacio cubierto con malla antiáfidos, con tres capas de plástico sobre el techo y con malla 'ground cover' en el piso. Se utilizaron cubetas de polietileno de baja densidad de 12 litros para colocar el sustrato (tezontle). Se utilizó solución nutritiva Steiner a 0.72 atm, adicionando también óxido de plomo (Pb_3O_4), arsenato de sodio (Na_3AsO_4), cloruro de cadmio (CdCl_2), cloruro de níquel (NiCl_2) y cromato de potasio (K_2CrO_4) en diferentes concentraciones (10, 1 y 0.1 mg L) como fuente de metales pesados. Después de la floración de las plantas y de la cosecha de los frutos, se llevó a cabo una digestión total de raíz, tallo, hojas y flores utilizando agua regia ($3\text{HCl} + 1\text{HNO}_3$). Los análisis de las muestras se realizaron por la técnica de espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción. Las raíces de plantas cultivadas en hidroponía con soluciones de metales pesados de 10, 1.0 y 0.1 mg L tuvieron concentraciones de As entre 160 y 3 mg kg^{-1} ; Cd entre 367 y 2.3 mg kg^{-1} , Ni, 191 y 2 mg kg^{-1} , de Cr entre 815 y 6.7 mg kg^{-1} , y de Pb entre 92 y 0.12 mg kg^{-1} . Los tallos tuvieron concentraciones de As de 127.1 a 0.1 mg kg^{-1} ; Cd entre 29.6 y 0.2 mg kg^{-1} , Ni de 40 a 2 mg kg^{-1} , Cr oscilaron entre 219.8 a 1.1 mg kg^{-1} y el Pb obtuvo valores de 2.0 a 0.1 mg kg^{-1} . Las hojas tuvieron concentraciones de As de 163.2 a 0.5 mg kg^{-1} ; Cd de 370.9 a 0.1 mg kg^{-1} , Ni de 68.7 a 5.3 mg kg^{-1} , Cr 823.3 a 4.2 mg kg^{-1} y, por último, los valores de Pb oscilaron entre 92.7 a 2.5 mg kg^{-1} . Las flores de los cuatro tratamientos presentaron concentraciones de As de 36.3 a 1.0 mg kg^{-1} ; Cd de 66.9 a 0.8 mg kg^{-1} , Ni de 51.5 a 0.5 mg kg^{-1} , el Cr de 110.4 a 1.3 mg kg^{-1} y finalmente, el Pb de 0.24 mg kg^{-1} . Los datos obtenidos indican que, aunque las raíces presentan una mayor acumulación de metales pesados en comparación a la parte aérea de la planta, la absorción de metales pesados en el tallo, hojas y flores, aunque es menor que la raíz, es lo suficientemente alta para intoxicar a la planta e interrumpir un desarrollo normal. De tal forma que, todas las plantas de los tratamientos I y II no produjeron fruto, además de presentar, baja biomasa, y marchitamiento, lo cual surge por la intoxicación por metales pesados, que las plantas experimentaron, por el exceso en As, Cd, Ni, Cr y Pb.

Abstract

The ability of accumulation and translocation of heavy metals in tomato plants was evaluated using a closed hydroponics system. The tomato seeds used were Rio Grande variety. They were planted inside a greenhouse covered with anti-aphids mesh with three layers of plastic on the roof and ground mesh cover on the floor. Low density polyethylene buckets of 12 liters were used to place the substrate. The growing media was tezontle for the hydroponic system after transplanting. Steiner nutrient solution was used at 72 atm in the hydroponic system, adding lead oxide (Pb_3O_4), sodium arsenate (Na_3AsO_4), cadmium chloride (CdCl_2), nickel chloride (NiCl_2) and potassium chromate (K_2CrO_4) at different concentrations (10, 1, 0.1 and 0.01 mg L^{-1}). A total digestion using aqua regia ($\text{1HNO}_3 + 3\text{HCl}$) was carried out after flowering and harvest. Analyses of samples were performed by the technique of atomic emission spectroscopy inductively coupled plasma (ICP-AES). The roots of plants grown hydroponically with heavy metal solutions 10, 1.0 and 0.1 mg kg^{-1} had As concentrations between 160 and 3 mg kg^{-1} ; Cd between 367 and 2.3 mg kg^{-1} , Cr between 815 and 6.7, and 0.12 mg kg^{-1} Pb and 92. Stems from treatments 10, 1.0 y 0.1 mg kg^{-1} of heavy metals showed concentrations of As from 127.10 to 0.11 mg kg^{-1} ; Cd between 29.62 y 0.24 mg kg^{-1} , Cr concentrations oscillated to 219.78 and 1.10 mg kg^{-1} and Pb evince values from 2.04 to 0.11 mg kg^{-1} . For treatments 10, 1.0 y 0.1 mg kg^{-1} the concentrations of heavy metals in leafs for As range from 163.20 to 0.48 mg kg^{-1} ; Cd from 370.85 to 0.12 mg kg^{-1} , Cr vary from 823.30 to 4.20 mg kg^{-1} and Pb concentrations from 92.74 to 2.52 mg kg^{-1} . The data show that the roots in hydroponics have very high concentrations of As, Cd, Cr and Pb. The experiment allowed identifying a different behavior related to heavy metals uptake by tomato plant roots depending upon concentration. This suggests that roots of tomato plants were accumulating heavy metals, and this behavior may vary depending on the concentration of heavy metals in the ground media; the higher concentrations of heavy metals contained in the ground media, the higher concentrations of heavy metals within the plant roots.

1. INTRODUCCIÓN

Los metales pesados como el plomo (Pb), arsénico (As), níquel (Ni) cadmio (Cd) y cromo (Cr) producen afectaciones al medio ambiente y a la salud humana (Lugon-Moulin *et al.*, 2004; Duruibe, 2007; Gallego *et al.*, 2012). Los metales pesados se pueden solubilizar al entrar en contacto con el agua, lo cual permite que puedan ser absorbidos por organismos vivos (Landis y Ho Yu, 2000; Méndez *et al.*, 2009; Wójcik *et al.*, 2014). Las fuentes de metales pesados más comunes son fertilizantes, plaguicidas, residuos mineros, entre otros (Sabine, 2009; Hu, 2002; McElroy *et al.*, 2006; WHO, 2011). El cadmio y el arsénico se encuentran normalmente en fertilizantes, pesticidas y fungicidas (Sabine, 2009) y ambos elementos junto con el cromo son reconocidos como carcinógenos (Hu, 2002; McElroy *et al.*, 2006; Who, 2011). El plomo, por otro lado, es uno de los metales pesados más peligrosos, ya que retarda la sinapsis neuronal y provoca deficiencia en el desarrollo cerebral e intelectual, afectando principalmente a niños (Banks *et al.*, 1997; Duruibe *et al.*, 2007).

Las plantas son una parte muy importante de los ecosistemas y son altamente impactadas por la contaminación de metales pesados. La acumulación de metales pesados en tejidos vegetales produce biodisponibilidad de metales pesados para animales y seres humanos cuando consumen este tipo de productos (Fries *et al.* 2006; Ruiz-Huerta y Armienta-Hernández, 2012). Las plantas han desarrollado mecanismos naturales de defensa contra el exceso de absorción de metales pesados. Sin embargo, las plantas comestibles como el maíz, fresas, arroz, zanahorias y papas son capaces de acumular metales pesados en sus tejidos y en sus frutos (Díaz-Villaseñor 2006; Oluyemi y Awokunmi, 2013; Flores Ronces, 2015). Por lo tanto, el estudio de la calidad de los productos vegetales comestibles y en especial la calidad del jitomate, por ser uno de los alimentos de mayor consumo en la dieta del mexicano, lo hacen un tema prioritario.

El jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es el vegetal más consumido en el mundo después de la papa (SAGARPA. 2010). El cultivo de jitomate en el Municipio de Taxco de Alarcón es una actividad económica importante para la región, ya que su producción y comercialización genera fuentes de empleo. De esta forma, el estudio de la translocación de metales pesados en jitomate adquiere relevancia, ya que, de demostrarse la translocación de metales pesados en esta planta, representaría un problema de salud ambiental y social en la región.

Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo evaluar la capacidad de acumulación y translocación de metales pesados de plantas de jitomate, cultivadas en un sistema hidropónico cerrado bajo condiciones controladas de invernadero. La importancia de este trabajo está en la utilización de un sistema hidropónico como una vía para tener un control hermético de las fuentes de metales pesados en las plantas y así, evaluar de forma precisa la transferencia y los mecanismos de absorción y translocación de metales pesados procedentes únicamente de las soluciones agregadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se utilizó un bioespacio de 60 m² (10 x 6 m) para controlar la entrada de metales pesados ajenos al experimento (principalmente plaguicida, herbicidas y fertilizantes). Para este propósito, el bioespacio se cubrió con malla antiáfido de polietileno de alta densidad de color cristal. En el techo se utilizaron tres capas de plástico de polipropileno de alta densidad, mientras que en el suelo se utilizó una cubierta de malla “*ground cover*” de polipropileno tejido de color negro y aditivos UV para tener un aislamiento completo (Fig. 1 A-B).



Figura 1. Imagen del bioespacio en su parte exterior e interior y de las charolas utilizadas para la germinación de la semilla. A=Imagen exterior del bioespacio. B=Imagen interior del Bioespacio. C=Germinación de las semillas de jitomate. D=Preparación del sustrato (tezontle) para experimento hidropónico.

2.1 Diseño experimental

El diseño experimental fue en bloques completos al azar. El experimento consistió de cuatro tratamientos con cinco repeticiones y se utilizó como sustrato tezontle previamente desinfectado (Fig. 1-D). Las muestras de plantas se evaluaron 100 días después de la siembra.

2.2 Experimento en Bioespacio

Se utilizaron semillas de jitomate de crecimiento indeterminado de la variedad Río Grande. Las semillas fueron germinadas en charolas de 162 cavidades con agrolita. El trasplante de las plántulas se realizó 30 días después de la germinación (FAO, 2012). Las plántulas fueron colocadas en contenedores de 12 litros con tezontle para realizar el experimento.

El tezontle se desinfectó con hipoclorito de sodio diluido 1/100 (1 litro de hipoclorito por cada 100 litros de agua), el cual se remojó durante 60 horas en contenedores de 250 litros. Posteriormente, el tezontle se escurrió y se puso en costales nuevos de 20 kg para ser colocado en una olla autoclave de 300 litros. La olla autoclave se llevó a una temperatura constante de $\sim 150^{\circ}\text{C}$ durante dos horas para eliminar microorganismos patógenos. El tezontle se dejó enfriar durante 5 horas y posteriormente, se colocó dentro del bioespacio para su utilización en los diferentes tratamientos hidropónicos. Se usaron cubetas de polietileno de baja densidad de 12 litros como macetas (Fig. 2). Se utilizó la solución nutritiva Steiner a 0.72 atm de presión osmótica (100%) con un sistema de riego cerrado. El riego se llevó a cabo dos veces al día y el cambio de agua (solución nutritiva con metales pesados) se realizó cada 15 días. Los tratamientos fueron preparados previamente utilizando una mezcla de solución nutritiva y arseniato de sodio, cloruro de cadmio, cromato de potasio y óxido de plomo (como las respectivas fuentes de As, Cd, Cr y Pb) y fueron almacenados en contenedores de 60 litros. Las concentraciones calculadas en los cuatro tratamientos utilizando la solución nutritivas Steiner fue de nitrógeno 167, fósforo 31,

potasio 277, magnesio 49 calcio 183, azufre 67, hierro 3, manganeso 1.97, boro 0.44, zinc 0.11, cobre 0.02 y molibdeno 0.007 ppm. Para los tratamientos I, II y III se prepararon soluciones calculando obtener concentración de As, Cd, Cr y Pb, de 10, 1.0 y 0.1 mg kg⁻¹, respectivamente (Tabla 1). El tratamiento IV sirvió de testigo o control ya que sólo se le agregó solución nutritiva.



Figura 2. Imagen de los 4 tratamientos de hidroponía y del nivel de crecimiento de las plantas de jitomate.

Tabla 1. Peso en gramos de los reactivos utilizados para la preparación de los tratamientos de hidroponía

Compuesto	Fórmula	Tratamiento I (g)	Tratamiento II (g)	Tratamiento III (g)
Arsenato de sodio	Na ₃ As O ₄	2.8051	0.2804	0.0291
Cloruro de cadmio	Cd Cl ₂	0.8280	0.0825	0.0085
Cloruro de níquel	Ni Cl ₂	2.0471	0.2103	0.0210
Cromato de potasio	K ₂ Cr O ₄	1.2062	0.1219	0.0126
Óxido de plomo	Pb ₃ O ₄	1.6536	0.1696	0.0179

Los pesos calculados son para preparar soluciones con volúmenes de 75 litros cada uno.

2.3 Recolección y preparación de las muestras

Una vez que las plantas desarrollaron frutos, fueron retiradas de su contenedor. En el caso de las plantas de los tratamientos I y II, el momento de recolección se efectuó a partir de que las hojas empezaron a entrar a senescencia, es decir en el día 60 y 65 después del trasplante (DDT), respectivamente; mientras que las plantas de los tratamientos III y IV se cosecharon 70 DDT.

Las plantas fueron lavadas primero con agua potable y luego tres veces con agua destilada, dos horas antes de la sustracción de las plantas de su maceta. Posteriormente, cada planta fue cortada a ras del suelo (en este caso sustrato/tezontle) con tijeras de podar, las cuales fueron lavadas con agua destilada antes de cada corte. Al tallo se le eliminaron las ramas laterales y la yema terminal, al resultado de esta poda se le consideró la muestra que ejemplificaría el tallo principal. Todas las ramas laterales se cortaron a ras de las yemas axilares y se consideraron como muestras de hojas, previa eliminación de las inflorescencias. Las muestras de raíz, se colectaron justamente de la raíz principal y de las raíces laterales en cada planta. Las muestras húmedas de las diferentes partes de la planta fueron pesadas en una balanza granataria ajustada a gramos (g) (Fig. 3-A) y se secaron hasta obtener un peso constante en un horno (Fig. 4-B) a 65 – 70 °C durante 7 días (Terraza *et al.*, 2008). Al término del registro del peso húmedo, cada una de las muestras se almacenó en bolsas de papel independientes. Finalmente, las muestras se molieron en un molino mecánicos y en un mortero de porcelana (Fig. 4 C-D), se tamizaron a una malla de 1 mm y se guardaron en tubos de centrifuga de 50 ml.



Figura 3. Imágenes de raíz pesada para obtener el peso fresco, del aspecto de las plantas llegadas a senescencia y de sus frutos.

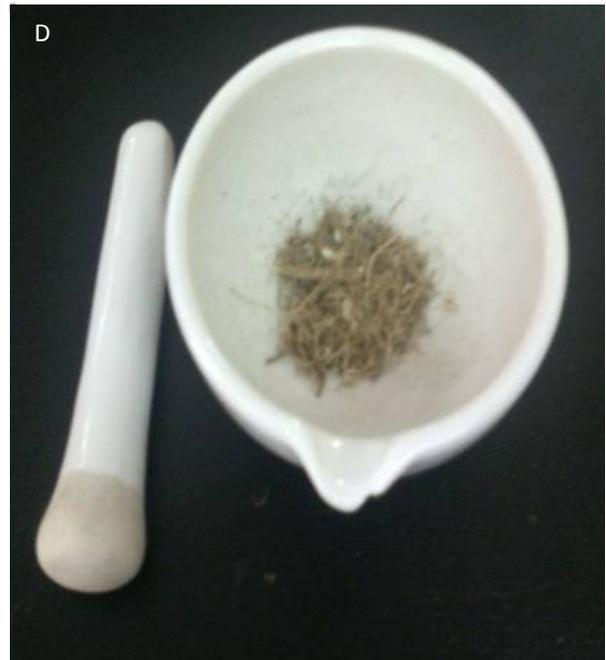


Figura 4. Imagen de los equipos y materiales utilizados en el laboratorio utilizados para la deshidratación de las plantas de jitomate. También en la parte inferior se observa los equipos utilizados para la molienda de las muestras. A y B, horno utilizado para el secado de plantas. C y D materiales utilizados para la molienda de plantas.

2.4 Análisis de las muestras

La digestión y análisis de las muestras se realizó en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Guerrero. Entre 200 y 300 mg de muestra fueron cuidadosamente pesados en bombas Savillex PTF ultra limpias. Las muestras fueron atacadas con agua regia ultra pura (1HNO_3 : 3HCl) dos veces en platos calientes a 120°C . Las muestras fueron evaporadas a sequedad y fueron restituidas con 1 ml de HNO_3 al 2%. El contenido de cada muestra fue filtrado usando papel Whatman # 42. El filtrado fue hecho con 25 ml de agua MQ para su análisis. Los blancos siguieron el mismo procedimiento, excepto por la adición de muestra al contenedor. Las concentraciones de metales pesados fueron determinadas en un espectrómetro de emisión por acoplamiento de plasma inducción (ICP-AES) Perkin Elmer Optima 3200 (Fig. 5). La exactitud y precisión de los métodos analíticos e instrumentación fueron monitoreados con los estándares certificados internacionalmente CWW-TM-A, CWW-TM-H y CWW-TM-D. Basado en el análisis de numerosos estándares multielementales en los últimos 20 años, la cuantificación del límite para metales pesados (As, Cd, Pb, Cr) es mejor al 0.010 mg L^{-1} .

2.5 Análisis de datos

El Factor de Bioacumulación (FBC) fue expresado por la proporción de la concentración del metal en la raíz sobre la concentración total en el suelo, mientras que el Factor de Translocación (FT) se expresó como la concentración en la parte aérea dividida entre la concentración en la raíz (Ruiz-Huerta y Armienta-Hernandez, 2012).

$$\text{FBC} = \frac{(\text{metales en raíz})}{(\text{metales en el suelo})} \quad \text{FT} = \frac{(\text{metales en la parte aérea})}{(\text{metales en la raíz})}$$



Figura 5. Espectroscopio de plasma por acoplamiento inductivo (ICP-AES), con el cual se realizaron los análisis geoquímicos a las plantas de jitomate. El equipo está localizado en el Laboratorio de Geoquímica de la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, de la Universidad Autónoma de Guerrero.

3. RESULTADOS

3.1 Desarrollo

Se observó una tasa de germinación de 96.29% de un total de 810 semillas de jitomate variedad Río Grande. Los primeros brotes de las plántulas empezaron a partir del cuarto día. El crecimiento de las plántulas en los tratamientos no tuvo diferencia durante los primeros 23 días, con alturas que variaban entre 5 y 7 cm. Sin embargo, en el día 24 se observó pérdida de coloración en las hojas y marchitamiento en 25 plántulas y a partir del día 26 se perdió una población de 19 plántulas. En el día 29 se realizó una homogenización de las plántulas, eliminando aquellas enfermas y cloróticas. El trasplante de las plántulas a los contenedores correspondientes se realizó el día 30. Las plántulas fueron regadas únicamente con solución nutritiva Steiner a 0.72 atm durante 22 días después del trasplante (DDT). Durante este tiempo, las plantas tuvieron un crecimiento uniforme, mostrando una altura promedio de 36.28 cm y crecimiento de hojas nuevas. En el día 23 DDT, las plantas comenzaron a mostrar un buen desarrollo de las inflorescencias y a partir del día 35 DDT la floración comenzó. A los 42 DDT todas las plantas que desarrollaron flores entraron en antesis.

La aplicación de la solución con metales pesados se efectuó en el día 51 DDT. En los días 52, 53 y 54 no se observó ningún cambio, las plantas siguieron con una altura promedio de 37 cm, las hojas maduras mostraron una coloración verde oscuro intenso y las hojas jóvenes tonalidades en color verde con menos intensidad. Las flores mostraron un buen desarrollo, con un color amarillo brillante. A los 55 días DDT, las plantas sometidas al Tratamiento I mostraron cambios en la coloración de las hojas con marchitamiento, comparadas a las plantas de los tratamientos II, III y IV que no mostraron deterioro ni cambios de coloración, e incluso en las plantas de los tratamientos III y IV comenzó la aparición de los primeros frutos. A los 57 DDT solo las plantas del tratamiento I y II tiraron las flores y se hicieron evidentes cambios de

estructura, marchitamiento, enchinamiento, clorosis y necrosis en las hojas, a diferencia de los tratamientos III y IV que si mantuvieron todas sus flores y no presentaron afectación alguna. A los 60 DDT todas las plantas del tratamiento I llegaron a senescencia, tiempo en el que fueron recolectadas las muestras de las diferentes partes de las plantas de este tratamiento para la determinación de metales pesados. Para el día 63 DDT el desarrollo de frutos en los tratamientos III y IV fue lento y mostraron poco crecimiento, los frutos presentaron en promedio 4.3 cm de altura y 1.4 cm de ancho. En el día 64 DDT, las tres plantas restantes del tratamiento II llegaron a senescencia por lo que fueron recolectadas. En el día 66 DDT, el fruto desarrollado en el tratamiento III mostró pudrición en la base (Fig. 3) , mientras que los frutos del tratamiento IV no mostraron afectación alguna. A los 70 DDT se realizó la cosecha y recolección de las muestras de los tratamientos III y IV.

3.2 Peso húmedo y seco

Los pesos húmedo y seco de la raíz y de la parte aérea de las plantas de jitomate se muestran en la Tabla 2. En los cuatro tratamientos se pueden observar una variación en el peso húmedo, mostrando el orden siguiente: tratamiento III>tratamiento IV>tratamiento II>tratamiento I (Fig. 6). Así, las raíces tuvieron un peso húmedo que vario de 5.4 g, seguido por 11.0 g, 14.6 g y 13.8 g, indicando que el peso húmedo menor se obtuvo en el tratamiento I y el mayor en el tratamiento III y IV. El peso húmedo del tallo también mostró un comportamiento idéntico al de las raíces mostrando un rango de peso entre 7.4g y 14.6 g. En las hojas la situación no fue diferente teniendo un peso húmedo en un rango de 11.0g a 19.4 g. Debido a que solo se obtuvieron frutos en los tratamientos III y IV, el rango de peso húmedo es muy estrecho de 2.80 a 1.20 g, donde el menor peso fue del tratamiento IV.

Los cuatro tratamientos muestran una variación en el peso seco en el orden siguiente: tratamiento III>tratamiento IV>tratamiento II> tratamiento I (Fig. 7). De este modo, las raíces tuvieron un peso seco con muy poca variación de 2.6 g a 3.1. El peso seco del tallo mostró un comportamiento distinto al de las raíces ya que el peso mayor se dio en el tratamiento I con 3.2 g, seguido por el tratamiento II con 3.0 g, después el tratamiento III con 2.8 g y finalmente con el tratamiento IV con 2.7 g. Las hojas mostraron un rango de peso seco muy pequeño de 2.5 a 3.6 gramos, donde el peso seco menor estuvo en el tratamiento I y el mayor en el tratamiento II. Las plantas de jitomate no dieron frutos en los tratamientos I y II y el peso seco de los frutos del tratamiento III y IV fue de 1.6 a 1.0 g, con el mayor peso en el tratamiento IV.

Tabla 2. Peso(g) húmedo y seco de *Lycopersicum esculentum* Mill., cultivadas en hidroponía y contaminadas con As, Cd, Cr y Pb.

	Tratamiento I	Tratamiento II	Tratamiento III	Tratamiento IV
Peso - fresco raíz	5.4 ± 0.55c	11.00 ± 1.73b	14.60 ± 2.70ab	13.80 ± 1.64a,b
Peso - seco raíz	2.66 ± 0.52a	2.94 ± 0.74a	3.06 ± 0.90a	2.92 ± 1.04a
Peso - fresco tallo	7.40 ± 0.55b	11.60 ± 1.34ab	14.60 ± 1.85a	14.40 ± 1.95a
Peso - seco tallo	3.16 ± 0.26a	3.00 ± 0.52a,b	2.78 ± 0.26a,b	2.72 ± 0.44a,b
Peso - fresco hojas	11.00 ± 1.00a	12.60 ± 2.88a	19.40 ± 3.02a	16.20 ± 2.95a
Peso - seco hojas	2.48 ± 0.25b	3.58 ± 0.50a	3.18 ± 0.77a,b	3.04 ± 0.57a,b
Peso fresco frutos	NF	NF	2.80 ± 0.35a	1.20 ± 0.46a
Peso seco frutos	NF	NF	1.03 ± 0.26a	1.60 ± 0.34a

Tratamiento I. 10 ppm de arseniato de sodio, cloruro de cadmio, cromato de potasio y óxido de plomo

Tratamiento II. 1.0 ppm de arseniato de sodio, cloruro de cadmio, cromato de potasio y óxido de plomo

Tratamiento III. 0.1 ppm de arseniato de sodio, cloruro de cadmio, cromato de potasio y óxido de plomo

Tratamiento IV. Solución nutritiva Steiner (Testigo)

Se presenta la media y desviación estándar (media ± DS)

abc= Medias en una fila con diferente letra son estadísticamente diferentes (p<0.05).

NF= No hubo fruto en estas planta

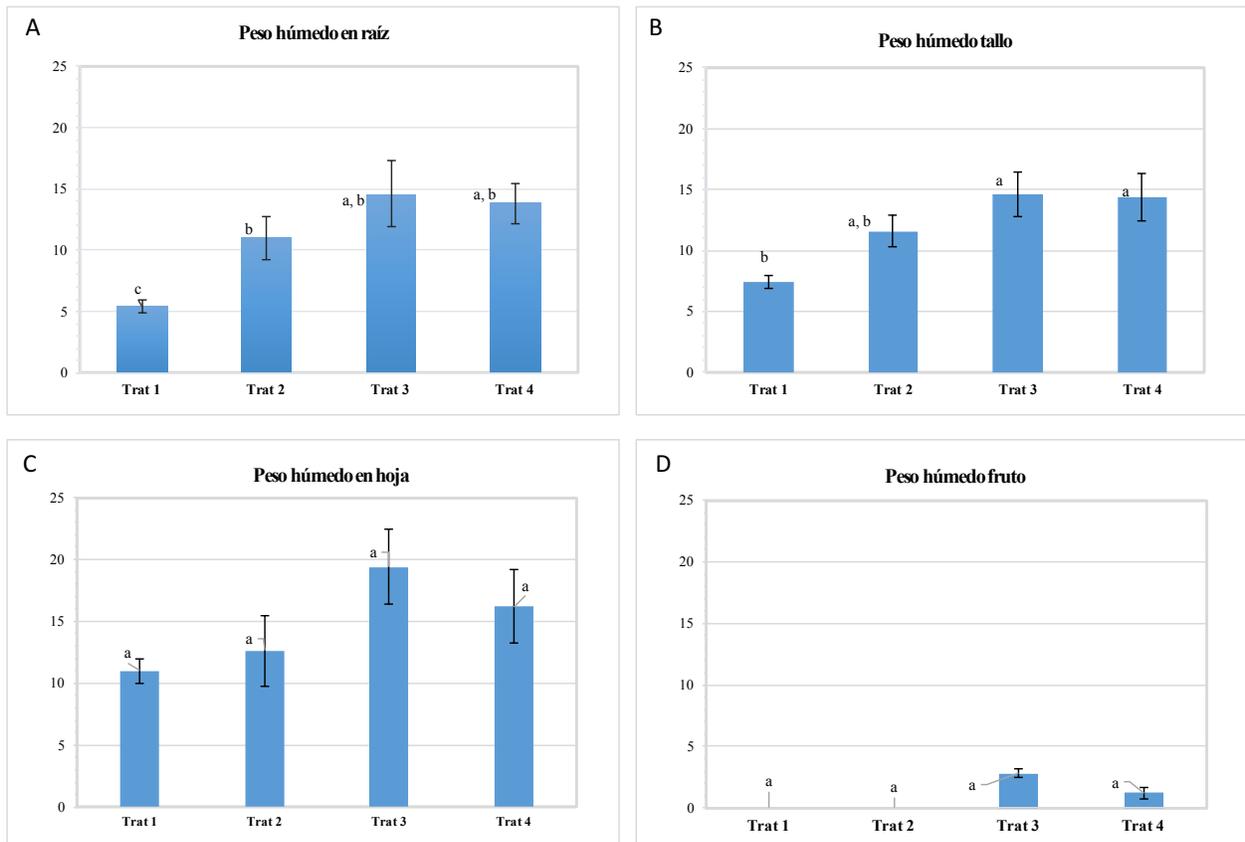


Figura 6. Peso húmedo de la raíz, tallo, hojas y fruto, de las plantas de jitomate de los cuatro tratamientos; permitiendo una comparación entre ellos. Trat 1 = tratamiento I, Trat 2 = tratamiento II, Trat 3 = tratamiento III, Trat 4 = tratamiento IV.

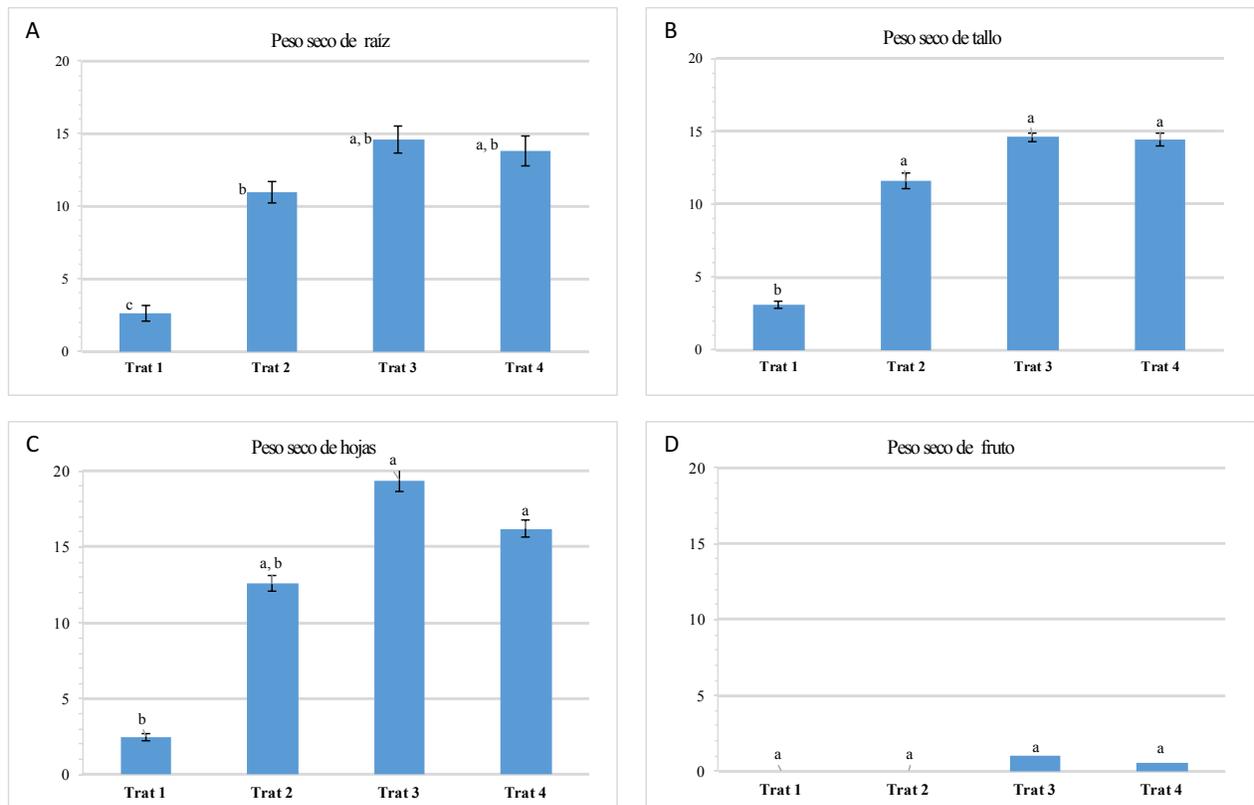


Figura 7. Peso seco de la raíz, tallo, hojas y fruto, de las plantas de jitomate de los cuatro tratamientos; permitiendo una comparación entre ellos. Trat 1 = tratamiento I, Trat 2 = tratamiento II, Trat 3 = tratamiento III, Trat 4 = tratamiento IV.

En las hojas, los pesos húmedos variaron de 10 a 12 g con un promedio de 11.0 g para el tratamiento I; de 10 a 17 g con promedio de 12.6 g en el tratamiento II; de 10 a 30 g con promedio de 19.4 g para el tratamiento III; y finalmente de 13 a 21 g con 16.2 g en promedio en el tratamiento IV. Los únicos datos de frutos se registraron en los tratamientos III y IV, con pesos de 14 y 6 g, respectivamente.

3.3 Datos geoquímicos

3.3.1 Concentraciones en soluciones nutritivas

La concentración (mg L^{-1}) de metales pesados y de oligoelementos utilizados en las soluciones nutritivas de los cuatro tratamientos son reportados en la Tabla 3. El Al tuvo mayores concentraciones en la solución nutritiva del tratamiento I (0.38 mg L^{-1}), posteriormente en el tratamiento IV (0.33 mg L^{-1}), seguido por tratamiento III (0.14 mg L^{-1}) y finalmente en el tratamiento II (0.05 mg L^{-1}). El Fe, Zn, y Cu mostraron un comportamiento muy homogéneo, siendo el Fe el elemento con mayor concentración de los tres en los cuatro tratamientos y el Cu el de menor concentración. El Fe mostró una concentración en las soluciones nutritivas de los cuatro tratamientos en un rango de 4.81 a 1.70 mg L^{-1} . El Zn presentó una concentración en un rango de 2.22 a 0.80 mg L^{-1} . El Cu en las soluciones nutritivas tuvo concentraciones en un rango de 0.20 a 0.081 mg L^{-1} , donde al igual que el Fe y Zn las concentraciones mayores estaban en el tratamiento I y las menores en el tratamiento IV. En la Figura 8 se presenta la concentración de estos oligoelementos y se hace una comparación con la concentración de metales totales y metales pesados de las soluciones en los cuatro tratamientos.

En el caso de la concentración de metales totales, se observó que el estroncio (Sr) mantuvo una concentración extremadamente homogénea en los cuatro tratamientos (2.72 - 1.76 mg L^{-1}), teniendo la mayor concentración en el tratamiento III y la menor en el tratamiento IV

(Fig. 8). El boro (B) mantuvo en los cuatro tratamientos una concentración muy similar en un rango de 0.66 a 0.23 mg L⁻¹, teniendo la concentración menor en el tratamiento IV. El cobalto (Co) tuvo en los cuatro tratamientos concentraciones extremadamente bajas que varían entre 0.01 y 0.001 mg L⁻¹ (Fig. 8).

Las concentraciones de cromo (Cr), cadmio (Cd), arsénico (As), níquel (Ni) y plomo (Pb) en las soluciones de cada tratamiento mostraron un comportamiento muy homogéneo, teniendo el siguiente orden en los cuatro tratamientos Cr>Cd>As>Ni>Pb. Así, la solución del tratamiento I mantuvo las mayores concentraciones en un rango de 16.78 a 6.66 mg L⁻¹, coincidiendo con los cálculos para obtener una solución de metales pesados con una concentración cercana a 10 mg L⁻¹ (Fig.8). La solución del tratamiento II mostró una concentración de metales pesados entre 1.66 a 0.68 mg L⁻¹, concentraciones que concuerdan con los cálculos para obtener una solución cercana a 1 mg L⁻¹. La solución del tratamiento III tuvo las menores concentraciones de metales pesados en un rango de 0.23 a 0.09 mg L⁻¹, concentraciones muy similares a las estimadas de 0.1 mg L⁻¹. Finalmente, en la solución nutritiva del tratamiento IV no se pudieron obtener datos de la concentración de metales pesados, ya que éstas estaban por debajo del límite de detección del equipo (< 0.01 mg L⁻¹), lo cual demuestra que la solución del tratamiento IV fue un tratamiento de control (Fig.8).

La Figura 8-D muestra a todos los elementos en conjunto, permitiendo una comparación de las concentraciones de ello en los cuatro tratamientos. Así, las concentraciones del Al, Cu, Fe, Zn, Sr, B y Co en las soluciones nutritivas mantienen patrones muy homogéneos en los cuatro tratamientos. En cambio, para el Ni, As, Cd, Cr y Pb muestran una clara diferencia en la concentración entre los tratamientos I, II, y III.

Tabla 3. Concentraciones de metales pesados en el agua de riego para los cuatro tratamientos.

Muestra	Tratamiento I	STD	Tratamiento II	STD	Tratamiento III	STD	Tratamiento IV	STD
As	10.970	0.604	1.003	0.053	0.145	0.0125	<LD	<LD
Cd	14.640	0.769	1.514	0.087	0.175	0.006	<LD	<LD
Cr	16.780	0.882	1.665	0.096	0.228	0.0061	0.003	0.0036
Pb	6.660	0.3351	0.686	0.041	0.098	0.0142	<LD	<LD
Al	0.384	0.0448	0.046	0.039	0.139	0.0317	0.330	0.0414
Cu	0.199	0.0075	0.135	0.014	0.143	0.0059	0.081	0.0108
Fe	4.811	0.2424	3.255	0.175	2.874	0.0781	1.701	0.016
Zn	2.219	0.1177	1.528	0.091	1.397	0.0336	0.798	0.0132
Sr	2.314	0.0873	2.001	0.038	2.719	0.0502	1.757	0.0536
B	0.661	0.0274	0.392	0.023	0.406	0.0244	0.234	0.0071
Co	0.010	0.0037	0.003	9E-04	0.001	0.0014	0.002	0.002
Ni	8.440	0.4429	0.874	0.047	0.117	0.0053	<LD	<LD



Figura 8. Concentración (mg L^{-1}) de oligoelementos, metales y metales pesados en la solución nutritiva de los cuatro tratamientos. Las gráficas están en escala logarítmica para poder observar las diferencias entre las soluciones con baja y alta concentración de metales. El tratamiento IV es el control y la concentración de metales pesados en la solución fue menor al límite de detección del equipo (ICP-AES)

3.3.2 Concentraciones en raíces y parte área de la planta

3.3.2.1 Oligoelementos

Las concentraciones de los oligoelementos y metales pesados de las plantas de los cuatro tratamientos se pueden observar en las tablas 4-7 y en las figuras 9-11. Las plantas de los cuatro tratamientos mostraron concentraciones de Al, Fe, Zn y Cu moderadamente homogéneas. El orden de mayor a menor concentración en las plantas se dio de Raíces>Hojas>Flores>Tallo.

Las concentraciones de estos cuatro macronutrientes en las raíces de las plantas de los cuatro tratamientos mostraron el siguiente orden Al>Fe>Zn>Cu; donde el Al y Fe tuvieron concentraciones por arriba o muy cercanas a 1000 mg Kg^{-1} en todos los tratamientos, con excepción del primero donde alcanzaron 2900 y 2100 mg Kg^{-1} . El Zn también mostró una concentración muy homogénea en las raíces de los cuatro tratamientos en un rango de 103.11 a 56.80 mg Kg^{-1} , teniendo la mayor concentración en el tratamiento I y la menor en el tratamiento III. El Cu es el que mostró la menor concentración de los cuatro macronutrientes en un rango de 26.20 a 24.70 mg Kg^{-1} para el tratamiento I, III, y IV; mientras que en el tratamiento II solo tuvo 10.92 mg Kg^{-1} (Fig.9).

En el tallo las concentraciones de Al, Fe, Zn y Cu fueron menores siempre a 100 mg Kg^{-1} en todos los tratamientos. El Al fue el que alcanzó las mayores concentraciones en los tratamientos I y II con 50.60 y 116.76 mg Kg^{-1} ; mientras que en los tratamientos III y IV alcanzó los 36.95 y 31.00 mg Kg^{-1} , respectivamente. El Fe presenta concentraciones muy homogéneas en los cuatro tratamientos en un rango que va de 77.82 a 35.36 mg Kg^{-1} , teniendo que la concentración mayor se encontró en el tratamiento I y la menor en el tratamiento IV; mientras que los tratamientos II y III fueron muy similares. El Zn y el Cu presentan concentraciones en los tallos de los cuatro tratamientos en un rango que va de 59.95 a 32.55 y 7.67 a 4.65 mg Kg^{-1} , mostrando ambos metales un comportamiento extremadamente homogéneo (Fig.9).

En las hojas de los cuatro tratamientos el Al y el Cu presentan concentraciones muy similares mostrando rangos que van de 166.31 a 104.78 y de 14.12 a 10.81 mg Kg⁻¹, respectivamente. El Fe presenta una concentración idéntica en las hojas de las plantas de jitomate de los tratamientos I y II de 200.50 mg Kg⁻¹, mientras que en los tratamientos III y IV presentaron concentraciones de 144.84 y 99.62 mg Kg⁻¹, respectivamente. Por su parte, en las hojas el Zn mostró concentraciones menores en los tratamientos I y II (74.91 y 62.05 mg Kg⁻¹, respectivamente) con respecto a las hojas de los tratamientos III y IV (107.74 y 103.34 mg Kg⁻¹).

Las flores de los tratamientos I, III y IV muestran concentraciones de Al, Fe, Zn y Cu muy similares, mientras que las flores del tratamiento II muestran concentraciones un orden de magnitud menor a las antes mencionadas. Así, el Al presenta concentraciones que van de 94.89 a 65.12 mg Kg⁻¹, teniendo e valor más alto en el tratamiento III y el más bajo en el tratamiento I. Sin embargo, el valor más bajo del Al se encontró en el tratamiento II con una concentración de tan solo 6.61 mg Kg⁻¹ (Fig.9). El Fe presentó concentraciones que van de 102.80 a 86.89 mg Kg⁻¹, donde la mayor concentración se encontró en el tratamiento I, y la más baja en el tratamiento IV. El tratamiento II mostró la concentración de Fe más baja de tan solo 7.82 mg Kg⁻¹(Fig. 9). El Zn al igual que los demás elementos en las flores mostró que los tratamientos I, III y IV son muy homogéneos en este elemento; teniendo concentraciones de 86.89, 75.27 y 63.66 mg Kg⁻¹, donde la concentración mayor fue en el tratamiento IV, seguida por el tratamiento III y la más baja en el tratamiento I. Al igual que en las anteriores, en el tratamiento II se obtuvo una concentración de Zn de tan solo 6.37 mg Kg⁻¹. El Cu, mostró concentraciones de 13.41 y 11.32 mgKg⁻¹, en los tratamientos I y III respectivamente; mientras que en los tratamientos II y IV tuvo concentraciones de Cu de 0.72 y 1.30 mg Kg⁻¹ (Fig. 9).

3.3.2.2 Metales totales

Las concentraciones de Sr, B y Co de los cuatro tratamientos se pueden observar en las tablas 4, 5, 6 y 7. Así mismo, en la Figura 10 se graficaron las concentraciones de estos elementos y se puede observar la variación que tienen en los tratamientos hidropónicos.

En la raíz, el Sr muestra concentraciones con moderada homogeneidad con respecto a las partes aéreas de la planta; es decir, el Sr presenta mayor concentración en la raíz, después en las hojas, posteriormente en las flores y finalmente en el tallo en los cuatro tratamientos. En las raíces de todos los tratamientos, el Sr presenta concentraciones que varían de 135.88 a 186.10 mg Kg⁻¹, teniendo la mayor concentración en el tratamiento III y la menor en el tratamiento II (Fig. 10). El B es un elemento que presenta un orden inverso al resto de los demás metales, ya que las mayores concentraciones están en las hojas y en las flores y las menores en las raíces. En las raíces de los cuatro tratamientos el B tiene concentraciones en un rango de 21.07 a 10.18 mg Kg⁻¹. El Co presenta las mayores concentraciones en las raíces, seguidos por las hojas y las flores; y las concentraciones más bajas en los tallos. No obstante, sus concentraciones en las raíces son muy similares con valores que van de 3.39 a 1.97 mg Kg⁻¹.

En el tallo, el Sr, el B y el Co presentan concentraciones en el orden de Sr>B>Co. El Sr en el tallo presenta concentraciones que varían entre 105.16 y 74.44 mg Kg⁻¹ (Fig. 10). El B es un elemento que presenta concentraciones que van de 43.53 a 27.04 mg Kg⁻¹ en los cuatro tratamientos. El Co presenta concentraciones extremadamente bajas en un rango que va de los 0.24 a los 0.36 mg Kg⁻¹.

En las hojas, el Sr es el elemento con las mayores concentraciones, mientras que el Co es el elemento con las menores concentraciones en los cuatro tratamientos. El orden de la concentración de estos cuatro elementos es Sr>B>Co. En las hojas es la parte de la planta donde existe la mayor concentración de estos elementos con respecto a la raíz, tallo y fruto. Así, el Sr

presenta una concentración en un rango de 241.52 a 213.35 mg Kg⁻¹, donde la mayor concentración esta en los tratamientos III y IV y las menores en los tratamientos I y II. El B muestra concentraciones en un rango de 192.27 a 76.77 mg Kg⁻¹, y al igual que en la raíz y en el tallo, presenta las mayores concentraciones en el tratamiento III y IV, y las menores en los tratamientos I y II. El Co presenta concentraciones extremadamente bajas en los cuatro tratamientos en un rango de 0.48 a 1.35 mg Kg⁻¹, mostrando las concentraciones más altas en los tratamientos III y IV y las menores en los tratamientos I y II (Fig. 10).

En las flores, el Sr también es el elemento con las mayores concentraciones y el Co es el elemento con las menores concentraciones en los tratamientos I, III y IV presentando un orden Sr>B>Co, ya que en el tratamiento II se observa un orden distinto B>Sr>Co. El Sr presenta una concentración en un rango de 184.37 a 99.76 mg Kg⁻¹, donde la mayor concentración esta en los tratamientos III y IV y la menor en tratamientos I. En el tratamiento II presenta una concentración anómala y excesivamente baja de 0.24 mg Kg⁻¹. El B muestra concentraciones en un rango de 238.6 a 5.29 mg Kg⁻¹, y al igual que en la raíz y en el tallo, presenta las mayores concentraciones en el tratamiento III y IV, y las menores en los tratamientos I y II. El Co presenta concentraciones extremadamente bajas en los cuatro tratamientos en un rango de 1.07 a 0.61 mg Kg⁻¹, mostrando las concentraciones más altas también están en los tratamientos III y IV y las menores en los tratamientos I y II (Fig.10).

3.3.2.3 Metales pesados

Las concentraciones de Cr, Cd, Ni, As, y Pb de los cuatro tratamientos se pueden observar en las tablas 4, 5, 6 y 7. Así mismo, en la Figura 11 y 12 se graficaron las concentraciones de estos elementos y se puede observar la variación que existen entre los cuatro tratamientos. La concentración de los metales pesados en los cuatro tratamientos hidropónicos se da de la

siguiente forma: Tratamientos I>Tratamiento II>Tratamiento III>Tratamiento IV. En donde las plantas del tratamiento I tiene concentraciones $\sim 100 \text{ mg Kg}^{-1}$, mientras que las plantas del tratamiento II rondan los 10 mg Kg^{-1} , las plantas del tratamiento III muestran valores cercanos a 1 mg Kg^{-1} y las del tratamiento IV están por debajo de 0.1 mg Kg^{-1} .

En las raíces, los tratamientos I y II presentan un orden de la concentración de metales pesados $\text{Cr}>\text{Cd}>\text{Ni}>\text{As}>\text{Pb}$; mientras que en los tratamientos III y IV el orden es $\text{Ni}>\text{Cr}>\text{As}>\text{Cd}>\text{Pb}$. El Cr presenta concentraciones en los tratamientos I, II, III, y IV de 815.23, 63.94, 6.44 y 4.24 mg Kg^{-1} , respectivamente. El Cd muestra la misma tendencia teniendo las mayores concentraciones en las raíces del tratamiento I con $367.21 \text{ mg Kg}^{-1}$, seguido del tratamiento II con 23.49 mg Kg^{-1} , después el tratamiento III con 2.22 mg Kg^{-1} y finalmente en el tratamiento IV con 0.12 mg Kg^{-1} . El Ni muestra significativas diferencias en los cuatro tratamientos, donde el orden de dichas concentraciones de mayor a menor va del tratamiento I al IV, con concentraciones de 190.66 a 8.85 mg Kg^{-1} . Por su parte el As presenta en las raíces del tratamiento I $161.60 \text{ mg Kg}^{-1}$, en el tratamiento II 19.06 mg Kg^{-1} , en el tratamiento III 3.04 mg Kg^{-1} y en el tratamiento IV 0.48 mg Kg^{-1} . Por último, el Pb muestra una concentración en las raíces del tratamiento I de 91.83 mg Kg^{-1} , en las raíces del tratamiento II de 19.18 mg Kg^{-1} , en las del tratamiento III 0.12 mg Kg^{-1} y en las del tratamiento IV no se pudo obtener una lectura ya que la concentración es más baja que el límite de detección del equipo. Así, podemos observar claramente que la concentración de metales pesados tiende a disminuir del tratamiento I al IV en un grado de magnitud (Fig. 11).

Los tallos muestran una gran variación en la concentración de metales pesados. El Cr presenta una concentración en el tratamiento I de $219.78 \text{ mg Kg}^{-1}$, la cual es mucho mayor a la que presenta los tallos del tratamiento II de 3.39 mg Kg^{-1} y muy similar a las de los tratamientos III y IV con 2.38 y 1.10 mg Kg^{-1} . El As es el siguiente metal pesado con mayor concentración en

los tallos, ya que en el tratamiento I presentó $127.10 \text{ mg Kg}^{-1}$, concentración mucho mayor que en los tallos de los tratamientos II y III con 2.06 y 3.21 mg Kg^{-1} . En el tratamiento IV hubo As en concentraciones extremadamente bajas, menores que límite de detección del equipo. El Ni en el tallo presenta las mayores concentraciones en el tratamiento I (39.57 mg Kg^{-1}), pero en los tratamientos II, III y IV presenta concentraciones en un rango de 4.00 a 1.22 mg Kg^{-1} . El Cd presenta concentraciones más bajas que el Cr y que el As, pero mantiene una marcada diferencia entre el tratamiento I con respecto al resto de los tratamientos, dado que los tratamientos I, II, III y IV poseen concentraciones de 29.62 , 2.06 , 0.59 y 0.24 mg Kg^{-1} , respectivamente. El Pb por su parte, presenta muy bajas concentración en comparación al Cr, Cd y As, ya que en los tratamientos I, II, III y IV muestra concentraciones que van de los 2.04 , 0.24 , 0.12 y $<0.015 \text{ mg Kg}^{-1}$. Aunque son concentraciones muy bajas, el tratamiento I tiene concentraciones 10 veces mayores al resto de los tratamientos (Fig.11).

Las hojas tienen una mayor concentración de metales pesados que los tallos y las flores. El Cr en los tratamientos I, II, III y IV presenta concentraciones de 191.80 , 15.22 , 6.51 y 1.44 mg Kg^{-1} . El Cd presenta concentraciones que varían entre 93.86 , 6.66 y 2.58 en los tratamientos I, II y III, respectivamente. El Ni presenta concentraciones en un rango que va de los 68.72 a 5.28 mg Kg^{-1} , donde la mayor concentración está en el tratamiento I, mientras que en los tratamientos II, III, y IV tienen concentraciones mucho menores y sin una marcada variación. El As mostró concentraciones en las hojas entre 89.77 , 6.78 y 1.23 en los tratamientos I, II, III, respectivamente. Finalmente, el Pb, presenta las menores concentraciones en un rango que va de 3.34 a 0.83 mg Kg^{-1} en los tratamientos I y II. La concentración del As, Cd en el tratamiento IV y del Pb en los tratamientos III y IV la concentración está por debajo del límite de detección.

Las flores en el tratamiento I tienen una alta concentración de metales pesados con respecto a las flores de los tratamientos II, III y IV. Los tratamientos con la menor concentración

de metales pesados son el II y el IV. El Cr en el tratamiento I presentó una concentración de $110.37 \text{ mg Kg}^{-1}$, mientras que en el resto de los tratamientos mostró concentraciones en un rango entre 3.37 y 0.24 mg Kg^{-1} , donde la menor concentración la tuvo el tratamiento II. El Ni presenta concentraciones en un rango que va de los 51.46 a 7.83 mg Kg^{-1} , donde la mayor concentración está en el tratamiento I, mientras que, en los tratamientos, III, y IV tienen concentraciones mucho menores y sin una marcada variación; y donde en el tratamiento II el Ni presentó una concentración demasiado baja de 0.48 mg Kg^{-1} , en comparación al resto de los tratamientos. De la misma forma, el Cd mostró su mayor concentración en las flores del tratamiento I con 66.95 mg Kg^{-1} , mientras que en los tratamientos II, III y IV tuvo concentraciones evidentemente menores de 0.84 , 1.33 y 0.24 mg Kg^{-1} . Sólo se obtuvieron datos de la concentración de As los tratamientos I y III, con valores de 36.34 y 0.96 mg Kg^{-1} , respectivamente. En los tratamientos II y IV la concentración de As estuvo por debajo del límite de detección (0.005 mg Kg^{-1}). Finalmente, el Pb, sólo presentó concentraciones en los tratamientos I y IV con valores de 0.24 y 0.23 mg Kg^{-1} , mientras que en los tratamientos II y III tuvieron concentraciones por debajo del límite de detección (0.015 mgKg^{-1}).

Tabla 4. Concentración de metales pesados oligoelementos y metales (mg/kg peso seco) en raíz y parte aérea de las plantas de jitomate del **tratamiento I** (10 mg/kg)

TRATAMIENTO I								
Muestra	Raíz	STD	Tallo	STD	Hojas	STD	Flor	STD
As	161.60	2.02	127.10	4.34	89.77	1.35	36.34	0.83
Cd	367.21	10.04	29.62	0.91	93.86	1.20	66.95	0.71
Cr	815.23	22.09	219.78	6.86	191.80	2.24	110.37	0.88
Pb	91.83	0.65	2.04	0.43	3.34	1.21	0.24	0.28
Al	2899.71	75.53	50.60	5.00	145.86	2.42	65.12	4.68
Cu	24.89	0.45	7.67	0.55	14.12	0.85	13.41	0.15
Fe	2096.62	58.12	77.82	2.59	200.47	3.11	102.80	0.92
Zn	103.11	2.99	59.95	2.23	74.91	1.00	63.66	0.57
Sr	150.20	0.70	105.16	4.44	213.35	2.56	99.76	2.37
B	10.18	0.96	28.78	0.91	76.77	1.67	58.90	1.37
Co	3.07	0.29	0.36	0.16	0.74	0.11	0.61	0.12
Ni	190.66	5.67	39.57	1.10	68.72	0.72	51.46	0.94

Tratamiento I. 10 ppm de arseniato de sodio, cloruro de cadmio, cromato de potasio y óxido de plomo
<LD Menor al limite de detección

Tabla 5. Concentración de metales pesados, oligoelementos y metales (mg/kg peso seco) en raíz y partes aéreas de las plantas de jitomate del **tratamiento II** (1.0 mg/kg).

TRATAMIENTO II								
Muestra	Raíz	STD	Tallo	STD	Hojas	STD	Flor	STD
As	19.06	1.439	2.06	0.885	6.78	1.272	<LD	<LD
Cd	23.49	0.271	2.06	0.133	6.66	0.107	0.84	0.601
Cr	63.94	0.836	3.39	0.073	15.22	0.238	0.24	0.253
Pb	19.18	0.750	0.24	0.812	0.83	2.080	<LD	<LD
Al	1253.07	10.944	116.76	12.597	166.31	8.916	<LD	<LD
Cu	10.92	0.590	4.73	0.667	11.06	0.571	0.72	0.481
Fe	1000.25	10.576	49.71	0.727	200.55	4.886	7.82	6.987
Zn	61.12	0.824	44.50	0.424	62.05	1.652	6.37	4.714
Sr	135.88	1.808	74.44	0.994	218.14	4.054	0.24	0.012
B	12.30	0.111	27.04	0.194	105.80	3.115	5.29	3.223
Co	1.97	0.098	0.24	0.170	0.48	0.178	<LD	<LD
Ni	23.61	0.295	4.00	0.158	18.43	0.392	0.48	1.130

Tratamiento II. 1.0 ppm de arseniato de sodio, cloruro de cadmio, cromato de potasio y óxido de plomo
<LD Menor al limite de detección

Tabla 6. Concentración de metales pesados, oligoelementos y metales (mg/kg peso seco) en raíz y parte aérea de las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del **tratamiento III** (0.1 mg/kg)

TRATAMIENTO III								
Muestra	Raíz	STD	Tallo	STD	Hojas	STD	Flor	STD
As	3.0431	0.8780	3.2082	2.9587	1.2300	1.5720	0.9634	1.3728
Cd	2.2200	0.0470	0.5941	0.0713	2.5800	0.0490	1.3247	0.2047
Cr	6.4373	0.1170	2.3764	0.1545	6.5100	0.2210	3.3719	0.0482
Pb	0.1170	0.4213	0.1188	0.7961	<LD	<LD	<LD	<LD
Al	976.3600	7.3030	36.9500	1.0810	134.5200	5.2830	94.8940	4.1065
Cu	24.7000	0.6320	6.1800	0.5820	10.8100	0.6510	11.3198	0.9634
Fe	837.9000	5.0680	52.5200	0.4040	144.8403	3.6000	101.7582	2.4687
Zn	56.7600	0.3040	42.8900	0.3327	107.7400	2.6900	75.2649	2.0713
Sr	186.1000	1.5220	79.6100	0.9740	241.5200	3.1940	184.3700	0.6860
B	21.0700	0.2460	30.4200	1.5210	107.7400	0.0219	107.1800	2.7460
Co	3.2800	0.1520	0.2400	0.2020	1.3500	0.1470	0.8400	0.1810
Ni	12.1700	0.1400	1.6600	0.1540	12.4100	0.0980	11.5600	0.1690

Tratamiento III. 0.1 ppm de arseniato de sodio, cloruro de cadmio, cromato de potasio y óxido de plomo

<LD Menor al limite de detección

Tabla 7. Concentración de metales pesados, oligoelementos y metales (mg/kg peso seco) en raíz y parte aérea de las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del **tratamiento IV** (control).

TRATAMIENTO IV								
Muestra	Raíz	STD	Tallo	STD	Hojas	STD	Flor	STD
As	0.4850	2.0732	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cd	0.1212	0.0727	0.2400	0.2447	<LD	<LD	0.2374	0.0475
Cr	4.2435	0.2910	1.1000	0.2100	1.4400	0.1900	1.3058	0.1781
Pb	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0.2374	0.6410
Al	1374.8800	4.6000	30.9594	8.1620	104.7768	18.4229	80.8405	4.5109
Cu	26.1900	0.3500	4.6500	1.8400	11.8800	1.5400	1.3058	0.1781
Fe	1158.2200	14.2700	35.3600	3.2100	99.6200	16.6947	86.8946	6.4340
Zn	85.6000	1.4200	32.5500	3.0500	103.3400	17.0400	86.8946	12.6899
Sr	175.0700	4.6000	92.3900	16.0300	240.7600	14.7500	129.0400	1.0100
B	19.2800	1.1300	43.5300	5.5900	192.2700	37.4200	238.6000	17.2000
Co	3.3900	0.1900	0.4800	0.2900	0.8400	0.1000	1.0680	0.2500
Ni	8.8500	0.1100	1.2200	0.5300	5.2800	0.4700	7.8300	1.2100

Tratamiento IV. Solución nutritiva Steiner

<LD Menor al limite de detección

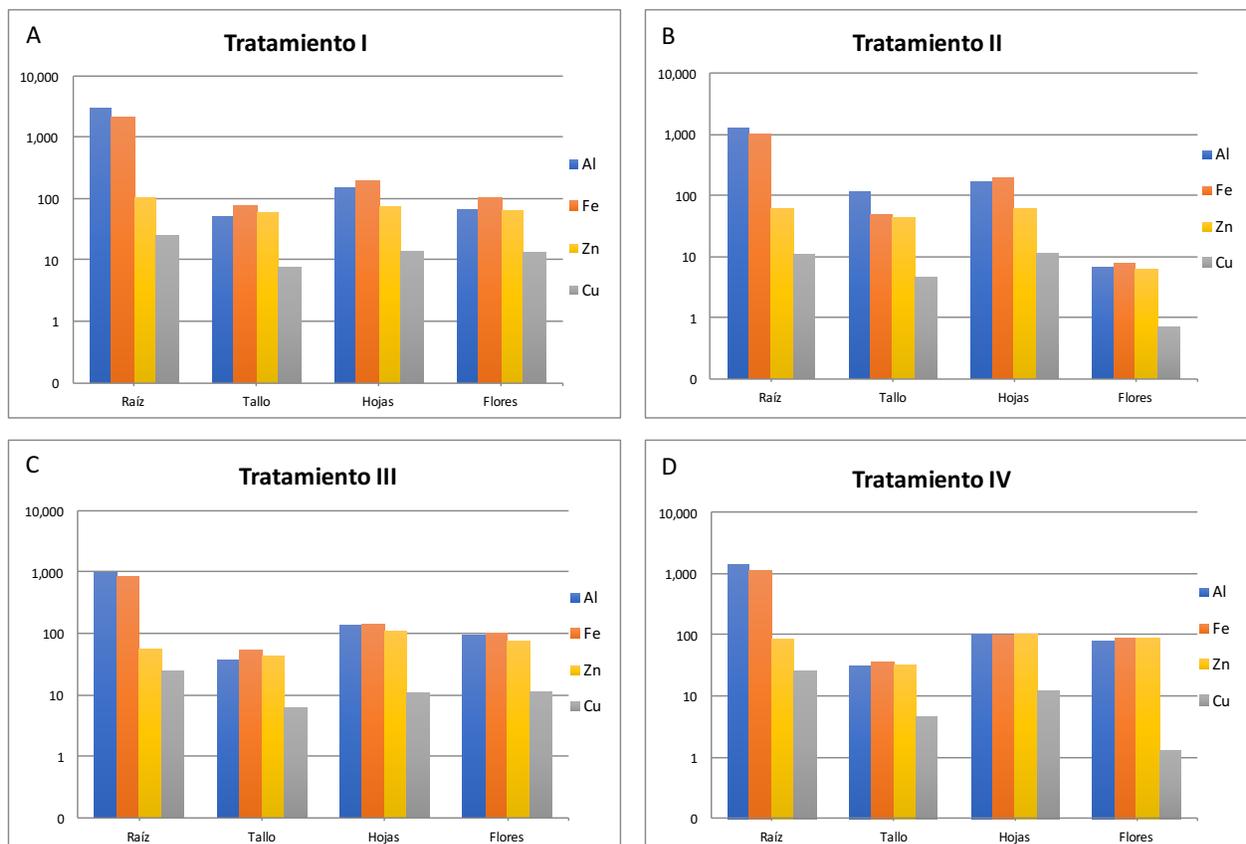


Figura 9. Concentración de Al, Cu, Fe, y Zn (mg/kg) en las plantas de jitomate de los cuatro tratamientos. Se observa una comparación entre la concentración de oligoelementos entre la raíz, el tallo, hojas y flores, observando que las concentraciones de los cuatro tratamientos son muy similares.

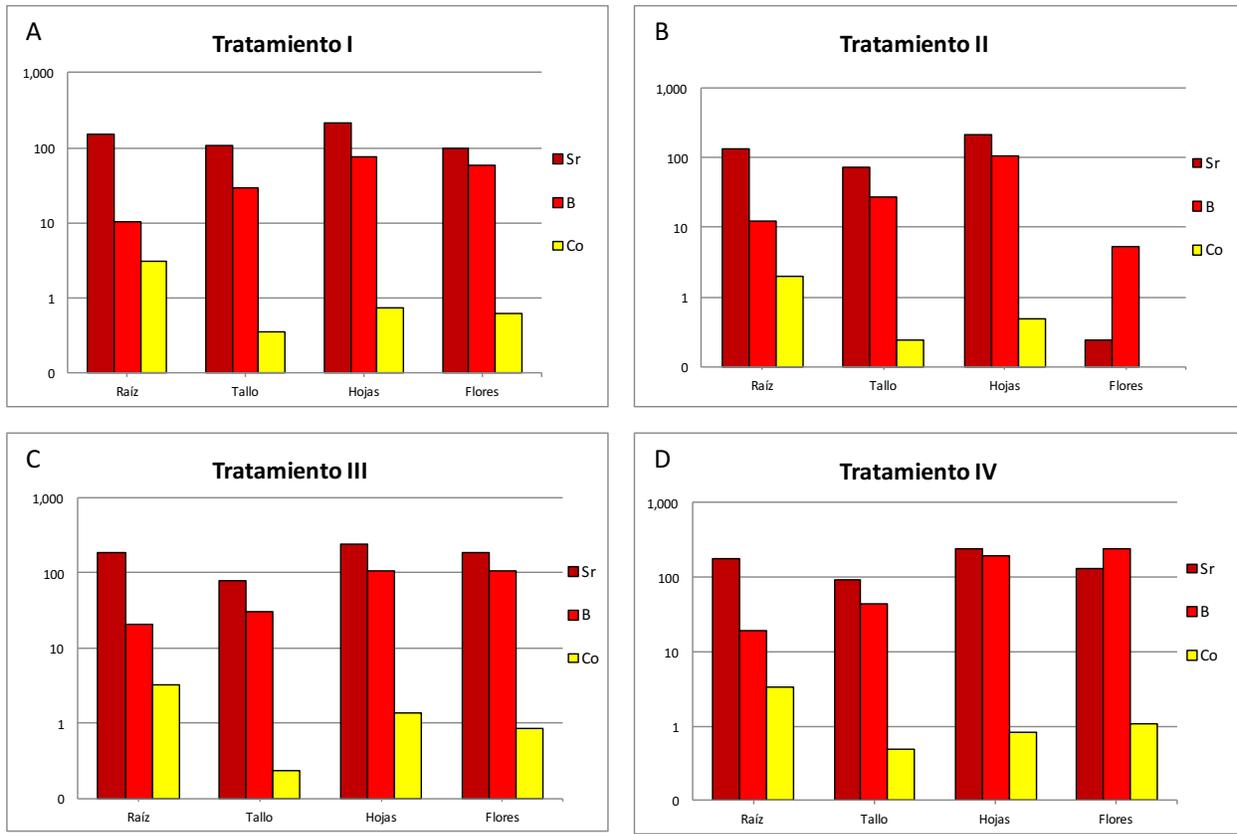


Figura 10. Concentración de Sr, B, y Co (mg/kg) de las plantas de jitomate de los cuatro tratamientos. Se observa una comparación entre la concentración de metales entre la raíz, tallo hojas y flores, observando que las concentraciones de las diferentes partes de las plantas en los cuatro tratamientos son muy homogéneas.

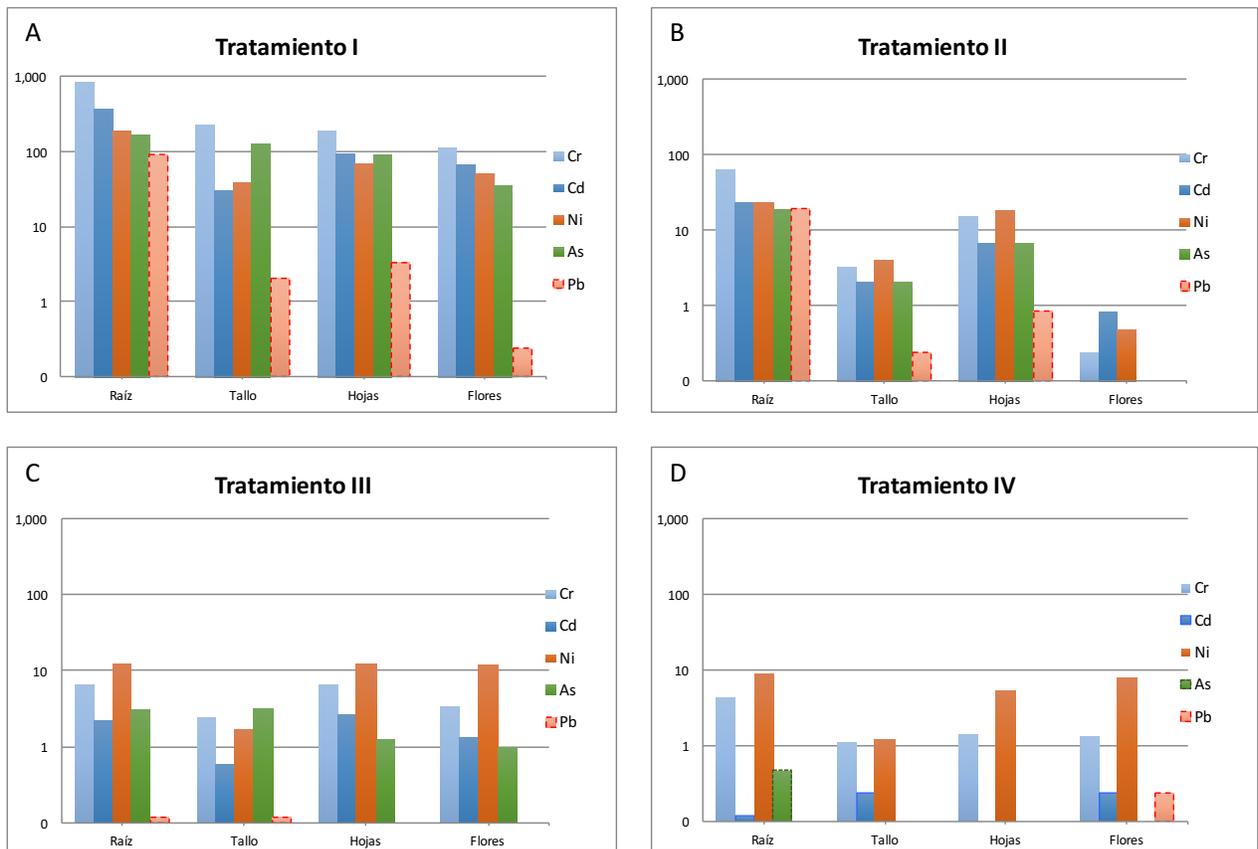


Figura 11. Concentración de As, Cd, Cr, y Pb (mg/kg) de las plantas de jitomate de los tratamientos I, II, III, y IV.

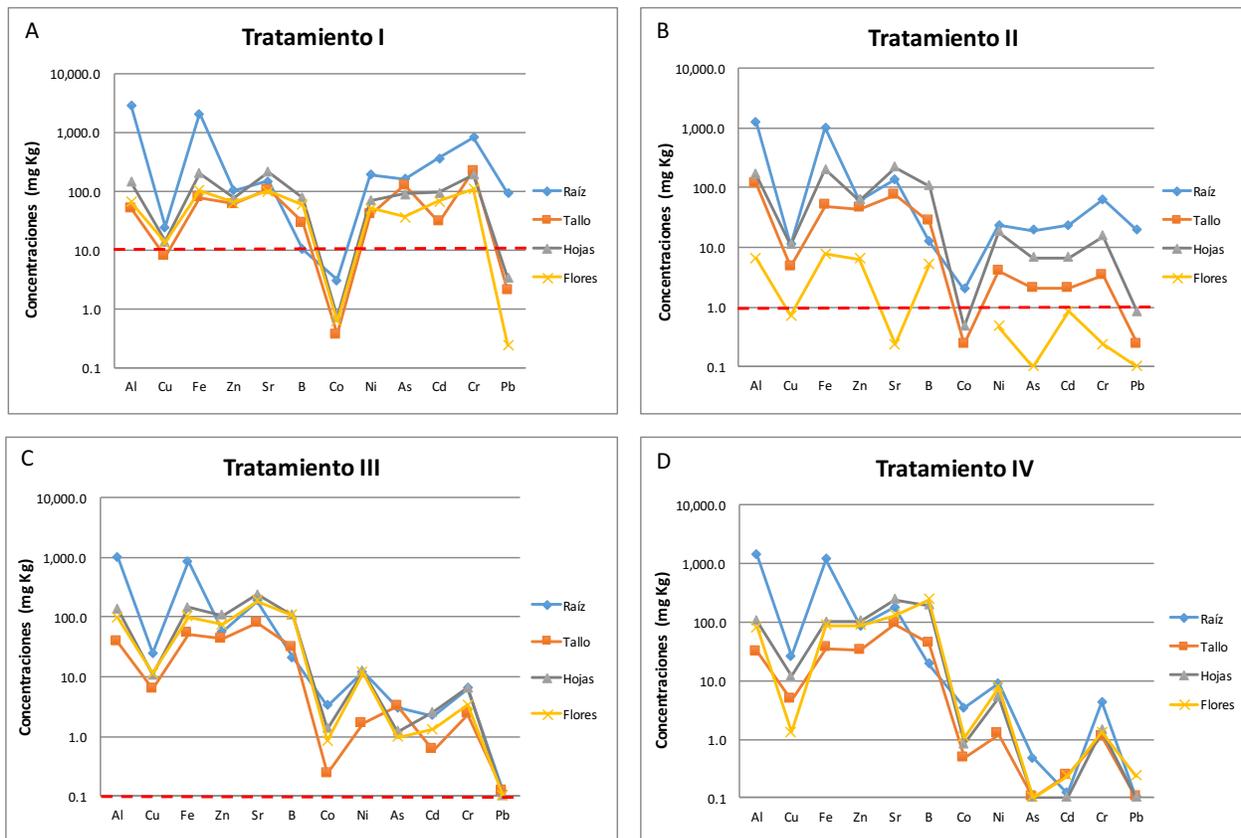


Figura 12. Patrones multi-elementales, donde se puede apreciar el comportamiento de todos los elementos, en todos los tratamientos, en todas las partes de la planta. La concentración de oligoelementos, metales y metales pesados en la solución nutritiva de los cuatro tratamientos está dada en mg L^{-1} . Las gráficas están en escala logarítmica para poder observar las diferencias entre las soluciones con baja y alta concentración de metales. El tratamiento IV es el control y la concentración de metales pesados en la solución fue menor al límite de detección del equipo (ICP-AES).

4. DISCUSIÓN

4.1 Concentraciones en raíces y parte área de la planta

De forma general y comparando las concentraciones de las soluciones nutritivas de los cuatro tratamientos con las concentraciones de las plantas (Tablas 3, 4, 5, 6 y 7), se observa una evidente bioacumulación de oligoelementos, metales totales y metales pesados. De esta forma, el Al en las raíces de los cuatro tratamientos está enriquecido entre ~7500 y ~2700 veces más que la solución nutritiva; mientras que en el tallo, hojas y fruto tiene concentraciones entre 3600 y 100 veces más que la solución nutritiva (Fig. 13). Los metales pesados como el As, Cd, Cr y Pb, muestran un menor enriquecimiento en comparación a los oligoelementos, pero por su toxicidad aún en bajas tasas de enriquecimiento pueden generar daños a la fisiología de la planta. Así, el Cu, Fe, Zn, Sr y B muestran un enriquecimiento de 700 a 100 veces más que la solución nutritiva tanto en raíces, tallos, hojas y fruto (Fig.13). El Cr es el elemento que mayor enriquecimiento muestra en raíz, tallo, hojas y flores en todos los tratamientos. En raíz está entre 49 y 28 veces más concentrado en comparación a la solución nutritiva de cada tratamiento; mientras que en tallo, hojas y fruto varía de 7 a 13 en el tratamiento I, de 2 a 9 en el tratamiento II y de 10 a 29 en el tratamiento III.

Por el contrario, el As, Cd y Pb en las raíces de los tratamientos I, II y III presentan concentraciones que son entre 28 y 14 veces mayores a las de los metales pesados que las soluciones nutritivas, lo cual demuestra la capacidad de acumulación de esta planta. El As y el Cd muestran concentraciones en un rango de 2 a 12 veces mayores que las de sus respectivos tratamientos, mientras que el Pb tiene de 28 a 14 veces más concentración en la raíz, que en la parte aérea de la planta, en donde solo alcanza concentraciones muy similares a las de la solución nutritiva.

De forma particular, en el tratamiento I (Fig.12-A), se observó que todos los elementos a excepción de Co y del Pb, en la parte área de las plantas del tratamiento I, presentan concentraciones por encima de los 10 mg kg^{-1} (línea roja punteada). También se pudo apreciar que la raíz es la parte de la planta que más acumula metales, mientras que el tallo y las flores son las que menos metales acumulan.

La concentración en las plantas del tratamiento II (Fig. 12-B), permite observar que existe una diferencia notable entre la raíz, tallo hojas y flores, en la concentración de metales pesados; mostrando un enriquecimiento en el siguiente orden raíz>hojas>tallo>flores. La raíz y las hojas muestran concentraciones 10 veces mayores a la concentración del tratamiento III (1.0 mg kg^{-1}); en cambio el tallo tiene concentraciones de metales pesados cercanas a la concentración de la solución nutritiva y las flores por debajo de la solución.

En el tratamiento III (Fig. 12-C) se puede observar que todos los elementos presentan concentraciones por arriba de la concentración de la solución nutritiva (0.1 mg L^{-1}). Dadas las bajas concentraciones de metales pesados en este tratamiento, se observa poca heterogeneidad en la concentración entre la raíz y la parte área de las plantas. Además de que se puede observar una clara diferencia entre la concentración de oligoelementos y metales pesados, ya que, a partir del Co, las concentraciones en toda la planta están por debajo de 10 mg kg^{-1} , en cambio los oligoelementos son mayores a 10 mg kg^{-1} .

La concentración de metales de las plantas del tratamiento IV (Fig. 12-D), se observa un comportamiento similar a las plantas del tratamiento III, con la diferencia que los metales pesados están en mucho más bajas concentraciones. Este tratamiento IV, aun cuando es el tratamiento de control y que tuvo concentraciones menores al límite de detección en la mayoría de los metales pesados, presenta de altas a moderadas concentraciones de Cr en la raíz y en las

partes aéreas, entre ~1400 y 367 veces más que la solución nutritiva, con lo cual se demuestra su carácter de oligoelemento.

En la Figura 13, se observa con mayor claridad el comportamiento de los oligoelementos y metales pesados en la raíz y parte aérea de las plantas de los cuatro tratamientos, mostrando que la raíz tiene mayor concentración de oligoelementos que de metales pesados que la parte aérea. En los tratamientos I y III se observa una mayor homogeneidad en el comportamiento de las partes aéreas de las plantas, lo que significa que, si un elemento está enriquecido en el tallo también está enriquecido en las hojas y en las flores. En el Tratamiento I (Fig. 13-A) sólo el Cu, Zn, Sr, y As tienen valores muy similares al de la raíz, lo cual implica que estos elementos tienen concentraciones muy similares en la raíz y en la parte aérea; pero el boro tiene concentraciones mayores en la parte aérea que en la raíz hasta en un factor de 10, lo cual implica que la raíz no tiene un mecanismo de regulación con este elemento, debido mayormente a ser un oligoelemento. En el caso de los metales pesados (Ni, As, Cd, Cr y Pb) se observa una diferencia, aunque no muy clara en comparación al tratamiento II (Fig. 13.B), entre la concentración de estos elementos en la raíz con respecto a la parte aérea. Esto sugiere que la alta concentración de metales pesados en la solución nutritiva (10mg L⁻¹) le impide a la planta sujetar los metales pesados en la raíz y, por lo tanto, estos pasan con cierta libertad a la parte aérea, intoxicando a la planta. Sin embargo, si se observa que la planta tuvo un mecanismo de defensa efectivo contra el Pb, debido posiblemente a que la concentración de la solución nutritiva fue de casi un 60% con respecto al resto de los metales pesados en la solución (Tabla 3). En el tratamiento III (Fig.13-C), se observa un comportamiento distinto, y se puede notar que tanto en los oligoelementos, como en los metales totales y los tóxicos que la planta, dadas la concentración de metales pesados en la solución nutritiva, si pudo regular con relativa eficiencia el paso de oligoelementos y metales pesados a la parte aérea de la planta, lo cual sugeriría que en concentraciones aproximadas de 1

mg L⁻¹, la planta no está intoxicada y su sistema de defensa todavía puede ser eficiente. En este tratamiento también se observó un comportamiento más homogéneo en términos de que la raíz y la parte aérea de la planta muestran patrones similares; es decir, el elemento que tiene algún enriquecimiento o empobrecimiento en la raíz también se ve reflejado en la parte aérea y con valores muy similares. Este comportamiento sugiere que, dada la baja concentración de metales pesados en la solución nutritiva, estos elementos ya no alcanzan la parte aérea o si lo hacen lo hacen en tan bajas concentraciones que no generan afectaciones en la fisiología de la planta. Finalmente, en el tratamiento IV (Fig. 13-D) no se pudieron coleccionar valores de metales pesados con excepción del Cr, el cual además de ser un metal pesado también es un oligoelemento. Así, se puede interpretar que los valores de Cr en la planta fueron tomados de la solución nutritiva.

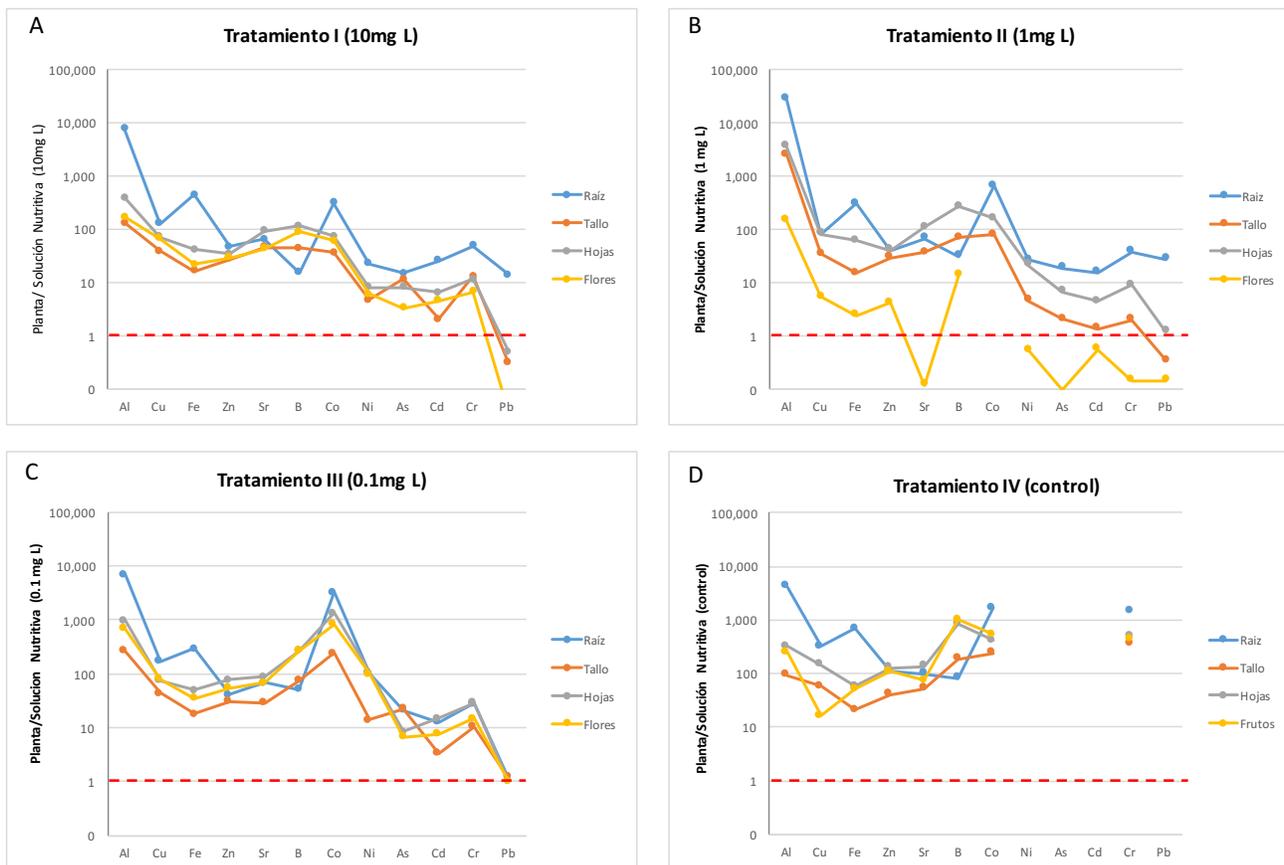


Figura 13. Patrones multi-elementales que permiten observar el comportamiento de oligoelementos y metales pesados en las diferentes partes de las plantas de los cuatro tratamientos. En esta gráfica está representada la diferencia entre la concentración de las plantas en la raíz y partes aéreas y la de las soluciones nutritivas. Un valor de 1 implica que la concentración en la raíz, tallo, hojas y flores es igual al de la solución nutritiva correspondiente al tratamiento. Los valores mayores a 1 representan cuantas veces es mayor la concentración al de la solución nutritiva, mientras que los valores menores significan cuantas veces es menor la concentración en la muestra en comparación de solución nutritiva.

4.2 Bioacumulación (FBC) y Factores de translocación (FT)

La El FBC permite evaluar la capacidad de las raíces de las plantas (en este trabajo plantas de jitomate) de absorber oligoelementos y metales pesados del suelo o para este caso en particular, de la solución nutritiva (hidroponía). Por otro lado, el FT permite evaluar la habilidad de las plantas para mover los metales desde la raíz hacia la parte aérea. La Tabla 8, 9, 10 y 11 muestran los valores de FBC y FT de las plantas de jitomate en los cuatro tratamientos.

En los cuatro tratamientos se puede observar una gran diferencia entre el factor de bioacumulación y los factores de translocación (Fig.14). Se sabe que un factor de translocación de 1 o cercano a éste implica que el elemento en cuestión se moviliza fácilmente y pasa de la raíz a la parte aérea de planta, teniendo consecuencias toxicológicas para la misma (Ruiz y Armienta, 2012). En todos los tratamientos, se observan mayores valores de FBC en los oligoelementos que en los metales pesados. También se puede observar que, en los cuatro tratamientos, el Al, Fe, Co y Cr son los elementos con los mayores valores de FBC, pero los menores de FT.

De forma particular, en el tratamiento I, los elementos que tienen valores de FT de 1 o muy cercanos son el Cu, Zn, Sr, B, Ni, As y Cr. Elementos como Al, Fe, Co, y Cr presentan altos valores de bioacumulación, pero bajos valores de translocación, lo cual indicaría que la planta tiene una alta capacidad con estos elementos para controlar su movilidad hacia la parte aérea; en cambio elementos como el Cu, Zn, B, As, Ni y Cd aunque muestran bajos niveles de FBC en comparación a los elementos anteriores, presentan mayores valores de FT, lo cual indicaría que la planta en altas concentraciones no puede dejar de absorber estos metales y los incorpora fácilmente a la parte aérea de la planta, trayendo como consecuencia una intoxicación de la misma. El Pb es el único elemento que tiene valores bajos de FBC y FT, indicándonos que el plomo no fue absorbido de igual manera que el resto de los metales pesados (Fig. 14-A).

En el tratamiento II, se observan claras diferencias con el tratamiento I, ya que el FBC fue en general un orden de magnitud menor, pero el FT se mantuvo igual, sin olvidar que la concentración de metales pesados en la solución del tratamiento II fue un orden de magnitud menor. Igualmente, el Al, Fe, Co y Cr presentan altos valores de FBC y bajos valores de FT. En contraste el Cu, Zn, Sr, B, As, y Cd, aun con bajos niveles de FBC presenta moderados a altos niveles de FT cercanos a 1. También se observa que las hojas tienen los mayores valores de translocación en comparación con el tallo y las flores (Fig. 14-B).

El tratamiento III, presenta patrones de bioacumulación muy similares al del tratamiento II, aunque también se observan algunas particularidades, tales como que los metales pesados presentan valores de translocación mayores al de los tratamientos I y II. Este fenómeno se da porque la concentración de metales pesados en la solución nutritiva fue muy baja, con lo que un enriquecimiento pequeño en estos metales dará valores altos de translocación (Fig. 14-C).

El tratamiento IV presenta patrones altos de bioacumulación y translocación en oligoelementos, ya que en metales pesados no se tuvieron valores de bioacumulación por presentar concentraciones menores al límite de detección del equipo (Fig. 14-D).

Los valores calculados en este trabajo son similares a los valores calculados en otros trabajos (Chopra y Pathak, 2012, Ruiz y Armienta, 2012), que aunque no son sobre hidroponía, obtuvieron FBC que oscilaban entre 0.1 y 1.8. Así, la principal razón para tener valores de FT (> 0.5) en metales pesados como el As, Cd, Cr, y Ni, y de oligoelementos como el Cu, Zn, Sr, B y Co, en los tratamientos I y II, es que en este trabajo se realizó un experimento hidropónico, mientras que en los demás trabajos las plantas fueron regadas con aguas residuales pero plantadas en un sustrato terroso. De esta forma, las plantas en hidroponía están expuestas a metales pesados previamente disueltos; en cambio, en experimentos donde utilizan sustratos terrosos, los metales

pesados deben de ser disueltos de forma natural y por el contacto con el agua de lluvia, minimizando la cantidad de metales pesados que quedan biodisponibles para la planta.

Las concentraciones de metales pesados (As, Cd, Pb, Ni y Cr) de los tratamientos I, II y III en raíces, tallos y hojas en las plantas de jitomate, muestran una gran similitud a las concentraciones de plantas de jitomate cultivadas en diferentes partes del mundo como son India, Brasil y Bangladesh (Tiwari et al. 2011, Carvalho et al. 2012, Singh et al. 2012 y Shaheen et al. 2016). Estos autores, aunque concuerdan en que las plantas de jitomate no representan ningún riesgo para la salud por la acumulación de metales como el As, Pb y Cr, coinciden en que el Cd es un elemento que si representa un riesgo para la salud humana, ya que el jitomate tiene a acumularlo en el fruto; además de que el Cd tiene menor tolerancia en las normas mundiales de salud, de hasta un orden de magnitud. Sin embargo, en este estudio, nos indica que las plantas de jitomate cuando son expuestas a metales pesados con altas concentraciones, afectan el sistema reproductivo impidiendo la formación del fruto.

Ruiz y Armienta (2012) encontraron que en plantas de maíz el FT más elevado correspondió al As con valores entre 1.08 y 2.29, seguido por Cd de 0.07 y 0.86 y Zn de 0.12 y 0.82, mientras que el Pb, Cu y Fe presentaron valores muy bajos y con ellos refirieron que la planta de maíz es translocadora de metales, por tener FT mayores a 1 (Raskin y Ensley 2000, Tu et al. 2003). En este trabajo, el As, Cd, Pb y Cr de todos los tratamientos tienen $FT > 1$, lo cual indican también que estos elementos son fácilmente transferibles a la parte aérea de las plantas de jitomate.

Tabla 8. Factores de bioacumulación (FBC) y translocación (FT) para las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del **tratamiento I** (10 mg/kg)

TRATAMIENTO I					
Muestra	FBC	FT_T	FT_H	FT_F	FT_{to}
As	37.813	0.787	0.556	0.225	1.567
Cd	38.090	0.081	0.256	0.182	0.519
Cr	79.689	0.270	0.235	0.135	0.640
Pb	14.633	0.022	0.036	0.003	0.061
Al	8232.526	0.017	0.050	0.022	0.090
Cu	301.960	0.308	0.567	0.539	1.414
Fe	515.009	0.037	0.096	0.049	0.182
Zn	135.931	0.581	0.727	0.617	1.925
Sr	245.666	0.700	1.420	0.664	2.785
B	264.191	2.827	7.541	5.786	16.154
Co	478.000	0.117	0.241	0.199	0.557
Ni	41.518	0.208	0.360	0.270	0.838

Tabla 9. Factores de bioacumulación (FBC) y translocación (FT) para las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del **tratamiento II** (1.0 mg/kg)

TRATAMIENTO II					
Muestra	FBC	FT_T	FT_H	FT_F	FT_{to}
As	58.230	1.056	0.405	0.317	1.777
Cd	38.370	0.266	1.162	0.597	2.025
Cr	82.026	0.370	1.011	0.524	1.904
Pb	4.490	1.000	0.833	0.833	2.667
Al	8937.871	0.038	0.138	0.097	0.273
Cu	370.698	0.250	0.438	0.458	1.146
Fe	395.657	0.063	0.173	0.121	0.357
Zn	202.359	0.755	1.897	1.325	3.977
Sr	254.358	0.428	1.298	0.991	2.716
B	656.182	1.444	5.113	5.087	11.644
Co	5710.000	0.073	0.412	0.256	0.741
Ni	323.077	0.136	1.020	0.950	2.106

Tabla 10. Factores de bioacumulación (FBC) y translocación (FT) para las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del **tratamiento III** (0.1 mg/kg)

TRATAMIENTO III					
Muestra	FBC	FTT	FTH	FTF	FT
As	27.917	0.108	0.356	0.005	0.469
Cd	21.830	0.088	0.284	0.036	0.407
Cr	49.727	0.053	0.238	0.004	0.295
Pb	29.670	0.013	0.043	0.005	0.061
Al	33538.043	0.093	0.133	0.005	0.231
Cu	203.196	0.433	1.013	0.066	1.512
Fe	386.583	0.050	0.200	0.008	0.258
Zn	113.903	0.728	1.015	0.104	1.848
Sr	214.243	0.548	1.605	0.002	2.155
B	383.750	2.198	8.602	0.430	11.230
Co	896.667	0.122	0.244	0.000	0.365
Ni	53.227	0.169	0.781	0.020	0.970

Tabla 11. Factores de bioacumulación (FBC) y translocación (FT) para las plantas de jitomate en el experimento de hidroponía del **tratamiento IV** (control)

TRATAMIENTO IV					
Muestra	FBC	FTT	FTH	FTF	FT
As	<LD	0.208	0.208	0.208	0.625
Cd	<LD	2.000	0.833	1.978	4.812
Cr	2695.264	0.259	0.340	0.308	0.907
Pb	<LD	1.000	1.000	2.374	4.374
Al	4822.971	0.023	0.076	0.059	0.158
Cu	543.652	0.177	0.453	0.050	0.681
Fe	811.214	0.031	0.086	0.075	0.192
Zn	386.447	0.380	1.207	1.015	2.603
Sr	362.698	0.528	1.375	0.737	2.640
B	2109.744	2.258	9.973	12.376	24.606
Co	2889.000	0.142	0.248	0.315	0.704
Ni	<LD	0.138	0.597	0.885	1.619

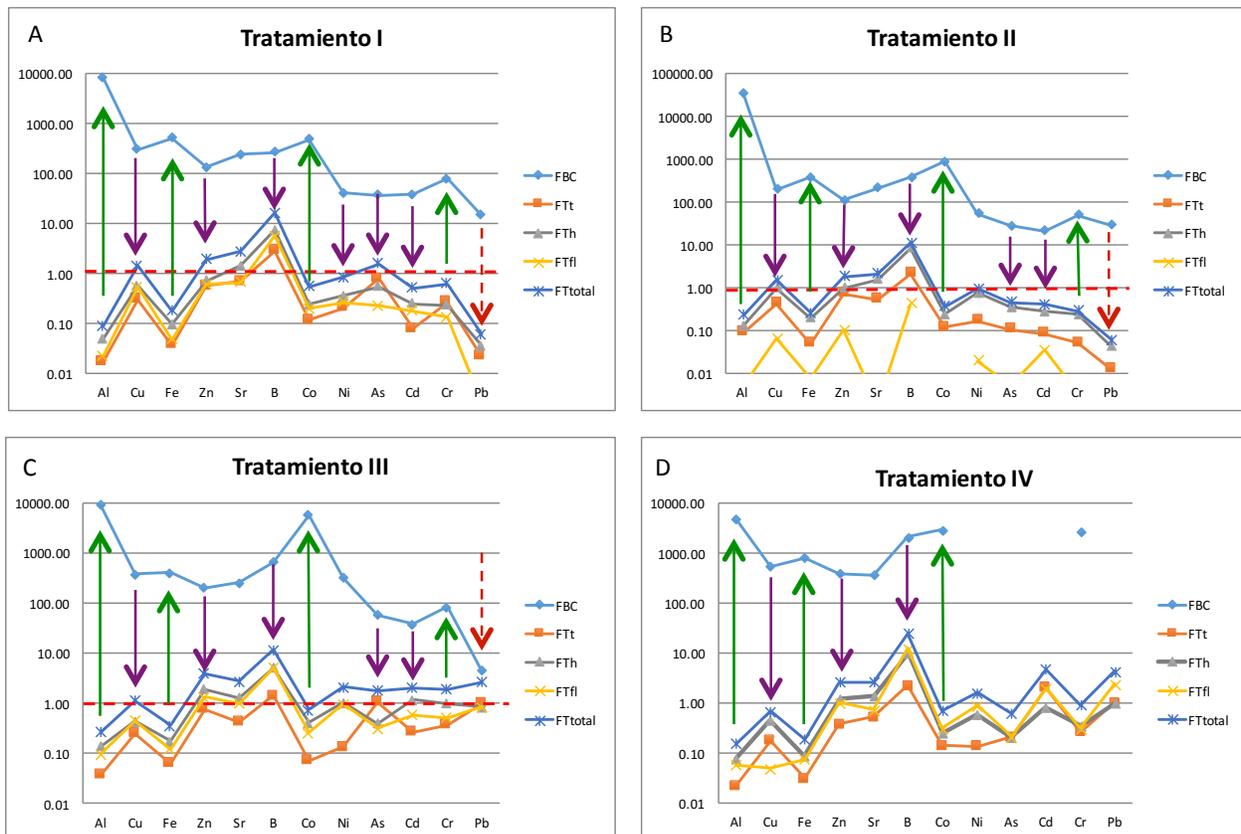


Figura 14. Factores de Bioacumulación (FBC) y Translocación (FT). Las gráficas están en escala logarítmica para poder observar las diferencias entre las soluciones con baja y alta concentración de metales. El tratamiento IV es el control y la concentración de tóxicos en la solución fue menor al límite de detección del equipo (ICP-AES). FTt=Factor de translocación en tallo; FTh=facto de Translocación en hojas, FTfl=Factor de Translocación en Flores, FTtotal= Factor de Translocación de la parte aérea de la planta. Las flechas verdes indican altos valores FBC, pero valores bajos de FT. Las flechas purpuras señalan a todos aquellos elementos que aun con moderados valores de FBC, presentan valores de FT altos o cercanos a 1. La flecha roja resalta el comportamiento del Pb, el cual con excepción del tratamiento I, presenta extremadamente bajos valores de FBC y aún más bajos valores de FT.

4.3 Fisiología vegetal

Los resultados fisiológicos obtenidos en el transcurso del desarrollo de las plantas de jitomate como el marchitamiento y enchinamiento de las hojas, se asocian a estrés hídrico o por deficiencia de Cu, pudiendo ser una mezcla de ambos casos pues la actividad antagónica y sinérgica que presenta el Cd^{2+} puede llegar a desplazar la absorción de Cu^{2+} (Bertoli *et al.*, 2012)

La exposición a Cd, Cr y Pb inhiben el crecimiento y provocan hojas cloróticas, ya que estos metales pesados disminuyen las actividades fotosintéticas como resultado de la distorsión de la ultra estructura del cloroplasto, la inhibición de la catálisis enzimática del ciclo de Calvin y la sustitución de elementos esenciales (Malkowski *et al.*, 2002; Clemens, 2006; Gallego *et al.*, 2012; Pourrut *et al.*, 2012). La pudrición apical del fruto está vinculada directamente a los bajos niveles de Ca^{2+} (Mendez, 2012), esto debido a que el As y Cd son capaces de sustituir al Ca^{2+} (Verbruggen *et al.*, 2009), hecho que se ve fortalecido por los resultados encontrados por Bertoli, (2012), en donde encontró una ligera disminución del Ca^{2+} en las partes aéreas de *Lycopersicon esculentum* al suministrar Cd.

Los resultados obtenidos demuestran que la concentración de metales pesados en las plantas de jitomate está en función de la biodisponibilidad y concentración de los metales pesados en el medio en donde se siembre. Castaldi y Melis (2006), reportan los mismos efectos cuando evaluaron diferentes sustratos en condiciones hidropónicas. Debido a que en este experimento los metales pesados se encontraban en una fase soluble y el sustrato que se utilizó no fue capaz de absorber o crear enlaces estables con los metales pesados en comparación a la acción que generan las arcillas y materia orgánica, por lo tanto, las plantas absorbieron en grandes concentraciones As, Cd, Cr y Pb (Tiwari *et al.*, 2011; Bertoli *et al.*, 2012; Ilić *et al.*, 2014). La cualidad antagónica de los elementos Cd y As promueven la absorción de ambos elementos al sustituir el Ca, Mg, Fe, Z y P (Verbruggen *et al.*, 2009) pudiendo ser por esto que se

encontraron concentraciones elevadas de los elementos Cd y As. Por otro lado, la presencia de Pb en la raíz promueve que las cargas positivas de los cationes metálicos del Pb, al entrar en contacto con las cargas negativas en la rizósfera, ayude a formar una interface en equilibrio que permite la absorción de este metal tóxico hacia las partes aéreas de las plantas (Vargas, 2006).

La absorción de metales como el As, Cd y Pb ocurre por las vías de los transportadores de los nutrientes esenciales como el Fe^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , y Mn^{2+} (Clemens, 2006; Mendoza-Cózatl et al, 2011). Los complejos de As son absorbidos por transportadores de fosfato por aquaporinas. Los datos obtenidos son congruentes con los resultados de trabajos similares (Castaldi y Melis, 2006; Clemes, 2006; Verbruggen *et al.*, 2009; Pourrut *et al.*, 2012; y Ilić *et al.*, 2014) en donde se menciona que la materia orgánica (M.O) y las arcillas limitan la biodisponibilidad de metales pesados, ya que los metales pesados crean enlaces estables con la materia orgánica y las arcillas, impidiendo que se solubilizan, por ende, las plantas no son capaces de absorberlos. En el estudio de Castaldi y Melis, (2006) utilizaron tratamientos en hidroponía y composta, encontrando que la mayor concentración de metales pesados se dio en el tratamiento de hidroponía seguido por el tratamiento en donde se utilizó composta como sustrato.

4.3.1 Frutos de Jitomate

En este trabajo, las características de las plantas de jitomate durante el experimento hidropónico, permitieron observar que, a mayor concentración de metales pesados en la solución nutritiva, las plantas mostraron mayor intoxicación por estos metales pesados, evidenciado por bajo rendimiento, clorosis, marchitamiento, enchinamiento y sobre todo la falta de fruto. Fue muy notorio que, a mayor concentración de metales pesados, las plantas tuvieron una mayor deficiencia en el desarrollo del sistema reproductivo, teniendo, por ejemplo, que la floración fuera más deficiente, durante un periodo menor y con flores más pequeñas. Así, la producción de

frutos fue prácticamente nula en las plantas de los tratamientos I y II, muy baja en las plantas del tratamiento III y relativamente normal en las plantas del tratamiento IV. Una gran diferencia de este experimento con otros similares, es que aquí las plantas estuvieron con una solución nutritiva por alrededor de 45 días, en comparación a los 10 días de exposición de otros experimentos (Valdiviezo-Freire et al., 2015). De esta manera, las plantas de jitomate, sobre todo de los tratamientos I y II, estuvieron expuestas a altas dosis de metales pesados por periodos prolongados, produciendo grandes afectaciones a la fisiología de la planta.

4.4 Inocuidad vegetal

La inocuidad alimentaria es un proceso que debe de asegura la calidad en la producción y elaboración de los productos alimentarios. Según lo establece el Codex Alimentarius, el código que reglamenta la calidad e inocuidad de los alimentos, un alimento se considera contaminado cuando contiene: agentes vivos (virus o parásitos riesgosos para la salud), sustancias químicas tóxicas u orgánicas extrañas a su composición normal, y componentes naturales tóxicos, como los metales pesados en concentración mayores a las permitidas. La garantía de alimentos inocuos es fundamental para la protección de la salud humana y para mejorar la calidad de vida de los países. Cada brote de enfermedades transmitidas por alimentos tiene una serie de costos directos e indirectos en el país, ya que afecta la salud pública, la economía y el comercio nacional e internacional de alimentos.

En este sentido, la ciudad de Taxco ha sido uno de los productores de metales preciosos más importantes en México desde tiempos prehispánicos (Talavera et al. 2005). El material de minerales ricos en azufre de baja ley y la escoria residual fueron acumulados en los alrededores próximos a las minas, generando una gran cantidad de desechos o jales mineros (Armienta et al. 2004; Talavera et al. 2005; Talavera et al. 2006; Talavera et al. 2016). Los jales y terreros en la

región de Taxco fueron depositados sobre formaciones rocas impermeables que impiden la infiltración de grandes volúmenes de drenaje ácido de mina (DAM) a los acuíferos (Talavera et al. 2005; 2006). Por lo tanto, año con año enormes cantidades de estos jales son erosionados y transportados hacia partes más bajas a través del flujo de barrancas, arroyos y ríos, afectando al ambiente y a los ecosistemas de regiones alejadas a los jales.

Las plantas de la región de Taxco son altamente impactadas por la contaminación de metales pesados y tóxicos provenientes en gran medida de los desechos mineros localizados en Municipio de Taxco. La acumulación de metales pesados en tejidos vegetales produce su biodisponibilidad para animales y seres humanos cuando consumen este tipo de productos (Fries et al. 2006; Ruiz-Huerta y Armienta-Hernández, 2012). Ya que el jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) es el vegetal más importante en la dieta del mexicano y es cultivado periódicamente en la región de Taxco. Poblados como los de Puente Campuzano pueden tener potenciales problemas de salud ambiental, debido a que ahí, grandes extensiones de terreno son utilizados constantemente para la siembra del jitomate y, durante la temporada de estiaje son regadas con aguas del Río Taxco que estuvieron en contacto en su trayecto con desechos mineros y/o con drenaje ácido de mina. Debido a que el jitomate es comercializado dentro y fuera de la región de Taxco, es necesario generar más información que permita el entendimiento de la translocación de metales pesados en esta planta, para saber si existen las condiciones en la región de un problema ambiental.

Ya que los metales pesados no son biodegradables, pero si pueden sufrir transformación química y biológica en el medio ambiente, los metales pesados son sustancias químicas de alto riesgo. Por tal razón, algunos países como China y Rusia mantienen un estricto control en la distribución de alimentos como el jitomate, ya que si este vegetal llega a presentar As, Cd y Pb por encima de los límites máximos permisibles es cancelada su inmediatamente su distribución.

Los máximos permisibles en frutos de jitomate en China son para el As, Cd y Pb, 1.4, 0.1 y 6.0 mg kg⁻¹, respectivamente; mientras que en Rusia tienen menor tolerancia y sus límites máximos permisibles son 0.2 mg kg⁻¹ para el As, 0.03 mg kg⁻¹ para el Cd y 0.05 mg kg⁻¹ en el Pb.

Aun cuando en este trabajo no se tuvieron frutos en los tratamientos I y II, los datos indican el Pb, As, Cd, Ni, y Cr en la parte aérea de la planta están por arriba del máximo permisible para frutos de jitomate (NOM-127-SSA101994, NOM-001-SEMARNAT-1996). Sin embargo, aun cuando no es posible hacer una comparación directa entre la concentración de los frutos que se indican en las diferentes normas con las de los datos químicos de la parte aérea de las plantas, la concentración tan elevada en tallos y hojas en las plantas de los tratamientos I y II nos indican que la planta sí transloca los metales pesados y que, de haber existido fruto habría tenido altas concentraciones de metales pesados.

También, es importante señalar que en plantas de jitomate que fueron expuestas a experimentos similares, presentaron concentraciones similares de Cd y Ni, en la parte aérea a las de este trabajo (Valdiviezo-Freire et al., 2015). Esto indica que, todas aquellas plantas de jitomate que tengan acceso a metales pesados por arriba de 1 mg kg⁻¹, van a bioacumular metales pesados, sobre todo aquellos como el Cd, Ni, y As, y los van a translocar, es decir, los van a movilizar a la parte aérea, intoxicando a la planta.

5. CONCLUSIONES

La planta de jitomate absorbe metales pesados en función de la biodisponibilidad de éstos. La mayor cantidad de metales pesados se acumulan en la raíz, seguida por las hojas, tallos y, por último, en los frutos.

Los tratamientos con la mayor cantidad de metales pesados (tratamiento I) obtuvieron las concentraciones más altas de As, Cd, Ni, Cr y Pb en raíces, tallos y hojas.

El Cr y el Cd son los elementos con las mayores concentraciones en raíz tallo y fruto en todos los tratamientos. El Pb y el As son los elementos con las menores concentraciones en las diferentes partes de las plantas en todos los tratamientos. Los FT para los metales pesados como el As, Cd, Pb y Cr fueron en todos los tratamientos mayores >1.

Las plantas de jitomate tienen un alto FT cuando los metales pesados solubles tienen concentraciones iguales o mayores a 10 mg/L. Cuando el agua o el sustrato no producen concentraciones superiores a 1 mg/L, no se observa un peligro o riesgo potencial evidente para la salud de los humanos con excepción del Cd.

El Cd que tiene límites permisibles en frutos de 0.003 mg kg⁻¹, representa un alto riesgo, ya que es evidente que el jitomate si puede movilizar metales a la parte aérea, incrementando la posibilidad de que los frutos tengan valores por lo menos mayores a los de las normas.

Las plantas presentan un alto potencial de bioacumulación y de translocación aunque no tuvieron frutos en los tratamientos de mayor concentración. Esto indica que con concentraciones de entre 1 y 10 mg/L pudiera haber frutos con presencia de metales pesados, lo cual representaría un riesgo para la salud de los seres humanos.

6. REFERENCIAS

- Bertoli Alexandre Carvalho, Cannata Marcele Gabriel, Carvalho Ruy, Ribeiro Bastos Ana Rosa, Puggina Freitas Matheus, Augusto Amandados Santos. (2012). *Ecotoxicology and Environmental Safety* 86, 176–181.
- Castaldi Paola & Melis Pietro. (2004). Growth and Yield Characteristics and Heavy Metal Content on Tomatoes Grown in Different Growing Media, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35:1-2, 85-98, DOI: 10.1081/CSS-120027636.
- Chopra A. K. & Pathak Chakresh, 2012. Bioaccumulation and Translocation Efficiency of Heavy Metals in Vegetables Grown on Long-Term Wastewater Irrigated Soil Near Bindal River, Dehradun. *Agric Res (April–June 2012)* 1(2):157–164
- Clemens S. (2006). Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* 88, 17071719.
- Duruibe, J. O.1, Ogwuegbu, M. O. C. and Egwurugwu, J. N. (2007). Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences* Vol. 2 (5), pp. 112-118, May, 2007.
- Food and Agriculture Organization (FAO). *El cultivo del tomate con buenas practicas agricolas en la agricultura urbana y periurbana.* (2013). Venezuela.4-72.
- Gallego M, Susana. Penaa Liliana B., Barciaa Roberto A., Azpilicuetaa Claudia E., Iannonea María F., Rosalesa Eliana P., Zawoznika Myriam S., Groppaa María D., Benavidesa María P. (2012). Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanism. *Environmental and Experimental Botany* 83, 3– 46.
- García Vargas, D. (2006). Efectos fisiológicos y compartimentación radicular en plantas de *Zea mays L.* expuestas a la toxicidad por plomo. Doctorado. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Ilić S. Zoran, Kapoulas Nikolaos, Šunić Ljubomir , Beković Dragoljub, Mirecki Nataša. (2014). Heavy Metals and Nitrate Content in Tomato Fruit Grown in Organic and Conventional Production Systems. *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 23, No. 6, 2027-2032.

- Małkowski Eugeniusz, Kita Andrzej, Galas Witold, Karcz Waldemar and Kuperberg J. Michael. (2002). Lead distribution in corn seedlings (*Zea mays* L.) and its effect on growth and the concentrations of potassium and calcium. *Plant Growth Regulation*, 37, 69-76.
- Mendoza-Cózatl D, Timothy O Jobe, Felix Hauser and Julian I Schroeder: Long-distance transport, vacuolar sequestration, tolerance, and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic. (2011). *Plant Biology*, 14:554–562.
- Méndez-Ramírez Miriam y Armienta Hernández María Aurora. (2012). Distribución de Fe, Zn, Pb, Cu, Cd y As originada por residuos mineros y aguas residuales en un transecto del Río Taxco en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29, 450-462.
- N. Lugon-Moulin, M. Zhang, F. Gadani, L. Rossi, D. Koller, M. Krauss, G.J. Wagner. (2004) Critical review of the science and options for reducing cadmium in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) and other plants, *Adv. Agronomy* 83, 111–180.
- Oluyemi Adefemi Samuel & Awokunmi Eytayo Emmanuel. (2012). Uptake of Heavy Metals by Tomato (*Lycopersicon esculentus*) Grown on Soil Collected from Dumpsites in Ekiti State, South West, Nigeria. *International Journal of Chemistry*; Vol. 5, No. 3; ISSN 1916-9698 E-ISSN 1916-9701.
- Pourrut Bertrand, Muhammad Shahid, Camille Dumat, Peter Winterton, Eric Pinelli. (2011). Lead Uptake, Toxicity, and Detoxication in Plants. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Springer Verlag, vol. 213, pp. 113-136. <10.1007/978-1-4419-9860-6_4>.<hal-00717188>
- Ruiz Huerta Esther Aurora y Armienta Hernández María Aurora. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Rev. Int. Contam. Ambie*, 28 (2), 103-117.
- Sabine Martin, Wendy Griswold. (2009). Human Health Effects of Heavy Metals. *Environmental Science and Technology Briefs for Citizens*. Issue 15.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), (2010). Monografía de Jitomate. México, pp.3-10.
- Talavera Mendoza O, Yta Miriam, Moreno Tovar Raúl, Dótor Almazán Azucena, Flores Mundo Néstor and Duarte Gutiérrez Carlos (2005). Mineralogy and geochemistry of sulfide-

bearing tailings from silver mines in the Taxco, Mexico area to evaluate their potential environmental impact *Geofísica Internacional* (2005), Vol. 44, Num. 1, pp. 49-64.

Talavera-Mendoza O., Armienta Hernandez M., Garcia Abundis J., & Flores Mundo N. 2006. Geochemistry of leachates from the El Fraile sulfide tailings piles in Taxco, Guerrero, southern Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 28:243–255.

Talavera Mendoza, O., Ruiz, J., Díaz Villaseñor, E., Ramírez Guzmán, A., Cortés, A., Salgado Souto, S.A., Dótor Almazán, A. and Rivera Bustos, R., 2016. Water-rock-tailings interactions and sources of sulfur and metals in the subtropical mining region of Taxco, Guerrero (southern Mexico). *Applied Geochemistry*, 66, pp.73-81. ISSN: 0883-2927

Tiwari K.K., Singh N.K., Patel M.P. and Tiwari M.R., Rai U.N. (2011). Metal contamination of soil and translocation in vegetables growing under industrial wastewater irrigated agricultural field of Vadodara, Gujarat, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74(2011)1670–1677.

Valdiviezo-Freire E., Sandoval-Villa M., Carrillo-González R., Alcántar-González G., y Santizo-Rincón J. A., 2015. Absorción y transporte de cadmio y níquel en tomate. VIII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.

Verbruggen, N., Hermans, C., Schat, H., 2009. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants. *Curr. Opin. Plant Biol.* 12, 364-372.

Wójcik Małgorzata, Sugier Piotr, Siebielec Grzegorz. (2014). Metal accumulation strategies in plants spontaneously inhabiting Zn-Pb waste deposits. *Science of the Total Environment*, 487, 313-322.