



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Captación de metales pesados por *Echeveria gigantea*
(Rose & Purpus)**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

DIANA HERNÁNDEZ ROJAS



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. MARGARITA COLLAZO ORTEGA**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx; 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTE TRABAJO SE DESARROLLÓ EN EL LABORATORIO DE DESARROLLO EN PLANTAS, DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA COMPARADA, FACULTAD DE CIENCIAS, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

SE REALIZÓ CON EL APOYO DEL PROYECTO CONACyT 247078: "Iniciativa interdisciplinaria para el aprovechamiento sustentable del género *Echeveria* (Crassulaceae), plantas con potencial hortícola para la producción de áreas rurales de México".

ASESOR DEL TEMA:

Dra. Margarita Collazo Ortega

SUSTENTANTE:

Diana Hernández Rojas

Agradecimientos

Académicos

- ❖ Al Laboratorio de Desarrollo en Plantas, por todo el apoyo brindado durante la elaboración de este trabajo, gracias a todos los integrantes del mismo por sus enseñanzas.
- ❖ Gracias al Biól. Jerónimo Reyes Santiago del Jardín Botánico de la UNAM por su apoyo en la obtención del material biológico.
- ❖ A la Dra. Maria Eugenia Muñiz Díaz de León por permitirnos el uso de las estufas para el secado del material biológico.
- ❖ Gracias a la Dra. Lucia Mora del Instituto de Geología por permitirnos el uso de molino para el procesamiento de las muestras del material biológico.
- ❖ Un agradecimiento en especial a la Dra. Ofelia Morton Bermea, y todos los integrantes del Laboratorio de ICM-MS del Instituto de Geofísica por el apoyo en la realización de la espectrometría de masas.
- ❖ Al Dr. Gerardo Rivas Lechuga por su ayuda en el análisis estadístico.
- ❖ Agradezco a laboratorios MEDIX® por permitir el uso de las instalaciones de la azotea verde.
- ❖ Muchas gracias a la Dra. Margarita Collazo Ortega por todo el aprendizaje, ayuda y atenciones durante toda la elaboración de este trabajo.
- ❖ Gracias a la Dra. Ana Laura López Escamilla, Dr. Pedro Eloy Mendoza Hernández, y a la M. en C. Eréndira Alejandra Arellano Leyva por sus aportaciones a este trabajo.

Dedicatoria

A Dios por darme la oportunidad de llegar hasta aquí y permitirme concluir esta etapa de mi vida.

Esta tesis está dedicada a mi mamá, ya que sin ella no podría haber logrado alcanzar esta meta. Mami eres la mujer más buena, amable y linda que conozco en todo el mundo, gracias por todo lo que has hecho por mí durante toda mi vida, sabes que sin tu apoyo en cada momento difícil no sabría cómo seguir adelante, eres un ser humano ejemplar y gracias por enseñarme que no importan las adversidades uno debe dar lo mejor siempre y afrontar la vida con una sonrisa, gracias por compartir este sueño conmigo, Te Amo con todo mi corazón.

Gracias papá por el cariño y enseñanzas que nos brindas día con día, por apoyarme siempre en los momentos buenos y malos y siempre desear que seamos la mejor versión de nosotras mismas, gracias por siempre creer en mí y en que puedo lograr todo lo que me proponga, espero te sientes orgullo de al fin terminar esta etapa, Te Amo mucho.

A mi hermana por todo su amor, compañía y apoyo. Ana Banana, quiero que sepas que siempre vas a contar conmigo y siempre estaremos juntas en las buenas y malas, eres quien más puede hacerme reír incluso cuando me siento triste y aunque eres mi pequeña siempre aprendo algo de ti, Te Amo como no te imaginas y eres la mejor hermana que cualquiera pueda tener, siempre me esforzare por ser un ejemplo para ti.

Tengo que agradecer a mis abuelos Evelia y Salomón por todo el amor y cuidados que siempre han sabido brindar a cada miembro de la familia, y por ser el mejor ejemplo de que si uno desea algo debe esforzarse y trabajar para alcanzarlo, gracias abuelita por cuidarme desde que tengo memoria y todos los valores que has inculcado en mí, abuelito gracias por siempre estar para apoyar a cada uno de tus nietos y espero hacerte sentir orgulloso de mí así como yo me siento orgullosa de tener abuelos como ustedes, no saben cómo los amo. Gracias a mis tías y tíos Rojas, Mirtha, Bricia, Gloria, Mary y Alfredo, las quiero inmensamente a todas y siempre las llevo en mi corazón y mis pensamientos, gracias por todos los consejos y por brindarme la confianza de compartirlas mis preocupaciones y mis alegrías, gracias también por siempre aceptarme y quererme como soy, por su cariño tan único y principalmente por siempre estar acompañándome en los momentos importantes, cada una de ustedes tiene un lugar muy especial en mi corazón.

A Alma Delia y Luis Eduardo Buendía, los quiero muchísimo y gracias por cada enseñanza y por cada plática, gracias por su apoyo incondicional en todos los sentidos y por todos los buenos momentos.

A todas mis primas y primos, desde las más grandes hasta los más chiquitos, los quiero con todo mi corazón a todas y todos, y a pesar de ser tan diferentes entre nosotros, siempre voy a agradecer el seguir creciendo junto a ustedes y cada uno de los momentos de alegría que hemos compartido, todos son igual de importantes y especiales para mí y siempre contarán con todo mi apoyo.

A Rodrigo Valentino, por todo el amor que me ha dado a lo largo de estos años y además ser mi mejor amigo y compañero de aventuras. Mi amor, gracias por el apoyo que siempre me das, por compartir conmigo este camino lleno de altas y bajas pero siempre impulsarme a seguir adelante. Me hace muy feliz que estés a mi lado para al fin alcanzar esta meta y sé que será el principio de muchos sueños más por cumplir juntos, Te Amo Infinito. De nadie seré, solo de ti... y el resto tu sabes cómo continúa.

A mi querido grupo de "Amistades largas", Pollo, Giby, Cindy, Juls, Sebas Dear y Chiquicento, sin duda alguna la carrera no hubiera sido la misma sin compartir con cada uno de ustedes, gracias por todas esas pláticas, por esas salidas al campo y por cada momento en el que nos reímos hasta llorar. A mis amigas, saben cuánto las quiero y todas tienen un lugar en mi corazón, gracias por todos los momentos buenos y malos, por todo el "profundismo" y a pesar de que cada uno vaya tomando su camino siempre contamos una con la otra, amistades largas por siempre.

Un agradecimiento muy en especial a mi asesora de tesis la Dra. Margarita Collazo Ortega, a quien admiro mucho y le agradezco la oportunidad que me dio de llevar a cabo este trabajo. Mague, muchas gracias por todo tu tiempo, paciencia, compromiso, y por todas las atenciones que siempre tienes para tus alumnos, gracias por todas tus enseñanzas y apoyo.

Finalmente, gracias a la UNAM por estos años de formación.

"HERE'S TO THE FOOLS WHO DREAM"

ÍNDICE

Página

1. Resumen.....	1
2. Introducción.....	2
3. Antecedentes.....	3
3.1. Características de la Ciudad de México.....	5
3.2. Contaminación atmosférica en la ZMVM.....	7
3.3. Contaminación por metales pesados.....	10
3.4. Vías de entrada de metales pesados a las plantas y daños producidos.....	13
3.5. Características y funciones de las azoteas verdes.....	21
3.6. Tipos de vegetación utilizada comúnmente en azoteas verdes.....	24
3.7. Estudios de caso.....	27
3.8. Características de la familia <i>Crassulaceae</i>	27
4. Justificación.....	30
5. Objetivos.....	31
6. Método.....	31
6.1. Sitios de colecta.....	31
6.2. Colecta y procesamiento de material vegetal.....	33
6.3. Análisis de metales pesados por espectrometría de masas.....	33
6.4. Análisis estadístico.....	35
7. Resultados.....	36
8. Discusión.....	43
9. Conclusiones.....	50
10. Bibliografía.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1. Mapa de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). División Geoestadística delegacional y municipal.....	6
Figura 2. Tabla periódica de los elementos en la biosfera.....	13
Figura 3. Sistema de naturación directo con plantas nativas mexicanas.....	21
Figura 4. Esquema del género <i>Echeveria</i>	29
Figura 5. <i>Echeveria gigantea</i> creciendo en la azotea verde de los Laboratorios MEDIX®.....	30
Figura 6. Vista del muro vertical de la azotea verde del edificio de laboratorios MEDIX®.....	31
Figura 7. Vista de la azotea verde (horizontal) del edificio de laboratorios MEDIX®.....	32
Figura 8. Diagrama de flujo del procesamiento y análisis de metales pesados por espectrometría de masas.....	35
Figura 9. Concentración de Fe en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> a nivel de azotea.....	37
Figura 10. Concentración de micronutrientes metálicos en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> a nivel de azotea.....	37
Figura 11. Concentración de metales pesados en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> a nivel de azotea.....	38
Figura 12. Concentración de Fe en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> a nivel de azotea.....	39
Figura 13. Concentración de micronutrientes metálicos en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> a nivel de muro.....	39
Figura 14. Concentración de metales pesados en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> a nivel de muro.....	40
Figura 15. Concentración de Al, Ba, Hg, en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i>	41
Figura 16. Prueba de Mann-Whitney entre azotea y muro verde.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Página

Tabla 1. Emisiones (Tg) de contaminantes atmosféricos en los Estados Unidos.....	11
Tabla 2. Elementos esenciales de las plantas superiores ordenados de mayor a menor concentración en los tejidos vegetales, forma química en que son preferentemente absorbidos y papel fisiológico.....	16
Tabla 3. Efectos tóxicos específicos de los metales pesados en diferentes especies vegetales.....	19
Tabla 4. Mecanismos de resistencia de las plantas a los metales pesados.....	20
Tabla 5. Especies comúnmente utilizadas en azoteas verdes de la ZMVM.....	25
Tabla 6. Prueba de Kruskal-Wallis para la concentración de metales en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> cultivada en azotea verde ($p<0.05$).....	41
Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para la concentración de metales en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> cultivada en muro verde ($p<0.05$).....	42
Tabla 8. Rangos de concentración de elementos traza en el tejido foliar maduro para diversas especies hortícolas (mg Kg^{-1}) (Modificado de Kabata-Pendias, 2011), y, determinación en base a los valores encontrados, si son deficientes (D), suficientes (S) o excesivos (E) de acuerdo a los rangos establecidos, en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> en azotea verde.....	47
Tabla 9. Rangos de concentración de elementos traza en el tejido foliar maduro para diversas especies hortícolas (mg Kg^{-1}) (Modificado de Kabata-Pendias, 2011), y, determinación en base a los valores encontrados, si son deficientes (D), suficientes (S) o excesivos (E) de acuerdo a los rangos establecidos, en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> en muro verde.....	48

1. Resumen

La Zona Metropolitana del Valle de México se originó alrededor de un centro administrativo que provocó la migración de la población de estados aledaños y, actualmente alberga alrededor de 20 millones de habitantes. Aunado a un gran número de habitantes, los problemas de contaminación se ven agravados, ya que para cubrir las necesidades de vivienda e infraestructura las áreas verdes deben ser removidas. Debido a su ubicación geográfica y clima, los contaminantes en la Ciudad de México, tienden a quedar atrapados en la atmósfera y se dificulta su dispersión. En el verano la elevación de la temperatura provoca la formación de contaminantes secundarios, y durante el invierno las inversiones térmicas impiden la dispersión de los contaminantes, además, los vientos en la ciudad corren nor-noreste hacia la zona sur. Las azoteas y muros verdes representan una alternativa viable para recuperar los servicios ecosistémicos que se pierden con la disminución de la cubierta vegetal y edáfica dentro de las ciudades y además pueden contribuir a la disminución de algunos contaminantes atmosféricos, incluidos los metales pesados. Especies de la familia *Crassulaceae* han demostrado ser acumuladoras para contaminantes atmosféricos, en especial de metales pesados, además de ser resistentes a las condiciones extremas a las que son expuestas en una azotea verde. El presente trabajo estudió la capacidad de captación de metales pesados por *Echeveria gigantea* en individuos plantados en dos sistemas de naturación, azotea y muro verde construidos al sur de la Ciudad de México. Se analizó la concentración de manganeso (Mn), níquel (Ni), cobre (Cu), zinc (Zn), molibdeno (Mo), hierro (Fe), aluminio (Al), bario (Ba), vanadio (V), arsénico (As), cromo (Cr), cobalto (Co), cadmio (Cd), antimonio (Sb), plomo (Pb) y mercurio (Hg) en hoja, tallo, y raíz, de la planta mediante espectrometría de masas. Se encontró que *E. gigantea* tiene la capacidad de capturar y retener metales pesados tanto a nivel de hoja, tallo y raíz, siendo este último el órgano de mayor acumulación. Los metales con mayor concentración en orden descendente fueron Fe>Zn>Mn, como micronutrientes, y Al>Ba>Hg para metales pesados, y los de menor concentración fueron As>Cd>Sb. La presencia de altas concentraciones de Hg en *E. gigantea* es una posible indicación de que este metal puede migrar desde zonas altamente industrializadas, como el norte de la Ciudad, hacia el sur debido a la dirección de los vientos, principalmente mediante proceso de deposición seca y húmeda. La mayor acumulación de metales se dio a nivel de muro, a excepción de Cu y Ba que se acumulan en mayor cantidad en azotea. *E. gigantea* puede considerarse como una especie ideal en construcciones verdes debido a su capacidad de almacenar metales pesados.

2. Introducción

El incremento de la población en las grandes urbes como la Ciudad de México (CDMX), ha provocado la pérdida cada vez mayor de la vegetación original, dado que no se han implementado programas efectivos de urbanización y mantenimiento de la cobertura vegetal y suelo. La disminución de ésta provoca grandes daños al ambiente ya que se pierden los beneficios ecosistémicos que aporta, entre ellos, la captura de contaminantes, regulación de la humedad y la temperatura, la captura de agua de lluvia y el refugio de aves y microfauna, además de ser áreas de esparcimiento (Oberndorfer *et al.*, 2007).

La CDMX y su zona conurbada, que conforman la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) se encuentra entre las más pobladas de Latinoamérica, y se espera que la población aumente en un 25% para el año 2050 (INEGI, 2010). El incremento poblacional se debe a la migración hacia la urbe, la que requiere de infraestructura y servicios cada vez mayores. Además ha provocado un cambio drástico en el uso de suelo al transformar los sistemas naturales originales en ambientes urbanos y limitar la cobertura vegetal a parches aislados (INECC, 2014). La superficie total aproximada de la ZMVM es de 3,500 km², de los cuales aproximadamente 2,000 km² han sufrido algún proceso de urbanización (Lafragua *et al.*, 2003). La zona urbana se extiende a lo largo de una cuenca endorreica (Cuenca del Valle de México), se encuentra delimitada por extensas áreas montañosas que funcionan como barrera natural determinante de los patrones de circulación del viento, que, a su vez, dificulta la dispersión de los contaminantes (Lodoño, 2001).

En la CDMX han existido problemas de contaminación hace décadas, recientemente, en el 2016 y mayo de este año ha habido graves crisis. Habían pasado casi 14 años sin declarar contingencia ambiental, hasta el mes de marzo de ese año cuando se registraron los primeros altos niveles de contaminantes. Al mes siguiente la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) inicio el plan emergente decretando contingencia ambiental al llegar a los 156 puntos IMECA (el límite es 150). Durante los tres días de contingencia consecutiva en el mes de mayo, los niveles de contaminantes no bajaron a pesar de que tres millones de autos no circularon en esos días. Las delegaciones en donde la calidad del aire superó los límites de contaminantes desatando la contingencia fueron: Tlalpan, Benito Juárez, Tláhuac, Miguel Hidalgo, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero y Tlaxiaco (Periódico Expansión, 2016).

Los problemas de contaminación atmosférica se ven agravados por las condiciones geográficas y climáticas de la cuenca del Valle de México: menos oxígeno debido a su altitud, alto impacto solar que causa una gran reactividad atmosférica, los sistemas de montaña y los patrones de viento que intensifican las inversiones térmicas y con mayor frecuencia llevan contaminantes a las partes oeste y suroeste de la ciudad (Garza, 1996). Uno de los componentes de la contaminación son los metales pesados, cuyo principal origen se debe a actividades antropogénicas ligadas a las industria química, metalúrgica y la agricultura, cuyos efluentes van a la atmósfera y cuerpos de agua (agua superficial y profunda) (Navarro *et al.*, 2007).

La poca y mala distribución de las áreas verdes en la Ciudad de México lleva al incumplimiento de lo establecido por la Organización Mundial de la Salud de 9 m² de áreas verdes por habitante. Ante la imposibilidad de poder incrementar grandes áreas verdes, como parques debido a la falta de espacio, una alternativa es la naturación de espacios disponibles por medio de azoteas o muros verdes, que sustituyan en algún grado los servicios ecosistémicos de la vegetación.

En cuanto a la selección de especies para las azoteas o muros verdes, las suculentas como *Echeveria gigantea*, y otras pertenecientes a la familia Crassulaceae, han sido identificadas como bien adaptadas a las condiciones extremas que a menudo se encuentran en azoteas verdes, por ser plantas con metabolismo CAM (Crassulacean Acid Metabolism), que las convierte en especies resistentes a las condiciones ambientales (Winter y Smith, 1996), debido a su capacidad para limitar la transpiración y almacenar agua (Getter y Bradley, 2006).

En este sentido, se realizó la presente investigación para determinar la capacidad de captación de metales pesados por *Echeveria gigantea* en dos sistemas de naturación: azotea verde y muro verde.

3. Antecedentes

La distribución geográfica actual de la población mexicana se caracteriza por la fuerte concentración de habitantes en pocas ciudades y áreas metropolitanas. Las últimas se definen como el conjunto de dos o más municipios donde se localiza una ciudad de 50,000 o más habitantes, cuya área urbana, funciones y actividades rebasan el límite del municipio

que originalmente la contenía, incorporando como parte de sí misma o de su área de influencia directa a municipios vecinos, predominantemente urbanos, con los que mantiene un alto grado de integración socioeconómica (SEDESOL; CONAPO; INEGI, 2012).

La urbanización del país ha ido aparejada, en gran medida, del daño a los ecosistemas y los organismos que alberga para satisfacer las necesidades de construcción de viviendas, servicios y demás infraestructura requerida por la población. La vegetación que conforma los ecosistemas, prestan servicios ambientales que se definen como los beneficios que obtiene la población humana de los ecosistemas y se agrupan en cuatro categorías: soporte, regulación, provisión y culturales (Camacho y Ruíz, 2011).

Servicios de soporte: necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos. Algunos ejemplos son:

- Formación de suelos.
- Reciclaje de nutrientes.
- Producción primaria.

Servicios de regulación: los servicios de regulación son los beneficios que se obtienen de los procesos de regulación de los ecosistemas, por ejemplo:

- Del clima.
- Del saneamiento del agua.

Servicios de provisión: se refiere a todos los productos obtenidos del ecosistema. Algunos ejemplos son:

- Alimentos.
- Fibras.
- Leña.
- Bioquímicos.
- Recursos genéticos.

Servicios culturales: son los beneficios no materiales que se obtienen de los ecosistemas a través del enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, recreación y experiencias estéticas. Estos servicios incluyen:

- Identidad del sitio.
- Herencia cultural.
- Valor recreativo y turístico.
- Valor estético e inspirativo.
- Valor educativo.

3.1. Características de la Ciudad de México

La CDMX se localiza en el Valle de México, ubicado a los 19°20' N y los 99°05' O, formando parte de una cuenca, con una elevación promedio de 2240 msnm, y cuenta con prominencias topográficas como el Cerro de la Estrella, el Peñón y el Cerro de Chapultepec. Presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas, terrenos semiplanos en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco (SEMARNAT, Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de la Zona Metropolitana del Valle de México, 2002-2010). El clima en la mayor parte es templado subhúmedo (87%), en el resto se encuentra clima seco y semiseco (7%) y templado húmedo (6 %). La temperatura media anual es de 16°C. La temperatura más alta, mayor a 25°C, se presenta en los meses de marzo a mayo y la más baja, alrededor de 5°C, en el mes de enero. Las lluvias se presentan en verano, la precipitación total anual es variable: en la región seca es de 600 mm y en la parte templada húmeda (Ajusco) es de 1,200 mm anuales (García, 2004).

En 1930, el Distrito Federal (actualmente Ciudad de México) tenía una población de 1 millón, y en 1950 de 2.9 millones. Antes de esto, la ciudad no se había extendido más allá del límite del Distrito Federal, pero en 1950 comenzó a crecer hacia el norte a los municipios del Estado de México. Para 1990 la población había aumentado a 15 millones de habitantes, ubicados en el Distrito Federal y 27 municipios del Estado de México (Garza, 1996). Para el año 2015 la CDMX registró a 8,918,653 habitantes (INEGI, 2015) y la población de la ZMVM en 20,116,842 (INEGI, 2014) formada por 16 delegaciones de la CDMX y 59 municipios del Estado de México y un municipio del estado de Hidalgo, con una superficie de 7,866 km² (Estudios territoriales de la OCDE, 2015) (Figura 1). Una de las razones por las que ocurrió este acelerado aumento de la población es que las zonas metropolitanas se conformaron alrededor de un centro administrativo y a partir de éste se crearon centros de comercio e industria, lo que atrajo más población urbana y rural (Garza, 1996).

El crecimiento urbano ha ocurrido sin un adecuado plan de desarrollo, por lo que tener una población tan grande dentro de un área relativamente pequeña de 3,540 km², con 54,326 industrias y 3.3 millones de vehículos matriculados (INEGI, 2010), da una idea de la emisión y concentración de contaminantes a las que está expuesta la población. La ubicación geográfica y orográfica de la ZMVM influye en la calidad del aire de la zona ya que los vientos corren del nor-noreste hacia el sur (Jauregui, 2000), la zona más vegetada, provocando la acumulación de contaminantes y la no adecuada ventilación de la atmósfera,

que contribuyen a la contaminación de agua, suelo y aire. Otro gran problema de las ciudades es que en mayor medida está conformada por superficies oscuras e impermeables como pavimentos, lo cual forma las islas de calor urbano, ya que la radiación solar es absorbida por estas superficies, que las hace más calientes que las regiones rurales que las rodean. Estas islas pueden aumentar la demanda de energía para aire acondicionado, lo cual libera más calor al aire y también gases de efecto invernadero, degradando así la calidad del aire local. Las temperaturas urbanas más elevadas durante el día pueden aumentar la formación del smog urbano, puesto que tanto las emisiones de contaminantes precursores, como las tasas de reacciones fotoquímicas de la atmósfera aumentan (Osorio, 2013).



Figura 1. Mapa de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMVM). División Geoestadística delegacional y municipal.
Fuente: INEGI, 2011.

3.2. Contaminación atmosférica en la ZMVM.

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de materia o energía en cualquier estado físico y forma, que al incorporarse o actuar en la atmósfera altere o modifique su composición y condición natural (LGEEPA, 1988).

De acuerdo con la Secretaria de Medio Ambiente (2012) las principales fuentes de generación de contaminantes atmosféricos dentro de la ZMVM se pueden clasificar en cuatro tipos:

- ❖ Fuentes puntuales: es una fuente estacionaria, única y fácilmente identificable, se define como toda instalación en la que se realizan procesos industriales, comerciales o de servicios. De las 4,867 toneladas de bióxido de azufre (SO_2) generadas en la ZMVM, el sector industrial es el principal emisor con una participación del 85%, siendo los sectores de la industria química (12%) y del papel (38%) los que más contribuyen a esta emisión.
- ❖ Fuentes de área: son fuentes fijas que resultan demasiado numerosas y dispersas, como para ser incluidas de manera individual en un inventario de fuentes puntuales. Emiten aproximadamente 22 mil toneladas de PM_{10} (63% del total), provenientes en su mayoría de la re-suspensión del polvo durante el paso vehicular sobre las vialidades. También dentro de las fuentes de área, se generan 231,282 toneladas de compuestos orgánicos volátiles (COV), que representan el 37% del total en la ZMVM, estos se originan básicamente por el uso de solventes y productos que los contienen, así como de las fugas e hidrocarburos no quemados en la combustión de gas en estufas y calentadores de agua domésticos.
- ❖ Fuentes móviles: la flota vehicular en la ZMVM se estima en más de 4.5 millones de vehículos, de los cuales el 81% corresponde a autos particulares. El transporte vial genera la mayoría de los contaminantes y de los compuestos de efecto invernadero. Este sector aporta el 98% del CO con 1.57 millones de toneladas y el 88% de los NO_x con cerca de 210 mil toneladas. En general estos contaminantes provienen de la combustión de la gasolina en las unidades automotoras.
- ❖ Fuentes naturales: los compuestos orgánicos o biogénicos provenientes de la vegetación participan en la formación de ozono, no obstante, estas fuentes aportan solo 27 mil toneladas de COV, que representan el 4% de las emisiones totales de la ZMVM. Las partículas PM_{10} que se desprenden del suelo por causa del viento, aportan el 4% de las emisiones totales de dicho contaminante.

Las industrias ubicadas principalmente en el Estado de México, emiten el 61% de PM₁₀ y el 46% de PM_{2.5} y respecto a los precursores de ozono, éstas generan el 68% de COV y el 84% de NOX. La delegación Iztapalapa concentra el mayor número de industrias, seguida de Azcapotzalco y Gustavo A. Madero. En los municipios de Tlalnepantla, Naucalpan y Ecatepec de Morelos se ubican gran cantidad de industrias, así como la mayor generación de emisiones atmosféricas de esta entidad, además, cabe mencionar que el municipio de Acolman aporta el 43% de las emisiones de NOX debido a que en él se ubican dos plantas generadoras de energía de la ZMVM (Secretaría del Medio Ambiente, 2010).

El Programa 2002- 2010 para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de México, señala que, entre los principales factores fisiográficos y climáticos que afectan la calidad del aire son:

- El entorno montañoso que rodea la cuenca, con montañas que alcanzan en promedio una altitud de 3,200 msnn y elevaciones que superan los 5,400 msnm, constituyen una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes atmosféricos.
- Las frecuentes inversiones térmicas que ocurren en el Valle en más del 70% de los días del año, son un fenómeno natural que causa un estancamiento temporal de las masas de aire en la atmósfera. Ello inhibe la capacidad de autodepuración de ésta y favorece la acumulación de los contaminantes. El estancamiento perdura hasta que, al transcurrir el día y de manera gradual, la inversión térmica se rompe debido al calentamiento de la atmósfera, entonces los contaminantes se dispersan.
- Los sistemas anticiclónicos que se registran frecuentemente en la región centro del país, tienen la capacidad de generar cápsulas de aire inmóvil en áreas que pueden abarcar regiones mucho mayores que el Valle de México.
- La altitud a la que se ubica el Valle de México (2,240 msnm), determina que el contenido de oxígeno sea 23% menor que a nivel del mar, lo cual tiende a hacer más contaminantes los procesos de combustión.

El clima de la ZMVM se tiene una temporada seca de noviembre a mayo y una temporada de lluvias de junio a octubre. En la temporada de invierno son frecuentes las inversiones térmicas durante las primeras horas del día, lo que impide que los contaminantes se dispersen; en la época de verano la temperatura y la radiación solar aumentan, lo que

favorece la formación de contaminantes secundarios como el ozono y en la temporada de lluvias, la atmósfera se vuelve inestable lo que favorece la dilución y dispersión de contaminantes (Secretaría del Medio Ambiente, 2011).

Durante la noche se presenta un flujo débil que desciende por las pendientes de las montañas que rodean la cuenca, impulsado por la brisa de montaña, el viento converge en la región norte y centro de la ciudad, favoreciendo la acumulación de los contaminantes durante la mañana en esa región. Con la salida del sol, el calentamiento de las pendientes de las montañas, genera un gradiente de temperatura que impulsa la elevación del aire caliente, creando un movimiento de arrastre del viento desde la cuenca conocido como brisa de valle. La brisa de valle, arrastra consigo el aire contaminado desde las zonas de máxima emisión en el norte y centro de la zona urbana hacia el sur. Por la tarde, el aumento en la velocidad del viento que permite una mejor dispersión de los contaminantes del aire. Este patrón diurno explica porque durante las mañanas los contaminantes primarios se acumulan en el centro de la zona metropolitana, mientras que después del medio día las masas de aire contaminado se desplazan hacia el sur, donde las montañas dificultan la libre dispersión y permanecen parcialmente estancadas por la tarde (Secretaría del Medio Ambiente, 2016).

Además de las condiciones climáticas y el papel del viento, la depositación húmeda y seca de los contaminantes juega un papel importante en el transporte de los mismos dentro de la ZMVM. La depositación seca se puede definir como un proceso de sedimentación gravitacional y de transferencia que remueve partículas y gases de la atmósfera. Aunque la depositación seca ocurre con mayor frecuencia que la depositación húmeda, es menos eficiente para la remoción de aeropartículas en la atmósfera (Bridgman, 1990). Las aeropartículas pueden ser removidas de la atmósfera y ser depositadas en aguas superficiales, lagos, ríos o suelos (Jaffrezo *et al.*, 1994).

La depositación húmeda implica la transferencia de un gas o una partícula hacia las gotas de lluvia, nube o neblina. Este tipo de depositación es relativamente compleja en comparación con el proceso de depositación seca, principalmente porque involucra mecanismos de transferencia de masa de múltiples fases (fase gaseosa, aerosoles y fase acuosa). La posibilidad de encontrar la fase acuosa en diferentes formas físicas como agua

de lluvia, nieve, neblina, cristales de hielo y granizo complican los procesos de transferencia (Huerta, 2011).

3.3. Contaminación por metales pesados

La tabla periódica incluye unos 70 elementos metálicos, y de ellos 59 pueden ser considerados “metales pesados”, que son aquellos con peso atómico mayor que el del Fe (55.85 g/mol). Con esta precisión se excluirían metales con pesos atómicos menores que el del Fe y que con frecuencia pueden ser metales contaminantes, como el V (50.95 g/mol), Mn (54.44 g/mol), Cr (52.01 g/mol) y a otros que realmente no son metales como As, F y P. Por ello, resulta mejor hablar de contaminación por “elementos traza”, si bien hay que reconocer que la mayoría de los contaminantes inorgánicos son “metales pesados” (Galán y Romero, 2008).

Los metales pesados y los metaloides en los suelos se derivan del material de origen del suelo (fuente litogénica) y de varias fuentes antropogénicas, la mayoría de las cuales involucran varios materiales metálicos (Alloway, 2010). La fuente litogénica responde a la geodisponibilidad de los elementos, que es aquella porción de su contenido total que puede liberarse a la superficie o cerca de la superficie (o biosfera) por procesos mecánicos, químicos, o biológicos (Galán y Romero, 2008). Por tanto, los metales pesados geodisponibles son los que pasan de la roca madre a los suelos tras ser liberados por meteorización, junto a otros procedentes de emisiones volcánicas y lixiviadas de mineralizaciones. La liberación de los elementos depende de la estructura y estabilidad termodinámica de los minerales de la roca madre (Galán y Romero, 2008).

Existen muchas fuentes antropogénicas de contaminación de metales pesados que afectan tanto a los suelos agrícolas como los urbanos (Alloway, 2010), las principales pueden ser (Galán y Romero, 2008):

- Actividades agrícolas: riego, fertilizantes inorgánicos, pesticidas, estiércol, enmiendas calizas y, sobre todo, lodos residuales de depuradoras.
- Generación de energía eléctrica: la combustión de carbón es una de las principales fuentes de deposición de metales en el suelo. Las centrales térmicas que usan petróleo pueden ser fuentes de Pb, Ni y V.
- Actividades industriales: las principales industrias contaminantes son las fábricas de hierro y acero, que emiten metales asociados a las menas de Fe y Ni. La fabricación de baterías produce cantidades considerables de Pb. Las industrias de productos

químicos, fármacos, pigmentos y tintes, el curtido de pieles, etc. producen distintos tipos de contaminantes. En general las áreas altamente industrializadas incluyen As, Cd, Cr, Hg, Fe, Ni, Pb y Zn.

- Residuos domésticos: aproximadamente el 10% de la basura está compuesta por metales. Su enterramiento puede contaminar las aguas subterráneas, mientras que la incineración puede contaminar la atmósfera al liberar metales volátiles y como consecuencia contaminar los suelos. Por otra parte, las basuras no controladas obviamente son una importante fuente de contaminantes para el suelo y las aguas superficiales.

En la siguiente tabla se presenta una estimación de la importancia que tiene el aporte de contaminantes por diferentes fuentes de contaminación. Se considera que los principales aportes de contaminación por metales pesados son las descargas industriales, seguidas de la combustión y derrames de combustibles fósiles (Tabla 1) (Valette-Silver, 1993).

Tabla 1. Emisiones (Tg) de contaminantes atmosféricos en los Estados Unidos.	
FUENTE	EMISIONES ESTIMADAS (Tg/año)
Combustión de combustible y procesos industriales.	15
Emisión de partículas fugitivas de procesos industriales.	5.3
Fuentes fugitivas no industriales (polvo, erosión eólica, etc.)	47-115
Fuentes móviles.	2.5
Polvos.	50-250
Incendios forestales.	1-50
Sal marina.	300
Emisiones volcánicas	25-150
Partículas formadas a partir de emisiones gaseosas (H ₂ S, NH ₃ , NO _x y HC).	345-1100
Fuente: Valette-Silver (1993).	

Los suelos de todas las zonas urbanas están generalmente contaminados con Pb, Zn, Cd y Cu procedentes del transporte, pintura y muchas otras fuentes urbanas no específicas. Aunque la composición de metales pesados de los suelos agrícolas tiende a estar más estrechamente controlada por el material original, los insumos de fuentes tales como la deposición de partículas de aerosol transportadas atmosféricamente a gran distancia procedentes de la combustión de combustibles fósiles y otras fuentes, aplicaciones de

materiales orgánicos y contaminantes en fertilizantes también pueden ser significativos (Alloway, 2010).

La mayoría de los elementos traza se introducen en la atmósfera en forma de aerosoles finos, y después de viajar una cierta distancia se depositan por gravedad y / o son barridos por la humedad en forma de lluvia o niebla, tanto en el área local como zonas remotas. Los iones inorgánicos y los elementos traza requieren una atención especial, ya que son móviles en el medio ambiente y causan efectos adversos a los ecosistemas terrestres y a la hidrosfera (García *et al.*, 2009).

Algunos metales pesados constituyen micronutrientes necesarios para el funcionamiento de las células. Por lo tanto, los efectos tóxicos de estos elementos están dados en gran medida en función de su concentración. Los límites de concentraciones tóxicas son distintos para cada metal y dependen en gran medida de la química de cada especie y de los efectos fisiológicos asociados (SenGupta, 2002). Los metales pueden dividirse en tres clases de acuerdo con su reactividad con los grupos funcionales de las biomoléculas, y son; Clase A, aquellos que reaccionan más con el oxígeno, como Al, Ca, Sr, Ba; Clase B, son los que reaccionan más con el azufre, como Cu, Hg y Ag; en la C se encuentran metales con afinidad intermedia como Fe, Co, Ni, Zn, As, Cd, Pb y Cu. Para la mayoría de los organismos es extremadamente tóxica la exposición a un exceso de metales pesados como Cd, Hg, Cr, Ni y Pb. Los iones metálicos tóxicos suelen penetrar a la célula a través de los mismos sistemas de captación que utilizan los iones metálicos fisiológicamente importantes como Ca, Mg, Cu y Zn. Dentro de la cadena alimenticia, los organismos fotosintéticos son las principales vías de acceso de los metales pesados hacia los animales y el ser humano (Cervantes y Moreno, 1999).

En la Figura 2 se muestra la tabla periódica de los elementos en la biosfera, los considerados elementos traza y elementos traza esenciales.

1 H																	2 He																														
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																														
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																														
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																														
55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																														
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Db	105 Jb	106 Rf	107 Bh	108 Hn	109 Mt	110	111																																					
<table border="1"> <tr> <td>57 La</td><td>58 Ce</td><td>59 Pr</td><td>60 Nd</td><td>61 Pm</td><td>62 Sm</td><td>63 Eu</td><td>64 Gd</td><td>65 Tb</td><td>66 Dy</td><td>67 Ho</td><td>68 Er</td><td>69 Tm</td><td>70 Yb</td><td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>89 Ac</td><td>90 Th</td><td>91 Pa</td><td>92 U</td><td>93 Np</td><td>94 Pu</td><td>95 Am</td><td>96 Cm</td><td>97 Bk</td><td>98 Cf</td><td>99 Es</td><td>100 Fm</td><td>101 Md</td><td>102 No</td><td>103 Lr</td> </tr> </table>																		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																	
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																	

Elementos mayoritarios; Elementos minoritarios; Elemento traza; Elementos traza esenciales; Gases nobles.
 Los elementos en rojo se consideran elementos tóxicos.

Figura 2. Tabla periódica de los elementos en la biosfera. Modificada de: Galán y Romero (2008).

La remoción de Pb de la gasolina y las pinturas, los cambios en el tipo y la estructura de las industrias y las estrictas regulaciones sobre las emisiones atmosféricas y las descargas de aguas residuales han dado lugar a una reducción general de las concentraciones de metales pesados que alcanzan los suelos en muchos países. Sin embargo, la contaminación histórica todavía afecta los suelos en muchas áreas y puede tener impactos durante décadas o incluso siglos después (Alloway, 2010).

3.4. Vías de entrada de metales pesados a las plantas y daños producidos.

Independientemente del origen de los metales pesados en el medio ambiente, ya sea natural o antropogénico, para que estos ingresen a la planta y posteriormente se consideren biodisponibles, depende de un sistema de transferencia suelo-planta.

En el suelo se encuentran los iones minerales que provienen tanto del desgaste de la roca madre como de la descomposición de la materia orgánica. La roca madre puede ser de origen volcánico, metamórfica, sedimentaria o de otro tipo, pero dos cosas son importantes: la roca tiene una estructura cristalina, y conformando esta estructura hay numerosos tipos de iones contaminantes y elementos. La mayoría de los elementos que son esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas están presentes en la matriz cristalina de los minerales. En el suelo, los metales pesados, pueden estar presentes como iones libres o disponibles, compuestos de sales metálicas solubles o bien, compuestos insolubles o parcialmente solubilizados como óxidos, carbonatos e hidróxidos (Pineda, 2004).

Los elementos se ponen a disposición de las plantas cuando las rocas se descomponen con el tiempo, creando suelo junto con la materia orgánica, y hay la presencia de iones disueltos y compuestos inorgánicos (Mauseth, 2014). Los metales pesados forman parte de este complejo heterogéneo, por lo cual deben presentarse en un estado específico (disponible) antes de poder ser absorbidos por las plantas.

Los factores que influyen en la movilización de metales en el suelo son: pH, potencial redox, composición iónica de la solución del suelo, capacidad de intercambio (catiónico y/o aniónico), presencia de carbonatos, materia orgánica y textura, entre otros (Prieto *et al.*, 2009).

Se puede generalizar que en suelos ácidos bien aireados (oxidados), varios metales traza, especialmente Cd y Zn, son móviles fácilmente y disponibles para las plantas, mientras que en los suelos mal aireados (reducidos) los suelos neutros o alcalinos los metales están sustancialmente menos disponibles. Una última característica que influye en la forma en que son tomados los metales pesados por las plantas es la fase del suelo en donde se encuentren. La fase líquida del suelo (suelo en solución) cambia rápida y constantemente en cantidad y composición química debido al contacto con la gran diversidad de la fase sólida del suelo y, por la captación de agua e iones por las raíces de las plantas. En general, las plantas toman más fácilmente los metales pesados que están en el suelo en solución, ya sea como iones libres o formas complejas (Kabata-Pendias, 2004).

Una vez que los elementos metálicos, se encuentran en alguno de los estados iónicos o en la fase del suelo óptima para poder ser captados por una planta, son absorbidos por la raíz, que es la principal ruta de entrada, sin embargo, se ha observado que otros tejidos como las hojas, también tienen la habilidad de absorber tanto nutrientes como metales pesados (Taiz y Zeiger, 2010). La zona de las raíces por donde se efectúa la mayor absorción de nutrientes minerales puede ser por toda la raíz, principalmente por la zona de los pelos radicales, que tiene una mayor capacidad de absorción, debido a la gran superficie de absorción y una eficiente translocación hacia las partes altas de la planta a través de los elementos xilemáticos, que ya se encuentran completamente desarrollados en dicha zona.

Las paredes de las células vegetales tienen cargas negativas dadas por la disociación de los grupos carboxilo de los ácidos galacturónicos (ácidos débiles), monómeros de las pectinas que forman la lámina media de las paredes celulares, y atraen a los cationes. El movimiento de un ión desde la solución del suelo hasta los vasos xilemáticos involucra, al menos, dos eventos de transporte a través de la membrana. El primero, en las células de

la epidermis de la raíz o de la corteza para entrar al simplasto (antes de la endodermis) y llegar al xilema, y en segundo, en el estele para abandonar el apoplasto e ingresar al simplasto de las hojas o cualquier órgano demandante (Ortega y Collazo-Ortega, 2013).

Otro factor que favorece la entrada de los metales a la planta son los exudados, compuestos orgánicos que se liberan en la raíz y presentan diferentes características como su forma de liberación, pero de manera general favorecen la disponibilidad de los metales pesados. Un ejemplo de estos compuestos es el mucigel, que forma una capa externa a la raíz de la planta (Navarro *et al.*, 2007).

La disponibilidad de metales pesados provenientes de fuentes aéreas, y que pueden ser absorbidos por las hojas, tienen un impacto significativo en la concentración de contaminantes en la misma. Se sabe que la absorción foliar consiste en dos fases: penetración cuticular no metabólica, que es considerada la principal ruta de entrada, y mecanismos metabólicos, que representa la acumulación de elementos frente a un gradiente de concentración. El segundo proceso es responsable de transportar los iones a través de la membrana plasmática y protoplastos. Los elementos traza absorbidos por las hojas pueden ser traslocados a otras partes de la planta, inclusive a las raíces, en donde parece común la acumulación de un metal que se encuentre en exceso (Kabata-Pendias, 2011).

La absorción de elementos traza, ya sea por deposición húmeda o seca por la parte aérea de la planta está relacionada con la morfología de la superficie de las hojas, factor determinante para la absorción foliar de los elementos; algunas especies son especialmente susceptibles a adsorber elementos y contaminantes de fuentes aéreas (Kabata-Pendias, 2011).

Para su crecimiento, las plantas requieren 17 elementos esenciales o nutrimentos que incluyen el carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca), magnesio (Mg), boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), y zinc (Zn), sus funciones se señalan en la Tabla 2. Los elementos se dividen en macro y micronutrimentos dependiendo de la cantidad en que son requeridos por la planta para completar su desarrollo. El C, H y O, provienen de la atmósfera y los restantes del suelo. Los macronutrimentos son N, P, K, S, Ca, Mg. Los micronutrimentos son B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Zn (Mahler, 2003). Los elementos metálicos, así como parte de los elementos considerados dentro de los metales pesados son parte esencial para la nutrición y funcionamiento correcto de la célula, sin embargo,

cuando se presentan en altas concentraciones se convierten en elementos tóxicos para la misma y en general para los seres vivos.

Tabla 2. Elementos esenciales de las plantas superiores ordenados de mayor a menor concentración en los tejidos vegetales, forma química en que son preferentemente absorbidos y papel fisiológico.			
	Elemento y símbolo químico.	Forma química.	Papel fisiológico.
Macronutrientos	Hidrógeno (H)	H ₂ O	Constituyente de todas las moléculas orgánicas.
	Carbono (C)	CO ₂ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	Constituyente de todas las moléculas orgánicas.
	Oxígeno (O)	O ₂ , CO ₂	Constituyente de la mayoría de las moléculas orgánicas.
	Nitrógeno (N)	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	Componente de todos los aminoácidos, ácidos nucleicos, amidas proteínas, nucleótidos, fitohormonas y alcaloides.
	Potasio (K)	K ⁺	Osmorregulador, mantenimiento del equilibrio electroquímico; regulación de actividad enzimática: síntesis de proteínas, ATPasas.
	Calcio (Ca)	Ca ²⁺	Estabiliza la pared celular y membranas; actúa como mensajero secundario interactuando con calmodulina.
	Magnesio (Mg)	Mg ²⁺	Componente de la molécula de clorofila y ATPasas; activador de las enzimas RuBisCo, fosfoenol piruvato carboxilasa y la glutamato sintetasa.
	Fósforo (P)	HPO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	Componente de ácidos nucleicos, fosfolípidos, ATP y ADP (energía química); está involucrado en la regulación metabólica a través de reacciones de fosforilación.

	Azufre (S)	SO_4^{2-}	Componente de proteínas, glutatión (antioxidante importante) sulfolípidos, tiamina, coenzima A, biotina, fitoquelatinas.
Micronutrientes	Cloro (Cl)	Cl^-	Osmorregulador, mantenimiento del equilibrio electroquímico; cofactor de la manganeso- proteína.
	Hierro (Fe)	$\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^+$	Participa en sistemas redox: ferredoxina, citocromo, nitrito reductasa, y sulfito reductasa; activador de las enzimas catalasa, aminolevulínico sintetasa y protoclorofilida (ambas participan en la síntesis de clorofilas).
	Boro (B)	BO_3^{3-}	Ayuda al transporte de carbohidratos polihidroxílicos, involucrado en el metabolismo de los fenoles; estabiliza membranas; participa en la síntesis de uracilo.
	Manganeso (Mn)	Mn^{2+}	Forma parte de la manganeso-proteína, enzima clave del fotosistema II; componente de superóxido dismutasa (antioxidante).
	Zinc (Zn)	Zn^{2+}	Activador de la enzima anhidrasa carbónica, ARN polimerasa, alcohol deshidrogenasa.
	Cobre (Cu)	Cu^{2+}	Participa en sistemas redox: plastocianina, citocromo c oxidasa; activador de las enzimas lacasa y fenolasa.
	Molibdeno (Mo)	Mo_4^{2-}	Componente de la nitrato reductasa (enzima clave en el metabolismo del nitrógeno) y de la nitrogenasa.
	Níquel (Ni)	Ni^{2+}	Cofactor de la ureasa.
Fuente: Quiroz <i>et al.</i> (2013).			

Los metales pesados tienen una gran capacidad de unirse a moléculas orgánicas en diferentes formas, lo que los vuelve tan tóxicos para los organismos vivos (Tabla 3). Principalmente son afines a ligandos dentro de la célula (Navarro *et al.*, 2007). La interacción entre la señal y una molécula que actúa como receptor da lugar a un complejo en el que la señal se denomina ligando; de este modo, cuando la señal alcanza a la célula

blanco se forma un complejo ligando-receptor. Las interacciones están asociadas con funciones particulares (Curtis *et al.*, 2008).

El resultado de estas uniones ligando-metal puede ser muy perjudicial para la célula y cabe destacar: 1) la acción genérica sobre proteínas por inhibición de la actividad o por disrupción en la estructura de las mismas, 2) el desplazamiento de elementos esenciales de su metabolismo estándar, produciendo efectos de deficiencia, 3) la catálisis de reacciones de generación de moléculas ROS (Reactive Oxygen Species) o radicales libres que provocan fenómenos de estrés oxidativo (Navarro *et al.*, 2007). Un ejemplo de moléculas ROS es el radical hidroxilo altamente reactivo (OH^\cdot), que puede ser generado a partir de una interacción entre superóxido (O_2^-) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La reacción de Haber-Weiss proporciona un medio para generar radicales más tóxicos a partir del superóxido menos reactivo y peróxido de hidrógeno que puede ser generado enzimáticamente. Esta reacción es termodinámicamente desfavorable en sistemas biológicos (Kehrer, 2000).

Aunque otros iones de metal de transición son capaces de catalizar esta reacción, la reacción de Haber-Weiss catalizada por hierro, que hace uso de la química de Fenton, se considera ahora como el principal mecanismo por el cual el radical hidroxilo altamente reactivo se genera en sistemas biológicos (Liochev, 1999).

Tabla 3. Efectos tóxicos específicos de los metales pesados en diferentes especies vegetales.	
Metal	Efectos
Aluminio	Alteración de membranas, desbalance iónico, inhibición de la respiración, interferencia en la división celular, y funciones del citoplasma y pared celular.
Arsénico	Reducción del crecimiento, alteración en la concentración de Mn, Ca, K, y P.
Cadmio	Reducción del crecimiento, inhibición de la fotosíntesis y la transpiración. Inhibición de enzimas del ciclo de Calvin, inhibición de síntesis de la clorofila, alteración de la concentración de Mn, Ca y K.
Cobre	Reducción del crecimiento, alteración de la permeabilidad de la membrana, desbalance iónico, inhibición de la fotosíntesis y la respiración, interferencia en la síntesis de pigmentos y lípidos.
Cromo	Desbalance en la concentración de K, P, Fe, Mg y Ca, desorganización de la estructura y membrana del cloroplasto.
Mercurio	Reducción del crecimiento, inhibición de la fotosíntesis, alteración en la captación de K, inhibición de diferentes enzimas con SH esenciales.
Plomo	Inhibición del crecimiento, alteración de la concentración de Ca y K. Inhibición de la mitosis, inhibición en los procesos de fotosíntesis, respiración y absorción de agua.
Zinc	Inhibición del transporte de electrones fotosintéticos, alteraciones en la concentración de Cu, Fe, Ca y Mg, modificación de la permeabilidad de membranas.
Fuente: Cervantes y Moreno (1999).	

A continuación, se mencionan algunos de los mecanismos de resistencia de las plantas a algunos metales pesados (Tabla 4).

Tabla 4. Mecanismos de resistencia de las plantas a los metales pesados.	
Metal	Mecanismos de resistencia
Aluminio	Acumulación en tallo y raíz. Acumulación en la raíz sin transporte al tallo. Exclusión del metal. Evasión de la captación por expulsión limitada de H ⁺ . Disminución de la permeabilidad de la membrana celular o baja de la capacidad de intercambio catiónico en la pared celular. Posible incremento de quelantes de Al como citrato, malato, compuestos fenólicos o proteínas.
Arsénico	No determinado.
Cadmio	Síntesis de fitoquelatinas.
Cobre	Exclusión o decremento de la captación. Inmovilización en las paredes celulares. Compartimentación de complejos solubles e insolubles. Adaptación enzimática. Producción de fitoquelatinas.
Cromo	Posible acumulación en la raíz y otros tejidos, y formación de complejos como trioxalatocromato.
Mercurio	No hay evidencias de tolerancia. En algunos casos se concentra en raíz o en tejidos apicales como metilmercurio.
Plomo	Posible exclusión por interacción con la pared celular o bien por asociación al mecanismo de transporte de Pi.
Zinc	Inmovilización en paredes celulares. Compartimentación en complejos no difusibles. Compartimentación en complejos solubles en vacuolas. Desarrollo de sistemas enzimáticos resistentes.
Fuente: Cervantes y Moreno (1999).	

3.5. Características y funciones de las Azoteas Verdes.

Debido a la falta de áreas verdes en la CDMX, se hace necesario sustituir la vegetación que se ha perdido por alguna forma de naturación, de manera que se re-establezcan en alguna medida los servicios ambientales. Algunas de las formas de naturación son las azoteas o techos verdes y los muros verdes. Una azotea verde se puede definir como cualquier construcción en la superficie de un techo que ha sido cubierta con sustrato y plantas, e imitan a los ecosistemas naturales para proporcionar algunos servicios ecosistémicos (Oberndorfer *et al.*, 2007). Los muros verdes son sistemas conformados por una cubierta vegetal vertical o ligeramente inclinada; el término se refiere a la vegetación que crece directamente sobre la fachada de un edificio o a la vegetación que se cultiva en un sistema estructural separado que puede ser independiente y adyacente o unido a la pared (Loh, 2008). Se han convertido en elementos arquitectónicos originales que dan vida a fachadas y muros exteriores e interiores, en todo tipo de inmuebles industriales, comerciales y residenciales (Soemy *et al.*, 2007).

De manera general, las azoteas y muros verdes se construyen con los mismos elementos: Impermeabilizante, membrana anti-raíz, una capa de drenaje que permitirá el flujo de agua en la azotea, sobre la capa de drenaje se coloca (una capa filtrante malla geotextil), que retiene el sedimento y las partículas grandes para que no obstruyan la capa de drenaje; una tela de retención de agua se puede colocar de manera opcional sobre este filtro, lo que permite retener agua adicional para las plantas (Figura 3). Finalmente, se coloca un sustrato y las plantas (Getter y Bradley, 2006).

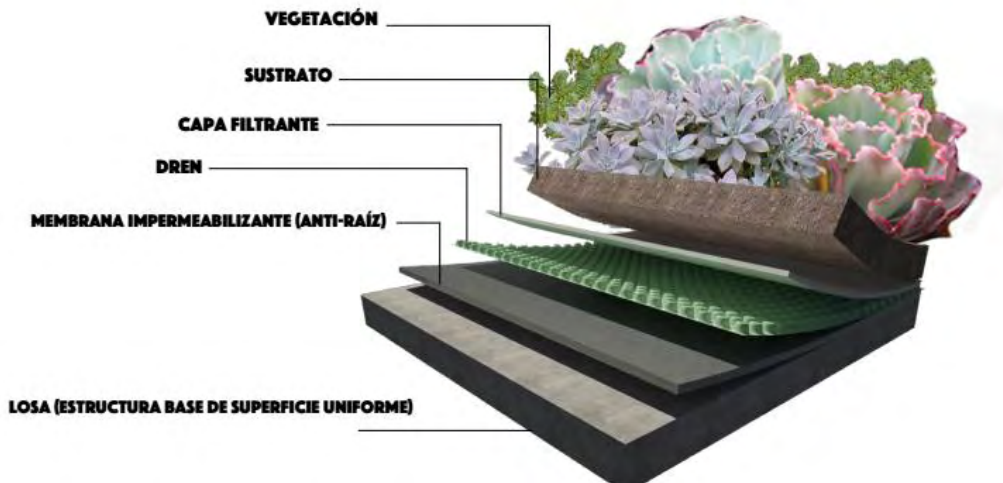


Figura 3. Sistema de naturación directo con plantas nativas mexicanas. Fuente: Dibujo Biol. Jerónimo Reyes Santiago (2017).

La diferencia entre cada azotea radica en la profundidad del sustrato vegetal, en las especies de plantas que se utilizan y en el nivel de mantenimiento que requieren. Existen básicamente tres tipos de azoteas verdes (Osorio, 2013):

- ❑ Azotea verde extensiva: Es la más económica, la que menor cuidado necesita y la más ligera, la vegetación se compone generalmente de plantas del género *Sedum* crasuláceas y/o suculentas que se propagan de manera natural en la misma región en donde se lleva a cabo el proyecto. Las características de las plantas hacen que la necesidad de riego, fertilización y mantenimiento sean mínimas.
- ❑ Azotea verde intensiva: Puede albergar una amplia gama de plantas, incluyendo árboles de hasta dos metros, con posibilidades de diseño casi ilimitadas. El mantenimiento es el mismo que el de un jardín tradicional, requiere riego, fertilización y poda constante. Tiene la mayor profundidad de sustrato y por lo tanto, un mayor costo.
- ❑ Azotea verde semi-intensiva: Combina ambos diseños dividiendo la carga de acuerdo con las características estructurales del inmueble. Se colocan especies de gramíneas, por lo tanto requiere un mantenimiento regular.

La azotea verde se puede construir también con macetas en donde se siembran árboles pequeños, arbustos, hortalizas y plantas, esto permite ir transformando espacios grises en espacios vivos y armónicos (naturación indirecta).

Los muros verdes pueden ser internos o externos a las paredes del edificio y pueden clasificarse ampliamente en tres tipos (Loh, 2008).

- ❑ Sistema de paneles: Normalmente constan de paneles pre-plantados que se llevan al sitio y conectados al sistema estructural y un sistema de riego mecánico.
- ❑ Sistema de fieltro: Donde las plantas se colocan en las bolsas de fieltro de medio de cultivo y se unen a un respaldo impermeable que se conecta a la estructura posterior. El fieltro se mantiene continuamente húmedo con agua que contiene nutrientes para las plantas.
- ❑ Sistema de contenedor y/o enrejado: Las plantas crecidas en contenedores se colocan en enrejados. Suelen usarse líneas de riego por goteo para controlar la humedad en cada recipiente.

Funciones de las azoteas y muros verdes (Getter y Bradley, 2006; Loh, 2008):

- ❑ Retención del escurrimiento generado por lluvia: Uno de los principales servicios ambientales que proveen las azoteas verdes es probablemente la reducción del escurrimiento de agua de lluvia. En un sistema de azotea verde las precipitaciones son captadas en el sustrato o en la vegetación, y eventualmente se evapora de la superficie del suelo o regresa a la atmósfera mediante la transpiración de las especies vegetales. Las azoteas verdes pueden reducir el escurrimiento generado por lluvia de 60% a 100% dependiendo del sistema de vegetación, amortiguando la carga de agua al drenaje en las ciudades.
- ❑ Mayor vida útil en los techos de los edificios: El sustrato y la vegetación de las azoteas verdes protege los techos de las construcciones de la exposición solar y la radiación ultravioleta que con el paso del tiempo pueden dañar las membranas de protección tradicionales.
- ❑ Conservación de energía: Las construcciones verdes pueden reducir la temperatura dentro de los edificios de 3 a 4° C, cuando la temperatura en el exterior alcanza los 25 a 30 °C. Esto a su vez puede reducir el uso de electricidad destinada para sistemas de aire acondicionado hasta un 8%, este ahorro de energía se considera que ayuda a mitigar el efecto de isla de calor urbano. Las azoteas verdes son una herramienta para aumentar el albedo en las ciudades, ya que reemplazan parte de las superficies oscuras e impermeables, forman parte de las nuevas construcciones con un enfoque ambiental y sustentable para mitigar los problemas de contaminación atmosférica de las grandes urbes.
- ❑ Incremento de la biodiversidad y hábitat: Debido a que la mayoría de las azoteas verdes no son de acceso público, pueden convertirse en un hábitat no perturbado para el desarrollo de microorganismos, insectos y aves. Incluso las azoteas verdes relativamente nuevas pueden proporcionar un hábitat para la fauna.
- ❑ Valor estético: Cuando las personas están en contacto con la naturaleza, esto repercute positivamente a su salud, reduciendo niveles de estrés, regulación de la presión sanguínea y menor tensión muscular. Estos beneficios a largo plazo pueden significar una mejor calidad de vida y mayor productividad laboral.
- ❑ Mitigación del ruido: Las superficies de concreto en las zonas urbanas tienden a reflejar el sonido, a diferencia de las áreas verdes que pueden absorber las ondas de sonido debido al tipo de sustrato y la vegetación.

- ❑ Mejora de la calidad del aire. Muchas paredes interiores están construidas para mejorar la calidad del aire al interior de los edificios, a través de la biofiltración, el CO₂ y las toxinas dañinas como COV, son absorbidos tanto a través de las plantas como del medio de siembra.
- ❑ Los estudios muestran que las azoteas verdes contribuyen a mejoras positivas a la hidrología urbana porque pueden controlar exitosamente la descarga repentina de aguas pluviales hacia las alcantarillas. Este retraso de escorrentía se puede realizar de manera similar a través de la percolación de la precipitación a través de muros verdes, aunque todavía no hay datos sobre la cantidad de agua de lluvia que se puede manejar de esta manera.

3.6. Tipos de vegetación utilizada comúnmente en azoteas verdes

La selección de las especies presentes en las azoteas verdes es de suma importancia, estas deben ser las adecuadas de acuerdo con el diseño y atractivo visual de la azotea, las condiciones climáticas del lugar, la composición y la profundidad del sustrato, y en las intensivas deben ser resistentes a sequías, presentar un crecimiento rápido y resistencia a enfermedades o plagas.

El atractivo visual generalmente es más importante en el diseño de azoteas intensivas debido a las visitas por público, comparado con algunas azoteas extensivas cuyo propósito principal es el manejo de aguas residuales (Getter y Bradley, 2006). El estrés de la humedad y la sequía severa, las temperaturas extremas (generalmente elevadas), las altas intensidades de radiación solar y las altas velocidades del viento aumentan el riesgo de desecación y daño físico a la vegetación y al sustrato (Dunnett y Kingbury, 2004).

El sustrato con profundidad de entre 2 y 5 cm tiene velocidades más rápidas de desecación y está más expuesto a fluctuaciones de temperatura, pero pueden soportar comunidades de *Sedum*-musgo simples. La profundidad del sustrato de 7 a 15 cm puede soportar mezclas más diversas de hierbas, geófitas, alpinas y herbáceas tolerantes a la sequía, pero también son fácilmente colonizadas por malas hierbas indeseables (Oberndorfer *et al.*, 2007). Una amplia gama de taxones son opciones potenciales para azoteas de tipo intensivo debido a que la profundidad del sustrato es mayor y a la disponibilidad de riego suplementario. Por el contrario, la tolerancia a la sequía es uno de los factores más limitantes de los sistemas de azotea extensiva, dada su profundidad de sustrato poco

profunda (<10 cm) y la dependencia habitual de los eventos de precipitación natural para mantener la vida vegetal (Getter y Bradley, 2006).

Las plantas de bajo crecimiento que se diseminan y cubren el sustrato en un corto período de tiempo reducen los posibles problemas de erosión y evitan la colonización de las malas hierbas. Aunque la cobertura rápida es importante, la capacidad de las especies de plantas para ser autosostenibles reduce la necesidad de re-plantación y mantenimiento futuros. Las especies de larga vida, que se re-siembran o que se propagan vegetativamente deben continuar proporcionando cobertura del 100%, siempre y cuando las condiciones ambientales sean favorables (Getter y Bradley, 2006). El género *Sedum* es el género más popular entre los proyectos de azoteas verdes como resultado de su tolerancia a la sequía y la adaptabilidad superficial del sustrato (Dunnet y Kingbury, 2004). Las especies endémicas generalmente se consideran las opciones ideales a nivel de paisaje debido a sus adaptaciones a los climas locales. En la Tabla 5 se presentan las especies más comúnmente utilizadas en azoteas verdes.

Tabla 5. Especies comúnmente utilizadas en azoteas verdes de la ZMVM	
Familia	Especies
<i>Asparagaceae</i>	<i>Agave isthmensis</i>
	<i>Agave inaquidens</i>
<i>Cactaceae</i>	<i>Opuntia ficus-indica</i>
	<i>Opuntia joconostle</i>
	<i>Opuntia robusta</i>
	<i>Opuntia tomentosa</i>
<i>Campanulaceae</i>	<i>Campanula rotundifolia</i>
<i>Crassulaceae</i>	<i>Echeveria agavoides</i>
	<i>Echeveria elegans</i>

	<i>Echeveria pulvinata</i>
	<i>Graptopetalum pentandrum</i>
	<i>Graptopetalum paraguayensis</i>
	<i>Sedum dendroideum</i>
	<i>Sedum griseum</i>
	<i>Sedum hemselyanum</i>
	<i>Sedum luteoviride</i>
	<i>Sedum moranense</i>
	<i>Sedum morganianum</i>
	<i>Sedum palmeri</i>
	<i>Sedum platyphyllum</i>
	<i>Sedum praealtum</i>
	<i>Sedum reptans</i>
	<i>Sedum rubrotinctum</i>
	X <i>Graptosedum</i> "Vera Higgins"
	X <i>Graptosedum</i> "Darley Sunshine"
Fuente: Vázquez (2013).	

3.7. Estudios de caso.

Se han realizado trabajos en cuanto a la presencia y captación de metales pesados en azoteas verdes que arrojan los siguientes resultados.

Li *et al.* (2001), tomaron muestras de suelo y concreto en una zona urbana de Hong Kong, y encontraron concentraciones altas de Cd, Cu, Pb y Zn.

Monterusso *et al.* (2005), estudiaron el potencial de diferentes especies de *Sedum* para establecerse en azoteas verdes, y concluyeron que es un género óptimo debido a que coloniza el terreno y sobrevive en azoteas que no son regadas con regularidad. Algunos estudios en China consideran a especies del género *Sedum* (*Crassulaceae*) como hipereacumuladoras para metales pesados como Cd y Zn, en suelos contaminados con dichos metales (Yang *et al.*, 2004; Zhou y Qiu 2005; Xu *et al.*, 2009). Ye *et al.* (2013), reportan también para *Sedum* creciendo en una azotea verde extensiva, la captación de Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb y Hg en mayor concentración en la raíz de las plantas, y consideran al sustrato con el que se construye la azotea verde como fuente directa de metales para las mismas.

Arellano (2012), encontró una disminución en las concentraciones de Zn, Ni, Mn, Cr, Co, Cd y Pb en el agua de escurrimiento (generado por lluvias) de una azotea verde extensiva en la Ciudad de México, lo cual indica que estos elementos se quedaron en mayor cantidad en el sustrato como una fuente directa para las plantas. Speak *et al.*, (2014), también estudiaron el contenido de metales en agua de escorrentía de dos azoteas verdes de diferente edad, encontrando que metales como Cu, Zn y Pb pueden ser retenidos en exceso en el sustrato y, además, este puede funcionar como fuente de Fe y Pb para las plantas.

Para determinar donde se almacenan estos metales en la planta, Leal (2014) y Martínez (2015) analizaron la presencia de metales pesados en tejidos de varias especies de crasuláceas, encontrando Ba, Cr, Mn, Ni y Zn tanto a nivel de hoja, tallo y raíz.

3.8. Características de la familia *Crassulaceae*.

La familia *Crassulaceae* está constituida por plantas que poseen un carácter común a muchas especies de zonas áridas o semiáridas, la succulencia, es decir son carnosas en mayor o menor grado; las hay desde herbáceas de pocos centímetros de alto hasta arbustivas de 1.5 a 2 metros de altura; con frecuencia son perennes, es decir viven varios o muchos años, pero también hay anuales o bianuales. Las hojas a menudo forman rosetas,

aunque pueden estar repartidas por una porción del tallo; la inflorescencia puede ser terminal, la rama que nace del centro de la roseta se va alargando hasta dar flores, o ser axial o lateral, que nace de un lado de la roseta, de la axila de una hoja o cerca del ápice de la rama, pero la roseta continúa creciendo normalmente. Las flores son actinomorfas (tienen simetría radiada), los sépalos y pétalos están distribuidos radialmente al centro de la flor; poseen igual número de sépalos, pétalos y carpelos, y en ocasiones tienen el mismo número de estambres, pero con frecuencia tienen el doble (Meyrán y López, 2003).

Se trata de una familia de distribución mundial (exceptuando Australia y Polinesia), principalmente en el sur de Asia Central, Sudáfrica, México y la región del Mediterráneo. Según el criterio de diferentes autores hay entre 25 y 33 géneros con 1200 a 1500 especies. Muchas crasuláceas son buscadas, colectadas y propagadas con fines ornamentales por aficionados y horticultores. Algunas especies, dada su belleza, son consideradas como favoritas por diversos cultivadores. Varios miembros de la familia se citan como medicinales y otros pocos como venenosos (Pérez, 2008).

La mayoría de los elementos del grupo muestran preferencia por sitios con afloramientos rocosos tales como riscos, laderas escarpadas, paredes más o menos verticales de cañadas y cañones, o en su defecto, se presentan como epífitas (Pérez y Franco, 2004); esto gracias a que presenta adaptaciones morfológicas y fisiológicas para adaptarse al medio ambiente xérico, como la succulencia de sus hojas y tallos, la disposición arrosetada de sus hojas, cutícula gruesa, una cera o pubescencia protectora y otras algunas el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) (Jimeno, 2008).

- *Echeveria* De Candolle

Plantas perennes, a veces arbustivas, con raíces fibrosas o a veces engrosadas, fusiformes, tallos simples o ramificados, cortos o alargados; hojas alternas espiralmente, ya sea rosuladas o dispersas, más o menos carnosas, bordes casi siempre enteros, pero a veces lacerados o fimbriados, casi siempre sésiles, pero también con base cuneada, no amplexicaule, una vena en la base de cada hoja, a menudo glaucas o pruinosas. Inflorescencia siempre lateral o axial, ya sea en cincino, panícula con cincinos, espiga o racimo; el tallo floral con hojas en su parte inferior, nunca cordadas o amplexicaules, en la inflorescencia brácteas debajo de cada flor y una o dos bractéolas o ninguna en los pedicelos, estos cortos o largos; flores con 5 sépalos, 5 pétalos, 5 carpelos y 10 estambres; los sépalos pueden ser de tamaño igual o desiguales, extendidos, ascendentes o apresadores; la corola varía de cilíndrica a conoidea o urceolada, habitualmente con colores

brillantes, pétalos gruesos, erectos, imbricados, a veces valvados, aquillados comúnmente por afuera y acanalados en su cara interna, sin apéndices a los lados del filamento epipétalo (excepto en tres especies), carpelos connatos en la base; nectarios grandes, que pueden ser truncados, reniformes o semilunares; los folículos comúnmente son divergentes al madurar, las semillas tienen testa lisa o reticulada (Meyrán y López, 2003) (Figura 4).

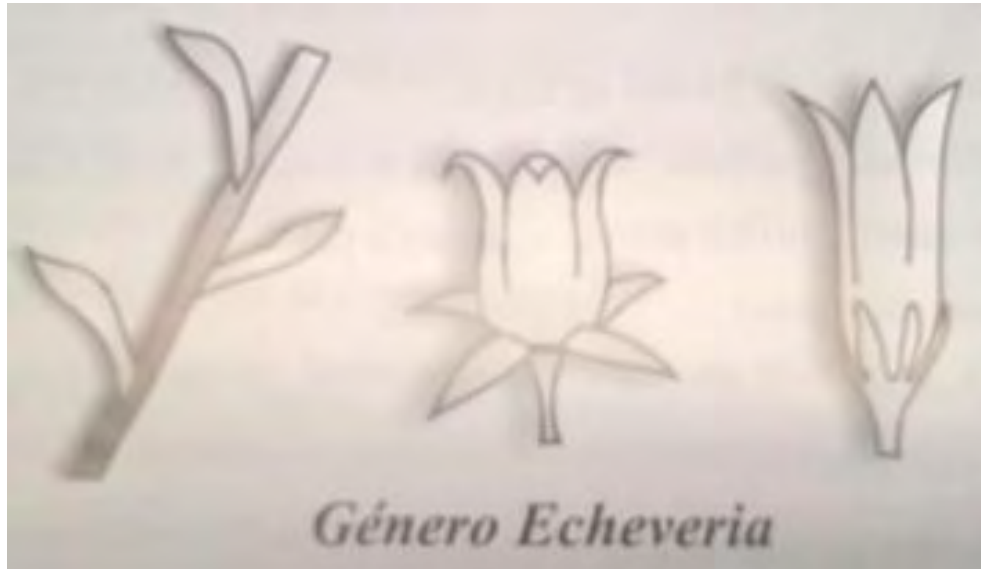


Figura 4. Esquema del género *Echeveria*. Fuente: Meyrán y López (2003).

- *Echeveria gigantea* Rose & Porpus.

Tallo hasta de 50 cm de largo, 4-8 cm de diámetro, roseta semí-densa hasta 60 cm de diámetro, hojas 15-20 obovadas, ápice redondeado, emarginado y apiculado, de 15-30 cm de largo y 10-20 cm de ancho, verdes con tonos rojizos, algo pruinosas con bordes rojos. Tallos florales 1-3, de 1-2 m de altura con hojas ascendentes, oblongo-espatuladas, obtusas a agudas; inflorescencia en panícula de 3-7 cincinnos de 7-16 flores cada uno, pedicelos de 2-8 mm de largo; sépalos desiguales, deltoides a lanceolados, acuminados, extendidos o recurvados, el mayor de 15 mm de largo; corola urceolada de 12-17 mm de longitud, 9-11 mm de diámetro basal, rojo oscuro a rosado; nectarios blancos (Figura 5). Se distribuye en Oaxaca y Puebla (Meyrán y López, 2003).



Figura 5. *Echeveria gigantea* creciendo en la azotea verde de los Laboratorios MEDIX®. Delegación Coyoacán, CDMX.

4. Justificación.

La ZMVM con una población de 20 millones de habitantes dentro de un área relativamente pequeña (3,540 km²), con casi tres cuartas partes de urbanización y escasa vegetación, da una idea de la gran emisión y concentración de contaminantes a las que está expuesta la población. Los sistemas de naturación, como azoteas o muros verdes, tienen importancia dentro de las zonas urbanas al desempeñar el papel de pequeños pulmones verdes dentro de la ciudad, ya que pueden ayudar a recuperar algunos de los servicios ecosistémicos que se pierden cuando la vegetación es removida por la urbanización. Por lo anterior, el presente trabajo pretende contribuir al conocimiento de la capacidad de captura de metales pesados por una especie utilizada en naturación, *Echeveria gigantea*, para promover su uso en las azoteas verdes para amortiguar las concentraciones de contaminantes en la Ciudad de México.

5. Objetivos

General

- Conocer y cuantificar la capacidad de captura y concentración de metales pesados en plantas de *Echeveria gigantea*.

Particulares

- Cuantificar la concentración de Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, Sb, Ba, Pb y Hg en hojas, tallo y raíz de *Echeveria gigantea* cultivadas en azotea verde y muro verde.
- Determinar si hay diferencias entre la concentración de metales pesados en las plantas de *Echeveria gigantea* en función al tipo de naturación (azotea verde y muro verde) y entre órganos, hoja, tallo y raíz.

6. Método

6.1. Sitios de colecta.

La zona de colecta fue la azotea y muro verde del edificio de laboratorio MEDIX® (Figuras 6 y 7), ubicado en la delegación Coyoacán de la Ciudad de México, en una latitud norte 19° 18' 31.7", longitud oeste 99° 08' 24.9". La temperatura media anual es de 16.6°C, la temperatura mínima anual de 13°C y la precipitación anual de 787.6 mm.



Figura 6. Vista del muro vertical de la azotea verde del edificio de laboratorios MEDIX®.
Delegación Coyoacán, CDMX.



Figura 7. Vista de la azotea verde (horizontal) del edificio de laboratorios MEDIX®. Delegación Coyoacán, CDMX.

De acuerdo con la ficha técnica, el proyecto de Naturación ERA VERDE se construyó en 2015 en la azotea del Laboratorio MEDIX®, con una superficie total de 550,997 m² que incluye el sistema de azotea verde, zona deck y muros verdes a doble cara. La azotea es de tipo extensivo, es decir, se caracteriza por tener una capa de sustrato de 10 cm en promedio, con requerimientos de mantenimiento muy bajo o casi nulo, con un peso estimado de entre 110 y 130 kg m⁻². El diseño constructivo está constituido por un sistema de ingeniería ligero que permite la siembra y crecimiento de plantas y flores. Este sistema está integrado por cuatro capas (descritas previamente) que se superponen a la cubierta del edificio para asegurar el correcto aislamiento y protección del edificio y la vida de las plantas.

Las especies que albergan la azotea y el muro son: *Echeveria elegans*, *Graptosedum* “darley sunshine”, *Graptosedum* “vera higgins” *Sedum dendroideum*, *S. griseum*, *S. moranense*, *S. pachyphyllum*, *S. rubrotinctum*, *S. stahlii*, *Agave attenuata*, *A. celsii*, *A.*

cupreata, *A. filifera*, *A. macroacantha*, *A. potatorum*, *A. vilmotiniana*, *Beucarnea recurvata*, *Dasyllirion acotriche*, *Echeveria agavoides*, *E. gigantea*, *Nolina*, *Opuntia robusta*, *Pelargonium graveolens* y *Salvia leucantha*.

El objetivo de la construcción de la azotea fue la creación de un área de esparcimiento y relajación, delimitada por la vegetación en muros verdes que buscó crear un espacio independiente de la zona urbana.

6.2. Colecta y procesamiento de material vegetal.

Se colectaron 6 ejemplares completos, del mismo tamaño, de *Echeveria gigantea* (parte aérea y raíces) de la azotea verde del edificio MEDIX® en el mes de abril de 2016; tres ejemplares a nivel de azotea y tres a nivel de muro, utilizando herramientas básicas de jardinería como pala, tijeras de podar y guantes. Los ejemplares se colocaron en bolsas de tela para su traslado al laboratorio.

Una vez en el laboratorio, cada ejemplar se limpió para retirar el exceso de sustrato y se separaron la raíz, el tallo y las hojas, teniendo especial cuidado de no dañar alguna de las partes. Posteriormente el material se pesó, se seccionó en partes pequeñas por órgano, se etiquetó y colocó en estufa entre 38-40°C alrededor de dos semanas, hasta lograr su total deshidratación. Posteriormente se tomó el peso seco (Anexo 1).

6.3. Análisis de metales pesados por espectrometría de masas.

Mediante espectrometría de masas (ver significado en Anexo 2) se midieron las concentraciones de seis elementos metálicos considerados como micronutrientes, Mn, Ni, Cu, Zn, Mo, Fe, y 10 elementos considerados como metales pesados, Al, V, Ba, As, Cr, Co, Cd, Sb, Pb, Hg, contenidas en cada órgano de *E. gigantea*, hoja, tallo y raíz.

Para llevar a cabo el proceso, el material deshidratado previamente, se molió en un molino en el laboratorio de Edafología Experimental del Instituto de Geología de la UNAM, y fue almacenado en bolsas de papel encerado hasta el análisis de metales pesados por espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (por sus siglas en inglés ICP-MS) en el laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM (ver la descripción del proceso completo en Anexo 3).

La muestra de material molido se sometió a una digestión acida (a temperatura y presión altas) asistida por horno de microondas. Se pesaron 0.5 g de cada muestra y se adicionaron 10 ml de HNO₃ grado ultrapuro. Las muestras se dejaron en pre-digestión toda la noche bajo campana de extracción, y finalmente se llevó a cabo la digestión asistida por horno de microondas. Las muestras se enfriaron y aforaron a 50 ml con HNO₃ al 2%. Se filtraron, etiquetaron y almacenaron a 4°C hasta su posterior análisis.

Se realizó la medición de los metales en el espectrómetro de masas modelo iCAP Qc de la marca Thermo Scientific (ver parámetros operacionales del ICP-MS en anexo 4), en el laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica. Todas las muestras se hicieron por duplicado y por cada 9 muestras se digirieron dos Materiales de Referencia Certificados (MRC), “1547 Peach Leaves” y “1573a Tomato Leaves”, además de dos blancos reactivos para monitorear posible aportación de contaminantes.

En el siguiente diagrama de flujo se presenta el proceso sinóptico realizado en el laboratorio (figura 8):

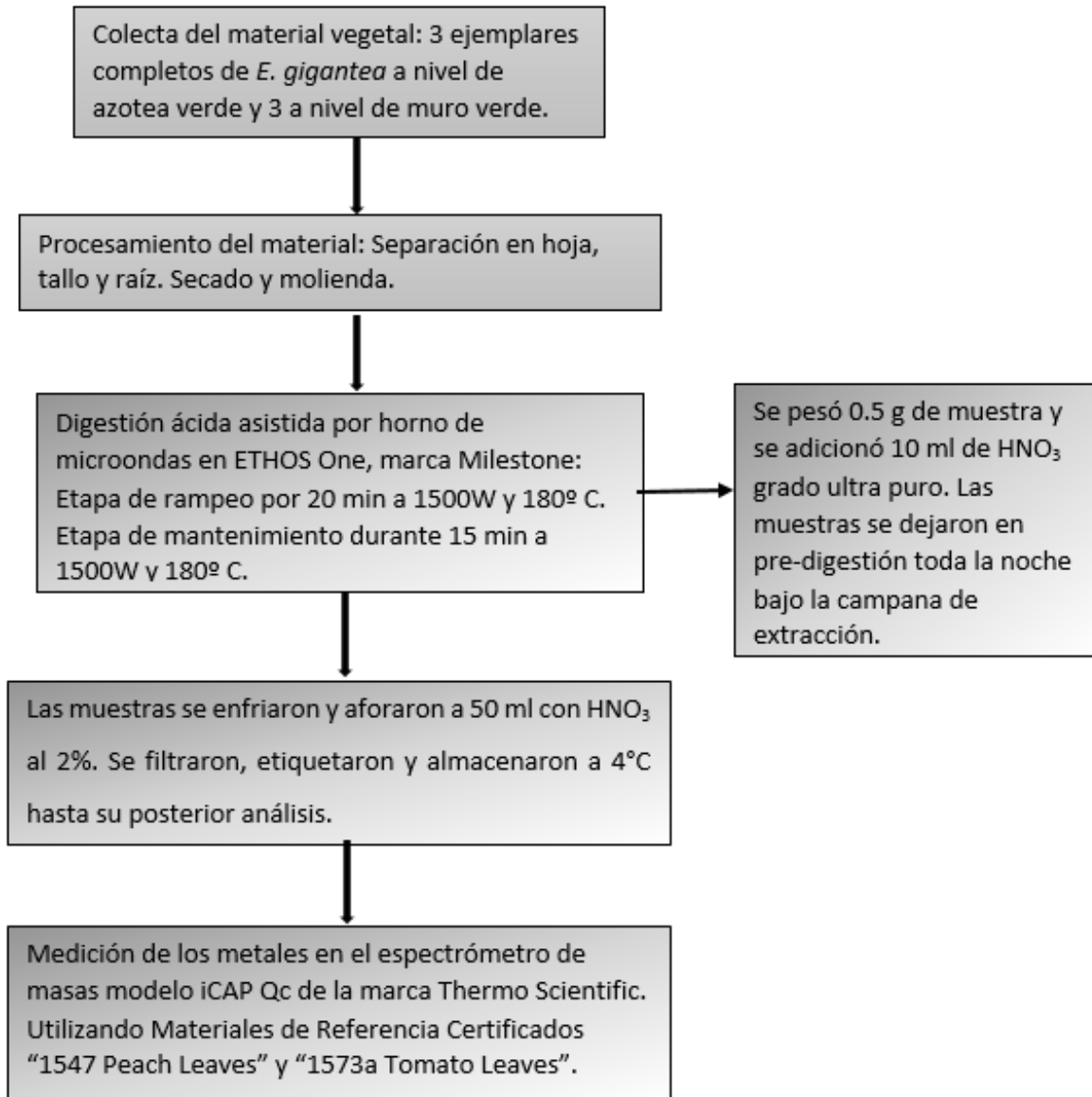


Figura 8. Diagrama de flujo del procesamiento y análisis de metales pesados por espectrometría de masas.

6.4. Análisis estadístico.

Las concentraciones reportadas por el ICP-MS son el resultado promedio de las dos digestiones (las muestras se tomaron por duplicado). Una vez obtenidos los valores de concentración de cada metal se ajustaron tomando en cuenta el porcentaje de recuperación del material de referencia 1573a Tomato Leaves, mediante la fórmula:

$$\text{CONCENTRACIÓN REAL (mg Kg}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{Concentración de metal de la muestra}) \times 100}{\% \text{ Recuperación del material de referencia}}$$

Una vez que se obtuvieron los datos ajustados se realizó una prueba de “Kruskal-Wallis” con las concentraciones para metales pesados obtenidos de la espectrometría de masas, con el fin de conocer si existen diferencias significativas entre hoja, tallo y raíz dentro de cada sitio (muro y azotea). También se realizó una prueba de “Mann-Whitney” con el fin de conocer las diferencias significativas al comparar ambos sitios.

Ambas pruebas estadísticas se realizaron utilizando el programa STATISTICA V 8.0 (Statsoft Inc; 2009).

7. Resultados

La concentración de metales en naturación de azotea en los órganos fue en orden descendente Raíz>Tallo>Hoja. Los micronutrientes presentes en mayor concentración fueron Fe en la raíz (279.12 mg Kg⁻¹), seguido de tallo (240.97 mg Kg⁻¹) y hoja (66.72 mg Kg⁻¹) (Figura 9), Zn en la parte del tallo (22.06 mg Kg⁻¹), seguido de la raíz (18.81 mg Kg⁻¹) y hojas (9.34 mg Kg⁻¹); y Mn en hojas (20.67 mg Kg⁻¹), seguido de tallo (15.92 mg Kg⁻¹) y raíz (8.60 mg Kg⁻¹); cabe destacar una alta concentración de Cu a nivel de raíz (25.32 mg Kg⁻¹). El micronutriente en menor concentración fue el Mo, con el siguiente orden de acumulación Raíz (0.94 mg Kg⁻¹) >Tallo (0.45 mg Kg⁻¹) >Hoja (0.32 mg Kg⁻¹) (Figuras 9 y 10).

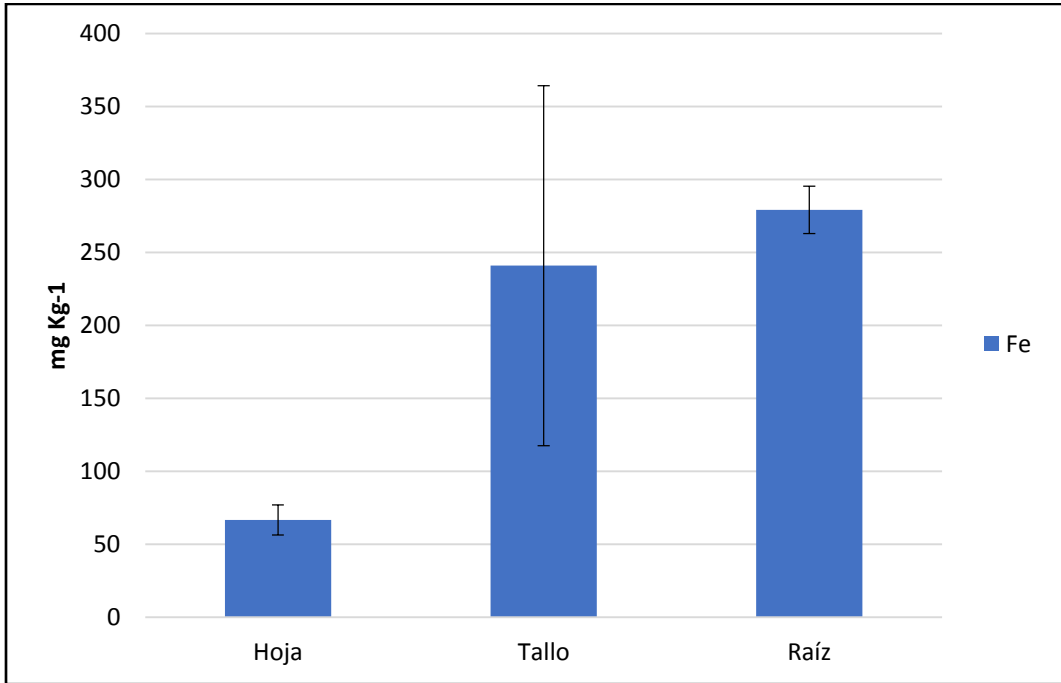


Figura 9. Concentración de Fe en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* a nivel de azotea.

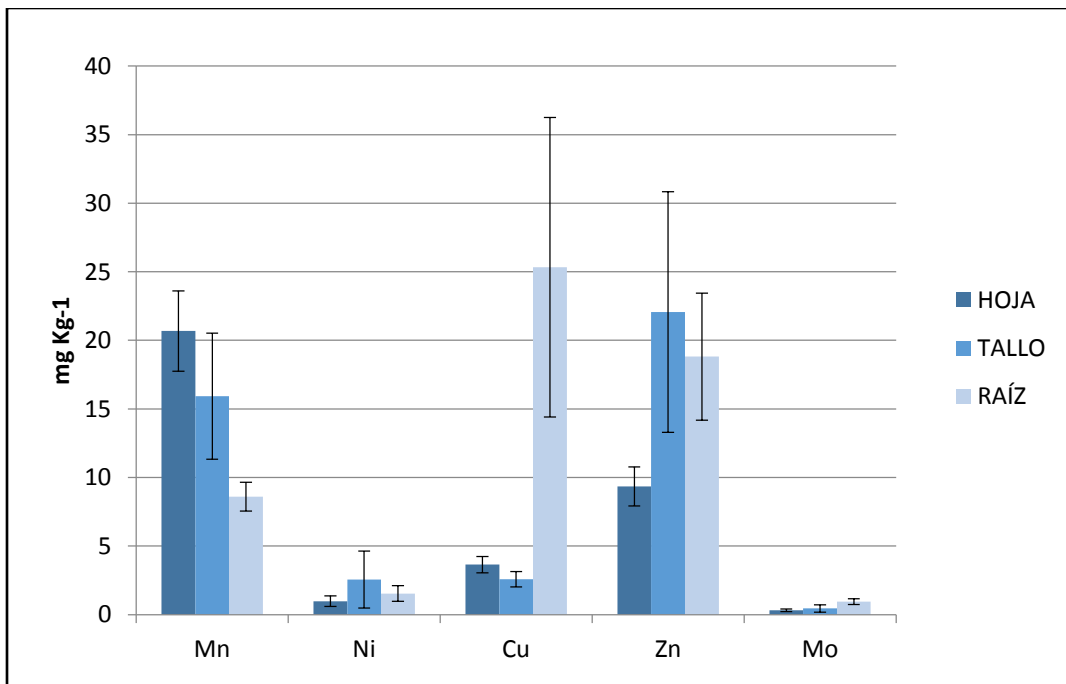


Figura 10. Concentración de micronutrientes metálicos en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* a nivel de azotea.

Para la parte de metales pesados, los tres elementos encontrados en mayor cantidad fueron Al, con mayor concentración en la raíz ($311.72 \text{ mg Kg}^{-1}$) seguido de tallo ($228.45 \text{ mg Kg}^{-1}$) y hoja (58.69 mg Kg^{-1}), el Ba con mayor concentración en las hojas (69.43 mg Kg^{-1}), seguido de tallo (53.53 mg Kg^{-1}) y raíz (30.09 mg Kg^{-1}), y el Hg en mayor concentración en hojas (6.35 mg Kg^{-1}) seguido de raíz (4.54 mg Kg^{-1}) y tallo (0.10 mg Kg^{-1}). El Sb fue el elemento encontrado en menor cantidad en el siguiente orden: Raíz (0.027 mg Kg^{-1}) >Hoja (0.024 mg Kg^{-1}) >Tallo (0.013 mg Kg^{-1}) (Figuras 11 y 15).

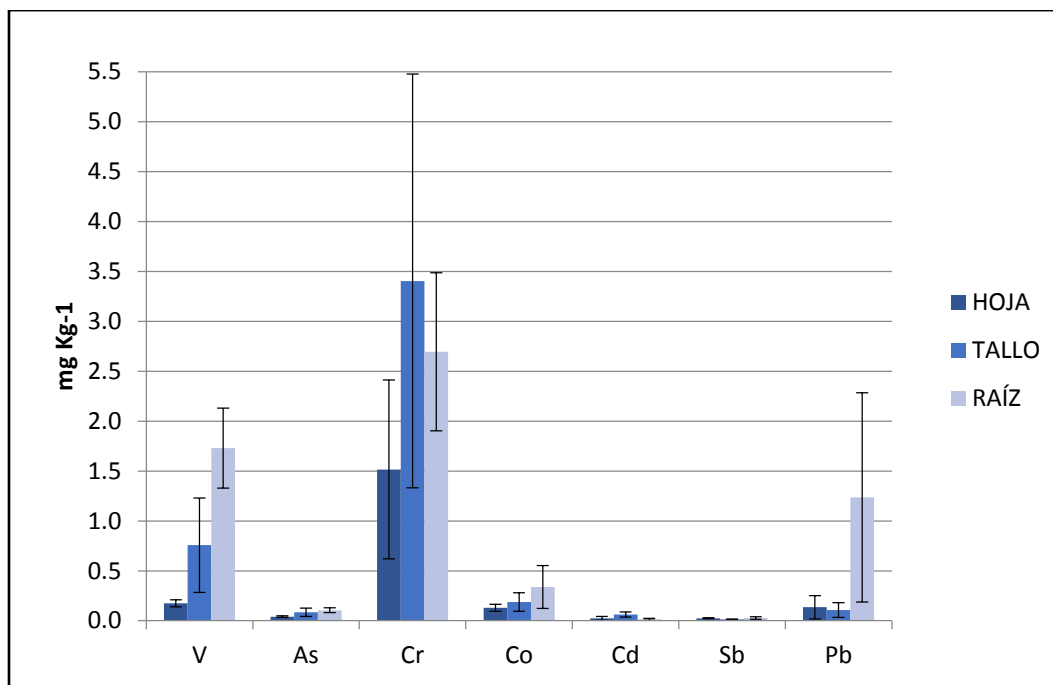


Figura 11. Concentración de metales pesados en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* a nivel de azotea.

Para la naturación de muro verde, al igual que en azotea, los metales se acumulan de forma preferente en Raíz>Tallo>Hoja, para micronutrientes y metales pesados. Nuevamente el micronutriente presente en mayor concentración es el Fe a nivel de raíz ($414.39 \text{ mg Kg}^{-1}$), seguido de tallo ($145.46 \text{ mg Kg}^{-1}$) y hojas (53.77 mg Kg^{-1}) (Figura 12), el segundo presente en concentración es el Mn con una mayor acumulación en hojas ($132.81 \text{ mg Kg}^{-1}$), seguido de tallo (96.59 mg Kg^{-1}) y raíz (31.31 mg Kg^{-1}), y Zn con mayor acumulación en tallo (98.69 mg Kg^{-1}), seguido por raíz (27.85 mg Kg^{-1}) y hoja (26.36 mg Kg^{-1}). En menor concentración también se presenta el Mo, igualmente de la forma Raíz (0.93 mg Kg^{-1}) >Tallo (0.68 mg Kg^{-1}) >Hoja (0.54 mg Kg^{-1}) (Figura 13).

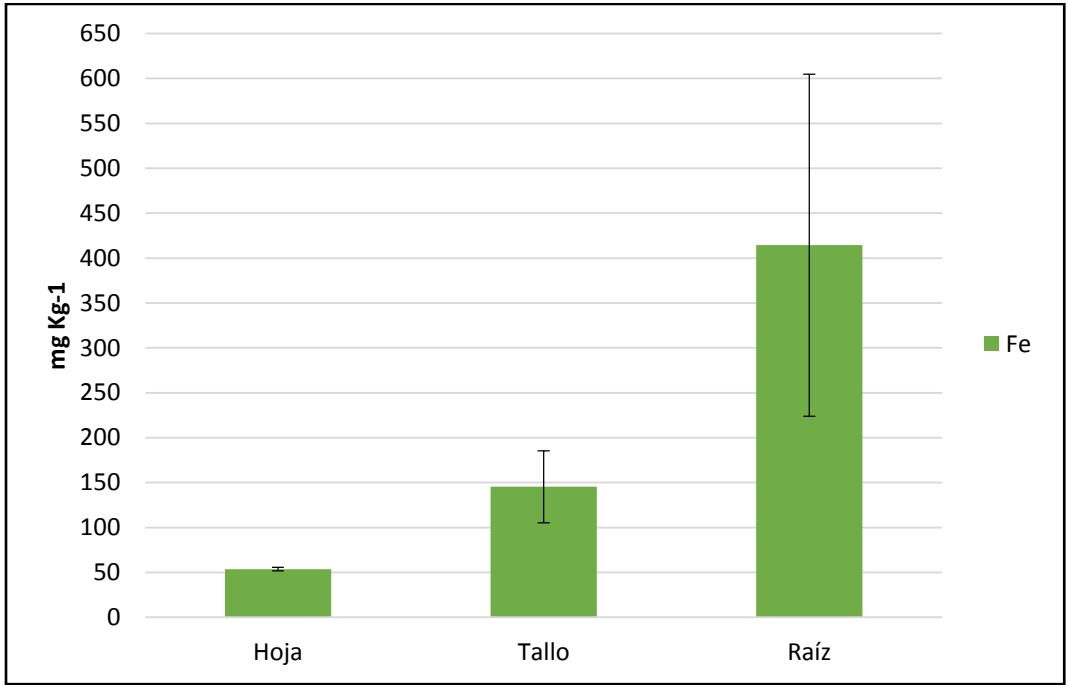


Figura 12. Concentración de Fe en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* a nivel de azotea.

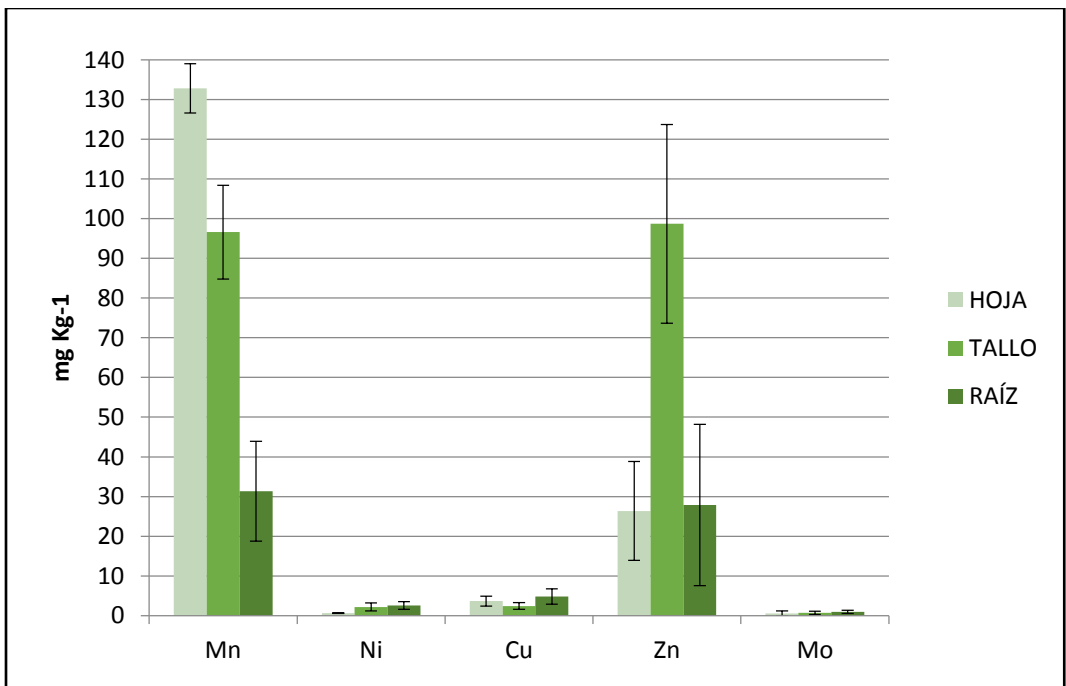


Figura 13. Concentración de micronutrientes metálicos en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* a nivel de muro.

Los metales pesados se encuentran presentes en ambas formas de naturación. Para el caso de naturación en muro verde, nuevamente el Al es el que está en mayor concentración en raíz (705.26 mg Kg⁻¹), seguido de tallo (221.08 mg Kg⁻¹) y hoja (71.22 mg Kg⁻¹), Ba con mayor concentración en hoja (50.96 mg Kg⁻¹), seguido de tallo (46.31 mg Kg⁻¹) y raíz (41.70 mg Kg⁻¹), y Hg en mayor concentración en hoja (12.07 mg Kg⁻¹) seguido de raíz (6.84 mg Kg⁻¹) y tallo (1.61 mg Kg⁻¹). El Sb es el elemento presente en menor cantidad en Raíz (0.12 mg Kg⁻¹) >Hoja (0.029 mg Kg⁻¹) >Tallo (0.029 mg Kg⁻¹) (Figura 14 y 15).

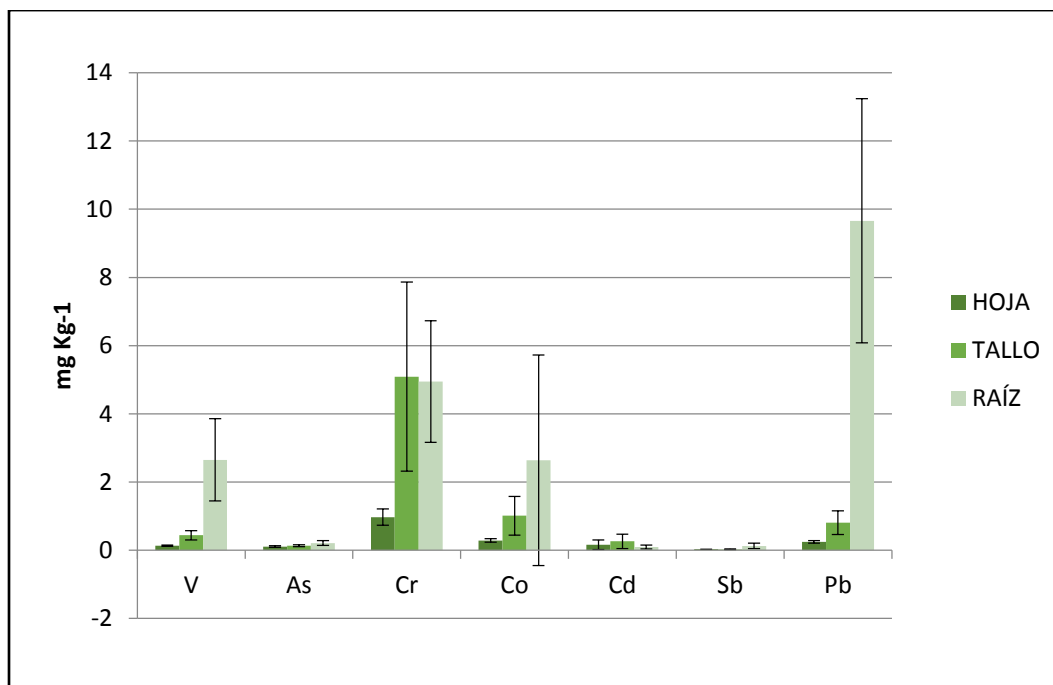


Figura 14. Concentración de metales pesados en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* a nivel de muro.

De manera general los tres metales pesados presentes en mayor concentración en ambas formas de naturación, en orden descendente, fueron: Al>Ba>Hg (Fig. 15). El Al presentó una acumulación preferente en el siguiente orden: Raíz (508.49 mg Kg⁻¹) >Tallo (224.76 mg Kg⁻¹) >Hoja (64.96 mg Kg⁻¹), para ambos sitios. Para el Ba, la acumulación ocurre de manera opuesta, Hoja (60.19 mg Kg⁻¹) >Tallo (49.92 mg Kg⁻¹) >Raíz (35.89 mg Kg⁻¹). Finalmente, las concentraciones de Hg se encuentran en el siguiente orden: Hoja (9.21 mg Kg⁻¹) >Raíz (5.69 mg Kg⁻¹) >Tallo (0.85 mg Kg⁻¹) para ambas formas de naturación.

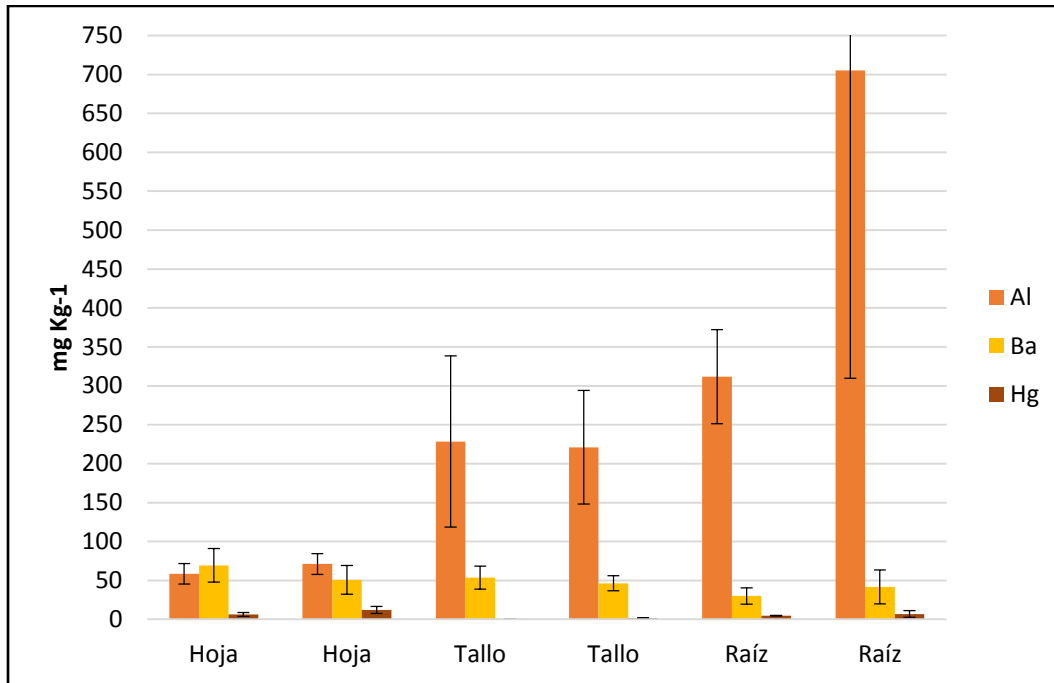


Figura 15. Concentración de Al, Ba, Hg, en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea*. Los tres metales pesados son los que se encuentran en mayor concentración en ambas formas de naturación (azotea y muro verde). El Al es el elemento presente en mayor concentración en la raíz de muro verde (705.26 mg Kg⁻¹).

Cabe destacar que, a excepción del Cu (10.51 mg Kg⁻¹) y el Ba (51.02 mg Kg⁻¹), los metales se presentan en mayor concentración en el muro verde que en la azotea.

Se realizó una prueba de Kruskal-Wallis para conocer las diferencias significativas en la concentración de metales entre hoja, tallo y raíz dentro de cada forma de naturación (Tabla 6). Para la azotea verde se presentan diferencias entre V, Cu y Mn, encontrándose la mayor concentración de V y Cu en raíz, y la mayor concentración en de Mn en hoja.

Tabla 6. Prueba de Kruskal-Wallis para la concentración de metales en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* cultivada en azotea verde (p<0.05).

Metal	Diferencia	P
V	HOJA<RAÍZ	0.022
Cu	TALLO<RAÍZ	0.039
Mn	HOJA>RAÍZ	0.039

En el muro verde los metales Al, V, As, Pb y Fe se encuentran en mayor concentración en la raíz, y Mn en mayor concentración en tallo (Tabla 7).

Tabla 7. Prueba de Kruskal-Wallis para la concentración de metales en hoja, tallo y raíz de <i>E. gigantea</i> cultivada en muro verde ($p < 0.05$).		
Metal	Diferencia	P
Al	HOJA<RAÍZ	0.021
V	HOJA< RAÍZ	0.021
As	HOJA<RAÍZ	0.033
Pb	HOJA<RAÍZ	0.021
Fe	TALLO<RAÍZ	0.021
Mn	TALLO>RAÍZ	0.021

Finalmente, mediante una prueba de Mann-Whitney se compararon las concentraciones de metales pesados entre ambas formas de naturación y se encontraron diferencias significativas entre Mn, Zn, Pb, Co, As, Cd y Sb, para los siete metales la mayor concentración se presenta en muro verde (Figura 14).

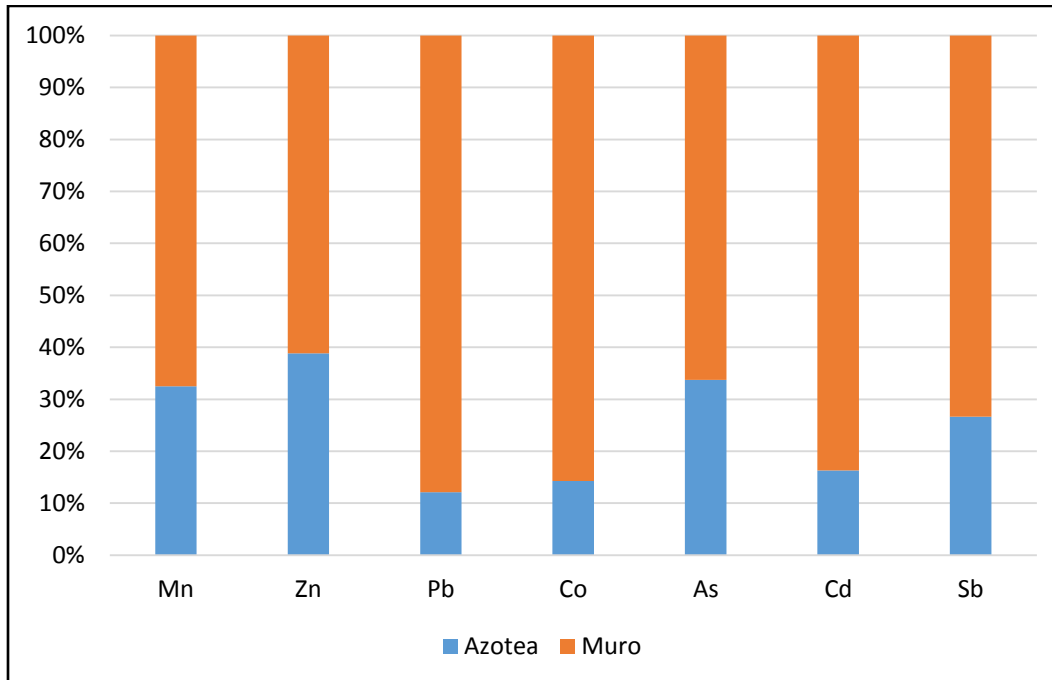


Figura 16. Prueba de Mann-Whitney entre azotea y muro verde. Mn, Zn, Pb, Co, As, Cd y Sb presentan diferencias significativas entre ambos sitios, encontrándose la mayor concentración en muro para todos los metales.

8. Discusión

Se encontró que *E. gigantea* es capaz de captar y retener metales pesados del ambiente o sustrato ya que estos se localizaron tanto a nivel de hojas, tallo y raíz de la planta en azotea y muro verde, el hecho de que para algunos metales las concentraciones sean mayores a nivel hojas o tallo indica que hay una traslocación de los mismos dentro de la planta. *E. gigantea* no es la única especie de crasulácea de la cual se puede afirmar lo anterior, existen estudios realizados con especies del género *Sedum* que concluyen que ésta se puede considerar una especie hiperacumuladora para metales pesados, ya que tiene la capacidad de acumular hasta 100 veces más la concentración normal de metales para otras especies, en particular Cd (Yang *et al.*, 2004; Zhou y Qiu, 2005; Ye *et al.*, 2013).

La acumulación de metales en *E. gigantea* se observó en el siguiente orden: Raíz>Tallo>Hoja, tanto para la absorción de nutrimentos como para metales pesados, lo cual indica que existe un transporte de los metales desde la raíz al resto de la planta que puede ser de forma activa y/o pasiva, dependiendo de la forma química en que se encuentre el elemento y las condiciones del suelo. La absorción de metales pesados por parte de la raíz representa la primera entrada a la planta, el transporte pasivo es la difusión de iones

de la solución externa en la endodermis de la raíz, el transporte activo requiere energía metabólica y tiene lugar a favor de un gradiente químico (Kabata-Pendias, 2011).

El Fe, Zn y Mn fueron los nutrimentos que se encontraron en concentraciones más altas para ambos sitios. A nivel de azotea, el Fe fue el micronutriente presente en mayor concentración y se localizó a nivel de raíz ($279.12 \text{ mg Kg}^{-1}$), seguido de Zn a nivel de tallo (22.06 mg Kg^{-1}), y Mn, presente en mayor concentración en las hojas (20.67 mg Kg^{-1}). Esto coincide con concentraciones reportadas por Leal (2014) (100 mg Kg^{-1} de Zn en muestras de hoja de *E. elegans*) y Martínez (2015) (450 ppm de Zn en muestras de tallo de *S. moranense*) en especies crasuláceas creciendo en azoteas verdes. De acuerdo a Leal (2014), la absorción y translocación de Zn la realiza la planta más comúnmente aun cuando este se encuentra a bajas concentraciones. Se considera que la absorción de Zn por las plantas es lineal a la concentración de este en el sustrato (Kabata-Pendias, 2011), además de que ciertos materiales de los cuales están contruidos los techos pueden aportar Zn al sustrato (Alloway, 2010). En cuanto al Mn se considera un importante catalizador redox metálico presente como recubrimiento de partículas del suelo, que determina el comportamiento y distribución de ciertos elementos traza, en particular aquellos que se encuentran en forma de aniones. Se observan concentraciones altas de metales como Zn, V, Cr y Pb en suelos enriquecidos con Mn (Kabata-Pendias, 2004), esto se puede relacionar al sustrato que se utilice para la naturación, ya que las concentraciones de Zn y Mn además de ser de las más altas para nutrimentos son casi iguales. El nutriente encontrado en menor concentración fue Mo a nivel de hojas (0.32 mg Kg^{-1}).

La concentración de Fe fue mayor en raíz para ambos sistemas de naturación. Tanto una absorción excesiva de Fe como una baja tolerancia a una alta concentración en los tejidos vegetales son significativamente complicadas por varios factores nutricionales, ya que recordemos que el Fe es un elemento esencial para el metabolismo. Los síntomas de la toxicidad del Fe no son específicos, las hojas lesionadas o las manchas necróticas en las hojas indican una acumulación de Fe por encima de 1000 mg kg^{-1} . La tolerancia al Fe de las plantas está más frecuentemente asociada con la oxidación e inmovilización y/o la exclusión del Fe soluble por las raíces (Kabata-Pendias, 2011).

Dentro de la ZMVM existen fuentes importantes de Mn, generadas por emisiones industriales tales como fundidoras, quema de combustibles y emisiones por el tráfico vehicular, sin embargo es un elemento esencial para el metabolismo de las plantas y no se considera un contaminante peligroso (García *et al.*, 2009).

El Zn también es un elemento esencial para el metabolismo y la mayoría de las especies muestran cierta tolerancia, su presencia en la plantas tiene una correlación directa con la concentración ambiental y al uso que se le da en recubrimientos de techos urbanos e industriales (Yang *et al.*, 2009; Kabata-Pendias, 2011).

Los elementos pesados encontrados en mayor concentración fueron Al en la raíz, seguido de tallo y hojas, y Ba, con mayor concentración en hojas, tallo y raíz en orden descendente. El origen del Al se considera natural en mayor medida, ya que es uno de los componentes estructurales de la matriz mineral del suelo o sustrato (Kabata-Pendias, 2004). Las altas concentraciones de Ba coinciden con lo reportado por Martínez (2015), con una mayor acumulación en hojas de diferentes especies de *Sedum* (más de 300 ppm en muestras de hoja y tallo de *S. dendroideum*, *S. griseum*, *S. pachyphyllum*, *S. rubrotinctum*) creciendo en azoteas verdes. El Ba es un metal ampliamente utilizado para la fabricación de vidrios, cerámicas y pinturas, y aunque no es un metal esencial se encuentra comúnmente en las plantas. En algunas especies se ha encontrado que debido a su similitud química las raíces absorben sin discriminar entre Ca, Ba y Sr cuando hay alta disponibilidad ambiental (Smith, 1971; Kabata-Pendias, 2011).

Es común la compartimentación e inmovilización de los metales pesados en la raíz, lo que explica porque es en esta zona donde se encontró la mayor acumulación tanto de micronutrientes como de metales pesados. De forma preferencial los metales quedan secuestrados en vacuolas y en células de manera que no se provoquen alteraciones al proceso de fotosíntesis (Zhou y Qiu, 2005). En relación a altas concentraciones de metales en hojas, como es el caso del Ba, puede existir absorción de metales por medio de estas debido a la deposición de los contaminantes del ambiente (Kabata-Pendias, 2011).

Para el sitio de muro verde las concentraciones de nutrientes más altas coinciden con las de azotea verde, en este caso el Fe es el elemento presente en mayor concentración a nivel de raíz ($414.39 \text{ mg Kg}^{-1}$) seguido por Mn a nivel de hojas ($132.81 \text{ mg Kg}^{-1}$), y Zn a nivel de tallo (98.69 mg Kg^{-1}). Mientras que el Mo se presenta en menor concentración a nivel de hojas (0.54 mg Kg^{-1}). En el caso de los metales pesados nuevamente coinciden las concentraciones con el nivel de azotea verde, encontrándose Al en mayor concentración a nivel de raíz, seguido de tallo y hoja con menor concentración, y Ba con mayor concentración a nivel de hoja, seguido de tallo y raíz con menor concentración. $\text{As} > \text{Cd} > \text{Sb}$, son los elementos encontrados en menor concentración para ambos sitios.

Los 3 elementos encontrados en mayor concentración para ambos sitios en orden descendente fueron Al>Ba>Hg.

Para el caso de Hg, que es un elemento tóxico tanto para plantas como animales, se encontró el siguiente orden de concentración, hojas>raíz>tallo. Sus principales fuentes de emisión se deben a procesos de minería (extracción de oro), fabricación de equipo eléctrico, industria del papel y celulosa, fungicidas mercuriales y fabricación de cloro-sosa (Cervantes y Moreno, 2009). Las plantas difieren en su capacidad de absorber el Hg y pueden desarrollar una tolerancia a sus altas concentraciones cuando se cultivan en sitios contaminados. Parece que las plantas absorben Hg fácilmente del suelo en solución, sin embargo, no hay mucha evidencia de que el aumento de Hg en suelo cause un aumento en el contenido de Hg de las plantas. El aumento del contenido de Hg en la vegetación presente en sitios contaminados indica que se toma del suelo, sin embargo se sabe que su fuente atmosférica contribuye significativamente a los niveles de acumulación (Kabata-Pendias, 2011), lo que podría explicar porque la mayor concentración se da a nivel de hojas, además del papel que desempeña la deposición húmeda y seca de contaminantes para que esto se lleve a cabo.

Dado que no hay valores de referencia reportados para crasuláceas, se compararon las concentraciones de metales encontrados en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* con concentraciones reportadas como deficiente, suficiente y excesivo para límites máximos permisibles en especies hortícolas (maíz, soya, arroz, pastos de forraje, alfalfa, trébol, betabel, tabaco, sorgo, caña de azúcar, cacahuates, algodón, papa, tomate, frijol, zanahoria, cebolla, apio, lechuga, espinaca, chícharo, melón, sandía, pepino, manzana, chabacano, almendra, ciruela, durazno, pera, cereza, nueces, limón, naranja, uva, frambuesa, árboles y arbustos ornamentales, rosas, crisantemos, claveles) (Tabla 8).

Para la azotea verde las concentraciones de Mn y Zn se pueden considerar como deficientes, mientras que para el resto de los nutrimentos se consideran en concentraciones suficientes, en cuanto a la presencia de Hg se considera una concentración excesiva. En el sitio de muro no se considera ninguna deficiencia ni exceso para las concentraciones de nutrimentos; en relación a los metales pesados Cr y Hg se consideran concentraciones excesivas (Tabla 9).

Tabla 8. Rangos de concentración de elementos traza en el tejido foliar maduro para diversas especies hortícolas (mg Kg⁻¹) (Modificado de Kabata-Pendias, 2011), y, determinación en base a los valores encontrados, si son deficientes (D), suficientes (S) o excesivos (E) de acuerdo a los rangos establecidos, en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* en azotea verde.

	ELEMENTO	DEFICIENTE	SUFICIENTE	EXCESIVO	HOJA	TALLO	RAÍZ
NUTRIMENTOS	Mn	0-49	50-150	151+	D (20.67)	D (15.92)	S (8.60)
	Ni	-	0.1-5	10-100	S (0.97)	S (2.55)	S (1.54)
	Cu	0-2	3,40	41+	S (3.64)	D (2.58)	S (25.32)
	Zn	0-20	21-100	101+	D (9.34)	S (22.06)	D (18.81)
	Mo	0.1-0.3	0.2-5	10,50	S (0.32)	S (0.45)	S (0.94)
	Fe	0-30	31-300	301+	S (66.72)	S (240.97)	S (279.12)
METALES PESADOS	Al	-	20	-	-	-	-
	V	-	-	5,10	-	-	-
	Cr	-	0.1-0.5	5,30	-	-	-
	Co	-	0.02-1	15-50	S (0.13)	S (0.18)	S (0.33)
	As	-	1-1.7	5,20	-	-	-
	Cd	-	0.05-0.2	5,30	-	S (0.062)	-
	Sb	-	7,50	150	-	-	-
	Ba	-	-	500	-	-	-
	Pb	-	5,10	30-300	-	-	-
	Hg	-	-	1,3	E (6.35)	-	E (4.54)

Tabla 9. Rangos de concentración de elementos traza en el tejido foliar maduro para diversas especies hortícolas (mg Kg⁻¹) (Modificado de Kabata-Pendias, 2011), y, determinación en base a los valores encontrados, si son deficientes (D), suficientes (S) o excesivos (E) de acuerdo a los rangos establecidos, en hoja, tallo y raíz de *E. gigantea* en muro verde.

	ELEMENTO	DEFICIENTE	SUFICIENTE	EXCESIVO	HOJA	TALLO	RAÍZ
NUTRIMENTOS	Mn	0-49	50-150	151+	S (132.81)	S (96.59)	D (31.31)
	Ni	-	0.1-5	10-100	S (0.60)	S (2.19)	S (2.56)
	Cu	0-2	3,40	41+	S (3.64)	S (2.43)	S (4.82)
	Zn	0-20	21-100	101+	S (26.36)	S (98.69)	S (27.85)
	Mo	0.1-0.3	0.2-5	10,50	S (0.54)	S (0.68)	S (0.93)
	Fe	0-30	31-300	301+	S (53.77)	S (145.46)	S (414.39)
METALES PESADOS	Al	-	20	-	-	-	-
	V	-	-	5,10	-	-	-
	Cr	-	0.1-0.5	5,30	-	E (5.09)	E (4.95)
	Co	-	0.02-1	15-50	S (0.28)	S (1.01)	-
	As	-	1-1.7	5,20	-	-	-
	Cd	-	0.05-0.2	5,30	S (0.16)	S (0.26)	S (0.09)
	Sb	-	7,50	150	-	-	-
	Ba	-	-	500	-	-	-
	Pb	-	5,10	30-300	-	-	S (9.66)
	Hg	-	-	1,3	E (12.07)	E (1.61)	E (6.84)

Para el caso de Cr, las concentraciones encontradas coinciden nuevamente con las reportadas por Leal (2014) para ejemplares de *Echeveria elegans*, con mayor concentración de este metal principalmente en raíz. La presencia de este metal en plantas, al igual que el

Zn, puede deberse al uso que se le da para recubrimiento de techos urbanos, además de una disponibilidad ambiental alta. En cuanto al Hg se caracteriza por transformarse en compuestos volátiles que se emiten a la atmósfera. En las zonas industriales, los contaminantes atmosféricos como el ozono pueden influir significativamente en la tasa de formación de especies de Hg oxidadas, que producen formas solubles en agua y pueden ser transportadas hasta zonas remotas del área de emisión mediante proceso de deposición húmeda o seca (Alloway, 2010).

Los procesos de deposición seca y húmeda se deben principalmente a las características climáticas de la ZMVM, debido al transporte de los contaminantes atmosféricos desde su fuente de emisión hacia la zona de muestreo, que se ubica en la parte sur de la Ciudad de México. Existen alrededor de 30,000 pequeñas hasta grandes industrias en la parte norte de la ZMVM, por lo que se esperan grandes emisiones de contaminantes en comparación con la delegación Coyoacán, una zona residencial donde no hay establecimiento de industrias (García *et al.*, 2009). El muestreo de los ejemplares de *E. gigantea* se realizó durante el mes de abril, que se considera aún dentro de la temporada de secas, por lo que el proceso de deposición seca ocurre con mayor frecuencia en esta época, aunque no se debe descartar la presencia de deposición húmeda. El hecho de encontrar concentraciones altas de metales como Hg en *E. gigantea*, es prueba de que los contaminantes viajan desde su zona de emisión hasta ser depositados en la superficie del terreno y representan una fuente potencial para la planta.

De acuerdo a los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis, en el sitio de azotea existen diferencias significativas solamente para dos elementos considerados como micronutrientes, Mn en hoja y Cu en raíz. En el muro verde el Mn también presenta diferencias significativas con mayor acumulación en tallo, además de Fe, con mayor acumulación en raíz. Para metales pesados, V, Al, As, Pb presentan diferencias significativas con una mayor acumulación en raíz. Las diferencias significativas indican que para los ejemplares de *E. gigantea* de este estudio, la acumulación de metales pesados en general se da en la forma Raíz>Tallo>Hoja, a diferencia de la acumulación en *E. elegans*, Hoja>Tallo>Raíz reportada por Leal (2014).

Los resultados para la prueba de Mann Whitney, indican que en el muro verde es donde se presenta la mayor acumulación de Mn, Zn, Pb, Co, As, Cd, Sb. De acuerdo a los estudios de Arellano (2012), elementos como Mn, Zn, Pb y Co, son aportados por el material de soporte o sustrato de la azotea verde al comparar muestras de agua de lluvia y de

escurrimiento, por lo que el mismo sitio puede funcionar como fuente directa de los metales para las plantas. Esto nos habla de las características propias de cada sitio, que influyen en la acumulación de los metales por las plantas, considerando la naturación vertical en el muro verde, puede que ésta sea la clave para presentar una mayor acumulación de estos metales, además de la edad de establecimiento de los ejemplares en cada sitio.

9. Conclusiones

E. gigantea capturó metales pesados.

La presencia de metales pesados en raíz, tallo y hojas indica un transporte de estos desde la raíz al resto de la planta.

La mayor concentración de metales se da en el sitio de muro verde, encontrándose diferencias significativas para 7 elementos.

La acumulación de metales pesados en *E. gigantea* se da en mayor concentración a nivel de raíz para ambos sitios, ya que se encontraron diferencias significativas para 7 elementos.

El Al, Ba y Hg se encontraron en altas concentraciones para ambos sitios.

En la comparación con los límites máximos permisibles, cabe destacar la capacidad de *E. gigantea* para almacenar concentraciones excesivas de Hg, lo que la hace tolerante y acumuladora de este metal, por lo cual se puede considerar una especie óptima para uso en azoteas verdes, además de contribuir a la disminución de contaminantes de la zona.

A pesar de que se encontró una mayor acumulación de ciertos metales pesados en la naturación de muro verde, ambas formas de naturación son idóneas para mejorar la calidad del aire dentro de la Ciudad de México.

10. Bibliografía

- Alloway, B. J. 2010. Heavy metals in soil. Trace metals and metalloids in soils and their Bioavailability. 3^{ra} ed. Edit. Springer. Londres, Reino Unido. 597 pp.
- Arellano, L. E. A. 2012. Capacidad de retención de hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados en una azotea verde extensiva. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Bartlett, R. J. 1999. Characterizing soil redox behavior. En: Sparks, D. L. Soil Physical (Eds) Chemistry. CRC Press. Estados Unidos. p:371-391
- Berardi, U; GhaffarianHoseini, A; GhaffarianHoseini A. 2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115: 411-428.
- Bridgman, H. A. 1990. Global air pollution: Problems for the 1990s. Edit. Belhaven Press. Londres. 261 pp.
- Camacho, V. V; Ruíz, L. A. 2011. Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias* 1 (4): 3-15.
- Cervantes, C; Moreno, S. R. 1999. Contaminación ambiental por metales pesados. Impacto en los seres vivos. 1^{ra} ed. Edit. A. G. T. Editor, S. A. México.
- Curtis, H; Barnes, N. S; Schenek, A; Massarini, A. 2008. Biología. 7^a ed. Edit. Panamericana. Buenos Aires.
- Dunnet, N; Kingbury, N. 2004. Planting green roofs and living walls. Edit. Timber Press. Estados Unidos. 254 pp.
- Era verde. 2015. Memoria técnica descriptiva MEDIX®
- Estudios territoriales de la OECD. 2015. Valle de México, México. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/56213/valle-de-mexico-OCDE.pdf>
Consulta: 25/05/2017.
- Galán, H. E; Romero, B. A. 2008. Contaminación de suelos por metales pesados. *Revista de la de la sociedad española de mineralogía. Macla* 10: 48-60.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5^{ta} ed. Instituto Nacional de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- García, R; Belmont, R; Padilla, H; Torres, M. C; Baez, A. P. 2009. Determination of inorganic ions and trace elements in total suspended particles at three urban zones in the Mexico City Metropolitan Area and one rural site. *Atmospheric research* 94: 313-319.

- Garza, G. 1996. Uncontrolled air pollution in Mexico City. *Cities* 13 (5): 315-328.
- Getter, K. L; Bradley, R. D. 2006. The role of extensive green roofs in sustainable development. *Hort Science* 41 (5): 1276-1285.
- Huerta, R. 2011. Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en el agua de lluvia de la Ciudad de México. Tesis de Maestría en Ciencias de La Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- INECC. 2011. Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009). Disponible en: http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/652/ebook/cuarto_almanaque.html
Consulta: 08/01/17.
- INEGI. 2010. Dirección General de Estadísticas Sociodemográficas. Censo de población y vivienda. Disponible en línea desde: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>
Consulta: 08/16.
- INEGI. 2011. Sistema para la consulta del cuaderno estadístico de la zona metropolitana del valle de México. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/cezm11/info/mapas.pdf>
Consulta: 08/01/17.
- INEGI. 2014. Censos económicos 2014, Las Zonas Metropolitanas en México. Disponible en: http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ce/ce2014/doc/minimonografias/m_zmm_ce2014.pdf Consulta: 25/05/17.
- INEGI. 2015. Encuesta Intercensal. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/>
Consulta: 25/05/2016.
- Jaffrezo, J. L; Clain, M. P; Masclet, P. 1994. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the polar ice of Greenland. Geochemical use of these atmospheric tracers. *Atmospheric environment* 28 (6): 1139-1145.
- Jauregui, O. E. 2000. *El clima de la Ciudad de México*. 1^{ra} ed. Edit. Plaza y Valdés. México. 131 pp.
- Jimeno, S. H. D. 2008. El género *Echeveria* (*Crassulaceae*) en Veracruz, México. Trabajo de la experiencia recepcional en la modalidad de tesis. Universidad Veracruzana. Facultad de Biología. México.
- Kabata-Pendias, A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements- an environmental issue. *Geoderma* 122: 143-149.

- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace elements in soils and plants, 4^a ed. Edit. CRC Press. Estados Unidos.
- Kehrler, J. P. 2000. The Haber–Weiss reaction and mechanisms of toxicity. *Toxicology* 149: 43-50.
- Lafragua, J; Gutiérrez, A; Aguilar, E; Aparicio, J; Mejía, R; Santillán, O; Suárez, M. A; Preciado, 2003. Balance hídrico en el Valle de México, Anuario Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA. México. 40 pp.
- Leal, R. L. A. 2014. Capacidad de captación de metales pesados por plantas utilizadas en azoteas verdes. Reporte de investigación. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- LGEEPA. 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación. México.
- Li, X; Poon, C; Liu, P. S, L. 2001. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied geochemistry* 16:1361-1368.
- Liochev, S.I. 1999. The mechanism of ‘Fenton-like’ reactions and their importance for biological systems. A biologist’s view. *Metal Ions Biol. Syst.* 36: 1–39.
- Lodoño, A. C. H. 2001. Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales- Caracterización-Planificación-Administración. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad del Tolima. Disponible en: http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/LIBROS/cuencas%20hidrograficas%20bases%20conceptuales%20%20caracterizacion%20%20planificacion%20yorganizacion%20-%20CARLOS%20LONDOO.pdf Consulta: 13/03/17.
- Loh, S. 2008. Living walls - a way to green the built environment. BEDP Environment Design Guide 1 (26): 1-7.
- Mahler, Robert L. 2003. General Overview of Nutrition for Field and Container Crops. En: Riley, L. E; Dumroese, R. K; Landis, T. D. National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. USDA Forest Service Proceedings.
- Maldonado, C. A. G. 2009. Parques industriales de México: dos perspectivas de desarrollo. *Comercio exterior* 59 (1): 60-76.
- Martínez, R. A. 2015. Determinación y zonificación de metales pesados en plantas de especies de *Sedum* en azoteas verdes. Reporte de investigación. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.

- Mauseth, James D. 2014. Botany: An introduction to plant biology. 5ª ed. Edit. Burlington: Jones and Bartlett Learning, cop. Estados Unidos.
- Meyrán, G. J; López, C. L. 2003. Las crasuláceas de México. Sociedad Mexicana de Cactología A. C. México. 286 pp.
- Monterusso, M. A; Rowe, B. D; Rugh, C. L. 2005. Establishment and persistence of *Sedum spp.* And native taxa for green roof applications. *Hort Science* 40 (2): 391-396.
- Navarro, A. J. P; Aguilar, A. I; López, M. J. R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas* 16 (2): 10-25.
- Oberndorfer, E; Lundholm, J; Bass, B; Coffman, R. R; Doshi, H; Dunnett, N; Gaffin, S; Kohler, M; Liu, K. K. Y; Rowe, B. 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological, structures, functions and services. *BioScience* 57(10): 823-833.
- Ortega, D. E; Collazo, O. M. 2013. Absorción y translocación de nutrimentos. En: Márquez, G. J; Collazo, O. M; Martínez, G. M; Orozco, S. A; Vázquez, S. S (Eds). Biología de angiospermas. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 622 pp.
- Osorio, H. M. Z. 2013. Análisis comparativo entre especies vegetales, tropicales y desérticas utilizadas en azoteas verdes para disminuir la isla calorífica en zonas urbanas. Tesis para acreditar el examen demostrativo de experiencia recepcional. Universidad Veracruzana. Facultad de Ciencias Químicas.
- Pérez, C. E. *Crassulaceae*. 2008. En: Rzedowski, R. J; Calderón, de R. G. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 156. Instituto de Ecología A. C. Centro regional del Bajío. México. 141 pp.
- Pérez, C. E; Franco, M. I. S. 2004. *Crasuláceas*. En: García, A. J; Ordóñez, M. J; Briones, S. M. Biodiversidad de Oaxaca. Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wildlife Fund. Instituto de Biología, UNAM. México. 209 – 217 pp.
- Periódico Expansión (25/05/2016). 10 datos de la pelea entre la contaminación y las contingencias en la CDMX. Disponible en: <http://expansion.mx/nacional/2016/05/25/contingencia-ambiental-en-la-cdmx-los-numeros> Consulta: 25/05/17
- Pineda, H.R. 2004. Presencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Contribución de *Glomus intraradices* en la Absorción y Translocación de Zinc y Cobre en Girasol

- (*Helianthus annuus L.*) crecido en un suelo contaminado con residuos de mina. Tesis para obtener el Grado de Doctor en Ciencias. Universidad de Colima. México
- Plascencia, V. G. 2003. Espectrometría de masas. Maestría en ciencias bioquímicas, Curso de métodos. Instituto de Biotecnología. UNAM.
 - Porteous, A. 2008. Dictionary of environmental science and technology. 4ta ed. Edit John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra.
 - Prieto, M. J; González, R. C. A; Román, G. A. D; Prieto, G. F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10 (1): 29-44.
 - Quiroz, F. A; Collazo, O. M; Ortega, D. E. 2013. La nutrición. En: Márquez, G. J; Collazo, O. M; Martínez, G. M; Orozco, S. A; Vázquez, S. S (Eds.). Biología de angiospermas. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 622 pp.
 - Secretaria del Medio Ambiente. 2010. Inventario de emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de México. Contaminantes criterio (2010). Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisiones-zmvm-criterio-2010/#p=6> Consulta: 10/01/17.
 - Secretaria del Medio Ambiente. 2011. Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2011. Disponible en: http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2011/#p=5 Consulta: 25/05/2017.
 - Secretaria del Medio Ambiente. 2012. Inventario de emisiones contaminantes y de efecto invernadero. Zona Metropolitana del Valle de México. Disponible en: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/inventario-emisioneszmvm2012/#p=1> Consultado: 25/05/2017.
 - Secretaria del Medio Ambiente. 2016. Calidad del aire en la Ciudad de México, Informe 2015. Disponible en: http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/informe_anual_calidad_aire_2015v3/mobile/#p=4 Consulta: 25/05/2017.
 - SEDESOL; CONAPO; INEGI. 2012. Delimitación de las Zonas Metropolitanas de México 2010. Disponible en: http://conapo.gob.mx/es/CONAPO/Delimitacion_zonas_metropolitanas_2010_Capitulos_I_a_IV Consulta: 05/03/17.

- SEMARNAT, Programas de gestión para mejorar la calidad del aire. Programa para mejorar la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010. Disponible en: http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/temas/gestionambiental/calidaddelaire/Documents/Calidad%20del%20aire/Proaires/ProAires_Anteriores/9_ProAire%20ZMVM_2002-2010.pdf Consulta: 28/12/16.
- SenGupta, A. K. 2002. Environmental separation of heavy metals. Engineering processes. Edit. Lewis Publishers. Estados Unidos de América. 383 pp.
- Smith, K. A. 1971. The comparative uptake and translocation by plants of calcium, strontium, barium and radium. *Plant and Soil* 34: 369-379.
- Soemy, F; Fumadó, J. L; Usón, E. 2007. Arquitectura y sostenibilidad. Herramientas de diseño y técnicas de control medioambiental. Las cubiertas ecológicas en los edificios y la renovación de la ciudad. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. p: 15-22
- Speak, A. F; Rothwell, J.J; Lindley, S. J; Smith, C. L. 2014. Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof. *Environmental pollution* 184:33-43.
- Taiz, L; Zeiger, E. 2010. Plant physiology. 5ª ed. Edit. Sinauer Associates. Sunderland, Massachusetts.
- Tian, S; Lu, L; Labavith, J; Yang, X; He, Z; Hu, H; Sarangi, R; Newville, M; Commisso, J; Brown, P. 2011. Cellular sequestration of Cadmium in the hyperaccumulator plant species *Sedum alfredii*. *Plant physiology* 157(4): 1914-1925.
- Vázquez, Q. S. 2013. Un laboratorio al aire libre. *El faro: boletín informativo de la coordinación de la investigación científica* 147: 6-7.
- Valette-Silver, N. J. 1993. The use of sediments cores to reconstruct historical trends in contamination of estuarine and coastal sediments. *Estuaries* 16 (3): 577-588.
- Winter, K; Smith J. A. C. 1996. Crassulacean acid metabolism. Biochemistry, ecophysiology and evolution. Ecological Studies. Vol. 114. Edit. Springer.
- Xu, L; Zhou, S; Wu, L; Li, N; Cui, L; Luo, Y; Christie, P. 2009. Cd and Zn tolerance and accumulation by *Sedum jinianum* in east China. *International Journal of Phytoremediation* 11: 283-295.
- Yang, X. E; Long, X. X; Ye, H. B; He, Z. L; Calvert, D.V; Stoffell, P. J. 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance). *Plant and Soil* 259: 181-18.

- Yang, J. G; Yang, J. Y; Peng, C; Tang, C; Zhou. K. 2009. Recovery of zinc from hyperaccumulator plants: *Sedum plumbizincicola*. *Environmental technology* 30 (7): 693-700.
- Ye, J; Liu, C; Zhao, Z; Li, Y; Yu, S. 2013. Heavy metals in plants and substrate from simulated extensive green roofs. *Ecological Engineering* 55: 29-34.
- Zhou, W; Qiu, B. 2005. Effects of cadmium hyperaccumulation on physiological characteristics of *Sedum alfredii* Hance (*Crassulaceae*). *Plant Science* 169: 737-745.

ANEXO 1. Registro de peso húmedo y peso seco de ejemplares de *Echeveria gigantea* colectados de la azotea verde y muro verde del edificio de Laboratorios MEDIX®.

TABLA 1. Peso húmedo de ejemplares de <i>Echeveria gigantea</i> colectados de azotea verde (kg).				
	HOJA	TALLO	RAÍZ	PESO TOTAL
AV1	2059.78	189.95	627.70	2058.78
AV2	1745.73	109.33	669	2524.06
AV3	1699.78	183.55	585.30	2467.96
Tabla 2. Peso seco de ejemplares de <i>Echeveria gigantea</i> colectados en azotea verde (g).				
AS1	136.81	23.72	60.01	220.54
AS2	95.29	16	75.36	186.65
AS3	95.85	23.88	71.68	191.41
Tabla 3. Peso seco de ejemplares de <i>Echeveria gigantea</i> colectados en azotea verde (kg).				
MV1	182.79	21.37	33.78	237.92
MV2	117.17	17.86	20.02	155.05
MV3	121.41	25.32	44.40	282.13
Tabla 4. Peso seco de ejemplares de <i>Echeveria gigantea</i> colectados en azotea verde (g).				
MS1	6.19	2.114	3.64	11.97
MS2	4.69	2.14	1.60	8.43
MS3	10.17	3.06	2.48	15.71

ANEXO 2. Espectrometría de masas.

La espectrometría de masas consiste en una poderosa técnica microanalítica usada para identificar compuestos desconocidos, cuantificar compuestos conocidos, y elucidar la estructura y propiedades químicas de moléculas. La detección de compuestos puede ser llevada a cabo con cantidades realmente pequeñas de muestra y obtener información característica como el peso y algunas veces la estructura del analito. En todos los casos,

alguna forma de energía es transferida a las moléculas a analizar para afectar la ionización. En la técnica clásica de impacto electrónico, algunas de las moléculas ionizadas del analito “explotan” en una variedad de fragmentos ionizados, el patrón de fragmentación resultante, así como los iones residuales, constituyen el espectro de masas. En principio, el espectro de masas de cada compuesto es único y puede ser usado como “huella química” para caracterizar el analito (Plascencia, 2003).

Espectrómetro de masas: Es un instrumento que mide las masas de moléculas individuales que han sido convertidas en iones. Un espectrómetro de masas no hace una medición directa de la masa molecular, pero mide la relación masa/carga de los iones formados de las moléculas (Plascencia, 2003).

Anexo 3. Ficha técnica del proceso de espectrometría de masas en *Echeveria gigantea* por el método ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado) del Instituto de Geofísica, UNAM.

METODOLOGÍA. Las muestras fueron preparadas en el digestor ETHOS One de la marca Milestone.

Digestión ácida en ETHOS One. Se pesó 0.5g y se adicionó 10 ml de HNO₃ grado ultrapuro. Las muestras se dejaron en pre-digestión toda la noche bajo la campana de extracción.

Posteriormente se llevó a cabo la digestión asistida por horno de microondas, se empleó el siguiente programa:

- 1 .Etapa de rampeo durante 20 min a 1500W y 180°C
2. Etapa de mantenimiento durante 15 min a 1500W y 180°C

Una vez terminado el programa, las muestras se enfriaron y aforaron a 50 ml con HNO₃ al 2%. Se filtraron, etiquetaron y almacenaron a 4°C hasta su posterior análisis.

Control de calidad. Todas las muestras se hicieron por duplicado (digestión en horno de microondas). Las concentraciones reportadas son el resultado promedio de las dos digestiones.

Por cada 9 muestras se digirió dos Materiales de Referencia Certificados (MRC), 1547 Peach Leaves y 1573a Tomato Leaves (NIST), además de dos blancos reactivos para monitorear posible aportación de contaminantes.

Tabla 1. Control de calidad para el MRC- 1547 Peach Leaves.

	L.D.	Certificado	Promedio (n=8)	DESVEST	Precisión %DPR	Exactitud %Error	%Recuperación
	$\mu\text{g L}^{-1}$	mg Kg^{-1}					
Al	1.133	249	230.478	32.852	17.965	7.438	92.562
V	0.001	0.37	0.317	0.020	15.907	14.269	85.731
Mn	0.020	98	81.854	5.853	17.636	16.476	83.524
Fe	0.371	218	192.256	16.293	27.484	11.809	88.191
Ni	0.049	0.69	0.747	0.424	46.742	8.276	108.276
Cu	0.044	3.7	3.492	0.541	7.936	5.612	94.388
Zn	0.217	17.9	15.425	1.404	30.243	13.827	86.173
Mo	0.008	0.06	0.054	0.001	12.590	10.648	89.352
Cd	0.002	0.026	0.024	0.008	16.078	7.361	92.639
Ba	0.028	124	135.032	9.691	9.104	8.897	108.897
Pb	0.016	0.87	0.855	0.138	25.853	1.724	98.276
Hg	0.0047	0.031	0.0319	4.134	7.149	2.914	102.914

Tabla 2. Control de calidad para el MRC- 1573a Tomato Leaves

	L.D.	Certificado	Promedio (n=8)	DESVEST	Precisión %DPR	Exactitud %Error	%Recuperación
	$\mu\text{g L}^{-1}$	mg Kg^{-1}					
Al	1.133	598	507.695	28.753	8.009	15.101	84.899
V	0.001	0.835	0.731	0.049	7.258	12.413	87.587
Cr	0.014	1.99	1.847	0.155	7.104	7.208	92.792
Mn	0.020	246	224.454	12.931	3.768	8.759	91.241
Fe	0.371	368	341.825	15.197	2.853	7.113	92.887
Co	0.001	0.57	0.522	0.026	1.727	8.392	91.608
Ni	0.049	1.59	1.591	0.370	46.903	-0.078	100.078
Cu	0.044	4.7	4.176	0.558	25.843	11.154	88.846
As	0.009	0.112	0.114	0.012	11.237	-1.894	101.894
Cd	0.002	1.52	1.227	0.032	4.419	19.245	80.755
Sb	0.007	0.063	0.042	0.002	4.930	33.972	66.028
Hg	0.0047	0.034	0.0304	3.799	9.782	10.491	89.509

Análisis de metales por ICP-MS. Todas las mediciones se realizaron por el método Espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (por sus siglas en inglés ICP-MS), modelo iCAP Qc de la marca Thermo Scientific, en el Laboratorio ICP-MS del Instituto de Geofísica de la UNAM. El instrumento fue optimizado previamente al análisis de las muestras, con una solución certificada acuosa de la marca High Purity

Standards (ICP-MS-B), la cual contiene un amplio intervalo de masas (Li, Co, In, Ba, Bi, Ce y U de 1µg/L respectivamente).

Para el análisis de metales, se realizó una curva de calibración con 16 puntos (0, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 25, 50, 75, 100, 250 y 500 µg L⁻¹), a partir de una solución stock multielemental (QCS-26). Y para el análisis de mercurio se realizó una curva de calibración con 12 puntos (0, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25 y 2.5 µg L⁻¹) a partir de una solución monoelemental de Hg.

El drift instrumental se corrigió con el estándar interno Indio (In de 10 µg/L). Los límites de detección se calcularon mediante la siguiente ecuación:

$$L.D. = \frac{3(SD \text{ int } BCO)(conc \text{ STD})}{(int \text{ STD} - prom \text{ int } BCO)}$$

Dónde:

SD int BCO – Desviación estándar de la intensidad del blanco

conc STD – Concentración de la solución estándar

int STD – Intensidad de la solución estándar

prom int BCO – Promedio de la intensidad del blanco

Anexo 4. Parámetros operacionales del espectrómetro de masas modelo iCAP Qc de la marca Thermo Scientific.

Parámetro	Valor
Additional Gas Flow 1	0.00
Additional Gas Flow 2	0.00
Additional Gas Flow 3	0.00
CCT Entry Lens	-70.02
Angular Deflection	-350.02
Deflection Entry Lens	-35.01
Extraction Lens 1 Polarity	0.00
Extraction Lens 1 Negative	0.00
Extraction Lens 1 Positive	0.00
Spray Chamber Temperature	2.70
Peristaltic Pump Speed	40.00
Cool Flow	14.00
Sampling Depth	5.00
Plasma Power	1550.00
Auxilliary Flow	0.80
Nebulizer Flow	0.81
Torch Horizontal Position	0.45
Torch Vertical Position	1.24
Extraction Lens 2	-144.33
CCT Focus Lens	-1.20
CCT Bias	-2.01
CCT Exit Lens	-160.01
Focus Lens	21.00
D1 Lens	-200.05
D2 Lens	-80.00
Quad Entry Lens	-20.00
Pole Bias	0.00
CCT1 Flow	0.00
CCT2 Flow	0.00
CCT1 Shut-Off Valve	0.00
CCT2 Shut-Off Valve	0.00
Virtual CCT Mass to Dac Factor	130.00
Virtual CCT Mass to Dac Offset	-250.01
Virtual CCT Mass parameter b	0.65
Virtual CCT Mass Maximum Dac Limit Set	4095.0