



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON OPCIÓN TERMINAL AMBIENTAL

**DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS EN  
VEGETALES DEL PARQUE ESTATAL GENERAL  
LÁZARO CÁRDENAS “FLOR DEL BOSQUE”,  
EN EL ESTADO DE PUEBLA.**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA CON OPCIÓN TERMINAL AMBIENTAL**

PRESENTA:

**I.A. LUIS ENRIQUE VÁZQUEZ ORTEGA**

ASESOR:

**DR. JOSÉ CARLOS MENDOZA HERNÁNDEZ**

CO ASESORA:

**DRA. GABRIELA PÉREZ OSORIO**

PUEBLA, PUE.

DICIEMBRE DE 2015.

## Agradecimientos:

### **A Dios:**

En primer lugar, por que esta presente en todos mis sueños y logros , a quien, le estoy agradecido infinitamente por darme la oportunidad de cumplir una meta mas en mi vida.

### **A mis padres:**

Por brindarme en todo momento su amor, apoyo y cariño por ser mi modelo a seguir y siempre alentare a superarme enseñándome que con fe en Dios y trabajo, todo se puede lograr.

### **A mi hermana:**

Por ser un pilar muy importante en mi vida que por sus consejos y ánimos, me regalo las palabras perfectas para que en su momento esto comenzará y ahora concluirá.

### **A mis amig@s:**

Por que siempre tuvieron palabras de aliento y muestras de cariño, que en los momentos buenos y malos vividos, siempre estuvieron allí apoyándome.

### **A mis amig@s de la maestría:**

Por caminar juntos en esta etapa de aprendizaje, me llevó muy buenos amig@s, con quienes conviví compartí y disfrute toda esta experiencia, con quienes reí, trabaje, reí y mas reí.....

### **A la Dra. Gaby y al Dr. José Carlos**

Por su tiempo y apoyo en este trabajo realizado, por darme la oportunidad de trabajar juntos en este proyecto.

### **A mis maestros y a la Dra. Paty:**

Por compartirme sus conocimientos adquiridos por su apoyo y dedicación a lo largo de toda esta etapa.

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	III
Lista de Figuras.....	VI
Lista de Tablas .....	VIII
RESUMEN.....	9
INTRODUCCIÓN .....	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
JUSTIFICACIÓN.....	16
OBJETIVO GENERAL: .....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS: .....	18
HIPÓTESIS.....	19
<b>1. ANTECEDENTES.....</b>	<b>21</b>
1.1 Composición del Aire.....	21
1.2 Contaminación del Aire.....	22
1.2.1 Fuentes de contaminación del aire .....	23
1.2.1.1 Fuentes Puntuales.....	23
1.2.1.2. Fuentes móviles.....	24
1.2.1.3. Fuentes de área.....	24
1.2.1.4 Fuentes naturales.....	25
1.2.2 Fuentes de contaminación en México .....	26
1.2.3 Clasificación de contaminantes de acuerdo a su origen.....	27
1.3 Metales Pesados .....	28
1.3.1 Cobre , Cu.....	28
1.3.2 Hierro, Fe.....	29

1.3.3 Niquel, Ni .....	31
1.3.4 Plomo, Pb.....	32
1.3.5 Mercurio, Hg.....	33
1.3.6 Cromo, Cr.....	34
1.3.7 Cadmio, Cd.....	35
1.3.8 Zinc, Zn.....	37
1.3.9 Manganeso, Mn.....	38
1.3.10 Arsénico, As.....	39
1.4 Biodisponibilidad de los metales pesados.....	40
1.5 Especies de vegetales a estudiar .....	40
1.6 Principales características de los vegetales a estudiar .....	40
1.6.1 <i>Eucalyptus globulus</i> .....	40
1.6.2 <i>Eucalyptus camaldulensis</i> .....	42
1.6.3 <i>Juniperus deppeana</i> .....	44
1.6.4 <i>Juniperus flaccida</i> .....	44
1.6.5 <i>Quercus rugosa</i> .....	46
1.6.6 <i>Quercus mexicana</i> .....	48
1.7 Absorción y Adsorción.....	49
1.7 Descripción de la zona de estudio.....	51
1.8 Clima.....	52
<b>2. METODOLOGÍA .....</b>	<b>54</b>
2.1 Sitios de muestreo.....	54
2.2 Muestreo.....	55
2.3 Pretratamiento de las muestras.....	55
2.4 Determinación de concentración de metales pesados adsorbidos .....	55
2.5 Determinación de concentración de metales pesados absorbidos.....	56
2.6 Estadística aplicada a los resultados.....	57
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>59</b>
3.1 Metales Adsorbidos.....	59
3.2 Metales Absorbidos.....	79
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>99</b>

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>102</b>
<b>REFERENCIAS ELECTRÓNICAS .....</b>	<b>107</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Ciclo de contaminación del aire.....	22
<b>Figura 2.</b> Porcentaje de contaminación atmosférico.....	26
<b>Figura 3.</b> Fenómenos de superficie. ....	50
<b>Figura 4.</b> Parque Estatal Gra. Lázaro Cárdenas "Flor del Bosque". ....	51
<b>Figura 5.</b> Rosa de los vientos en la zona Metropolitana del Valle de Puebla. ....	52
<b>Figura 6.</b> Zonas de muestreo de vegetales en el Parque Estatal Gral. Lázaro Cárdenas "Flor del Bosque". ....	54
<b>Figura 7.</b> Metales adsorbidos en <i>Eucalyptus globulus</i> .....	60
<b>Figura 8.</b> Metales adsorbidos en <i>Eucalyptus globulus</i> .....	61
<b>Figura 9.</b> Hg y As adsorbido en <i>Eucalyptus globulus</i> . ....	62
<b>Figura 10.</b> Metales adsorbidos en <i>Eucalyptus camuldalensis</i> . ....	63
<b>Figura 11.</b> Metales adsorbidos en <i>Eucalyptus camuldalensis</i> . ....	64
<b>Figura 12.</b> Hg y As adsorbido en <i>Eucalyptus camuldalensis</i> . ....	65
<b>Figura 13.</b> Metales adsorbidos en <i>Juniperus deppeana</i> . ....	67
<b>Figura 14.</b> Metales adsorbidos <i>Juniperus deppeana</i> . ....	68
<b>Figura 15.</b> Hg y As adsorbido en <i>Juniperus deppeana</i> . ....	69
<b>Figura 16.</b> Metales adsorbidos en <i>Junnipereus flaccida</i> . ....	70
<b>Figura 17.</b> Metales adsorbidos en <i>Junnipereus flaccida</i> . ....	71
<b>Figura 18.</b> Hg y As adsorbidos en <i>Junnipereus flaccida</i> . ....	72
<b>Figura 19.</b> Metales adsorbidos en <i>Quercus rugosa</i> . ....	73
<b>Figura 20.</b> Metales adsorbidos en <i>Querecus rugosa</i> . ....	74
<b>Figura 21.</b> Hg y As adsorbidos en <i>Quercus rugosa</i> . ....	75
<b>Figura 22.</b> Metales adsorbidos en <i>Quercus mexicana</i> .....	76
<b>Figura 23.</b> Metales adsorbidos en <i>Quercus mexicana</i> .....	77
<b>Figura 24.</b> Hg y As adsorbidos en <i>Quercus mexicana</i> .....	78
<b>Figura 25.</b> Metales absorbidos en <i>Eucalytus globulus</i> .....	80
<b>Figura 26.</b> Metales absorbidos en <i>Eucalyptus globulus</i> .....	81
<b>Figura 27.</b> Metales absorbidos en <i>Eucalyptus camuldalensis</i> . ....	83
<b>Figura 28.</b> Metales absorbidos en <i>Eucalyptus camuldalensis</i> . ....	84

<b>Figura 29.</b> Metales absorbidos en <i>Juniperus deppeana</i> .....	86
<b>Figura 30.</b> Metales absorbidos en <i>Junippereus deppeana</i> .....	87
<b>Figura 31.</b> Metales absorbidos en <i>Junnipereus flaccida</i> .....	89
<b>Figura 32.</b> Metales absorbidos en <i>Juniperus flaccida</i> .....	91
<b>Figura 33.</b> Metales absorbidos en <i>Quercus rugosa</i> .....	93
<b>Figura 34.</b> Metales absorbidos en <i>Quercus rugosa</i> .....	94
<b>Figura 35.</b> Metales absorbidos <i>Quercus mexicana</i> .....	95
<b>Figura 36.</b> Metales absorbidos en <i>Quercus mexicana</i> .....	97
<b>Figura 37.</b> Ubicación de zonas de muestreo y sus alrededores .....	98

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Niveles críticos de toxicidad en vegetales.....	17
<b>Tabla 2.</b> Componentes principales del aire.....	21
<b>Tabla 3.</b> Diferencia entre fisisorción y quimisorción.....	50

## RESUMEN

El desarrollo que ha buscado el hombre para obtener diversas comodidades, ha generado como consecuencia la contaminación del agua, aire y suelo, así como el desequilibrio en la relación de los diferentes ecosistemas.

El uso excesivo de combustibles fósiles, ha impactado en la calidad del medio ambiente, específicamente en la calidad del aire, el cual, es un compuesto de vital importancia para la sobrevivencia de los seres vivos.

En este estudio realizado en el Parque Estatal General Lázaro Cárdenas “Flor del Bosque”, se seleccionaron cinco especies diferentes de vegetales que se encuentran en mayor número, las cuales son: *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus camuldalunsis*, *Juniperus deppeana*, *Juniperus fláccida*, *Quercus rugosa*, *Quercus mexicana*, para cuantificar la presencia absorbida y adsorbida de diez metales (Cu, Fe, Ni, Pb, Hg, Cr, Cd, Zn, Mn y As) en el follaje expuesto al material particulado.

El Parque Estatal, fue dividido en cuatro zonas, de acuerdo a su ubicación y grupo de especies vegetativas que se encuentran agrupadas. El muestreo se realizó en dos periodos durante el año, el primero de los meses de Enero a Abril del 2012 y el segundo de Julio a Septiembre de 2012, para poder cuantificar los metales pesados en dos diferentes épocas del año.

Los metales pesados adsorbidos en los vegetales se presentaron en todas las zonas en los dos periodos a excepción del As y Hg en el segundo periodo en todas las zonas, así como el Cr en la zona 1 del P1 y en ambas zonas en el P2 en relación a la especie *Quercus rugosa*, así mismo, no fue detectable para Ni en las zona 1 en el P1, para la zona 1 y 2 en el P2 y el Cr en ambos periodos en las dos zonas (1 y 2) en lo que respecta a la especie *Quercus mexicana*.

Con respecto a la concentración de los metales absorbidos en los vegetales se comparó con los niveles críticos de toxicidad reportados por Kramer, (2010), Patra *et al*; (2004) y Wells, *et al*; (1993)., obteniéndose los siguientes resultados:

En relación con la especie *Eucalyptus camuldalensis*, el Fe se encuentra dentro del rango crítico de toxicidad en la zona 2 en los dos periodos y el Pb, se encuentra en el rango de toxicidad en las zonas 1, 2 y 3 en ambos periodos.

Con respecto a la especie *Juniperus deppeana*, el Pb, presenta concentraciones críticas de toxicidad en las zonas: 1, 2 y 4 tanto en el periodo 1, como en el 2.

La absorción presentada en la especie *Juniperus flaccida*, muestra que el Cu, presentó valores críticos de toxicidad en vegetales en las zonas: 1, 2 y 4 en los periodos 1 y 2, y el metal Cr, se encuentra en el rango de toxicidad crítica en las zonas 1, 2 y 4, en ambos periodos.

Los valores críticos de toxicidad para la especie *Quercus rugosa* presentada, fue en relación al Fe, en las zonas 1 y zona 2, únicamente en el P1, mientras que el Pb, se presentó en la zona 1 en el P1.

La especie *Quercus mexicana*, mostró concentraciones críticas de toxicidad en las zonas 1 y 2 del P1, con la presencia del Fe y de la zona 1 y zona 2 de ambos periodos, con la presencia del Pb.

# INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre desarrolló su capacidad para cambiar su entorno, ha generado cambios en la naturaleza en mayor o menor medida, siendo la contaminación un producto de su afán por “mejorar” su calidad de vida. Sin embargo, el desarrollo que ha experimentado para alcanzarlo ha ido acompañado de consumos masivos de recursos naturales y energéticos, así como de la generación de una variedad enorme de residuos y emisiones a la atmósfera que han causado una extensa degradación ambiental. Históricamente los residuos generados por las actividades humanas se han descargado al ambiente con la idea errónea de que tarde o temprano se degradarán o desaparecerán. El resultado es que actualmente las huellas de la actividad humana son evidentes en prácticamente cualquier lugar, incluso en aquellos que se encuentran alejados de los sitios donde se generan esos residuos. Un buen ejemplo de problemas ambientales que tienen implicaciones tanto locales como globales son los atmosféricos, de los cuales, los más importantes, por sus efectos sobre la salud de la población y los ecosistemas naturales, son la disminución de la calidad del aire, el fenómeno de cambio climático global y la reducción del espesor de la capa de ozono estratosférico (SEMARNAT, 2012).

La contaminación atmosférica no conoce fronteras, ya que tiene efectos a nivel local, regional y global. Varios países como Japón, China y México enfrentan, desde hace tiempo, problemas de calidad del aire en sus principales zonas metropolitanas (SEMARNAT, 2012).

Además de los efectos locales asociados a la mala calidad del aire en la salud de las personas, también se presentan efectos a nivel regional, como la afectación de los bosques y ecosistemas acuáticos debido a la lluvia ácida o, incluso, a nivel mundial, como el cambio climático y la reducción del espesor de la capa de ozono estratosférico, cuyos efectos más evidentes se manifiestan en Antártica (PNUMA, 2002).

Uno de los grupos de contaminantes que se encuentra en la atmósfera, son los metales pesados, los cuales pertenecen a un grupo de metaloides que se agrupan de acuerdo a sus características similares y que a lo largo de los años, han sido emitidos a la atmósfera por las diversas actividades antropogénicas, como es: la industria, la minería, la combustión de materiales fósiles, etc, encontrándose trazas de estos elementos en la atmósfera. Los metales pesados como el cadmio, plomo, cromo y mercurio son los principales contaminantes al medio ambiente, específicamente en áreas con alta presencia antropogénica (Nagajyoti P.C., *et al*; 2010)

Evaluar la presencia de metales pesados en los ecosistemas, permite conocer la capacidad bioindicativa de organismos como son las especies vegetativas, las cuales, tienen una función reguladora de los contaminantes. Los múltiples métodos de bioindicación en los que se utilizan líquenes, hongos, cortezas de árboles y hojas de las plantas superiores como biomarcadores, biosensores o en biopruebas, son empleados en las últimas décadas como herramienta rutinaria de diagnóstico, monitoreo y gestión en los sistemas ambientales (Anze, R. *et al.*, 2007, Madejón, P. 2003, Tomašević, M. *et al.*, 2004)

La presencia de estos elementos puede representar un riesgo significativo para la salud de los seres humanos, los animales, y plantas sobre todo, en altas concentraciones por encima de los bajos requerimientos biológicos (Gupta U. *et al.*, 1998).

Las determinaciones de diez metales pesados en cinco especies diferentes de vegetales del Parque Estatal General Lázaro Cárdenas, muestran la presencia de estos elementos, tanto absorbidos como adsorbidos en los vegetales, mostrando indirectamente la presencia de estas partículas en el aire, repercutiendo a corto, mediano o largo plazo a los seres vivos.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cuando se habla de contaminación del aire generalmente se refiere a los contaminantes generados por las actividades humanas (contaminantes antropogénicos). El uso de servicios como: la electricidad, medios de transporte, cocción de alimentos o de agua, y la fabricación de bienes de consumo como: alimentos, medicinas o productos de limpieza, etc., produce contaminantes al aire. Se puede considerar como contaminante a la sustancia que produce un efecto perjudicial en el ambiente; estos efectos pueden alterar tanto la salud de la población como la del medioambiente (INEEC, 2014).

A nivel internacional, el establecimiento de las Áreas Naturales Protegidas (ANP) es una de las estrategias seguidas para la conservación de la biodiversidad, de los ecosistemas y de los procesos ecológicos *in situ*. Se establecen tanto en ecosistemas naturales como urbanos y desempeñan un importante papel en la conservación de la biodiversidad y la provisión de los servicios ecosistémicos para satisfacer las necesidades de la población (Tlapa, 2011).

Por lo que respecta a la Ciudad de Puebla las emisiones de contaminantes atmosféricos empiezan a tener presencia significativa a partir de los años 60's y 70's, reflejándose en paralelo con su incremento demográfico, industrial y comercial, que en consecuencia demandan un mayor suministro de bienes y servicios, así como de transporte (SEMARNAT, SMRN, 2011).

El Parque Estatal General Lázaro Cárdenas "Flor del Bosque" se encuentra ubicado al norte de la ciudad de Puebla, en el municipio de Amozoc. En esta zona aledaña al Parque Estatal, se han instalado diferentes Parques y complejos Industriales, así como también, existe una gran afluencia vehicular, que se ha incrementado año con año, generándose una alta cantidad de fuentes móviles, fijas y de área. Aunado a este, en la ciudad de Puebla, los vientos dominantes se

comportan de forma que su orientación es la Nornoroeste durante la mañana y cambia su dirección en las tardes, identificándose como Sursuroeste. Los vientos dominantes se ven afectados por la presencia de la montañas que rodean el Valle de Puebla (el Popocatepetl, el Iztacihuatl y, principalmente, La Malinche). La polución afecta al crecimiento de las plantas y provoca la desaparición de muchas especies.

Un contaminante produce una alteración en la biología del organismo. El daño puede llegar a no producirse si los mecanismos de defensa y reacción del ser vivo pueden amortiguar dicha agresión, aunque esto supone siempre un coste energético para el organismo. Este gasto de energía puede repercutir negativamente en una parte o en todo el sistema, que al enfrentarse a otras agresiones ambientales (presencia de patógenos, cambios estacionales de temperatura, aporte hídrico, nutrientes, etc.), presenta un mayor debilitamiento y fragilidad.

El problema se agrava si el contaminante implica la desaparición total de una población de individuos. En este caso, el ecosistema sufre una pérdida en su diversidad y las relaciones internas existentes son modificadas. Como consecuencia de ello, el ecosistema puede simplificarse y perder estabilidad. El resultado final puede ser un ecosistema diferente, con otra composición de especies más simplificada, y con una menor resistencia ante nuevas perturbaciones.

La meteorología es un componente crítico de cualquier estudio de calidad del aire, ya que los niveles de contaminantes presentes en el aire pueden ser explicados en gran parte por las condiciones meteorológicas existentes, debido a que éstas determinan la velocidad de dispersión y el destino final que los contaminantes tendrá.

Por esta razón, es importante evaluar y determinar las concentraciones de metales pesados que han sido emitidos a la atmósfera, que debido a la dinámica y movimiento de los vientos, así como los factores meteorológicos han sido depositados en la vegetación del Parque Estatal General Lázaro Cárdenas.

## JUSTIFICACIÓN

El aire es un elemento esencial para la vida de todos los seres vivos que habitamos el planeta y está compuesto en porcentaje de volumen de aire seco, por los gases: nitrógeno en un 78%, oxígeno en un 21% y gases inertes en un 1%, que se mantienen virtualmente constantes en todo el planeta. Además de estos gases presentes en forma permanente, también están otros gases que varían en su concentración dependiendo de las características de los ecosistemas y de las condiciones climatológicas. Entre ellos, se encuentran el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), que puede variar entre 0 a 4 %; el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que tiene una concentración media global de 0.035%; y los gases llamados traza, que incluyen al metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>), material particulado (PM) y clorofluorocarbonos (CFC) que en conjunto poseen menos de 0.00017% por volumen de aire seco en la atmósfera. (INECC, 2011).

Numerosos estudios científicos han relacionado la contaminación del aire a una variedad de problemas de salud, incluyendo: la agravación de enfermedades respiratorias y cardiovasculares; disminución de la función pulmonar; aumento de la frecuencia y la gravedad de síntomas respiratorios tales como dificultad para respirar y tos; aumento de la susceptibilidad a las infecciones vías respiratorias; efectos sobre el sistema nervioso, incluyendo el cerebro, tales como la pérdida de IQ y el impacto en el aprendizaje, la memoria y el comportamiento; cáncer; y muerte prematura. Algunas personas sensibles parecen estar en mayor riesgo de efectos de salud relacionados con la contaminación del aire, por ejemplo, las personas con enfermedades cardíacas y pulmonares preexistentes como: insuficiencia cardíaca / enfermedad isquémica del corazón, asma, enfisema y bronquitis crónica, los diabéticos, adultos mayores y niños (EPA, 2010).

El estudio de metales pesados toma interés debido al impacto ambiental por su grado de contaminación, potencial tóxico y de ecotoxicidad, ya que los metales pesados han sido identificados como uno de los contaminantes más peligrosos en

los ecosistemas debido a su persistencia y elevada toxicidad, los de mayor importancia toxicológica y ecotoxicológica son: Hg, As, Cr, Pb, Cd, Ni y Zn ya que para la mayoría de los organismos la exposición por encima de una concentración umbral puede ser perniciosa (Martínez-Tabche, 2000), de acuerdo como se muestra en la siguiente tabla 1:

**Tabla 1.** Niveles críticos de toxicidad en vegetales.

Elemento	Nivel critico de toxicidad (mg/kg dw) <sup>a</sup>
As	<2-80
Cd	6-10
Co	0.4-several
Cu	20-30
Cr	0.2-1
Fe	70-300 <sup>c</sup>
Pb	0.6-28
Mn	200-3 500
Hg	0.001-5 <sup>b</sup>
Ni	10-50
Se	3-100
Tl	20
Zn	100-300

<sup>a</sup> Fuente: Kramer (2010), <sup>b</sup> Fuente: Patra *et al.*; (2004), <sup>c</sup> Fuente Wells, *et al.*; (1993).

Varios estudios realizados en los últimos años en Europa y especialmente en los EE.UU. mostraron que en términos de salud, las partículas finas en zonas urbanas representan un indicador en la calidad del aire (Shroender W.H 1987, Janssen N.A.H. *et al.*, 1997, Chiron M. *et al.*, 1997).

Numerosos estudios realizados, atribuyen estas partículas a una alta responsabilidad a la coocurrencia de una amplia gama de efectos biológicos sobre la salud (Dockery D.W. *et al.*, 1993. Pope C.A. *et al.*, 1995)

## **OBJETIVO GENERAL:**

- Determinar la concentración de metales pesados adsorbidos y absorbidos mediante Absorción Atómica en seis vegetales del Parque Estatal General Lázaro Cárdenas “Flor del Bosque,” del Estado de Puebla.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Establecer los metales pesados, que por su carácter tóxico a la salud humana y a los ecosistemas han sido emitidos por las diferentes fuentes de contaminación, a través del tiempo.
- Seleccionar las especies de vegetales de mayor abundancia del Parque Estatal General Lázaro Cárdenas “Flor del Bosque”, para realizar un estudio representativo.
- Cuantificar la concentración de metales pesados absorbidos y adsorbidos en el follaje expuesto de las distintas especies de vegetales seleccionadas dentro del Parque Estatal General Lázaro Cárdenas “Flor del Bosque”.

## **HIPÓTESIS**

- La vegetación que se encuentra en El Parque Estatal General Lázaro Cárdenas “Flor del Bosque”, contiene partículas de metales pesados adsorbidos y absorbidos en el follaje.

# Capítulo 1

---

# 1. ANTECEDENTES

## 1.1 Composición del Aire

El aire es una mezcla gaseosa en distinta proporción, los más importantes son: nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, vapor de agua y otros gases en menor proporción, como se muestra en la tabla 2. En la atmósfera también flotan diversas cantidades de partículas diminutas sólidas como polen, arena fina, cenizas volcánicas, bacterias. Todas ellas componen el polvo atmosférico.

**Tabla 2.** Componentes principales del aire.

<b>Componentes Principales</b>	<b>Volumen %</b>
Nitrógeno	78.03
Oxígeno	20.99
Argón	0.94
Dióxido de Carbono	0.035
Neón	0.0024
Otros gases inertes	0.0024
Hidrógeno	0.00005
<b>Componentes Menores</b>	<b>Volumen %</b>
Oxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	0.000025
Metano (CH <sub>4</sub> )	0.00015
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	0.0000001
Amoniaco (NH <sub>3</sub> )	0.0000001
Ozono	0.000002
Monóxido de carbón (CO)	0.00001

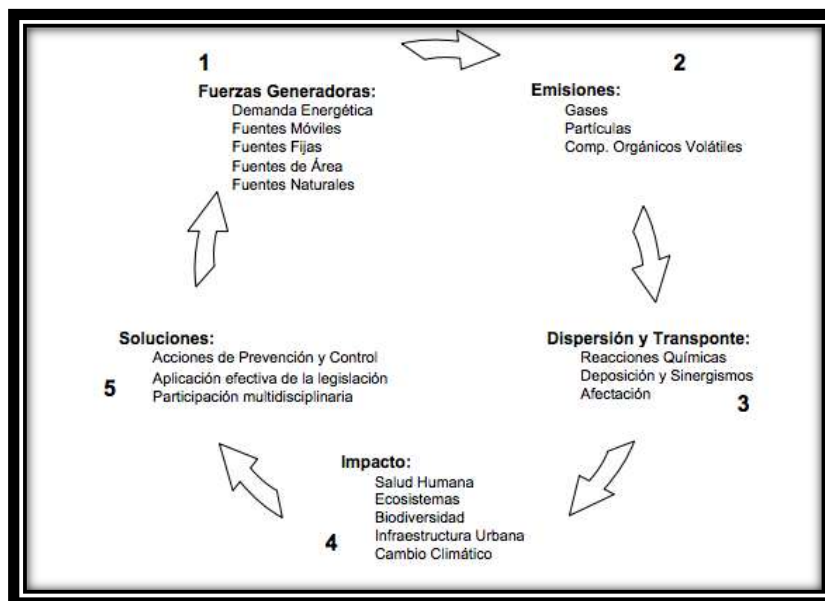
Fuente: <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-02a9.pdf>

## 1.2 Contaminación del Aire.

Existen diferentes definiciones sobre el concepto de contaminación de aire, ya que el aire es una mezcla de compuestos que varía en el tiempo y el espacio, sin embargo de manera general, se puede definir de la siguiente manera de acuerdo a la Asociación Francesa de Normalización AFNOR NFX43-001 (Chabrier de la Saulnière, 1969), establece que la contaminación atmosférica, es la presencia de impurezas en el aire que pueden provocar un perjuicio notable en la salud, la comodidad o los bienes humanos. Esta contaminación puede deberse a gases, vapores, partículas sólidas o líquidas e incluso radiaciones.

Un contaminante, es algo que al ser introducido en la atmósfera, ya sea, por actividades antropogénicas o de manera natural, reduce el contenido de oxígeno o cambia en forma significativa la composición del aire. (Ross R. 1974)

A continuación se presenta el ciclo de la contaminación del aire



**Figura 1.** Ciclo de contaminación del aire.

(Fuente: SEMARNAT, SMRN. 2011)

## **1.2.1 Fuentes de contaminación del aire**

Existen diferentes tipos de fuentes de contaminantes del aire, dependiendo de su origen, generalmente se clasifican en cuatro grupos: fuentes puntuales, fuentes móviles, fuentes aéreas y fuentes naturales.

### **1.2.1.1 Fuentes Puntuales**

Una fuente puntual se refiere a una fuente en un punto fijo o estacionario, existen cientos de miles de fuentes estacionarias de contaminación del aire, como las plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo, fábricas, etc. Según la industria o proceso específico, las fuentes estacionarias pueden emitir uno o varios contaminantes criterio del aire además de muchos otros contaminantes peligrosos.

Una de las mayores preocupaciones en todo el mundo, es la emisión de contaminantes como el bióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y material particulado (PM) en la generación de energía eléctrica, pues su proceso involucra la combustión de grandes cantidades de combustibles fósiles. Las industrias químicas, entre otras, son responsables de emitir muchos contaminantes peligrosos como los compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Muchas de estas fuentes de contaminación a su vez, generan productos de consumo útiles, crean millones de empleos y prestan servicios y comodidades. Por lo que, no resulta viable clausurarlas, pero es urgente que implanten procesos para minimizar y manejar adecuadamente sus emisiones.

La tendencia internacional para disminuir las emisiones contaminantes de este tipo de fuentes, en gran medida está dirigida a la adopción de tecnologías más limpias a través del uso de energías renovables como la solar o eólica, etc. y la implantación de medidas cada vez más efectivas para elevar la eficiencia

energética de los procesos y mejorar la calidad de los combustibles, entre otras. Y en menor medida, la instalación de dispositivos de control y reducción de las emisiones de las chimeneas industriales, pues se ha visto que generan otro tipo de desechos contaminantes que han significado problemas ambientales (INECC 2014).

#### **1.2.1.2. Fuentes móviles**

Las fuentes móviles incluyen a las diversas formas de transporte tales como automóviles, camiones y aviones, etc (Flores, 1997).

La principal fuente móvil de contaminación del aire es el automóvil, pues produce grandes cantidades de monóxido de carbono (CO) y cantidades menores de óxidos de nitrógeno (NOx) y compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Los programas para el control de emisiones de automóviles, como el programa de verificación vehicular y el uso de convertidores catalíticos, han reducido considerablemente la cantidad de contaminantes del aire. Además, las normas que especifican la calidad del combustible de los automóviles y límites de emisiones de vehículos nuevos y en circulación, también han contribuido a una mayor eficiencia y menores emisiones. Por ejemplo, la transición de la gasolina con plomo a la gasolina sin plomo, ha reducido extraordinariamente la cantidad de plomo en el aire ambiental. Sin embargo, debido al creciente número de vehículos, los automóviles siguen siendo la principal fuente móvil de contaminación del aire (INECC, 2014).

#### **1.2.1.3. Fuentes de área**

Las fuentes de área se refiere a una serie de fuentes pequeñas, numerosas y dispersas, que no pueden ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes puntuales, pero que en conjunto pueden afectar la calidad del aire en una

región, por ejemplo: el uso de madera para cocinar o calentar la casa, las imprentas, las estaciones de servicio, las tintorerías, etc (INEEC, 2014).

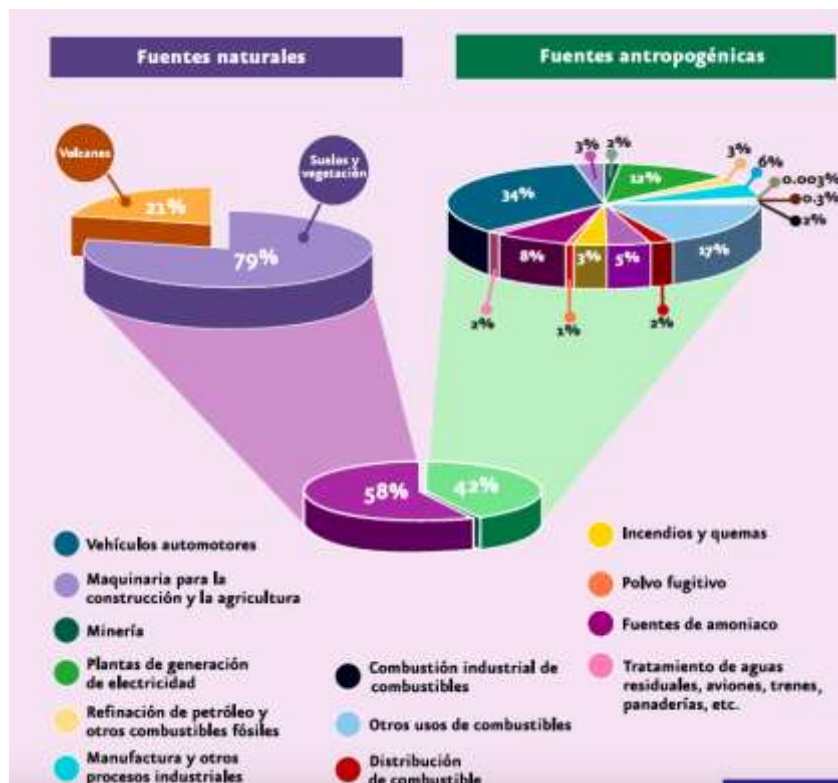
#### **1.2.1.4 Fuentes naturales**

Además de las actividades humanas, los fenómenos naturales y la vida animal y vegetal pueden jugar un papel importante en el problema de la contaminación del aire. Las principales fuentes naturales que son comúnmente consideradas en los inventarios atmosféricos son:

- a) Las erupciones volcánicas, una de las principales causas de contaminación, aporta a la atmósfera compuestos de azufre ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) y una gran cantidad de partículas que se diseminan por ella como consecuencia de la acción del viento.
- b) Los incendios forestales que se producen de forma natural y que emiten altas concentraciones de  $\text{CO}_2$ , óxidos de nitrógeno, humo, polvo y cenizas.
- c) Ciertas actividades de los seres vivos, como los procesos de respiración que incrementan la cantidad de  $\text{CO}_2$ ; los procesos de reproducción y floración en plantas anemófilas, como las gramíneas, los olivos y las arizónicas, las cuales producen pólenes y esporas que, al concentrarse en el aire, son la causa de alergias respiratorias, o finalmente la descomposición anaerobia (fermentaciones) de la materia orgánica, que genera metano.
- d) La descargas eléctricas generadas durante las tormentas y que dan lugar a la formación de óxidos de nitrógeno al oxidar el nitrógeno atmosférico.
- e) El mar que emite partículas salinas al aire.
- f) Los vientos fuertes o vendavales, que transfieren a otras zonas partículas de las regiones áridas (SEMARNAT, 2008).

## 1.2.2 Fuentes de contaminación en México

En México, excluyendo las fuentes naturales, la mayor parte de las emisiones de contaminantes provienen de los vehículos automotores, de la generación de electricidad y de la quema de combustibles empleados en las viviendas, en el sector agrícola y para el transporte. En la figura 2, se muestra los porcentajes, que contribuyen a la contaminación atmosférica.



**Figura 2.** Porcentaje de contaminación atmosférico.

(Fuente: SEMARNAT, 2012)

Estas cifras son las que se tienen registradas oficialmente, sin embargo, sabemos que nos encontramos en una sociedad dinámica, que cambiarán conforme a las necesidades de producción se tengan, así como al comportamiento de los fenómenos naturales del día a día.

Los contaminantes individuales se pueden clasificar sucintamente en cinco categorías, tres de ellas son específicas (monóxido de carbono, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno) y dos generales, hidrocarburos y partículas (los cuales pueden estar constituidos por decenas de compuestos y elementos diferentes (Ross R, 1974).

La mayoría del monóxido de carbono procede del motor de combustión interna, mientras la mayor parte de los óxidos de azufre, se originan en las plantas termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles y en la industria. La proporción mayor de óxidos de nitrógeno también procede del motor de combustión interna, siguiendo en importancia el quemado de combustibles. El mayor porcentaje de partículas provienen principalmente de la combustión de derivados del petróleo y de reacciones químicas de procesos industriales.

### **1.2.3 Clasificación de contaminantes de acuerdo a su origen**

Dentro del grupo de contaminantes, se pueden clasificar de acuerdo a su origen, como se detalla a continuación:

- a) Contaminantes primarios: Contaminante del aire emitido directamente por una fuente, los cuales, tenemos principalmente: partículas suspendidas (PS), dióxido de azufre ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de nitrógeno (NO), hidrocarburos (HC), clorofluorocarbonos (CFC), metales pesados y otras (plaguicidas, cetonas, ácidos, etc)
  
- b) Contaminante secundario: Contaminante que puede ser producido en la atmósfera por procesos físicos o químicos, a partir de contaminantes primarios u otras sustancias presentes como resultado de emisiones de fuentes estacionarias o móviles (Moragues, 2010). Entre los principales

contaminantes secundarios se encuentran: trióxido de Azufre ( $\text{SO}_3$ ), trióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_3$ ), Ácido Nítrico ( $\text{H}_2\text{NO}_3$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), nitratos de peroxiacetilo (PAN).

### **1.3 Metales Pesados**

El termino de “metales pesados” hacer referencia a elementos químicos caracterizados por su densidad mayor a la del agua ( $4 \text{ g/cm}^3$  hasta  $7 \text{ g/cm}^3$ ) y que son tóxicos para la salud humana a bajas concentraciones (mercurio, arsénico, cromo, talio, plomo, antimonio, aluminio) y tienen acumulación en la cadena trófica (EPA-US, 2006). En muchas ocasiones el término, solo se relaciona a las propiedades tóxicas de los elementos y no a su densidad. De igual forma, no todas las especies de un elemento presenta toxicidad, habiendo algunas especies inocuas y otras tóxicas (López D.M.G., 2009).

De hecho, algunos metales pesados, son esenciales para las plantas y animales, como son: Cu, Zn, Fe, Mn, Mo, Ni y Co, sin embargo, la absorción en exceso de éstos, produce efectos tóxicos en los seres vivos (Monni, *et al*; 2000, Blaylock and Huang 2000).

Dos de las principales funciones esenciales de los metales pesados en los seres vivos son: a) participan en reacciones redox y participan de forma directa en la parte integral de las enzimas.

#### **1.3.1 Cobre , Cu.**

El cobre es un elemento químico, de símbolo Cu, con número atómico 29; es uno de los metales de transición e importante metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia. El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos.

La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Los minerales oxidados son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita.

El cobre provoca problemas de corrosión en el hierro y acero galvanizado. En concentraciones mayores de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  tiñe textiles y accesorios de plomo. El cobre metálico es un excelente conductor, por lo que es ampliamente usado en la industria eléctrica. Se emplea en aleaciones con diversos metales (por ejemplo bronce). Varios compuestos orgánicos de cobre son usados como insecticidas, fungicidas, mordientes, pigmentos, catalizadores y como reactivos analíticos.

Dado que aún persiste la incertidumbre sobre la toxicidad del cobre para los seres humanos, el valor guía se considera provisional e igual a  $2 \text{ mg L}^{-1}$  (OMS, 1995).

En algunas personas, cuando la concentración en el agua para beber es superior a  $3 \text{ mg L}^{-1}$ , aparece una irritación gástrica aguda. Cuando la ingesta es prolongada y el mecanismo del cobre es defectuoso, puede provocar cirrosis hepática.

En vegetales, el exceso de Cu en los suelos, desempeña un efecto citotóxico, induciéndolas a aumentar el nivel de estrés, provocando lesiones en la planta. Esto lleva a la planta, a presentar retrasos en su crecimiento, estrés oxidativo y/o clorosis foliar (Lewis, *et al*; 2001).

### **1.3.2 Hierro, Fe.**

Elemento químico, cuyo símbolo es Fe, su número atómico es 26 y tiene un peso atómico 55.847. El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre (5%). Es un metal maleable, tenaz, de color gris plateado y magnético. Los cuatro isótopos estables, que se encuentran en la naturaleza, tienen las masas 54, 56, 57 y 58. Los dos minerales principales son la hematita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y la limonita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Las piritas,  $\text{FeS}_2$ , y la cromita,  $\text{Fe}(\text{CrO}_2)_2$ , se explotan como minerales de azufre y de cromo, respectivamente. El hierro se encuentra en

muchos otros minerales y está presente en las aguas freáticas y en la hemoglobina de la sangre.

El hierro puede ser encontrado en carne, productos integrales, patatas y vegetales. El cuerpo humano absorbe hierro de animales más rápido que el Hierro de las plantas. El hierro es una parte esencial de la hemoglobina: el agente colorante rojo de la sangre que transporta el oxígeno a través de nuestros cuerpos.

El hierro es un elemento esencial para las plantas, ya que presenta diversas actividades en los procesos biológicos, como es la fotosíntesis, desarrollo de cloroplastos y en la biosíntesis de la clorofila (Marschner, 1995).

Puede provocar conjuntivitis, coriorretinitis, y retinitis si contacta con los tejidos y permanece en ellos. La inhalación crónica de concentraciones excesivas de vapores o polvos de óxido de hierro puede resultar en el desarrollo de una neumoconiosis benigna, llamada siderosis, que es observable como un cambio en los rayos X. Ningún daño físico de la función pulmonar se ha asociado con la siderosis. La inhalación de concentraciones excesivas de óxido de hierro puede incrementar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón en trabajadores expuestos a carcinógenos pulmonares. LD50 (oral, rata) =30 mg kg<sup>-1</sup>. (LD50: Dosis Letal 50). Dosis individual de una sustancia que provoca la muerte del 50% de la población animal debido a la exposición a la sustancia por cualquier vía distinta a la inhalación. Normalmente expresada como miligramos o gramos de material por kilogramo de peso del animal.)

La aparición de la toxicidad de hierro en las plantas está relacionada con alto concentraciones de Fe<sup>2+</sup>, captado por las raíces y transportado a través de las hojas y la corriente de transpiración.

### 1.3.3 Níquel, Ni.

Símbolo Ni, número atómico 28, metal duro, blanco plateado, dúctil y maleable. La masa atómica del níquel presente en la naturaleza es 58.71.

El níquel tiene cinco isótopos naturales con masas atómicas de 58, 60, 61, 62, 64. También se han identificado siete isótopos radiactivos, con números de masa de 56, 57, 59, 63, 65, 66 y 67.

La mayor parte del níquel comercial se emplea en el acero inoxidable y otras aleaciones resistentes a la corrosión. También es importante en monedas como sustituto de la plata. El níquel finamente dividido se emplea como catalizador de hidrogenación.

El níquel es un elemento bastante abundante, constituye cerca de 0.008% de la corteza terrestre y 0.01% de las rocas ígneas. El níquel se presenta en pequeñas cantidades en plantas y animales, así como también está presente en pequeñas cantidades en el agua de mar, el petróleo y en la mayor parte del carbón. La concentración del  $\text{Ni}^{2+}$ , se han ido incrementado en ciertas áreas por las actividades humanas como: trabajos de minería, emisiones por fundiciones, quema de carbón y petróleo, aguas residuales, fertilizantes y pesticidas fosfatados, etc (Gimeno-García, *et al*; 1996).

El Comité Nacional de Concentraciones Máximas en el Lugar de Trabajo (NMWCC) de los Países Bajos propuso que una concentración de níquel en orina de  $40 \mu\text{g g}^{-1}$  creatinina o de níquel en suero de  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  (medidas en muestras obtenidas al final de una jornada laboral o de un turno) debían considerarse como límites de aviso para realizar una exploración adicional de los trabajadores expuestos al níquel metálico o a los compuestos solubles de níquel.

El exceso de  $\text{Ni}^{2+}$  en suelos, causa diversas alteraciones fisiológicas en las plantas, así como diversos síntomas tóxicos, como la clorosis y necrosis en

diferentes especies de plantas (Zornoza, *et al*; 1999, Pandey and Sharma 2002; Rahman *et al*; 2005). Las plantas que crecen en altas concentraciones de Ni<sup>2+</sup> contenidos en los suelos , muestran deterioro en el balance nutricional, teniendo como resultado un desorden en las funciones de la membrana celular (Ros, *et al*; 1992).

#### **1.3.4 Plomo, Pb**

El Plomo es un elemento químico, Pb es su símbolo, su número atómico es 82 y su peso atómico 207.19. El plomo es un metal pesado (densidad relativa, o gravedad específica, de 11.4 s 16°C), de color azulado, que se empaña para adquirir un color gris mate. Es flexible, inelástico, se funde con facilidad, se funde a 327.4°C (621.3°F) y hierve a 1725°C (3164°F). Las valencias químicas normales son 2 y 4. Es relativamente resistente al ataque de los ácidos sulfúrico y clorhídrico. Pero se disuelve con lentitud en ácido nítrico. El plomo es anfótero, ya que forma sales de plomo de los ácidos, así como sales metálicas del ácido plúmbico. El plomo forma muchas sales, óxidos y compuestos organometálicos.

El principal riesgo del plomo es su toxicidad. La intoxicación por plomo ha sido siempre una de las enfermedades profesionales más importantes. En la minería del plomo se produce una absorción considerable de este elemento a través del aparato digestivo; en consecuencia, el grado de riesgo en esta industria depende, en parte, de la solubilidad de los minerales que se manipulen. El sulfuro de plomo (PbS) en la galena es insoluble y su absorción por vía pulmonar es limitada; sin embargo, en el estómago, parte del sulfuro de plomo puede convertirse en cloruro de plomo ligeramente soluble y llegar a absorberse en cantidades moderadas.

La dosis letal de plomo absorbida es de unos 0.5 gramos. El riesgo de intoxicación crónica se considera a partir de 0.5 mgdía<sup>-1</sup>.

La presencia del plomo, específicamente en las plantas, ejerce efectos adversos sobre su morfología, su crecimiento, sus procesos fotosintéticos, así como

también, induce el estrés oxidativo incrementando la producción de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS), las cuales, producen daños celulares (Reddy, *et al*; 2005).

### 1.3.5 Mercurio, Hg.

Elemento químico, símbolo Hg, número atómico 80 y peso atómico 200.59. es un líquido blanco plateado a temperatura ambiente (punto de fusión  $-38.4^{\circ}\text{C}$  o  $-37.46^{\circ}\text{F}$ ); ebulle a  $357^{\circ}\text{C}$  ( $675.05^{\circ}\text{F}$ ) a presión atmosférica. Es un metal noble, soluble únicamente en soluciones oxidantes. El mercurio sólido es tan suave como el plomo. El metal y sus compuestos son muy tóxicos. El mercurio forma soluciones llamadas amalgamas con algunos metales (por ejemplo, oro, plata, platino, uranio, cobre, plomo, sodio y potasio).

En sus compuestos, el mercurio se encuentra en los estados de oxidación  $2^{+}$ ,  $1^{+}$  y más bajos; por ejemplo,  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  o  $\text{Hg}_3(\text{AsF}_6)_2$ . El Hg, es el único metal que existe en diferentes formas como:  $\text{HgS}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{HgO}$ , y metil-Hg.

A menudo los átomos de mercurio presentan dos enlaces covalentes; por ejemplo,  $\text{Cl-Hg-Cl}$  o  $\text{Cl-Hg-Hg-Cl}$ . Algunas sales de mercurio(II), por ejemplo,  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$  o  $\text{Hg}(\text{ClO}_4)_2$ , son muy solubles en agua y por lo general están disociadas. Las soluciones acuosas de estas sales reaccionan como ácidos fuertes a causa de la hidrólisis que ocurre. Han, *et al*; 2006, reporta que en suelos agrícolas, la forma iónica predominante es ( $\text{Hg}^{2+}$ ).

El mercurio metálico se usa en interruptores eléctricos como material líquido de contacto, como fluido de trabajo en bombas de difusión en técnicas de vacío, en la fabricación de rectificadores de vapor de mercurio, termómetros, barómetros, tacómetros y termostatos y en la manufactura de lámparas de vapor de mercurio. Se utiliza en amalgamas de plata para empastes de dientes. Los electrodos normales de calomel son importantes en electroquímica; se usan como electrodos

de referencia en la medición de potenciales, en titulaciones potenciométricas y en la celda normal de Weston.

La dosis letal de mercurio es aproximadamente de 3 a 30 g. Sería necesario más de 30,000 galones de agua contaminada con mercurio a 10 veces el estándar de USEPA para lograr una dosis de 3 g. El efecto en la salud por mercurio más probable es a dosis bajas por un período largo de tiempo o efecto “crónico”. Daños en el riñón es el efecto primario en la salud por mercurio.

En los vegetales, las altas concentraciones de  $Hg^{2+}$ , es fuertemente fototóxico a sus células, las cuales pueden inducir visibles lesiones y desordenes fisiológicos (Zhou, et al; 2007). Por ejemplo,  $Hg^{2+}$  puede solubilizarse en el agua del canal de las proteínas, provocando que las estomas se cierren en las hojas y obstruyan físicamente el flujo del agua en las plantas, interferencia en la actividad mitocondrial e induce el estrés oxidativo desencadenado por la generación de ROS.(Zhang and Tyerman, 1999).

### **1.3.6 Cromo, Cr.**

Elemento químico, símbolo Cr, número atómico 24, peso atómico 51.996; metal que es de color blanco plateado, duro y quebradizo. Sin embargo, es relativamente suave y dúctil cuando no está tensionado o cuando está muy puro. Sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados. El cromo elemental no se encuentra en la naturaleza. Su mineral más importante por abundancia es la cromita. Es de interés geoquímico el hecho de que se encuentre 0.47% de  $Cr_2O_3$  en el basalto de la Luna, proporción que es de 3-20 veces mayor que el mismo espécimen terrestre.

Sus propiedades mecánicas, incluyendo su dureza y la resistencia a la tensión, determinan la capacidad de utilización. El cromo tiene una capacidad relativa baja

de forjado, enrollamiento y propiedades de manejo. Sin embargo, cuando se encuentra absolutamente libre de oxígeno, hidrógeno, carbono y nitrógeno es muy dúctil y puede ser forjado y manejado. Es difícil de almacenarlo libre de estos elementos.

El cromo es capaz de formar compuestos con otros elementos en estados de oxidación (II), (III) y (VI).

La ingestión de sales de cromo desencadena un cuadro gastrointestinal agudo con vómitos sanguinolentos y diarrea abundante. La gravedad del cuadro puede provocar colapso.

Transcurrido este periodo inicial y con una dosis de  $10 \text{ mg kg}^{-1}$  o más de cromo hexavalente, sobreviene una lesión renal grave que conduce a la muerte por uremia. Es posible observar daño hepático y lesiones del sistema nervioso central. La dosis mortal para el ser humano es de 6 a 8 gramos.

Los compuestos de cromo son altamente tóxicos a los vegetales y determinantes en su crecimiento y desarrollo, esta considerado el mas tóxico en la plantas [ $100 \mu \text{ kg}^{-1}$  peso seco] (Davies, *et al*; 2002).

El estrés por Cr, es uno de los factores importantes que afectan la fotosíntesis en términos de fijación del  $\text{CO}_2$ , en el transporte de electrones, la fotofosforilación y la actividad enzimática (Clijsters Van Assche 1985).

### **1.3.7 Cadmio, Cd.**

Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil, de color blanco argentino con un ligero matiz azulado. Es más blando y maleable que el zinc, pero poco más duro que el estaño. Peso atómico

de 112.40 y densidad relativa de 8.65 a 20°C (68°F). Su punto de fusión de 320.9°C (610°F) y de ebullición de 765°C (1410°F) son inferiores a los del zinc.

El cadmio es miembro del grupo II B (zinc, cadmio y mercurio) en la tabla periódica, y presenta propiedades químicas intermedias entre las del zinc metálico en soluciones ácidas de sulfato. El cadmio es divalente en todos sus compuestos estables y su ion es incoloro.

El cadmio no se encuentra en estado libre en la naturaleza, y la greenockita (sulfuro de cadmio), único mineral de cadmio, no es una fuente comercial de metal. Casi todo el que se produce es obtenido como subproducto de la fundición y refinamiento de los minerales de zinc, los cuales por lo general contienen de 0.2 a 0.4%. Estados Unidos, Canadá, México, Australia, Bélgica, Luxemburgo y República de Corea son fuentes importantes, aunque no todos son productores.

En el pasado, un uso comercial importante del cadmio fue como cubierta electrodepositada sobre hierro o acero para protegerlos contra la corrosión. La segunda aplicación es en baterías de níquel-cadmio y la tercera como reactivo químico y pigmento. Se recurre a cantidades apreciables en aleaciones de bajo punto de fusión semejantes a las del metal de Wood, en rociadoras automáticas contra el fuego y en cantidad menor, en aleaciones de latón, soldaduras y cojinetes. Los compuestos de cadmio se emplean como estabilizadores de plásticos y en la producción de cadmio fosforado.

El Cd afecta diversos órganos y tejidos como son: riñón, corazón, huesos, testículos, placenta, sistema nervioso central y periférico (Nava y Méndez, 2011).

La dosis tóxica por vía digestiva, es en ingestas de hasta 100 mg van a producir síntomas gastrointestinales, mientras que a partir de los 350 mg se considera que es potencialmente mortal.

Por vía inhalatoria, concentraciones ambientales superiores a los 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  inducen la "fiebre de los metales", a partir de 500  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  aparece una neumonitis química y más allá de los 5.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se considera que es mortal.

El límite de cadmio (Cd) en suelos agrícolas es de 100  $\text{mg kg}^{-1}$  de suelo (Salt, *et al*; 1995). La plantas que crecen en suelos con altos niveles de Cd, muestran síntomas visibles de lesiones, reflejadas en términos de clorosis, inhibición de crecimiento, obscurecimiento de las puntas de la raíz y finalmente la muerte (Sanita di Toppi and Gabbrielli 1999). En general, el Cd, ha mostrado interferencia con el consumo, el transporte y el uso de diversos elementos (Ca, Mg, P and K) y agua a las plantas (Das, *et al*; 1997).

### **1.3.8 Zinc, Zn.**

Elemento químico de símbolo Zn, número atómico 30 y peso atómico 65.37. Es un metal maleable, dúctil y de color gris. Se conocen 15 isótopos, cinco de los cuales son estables y tienen masas atómicas de 64, 66, 67, 68 y 70. Cerca de la mitad del zinc común se encuentra como isótopo de masa atómica 64.

Los usos más importantes del zinc los constituyen las aleaciones y el recubrimiento protector de otros metales. El hierro o el acero recubiertos con zinc se denominan galvanizados, y esto puede hacerse por inmersión del artículo en zinc fundido (proceso de hot-dip), depositando zinc electrolíticamente sobre el artículo como un baño chapeado (electro galvanizado), exponiendo el artículo a zinc en polvo cerca de su punto de fusión (sherardizing) o rociándolo con zinc fundido (metalizado).

El zinc es uno de los elementos menos comunes; se estima que forma parte de la corteza terrestre en un 0.0005-0.02%. Ocupa el lugar 25 en orden de abundancia entre los elementos. Su principal mineral es la blenda, marmatita o esfalerita de zinc, ZnS. Es un elemento esencial para el desarrollo de muchas clases de organismos vegetales y animales. La deficiencia de zinc en la dieta humana

deteriora el crecimiento y la madurez y produce también anemia. La insulina es una proteína que contiene zinc.

El zinc puro y recientemente pulido es de color blanco azulado, lustroso y moderadamente duro (2.5 en la escala de Mohs). El aire húmedo provoca su empañamiento superficial, haciendo que tenga color gris. El zinc puro es dúctil y maleable pudiéndose enrollar y tensar, pero cantidades pequeñas de otros metales como contaminantes pueden volverlo quebradizo. Se funde a 420°C (788°F) y hierve a 907°C (1665°F). Su densidad es 7.13 veces mayor que la del agua, ya que un pie cúbico (0.028m<sup>3</sup>) pesa 445 lb (200 kg).

Este elemento, es un micronutriente esencial que beneficia en diversos procesos metabólicos de las plantas. La fitotoxicidad del Zn, es indicado por la disminución del crecimiento y desarrollo, en su metabolismo y una inducción de daños oxidativos en varias especies de plantas (Cakmak and Marshner, 1993).

### **1.3.9 Manganeso, Mn.**

Elemento químico, símbolo Mn, de número atómico 25 y peso atómico 54.938. Es uno de los metales de transición del primer periodo largo de la tabla periódica; se encuentra entre el cromo y el hierro. Tiene propiedades en común con ambos metales. Aunque poco conocido o usado en su forma pura, reviste gran importancia práctica en la fabricación de acero.

En sus muchos compuestos, presenta estados de oxidación de 1<sup>+</sup> hasta de 7<sup>+</sup>. Los estados de oxidación más comunes son 2<sup>+</sup>, 4<sup>+</sup> y 7<sup>+</sup>. Todos los compuestos, excepto los que contienen Mn II, son intensamente coloridos. Por ejemplo, el permanganato de potasio, K<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub>, produce soluciones acuosas que son de color rojo púrpura; el manganato de potasio, K<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub>, produce soluciones de color verde intenso.

Los compuestos de manganeso tienen muchas aplicaciones en la industria. El dióxido de manganeso se usa como un agente desecante o catalizador en pinturas y barnices y como decolorante en la fabricación de vidrio y en pilas secas. El permanganato de potasio se emplea como blanqueador para decoloración de aceites y como un agente oxidante en química analítica y preparativa.

En las plantas, la acumulación excesiva de Mn en la hojas, provoca una reducción de la tasa fotosintética (Kitao, et al; 1997). Manchas marrones necróticas en hojas, pecíolos y tallos es un síntoma común de toxicidad de Mn (Wu, 1994). Así como también, se ha reportado, la inhibición de síntesis de clorofila por bloqueo en procesos relativos a Fe.

#### **1.3.10 Arsénico, As.**

Elemento químico, cuyo símbolo es As y su número atómico, 33. El arsénico se encuentra distribuido ampliamente en la naturaleza (cerca de  $5 \times 10^{-4}\%$  de la corteza terrestre). Es uno de los 22 elementos conocidos que se componen de un solo nucleído estable,  $^{75}_{33}\text{As}$ ; el peso atómico es de 74.922.

Al arsénico se le encuentra natural como mineral de cobalto, aunque por lo general está en la superficie de las rocas combinado con azufre o metales como Mn, Fe, Co, Ni, Ag o Sn.

El arsénico elemental tiene pocos usos. Es uno de los pocos minerales disponibles con un 99.9999+ % de pureza. En el estado sólido se ha empleado ampliamente en los materiales láser GaAs y como agente acelerador en la manufactura de varios aparatos. El óxido de arsénico se utiliza en la elaboración de vidrio. Los sulfuros de arsénico se usan como pigmentos y en juegos pirotécnicos. El arseniato de hidrógeno se emplea en medicina, así como otros compuestos de arsénico. La mayor parte de la aplicación medicinal de los compuestos de arsénico se basa en su naturaleza tóxica.

## **1.4 Biodisponibilidad de los metales pesados**

En el suelo los metales se asocian con distintas fracciones: (1) en solución, como iones de metal libre y complejos metálicos solubles, (2) adsorbida en los sitios de intercambio de los constituyentes inorgánicos del suelo, (3) ligada a la materia orgánica, (4) precipitadas como óxidos, hidróxidos y carbonatos, y (5) residual en las estructuras de los minerales silicatados (Rieuwerts *et al.*, 1998; Lassat, 2001, Reichaman, 2002; Basta, 2004). Para que se produzca extracción de los metales por la planta, éstos deben estar biodisponibles. Se entiende por *biodisponibilidad* la fracción de metales pesados que está disponible para la absorción por las plantas. La biodisponibilidad depende de la solubilidad y movilidad de los metales en la solución suelo. Sólo los metales asociados con las fracciones 1 y 2 están realmente disponibles para que las plantas los extraigan, por ello, la concentración total de los metales en el suelo no refleja necesariamente los niveles de metales biodisponibles. (Elliot y Shields, 1988; Sims y Kline, 1991; Ma y Rao, 1997; Rieuwerts *et al.*, 1998; Lassat, 2001; Silveira *et al.*, 2003).

## **1.5 Especies de vegetales a estudiar**

Las especies de vegetales que se seleccionaron para su determinación, principalmente son las especies más representativas por el número de vegetales que prevalecen en el Parque Estatal General Lázaro Cárdenas “Flor del Bosque”, las cuales, por la ubicación geográfica de dicho Parque, han permitido su adaptación y crecimiento a las condiciones particulares que allí se presentan. Las especies son: *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus camuldalunsis*, *Juniperus deppeana*, *Juniperus fláccida*, *Quercus rugosa*, *Quercus mexicana*

## **1.6 Principales características de los vegetales a estudiar**

### **1.6.1 *Eucalyptus globulus***

*Nombre científico o latino: Eucalyptus globulus*

*Nombre común o vulgar:* Eucalipto blanco, Gomero azul de Tasmania, Árbol de la fiebre

*Familia:* Myrtaceae (Mirtáceas).

*Origen:*

- Sur de Australia (Victoria), Tasmania y las islas del Estrecho de Bass.
- Árbol perennifolio.
- Su corteza es lisa, verde y blanca y caediza en láminas o tiras.
- Las hojas adultas son de color verde más oscuro, lanceoladas.
- Su fruto es una cápsula que adquiere el aspecto de pequeñas campanillas.

*Estilos:* Los más apropiados son aquellos que permiten su crecimiento recto formal, informal o levemente inclinado, excepto el estilo escoba.

*Luz:* Abundante luz, prefiriendo pleno sol.

*Temperaturas:* Siempre ha de situarse en el exterior, tanto en verano como en invierno.

Resiste las heladas, pero si son bruscas o repetitivas, el *Eucalyptus globulus* resulta mucho más sensible, soportando difícilmente más de 8 o 10 días de helada al año.

*Humedad:* Precisa una humedad media. Bastará con pulverizar agua de vez en cuando.

*Substratos:* El eucalipto no se desarrolla bien en suelos excesivamente calcáreos (alcalinos), encharcados o con mal drenaje.

*Riego:* Regar con moderación y dejando secar someramente entre riego y riego, incrementando en las épocas de mayor calor y en las de brotación de la planta.

*Abonado:* Abonar con moderación en el periodo vegetativo de la planta, es decir, en primavera y principios del verano. Muy poco abono en las épocas de descanso de otoño e invierno.



*Multiplificación:* Por semillas.

Las semillas deberán sembrarse en primavera o, preferiblemente, en otoño, aunque también se puede a mediados o finales del verano.

Se recolectan los frutos sin abrir, pero ya maduros, durante los meses de verano, incluso recogiendo del suelo sin abrir.

Se sitúan al lado de una fuente de calor, en el caso de encontrarnos en la época de siembra. Al notar el calor, el fruto se abre como las piñas de los pinos. Se sacuden y salen las semillas. Se siembran y germinarán fácilmente.

*Enfermedades:* El Mal azul es una enfermedad que se caracteriza por la aparición de una mancha verde-azulada en el tallo, acompañada habitualmente por hojas secas en zonas próximas.

Ataca a plantas jóvenes que aún no han cambiado la hoja juvenil y a rebrotes, de ahí que no sea tan problemático como en el caso de afectar a árboles ya trabajados y maduros.

Si no hace nada el fungicida, se puede cortar por debajo de la zona afectada y rebrotará (Infojardín, 2012).

### **1.6.2 *Eucalyptus camaldulensis***

*Nombre científico o latino:* *Eucalyptus camaldulensis*.

*Sinónimos:* *Eucalyptus rostrata*.

*Nombre común o vulgar:* Gomero rojo, Eucalipto rojo.

*Familia:* Myrtaceae.

*Origen:* Australia.



*Árbol perennifolio.* Altura de 30-40 m. Diámetro 12-15 m. (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2012).

Corteza lisa, desprendiéndose en placas alargadas de tonos pardo-grisáceos.

Las hojas son lanceoladas, delgadas y de color verde azulado o verde.

Flores en umbelas, hermafroditas, actinomorfas. Corola con pétalos soldados formando un opérculo.

Por su gran crecimiento y su agresividad, no es árbol recomendado para jardines y, mucho menos cerca de edificaciones. Necesita grandes espacios para poder desarrollarse con libertad.

En la Península Ibérica se ha repoblado algunas zonas con ellos, provocando empobrecimiento del suelo.

Hojas de propiedades balsámicas y antisépticas.

Se usa para la fabricación de licores.

Extremadamente rústico y de muy rápido crecimiento. Resistente a la sequía y suelos pobres.

Soporta la presencia de cal en el suelo hasta cierto punto, pues su exceso le produce clorosis.

Se adapta a climas marítimos.

Requieren protección frente a los vientos fríos y suelos fértiles.

En general no es necesario podarlo.

Vigilar los barrenillos, realizando tratamientos en árboles jóvenes; en los adultos se raspa la corteza y recoge y quema los residuos.

Las cápsulas maduras se obtienen poco antes de que estén listas para abrir. En la mayoría de las especies no se presentan condiciones de letargo y la semilla puede germinar inmediatamente después de su maduración.

El eucalipto es difícil de propagar por estacas.

### 1.6.3 *Juniperus deppeana*

*Nombre común:* Táscate- Coahuila; cedro, sabino; aborí, aorí, awarf, awarí, enebro, kawarí, koarí (tarahumara), oyorique ; cedro chino – Puebla, Tlaxcala – Hidalgo.

*Origen:* Nativa de Estados Unidos de América y de México.

*Forma biológica:* Arbusto o árbol pequeño de 3 a 10 m (hasta 20 m) de altura, con un diámetro normal de 20 a 50 cm y hasta más de 1 m; esta especie es de lento crecimiento.



*Hojas:* perennifolia: *Flores:* florece de febrero a marzo con polinización anemófila  
*Frutos:* fructifica de agosto a octubre, a partir del segundo año de edad.

*Distribución en México:* Se encuentra en Aguascalientes, Coahuila, Chiapas, Chihuahua, D.F., Durango, Hidalgo, Jalisco, Edo. de México, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Puebla, Querétaro, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz, Zacatecas y Oaxaca.

*Asociación vegetal:* Bosque de *Quercus*, bosque de coníferas, pastizal.

*Requerimientos Ambientales:* Altitud (msnm) Especie dominante en los bosques de junípero, entre 1,800 a 2,800 msnm; en bosques de pino-encino.

*Usos de los frutos, hojas y tronco de esta especie:* se extraen aceites esenciales aromáticos. La madera es un excelente combustible de alto valor calorífico, arde lento y produce poco humo y hollín. El fuste y las ramas se usan como leña y para la elaboración de carbón (CONABIO, 2014).

### 1.6.4 *Juniperus flaccida*

*Nombres comunes:* De acuerdo con (Martínez, 1963) a *Juniperus flaccida* se le conoce con los siguientes nombres comunes: Cedro liso en Puebla Tlascal en Hidalgo Enebro en Oaxaca y Guerrero Cedro blanco en el Estado de México

*Descripción botánica:* El *Juniperus flaccida* es un árbol o arbusto con una altura que puede variar de 50 cm hasta 15 metros (Martínez, 1963).

*Fuste:* El fuste de *Juniperus flaccida*, tiene 25 a 50 cm de diámetro.

*Corteza:* El *Juniperus flaccida* tiene una corteza de 7 a 12 mm de espesor, dividida en tiras longitudinales, fibrosas, con escamas angostas y flojas, de color moreno, rojizo oscuro, en ocasiones algo violáceo

*Semillas:* Las semillas que se encuentran en esta especie, son en número de 4 a 13, más comúnmente de 6 a 8 desiguales, de 5 a 6 mm de ancho, irregularmente triangulares y angulosas, de color amarillento a castaño claro. En algunos casos, debido a la acción de un insecto que las invade, se hipertrofian y en tal caso sobresalen del epicarpio

*Hojas* Las hojas de *Juniperus flaccida* son opuestas, largamente ovadas y acuminadas, o casi lanceoladas, rígidas, agudas y punzantes, de color verde claro brillante, 1 x 1.5-2 mm de largo, por casi uno de ancho, con el ápice córneo y frecuentemente extendido; el borde es irregular y lleva diente cillos desiguales y diminutos, dorso convexo o deprimido, con glándula angostamente elíptica o casi linear, a veces en el fondo de una depresión y no siempre visible en las hojas nuevas, pero muy patente en las adultas

*Ramas y/ ramillas:* En *Juniperus flaccida* las ramas son extendidas formando una copa redondeada e irregular.

*Altitud:* 1,900-2,900 msnm.



*Origen / Extensión:* originaria de los Estados Unidos de América y México. Distribuida desde el suroeste de los Estados Unidos (Arizona, Nuevo México) hasta Veracruz (México).

*Suelos:* somero con materia orgánica, arenoso profundo, rojizo arcilloso pedregoso, arenoso rocoso, suelo profundo de llanuras.

*Usos:* aromatizante (fruto, hoja, tronco). Se extraen aceites esenciales aromáticos.

*Combustible (madera):* Leña, carbón. Excelente combustible de alto valor calorífico, arde lento y produce poco humo y hollín.

*Construcción (madera):* Construcción rural.

*Forrajero (hoja):* Especie forrajera. Las hojas de este *Juniperus* son más palatables que las de otras especies.

*Maderable (madera):* Gran durabilidad. Muebles, postes, durmientes y fabricación de lápices. Destacan los cofres, ventanas, armarios, puertas y lambrines y los muebles de tipo colonial. Escasa disponibilidad de productos de escuadría de largas dimensiones. Presencia de defectos naturales como nudos, inclusión de corteza, grano espiralado y entrecruzado (Martínez, 1963).

### **1.6.5 *Quercus rugosa***

*Nombres comunes en México:* Encino de asta (Montes de San Antonio, Col.); Encino blanco (BC.); Encino cuero (El Largo, Chih.); Tulán, Roble (Chis.); Encino blanco liso (Dgo.); Encino quiebra hacha (Hgo.); Encino roble (Amealco, Gro.); Cuhó (l. Chinanteca, Oax.); Palo colorado (S.L.P.); T-nuyá (l. zapoteca, Oax.); Encino avellano, Tocuz (Mich.). Encino de miel, Encino roble, Encino prieto, Encino negro, Sharari (otras localidades).

*Forma:* árbol perennifolio o caducifolio, de 3 a 8 m; 10 a 20 m (hasta 30 m) de altura, con un diámetro a la altura del pecho de 30 a 50 cm (hasta 1.2 m). Pertenece al subgénero *Leucobalanus* (encino blanco).

*Copa / Hojas:* opa amplia y redondeada que proporciona una sombra densa. Hoja ovada a elípticoobovada o casi suborbicular, de 8 a 15 cm de largo, por 3 a 8 cm de ancho, al madurar suavemente engrosadas y rígidas, notablemente cóncavas por el envés, muy rugosas; haz lustroso y glabro, envés de color ámbar o rojizo (CONABIO, 2014).

*Tronco / Ramas:* el tronco tiene un diámetro de 10 a 80 cm o más; ramillas de 3 a 6 mm de grueso, tomentulosas al principio, después casi glabras color café grisáceo.

*Fruto(s):* Fruto anual solitario o en grupos de 2 a 3 largo-ovoides, miden de 15 a 25 mm de largo y 8 a 12 mm de diámetro, una tercera parte o la mitad de su largo incluida en la cúpula hemisférica y con escamas café-pubescentes.

*Distribución:* Está ampliamente distribuido en las regiones montañosas de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Veracruz a Chiapas, pero es particularmente abundante en el centro del país, donde forma extensos bosques. Altitud: (1,100) 1,800 a 2,800 (3.050) m.

*Origen / extensión:* Se extiende desde el oeste de Texas y sur de Arizona, Estados Unidos, hasta Chiapas, México.

*Usos:* Combustible (madera). Leña y carbón. Comestible (bebidas) [fruto (bellota)]. Elaboración de café con la bellota, se dice que la infusión ayuda a atenuar la embriaguez. Curtiente (corteza, hojas). La corteza y las agallas que se forman en las hojas tienen gran cantidad de taninos. Forrajero [hoja, fruto (bellota)]. La consume el ganado bovino, porcino y caprino. Implementos de trabajo (madera) Mangos de herramientas. Industrializable (madera). Elaboración de pulpa para papel. Maderable (madera). La madera es de buena calidad. Se usa para fabricar pilotes, durmientes, postes para cerca. Medicinal (corteza). La corteza tiene propiedades astringentes y es auxiliar para detener pequeñas

hemorragias y reducir inflamaciones de la piel, producidas por ortigas y picaduras de insectos, ayuda a apretar los dientes y tratar úlceras (CONABIO, 2014).

### **1.6.6 *Quercus mexicana***

Nombre común: encino amarillo, encino avellano, encino bermejo, encino blanco, encino naxis, encino prieto y roble.

Descripción de la especie:

Tamaño: árbol de 5 a 25 m de altura y con

Diámetro del tronco de 15 a 60 cm.

corteza: café clara a oscura y agrietada.

Hoja: obovada de 7.5 a 23 cm de largo por 3.5 a 13 cm de ancho; margen con 12 a 17 dientes a cada lado; 17 mm; haz verde lustroso y casi glabro; envés verde pálido tomentoso.

Fruto: anual, solitario; bellota ovoide de 17 a 21 mm de largo por 11 a 12 mm de diámetro.

Usos: leña, carbón, fabricación de postes, horcones y extracción de celulosa para papel.

Manejo: no hay programas de manejo para su aprovechamiento.

Mecanismo de propagación: por bellotas producidas de julio a agosto.

Estado de conservación: no amenazado

Hábitat: barrancas, en bosque de encino, pino-encino y bosque tropical caducifolio entre 600 a 2,800 msnm y sobre suelos pedregosos.

Distribución geográfica: desde México hasta Centroamérica; se distribuye en Colima, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Sinaloa y Zacatecas.

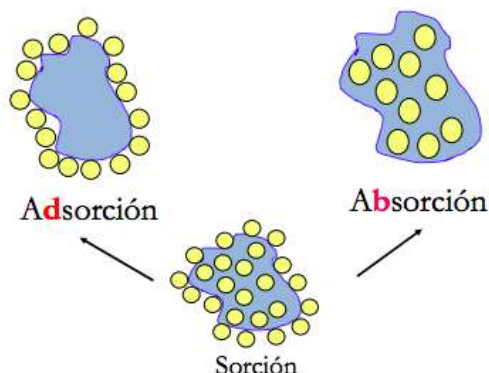
## 1.7 Absorción y Adsorción

A mediados del siglo XVIII se observó que las interfaces de un sistema, la concentración de la sustancia en la superficie es mayor que el volumen total. Sin considerar la magnitud y las características de las fuerzas que lo originan, a este fenómeno se le llamó sorción y a la sustancia en la que se efectúa dicho fenómeno sorbente. La sorción abarca un grupo de fenómenos, los más importantes son: absorción (quimisorción) y adsorción (fisisorción). La absorción se refiere al proceso que tiene lugar en el volumen del sorbente, a la penetración de una sustancia dentro del material absorbente según sus propiedades polares, de manera que una sustancia polar será más afín a un absorbente polar y una sustancia apolar lo será a un absorbente apolar y la adsorción se refiere al proceso que se lleva a cabo en la superficie del sorbente por lo que se basa en la retención del soluto a través de fuerzas físicas, normalmente de Van der Waals, asociadas con la superficie interna del sólido adsorbente.

La adsorción puede definirse como la tendencia de un componente del sistema a concentrarse en la interfase, donde la composición interfacial es diferente a las composiciones correspondientes al seno de las fases.

La adsorción se utiliza para eliminar de forma individual los componentes de una mezcla gaseosa o líquida. El componente a separar se liga de forma física o química a una superficie sólida, la cual recibe el nombre de adsorbente, y el componente que se adsorbe en él se denomina adsorbato. El fenómeno de adsorción fue estudiado por Langmuir quien consideraba que la superficie del adsorbente contiene un número fijo de lugares de adsorción y cada lugar puede adsorber una sola molécula (Aguilar, 1985; Margineda de Godos, 2004; Prieto, *et al.*, 2012).

En la figura 3, se muestra gráficamente los fenómenos de superficie.



**Figura 3.** Fenómenos de superficie.

Fuente: Viadez J.T, 2013.

Hay una clara diferencia entre el fenómeno de adsorción y el de absorción, en el segundo existe una penetración física de una fase en la otra; sin embargo es factible que ambos sucedan simultáneamente, y en este caso puede ser muy difícil separar los efectos de ambos fenómenos, inclusive un fenómeno puede afectar al otro.

**Tabla 3.** Diferencia entre fisisorción y quimisorción.

Propiedad	Fisisorción	Quimisorción
Interacciones Intermoleculares	Van der Waals o de larga distancia	Enlace químico (covalente)
$\Delta H_{\text{adsorción}}$	De $-20$ a $-40 \text{ kJ mol}^{-1}$	DE $-100$ a $-500 \text{ kJ mol}^{-1}$
Tipo de proceso	Reversible, no específico	Reversible a $T \gg$ .
$E_{\text{activación}}$	$\approx 0$	específico $\gg 0$
La desorción produce productos	Idénticos a los adsorbidos	Diferentes a los adsorbidos
Número de capas absorbidas	Multicapas	Monocapas
El aumento de presión produce	Condensación	No condensación
Estructura de las especies adsorbidas	Similar a las moléculas del gas adsorbidos	Diferente a las de las moléculas del gas absorbidos
Velocidad	Mayor	Menor

## 1.7 Descripción de la zona de estudio

El Parque Ecológico Recreativo “General. Lázaro Cárdenas” en el predio denominado Flor del Bosque, fue creado en base a la Declaratoria del 24 de diciembre d 1985, firmada por el entonces Gobernador del Estado de Puebla el C. Guillermo Jiménez Morales, la cual tuvo como objetivo la preservación y conservación del equilibrio ecológico, estableciendo parques naturales y medidas para controlar y evitar las erosión.

Posteriormente en 1994, el gobernador del Estado de Puebla, el C. Manuel Bartlett Díaz, presento la Declaratoria de reservas, destinos y usos de predios y áreas territoriales del programa regional de ordenamiento territorial de las zona Centro-Poniente del Estado de Puebla, en donde, se declararon nueve Reservas Ecológicas, entre ellas el Parque Ecológico Flor del Bosque “General Lázaro Cárdenas”.

El Parque Estatal, se encuentra ubicado al oriente de la ciudad de Puebla, en el Carril a San Bartolo S/N. Exhacienda San Bartolo Flor del Bosque, Colonia Casa Blanca, en el municipio de Amozoc de Mota, Puebla, con una superficie aproximada de 664 hectáreas.



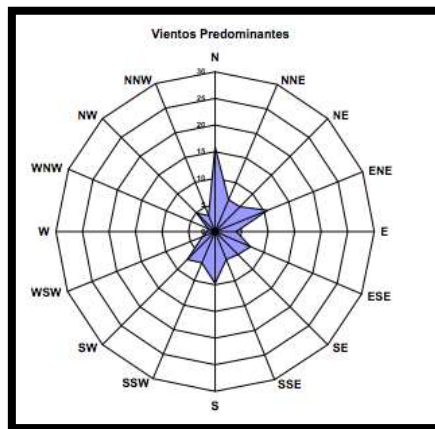
**Figura 4.** Parque Estatal Gra. Lázaro Cárdenas "Flor del Bosque".

## 1.8 Clima

La temperatura media anual del estado es de 17.5°C, la temperatura máxima promedio es de 28.5°C y se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 6.5°C durante el mes de enero. La precipitación media estatal es de 1270 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a octubre.

El clima para la región en la que se encuentra el Parque Estatal General Lázaro Cárdenas, es templado subhúmedo, de acuerdo a los reportes del INEGI (INEGI, 2011).

En general durante el periodo verano-otoño los vientos dominantes provienen del Norte y Noreste con velocidades promedio de 3.2 m/seg (11.52 Km/h). Mientras que en invierno y primavera los vientos dominantes son S y SW, con una velocidad promedio de 1.8 m seg<sup>-1</sup>. como se muestra en la figura 5: (SEMARNAT, SMRN. 2011)



**Figura 5.** Rosa de los vientos en la zona Metropolitana del Valle de Puebla.

Fuente: Estaciones REMA.

# Capítulo 2

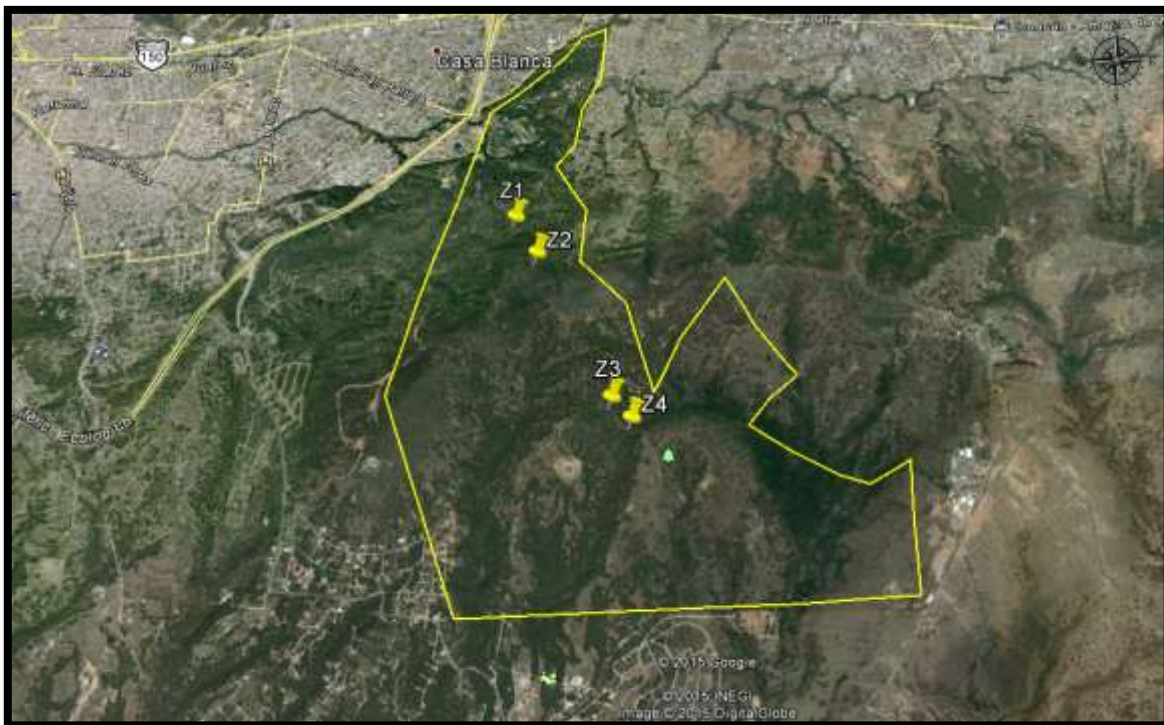
---

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Sitios de muestreo

Los sitios de muestreo se seleccionaron, de acuerdo a las zonas de mayor vulnerabilidad que se visualizaron físicamente dentro del Parque Estatal General Lázaro Cárdenas "Flor del Bosque", ya que debido a su ubicación, presentan mayor viabilidad de que las partículas sean arrastradas a dichas zonas, depositándose ya sea en el suelo o en el follaje de los vegetales presentes.

Por esta razón, el Parque Estatal, se zonifico en cuatro zonas de muestreo (zona 1, zona 2, zona3 y zona 4), como se muestra en la siguiente figura 6.



**Figura 6.** Zonas de muestreo de vegetales en el Parque Estatal Gral. Lázaro Cárdenas "Flor del Bosque".

## **2.2 Muestreo**

La recolección de las muestras de los diferentes vegetales en el Parque Ecológico Recreativo “General. Lázaro Cárdenas”, se realizó, por medio de la agrupación de zonas, las cuales, representaban diferentes puntos representativos de dicho Parque.

Este muestreo se realizó en dos periodos, el primero de los meses de Enero a Abril del 2012 y el segundo de los meses Julio a Septiembre de 2012, para poder cuantificar los metales pesados en dos diferentes épocas del año.

## **2.3 Pretratamiento de las muestras**

Las muestras recolectadas, fueron divididas en dos submuestras, las primeras fueron lavadas con la solución Extran de la marca Merk Millipore, así como un agente surfactante y agua destilada, y las segundas submuestras no se les realizó ningún lavado.

Una vez pretratadas las muestras de los vegetales, se llevaron a un horno a 120 °C por 2 horas para eliminar la mayor humedad posible, se trituran para aumentar la eficiencia de la digestión ácida. Una vez trituradas se pesa 0.5 g de vegetales y se colocaron en un sistema de reflujo soxhlet para llevarlos a digestiones acidas con 5ml de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), 5 ml de ácido clorhídrico (HCl) y 5 ml de ácido nítrico ( $HNO_3$ ) durante 2 horas. Posteriormente se filtraron, tomándose una alícuota de 2.5 ml para aforarse a 50 mL con agua tridestilada.

## **2.4 Determinación de concentración de metales pesados adsorbidos**

De la digestión de cada especie de vegetal, se determinaron los metales Fe, Cu, Cd, Mn, Zn Pb, y Cr, por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con atomización a la flama. Para ello se utilizó un Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) marca Perkin-Elmer, modelo AAnalyst-400, empleándose lámparas

de cátodo hueco para cada elemento metálico con llama de aire-acetileno. Se utilizaron curvas de calibración de 0.4,0.8, 1.2, 1.6 y 2.00 ppm.

Las concentraciones para As y Hg de cada muestra, fueron determinadas por la Técnica de espectrofotometría de absorción atómica con el uso de la técnica de generación de hidruros. En esta técnica, los metales solubles presentes en los digeridos son transformados en vapor que es arrastrado por una corriente de nitrógeno hasta una celda de cuarzo, donde es atravesada por un haz de luz proveniente de la lámpara de cátodo hueco de cada metal correspondiente, que produce líneas a las cuales absorben los átomos del analito. Para poder pasar las muestras por esta técnica es necesario tratar las muestras con una solución de Borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ) usando como blanco el ácido nítrico. Usando curvas de calibración de 100, 200, 300, 400, y 500  $\text{ng L}^{-1}$ . Las diluciones para las curvas de calibración se hicieron a partir de soluciones stock de 1000 ppm, haciendo las diluciones correspondientes. Todas las soluciones stock utilizados fueron estándares certificados, marca High-Purity Standard pureza 99%.

## **2.5 Determinación de concentración de metales pesados absorbidos.**

Las concentraciones de Fe, Cu, Cd, Mn, Zn, Pb y Cr en los digeridos de cada muestra fueron determinadas por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con atomización a la flama. Para ello se utilizó un Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA) marca Perkin-Elmer, modelo AAnalyst-400 y se emplearon lámparas de cátodo hueco para cada elemento metálico con llama de aire-acetileno. Se usaron curvas de calibración de 0.4,0.8, 1.2, 1.6 y 2.00 ppm.

Las concentraciones para As y Hg en los digeridos de cada muestra fueron determinadas por la Técnica de espectrofotometría de absorción atómica con el uso de la técnica de generación de hidruros. En esta técnica, los metales solubles presentes en los digeridos son transformados en vapor que es arrastrado por una

corriente de helio hasta una celda de cuarzo, donde es atravesada por un haz de luz proveniente de la lámpara de cátodo hueco de cada metal correspondiente, que produce líneas a las cuales absorben los átomos del analito. Para poder pasar las muestras por esta técnica es necesario tratar las muestras con una solución de borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ) usando como blanco el ácido nítrico. Usando curvas de calibración de 100, 200, 300, 400, y 500  $\text{ng L}^{-1}$ . Las diluciones para las curvas de calibración se hicieron a partir de soluciones stock de 1000 ppm, haciendo las diluciones correspondientes. Todas las soluciones stock utilizados fueron estándares certificados, marca High-Purity Standard pureza 99%.

El cálculo de la determinación de los metales pesados adsorbidos y absorbidos, se realizó, por medio de la diferencia presentada de la concentración del metal de la muestra no lavada de la muestra lavada.

## **2.6 Estadística aplicada a los resultados**

Una vez obtenidas las concentraciones de los metales pesados en los vegetales, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson, el cual, es un índice que mide el grado de relación que existe entre de dos variables. El valor del índice de correlación varía en el intervalo de -1 a 1.

Para este estudio, el coeficiente de correlación que presenta mayor relevancia es el que se encuentra  $> 0.6$ , donde existe una correlación positiva o en sentido directo, cuando aumenta una de ellas, la otra aumenta de la misma manera.

# Capítulo 3

---

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

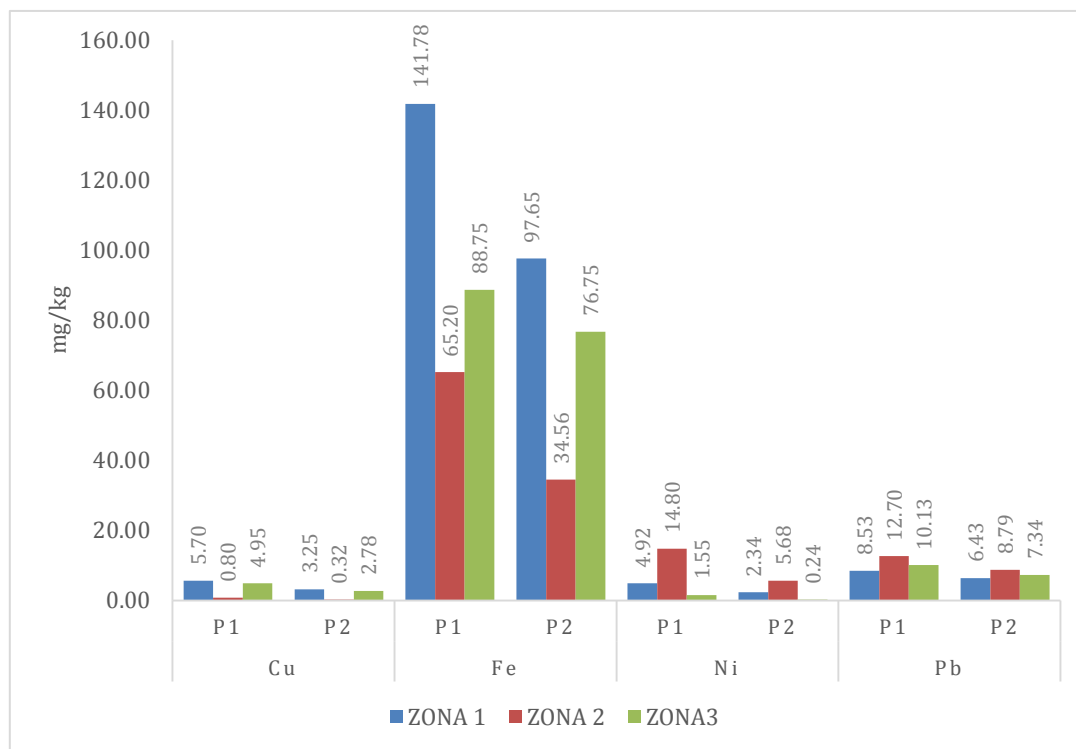
#### 3.1 Metales Adsorbidos

En la figura 7 se muestra los valores obtenidos en la cuantificación de cinco metales pesados adsorbidos sobre las muestras recolectadas en la especie vegetal *Eucalyptus globulus*, en el periodo 1, comprendido de los meses de Enero a Abril del 2012 (P1) y en el periodo 2, comprendido de los meses de Julio a Septiembre de 2012 (P2) de muestreo. Los valores obtenidos de Cu, en la zona 1 muestra el valor más alto en el P1 con  $5.70 \text{ mg kg}^{-1}$ , en contraste con la zona 2 donde se muestra el valor más bajo con  $0.32 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Con respecto al hierro, el valor más alto se muestra en la zona 1 con  $141.78 \text{ mg kg}^{-1}$ , y el valor más bajo en el P2 en la zona 2, con  $34.56 \text{ mg kg}^{-1}$ .

La mayor concentración de Ni, se presentó en la zona 2 en el periodo 1 de muestreo, mientras que el menor valor se presentó en la zona 3, en el P2 con un valor de  $0.24 \text{ mg kg}^{-1}$ .

El valor de Pb cuantificado más alto se muestro en la zona 2 en el P1, con  $12.70 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que el valor más bajo en dicho periodo, se presentó en la zona 1 con  $8.53 \text{ mg kg}^{-1}$ . En relación al P2, el valor más alto se presentó en la zona 2, en contraste con la zona 1, que fue la que presentó la menor concentración, con  $6.43 \text{ mg kg}^{-1}$ .

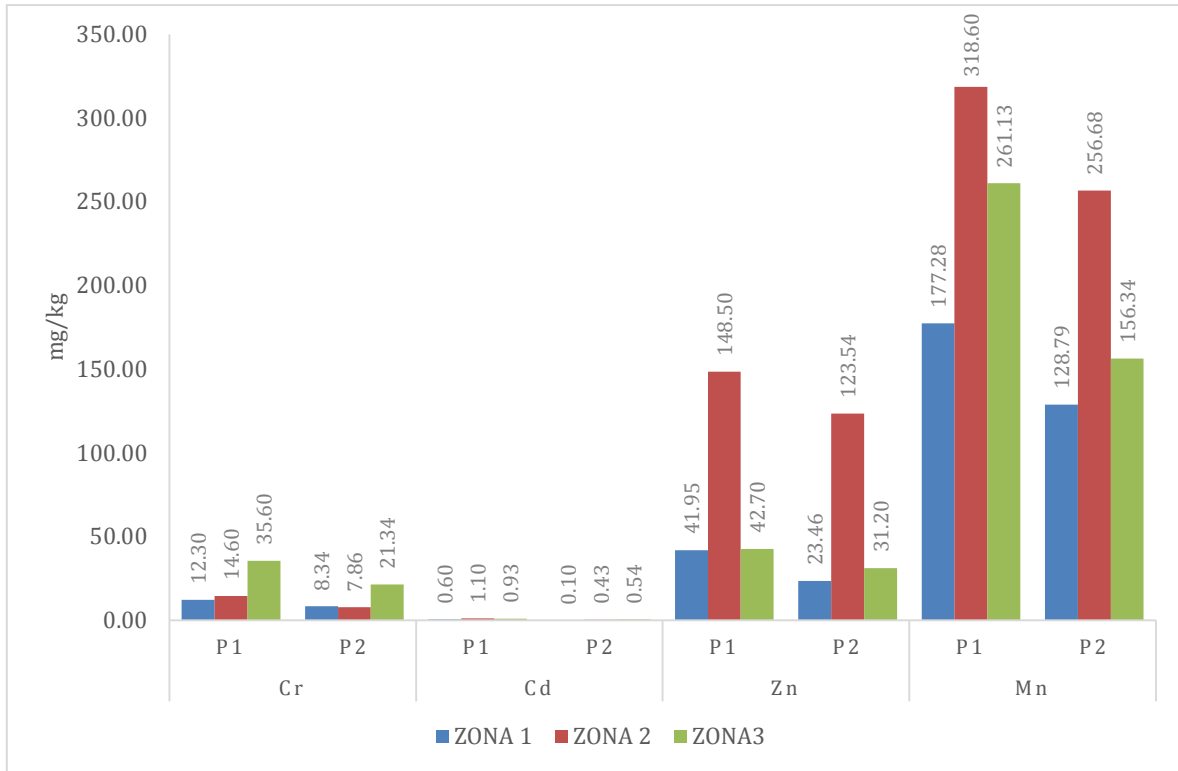


**Figura 7.** Metales adsorbidos en *Eucalyptus globulus*.

En la figura 8, el Cr muestra la mayor concentración en la zona 3 en el periodo 1 con  $35.60 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que el menor valor se cuantificó en el periodo 2 en la zona 2. Con respecto al Cd, la zona que presenta la más alta concentración es la 2, con  $1.10 \text{ mg kg}^{-1}$  en el P1, mientras que la zona 1, presentó la concentración más baja con  $0.10 \text{ mg kg}^{-1}$ , en el P2.

Con relación al Zn, en el P1, el valor mayor se cuantificó en la zona 2 con  $148.50 \text{ mg kg}^{-1}$  y el menor valor la zona 1 con  $41.95 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que en el P2, la zona 2 fue la de mayor presencia con  $123.54 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 1 la de menor con  $23.46 \text{ mg kg}^{-1}$ .

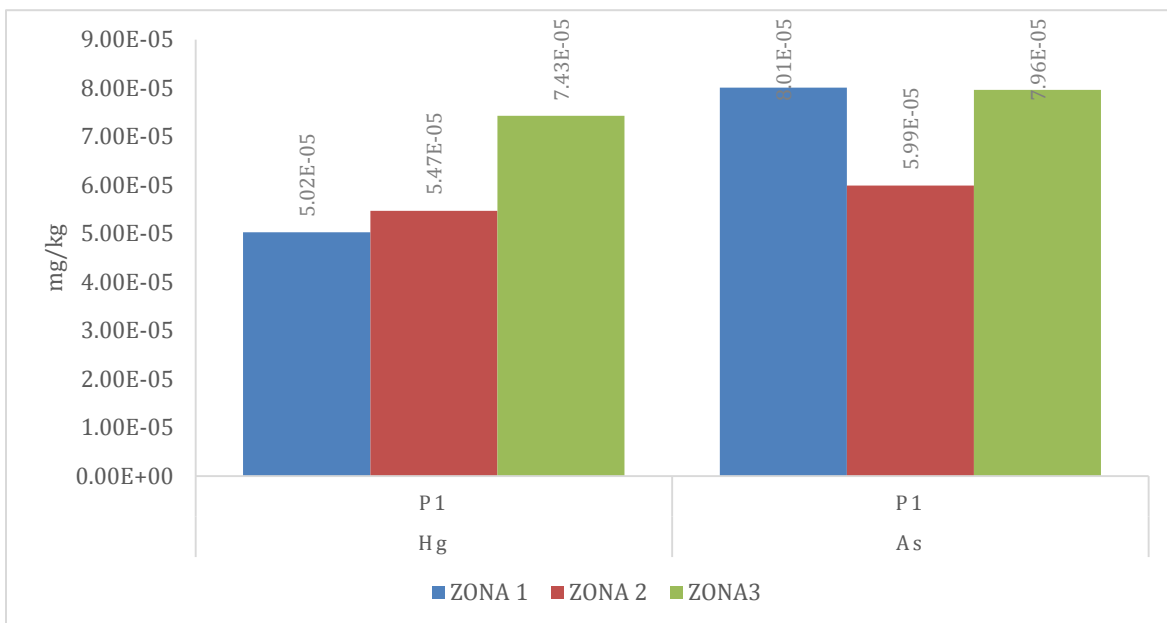
El Mn la mayor concentración se presentó en la zona 2, con  $318.60 \text{ mg kg}^{-1}$ , seguido de la zona 3 con  $261.13 \text{ mg kg}^{-1}$  y finalmente la zona 1 con  $177.28 \text{ mg kg}^{-1}$  en el P1, mientras que en el P2, la zona 2 tuvo la mayor concentración de  $256.68 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 1, la de menor concentración con  $128.79 \text{ mg kg}^{-1}$ .



**Figura 8.** Metales adsorbidos en *Eucalyptus globulus*.

Los valores más bajos en esta figura 9, se muestra en la cuantificación del Hg adsorbido, en donde la zona 3 muestra  $7.42 \times 10^{-5}$  mg kg<sup>-1</sup> en el P1, mientras que en el P2, no fue detectable en ninguna de las 3 zonas.

El metal pesado As, fue el de menor concentración que se presenta en esta figura 9, con  $8.00 \times 10^{-5}$  para la zona 1, seguido de la zona 3 con  $7.99 \times 10^{-5}$  mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 2 con  $5.99 \times 10^{-5}$  mg kg<sup>-1</sup>, en lo que respecta al P1, mientras que en el periodo 2 no fue detectable dicho metal en ninguna de las tres zonas muestreadas.



**Figura 9.** Hg y As adsorbido en *Eucalyptus globulus*.

De acuerdo a la estadística aplicada, los coeficientes de correlación más representativos de los metales pesados adsorbidos obtenidos para la especie *Eucalyptus globulus* en el P1, son los siguientes: Cu-Fe: 0.82, Cu-As: 0.99, Fe-As: 0.75, Ni-Pb: 0.80, Ni-Zn: 0.96, Ni-Mn: 0.63, Pb-Cd: 0.95, Pb-Zn: 0.92, Pb-Mn: 0.97 y Hg-Cr de 0.99.

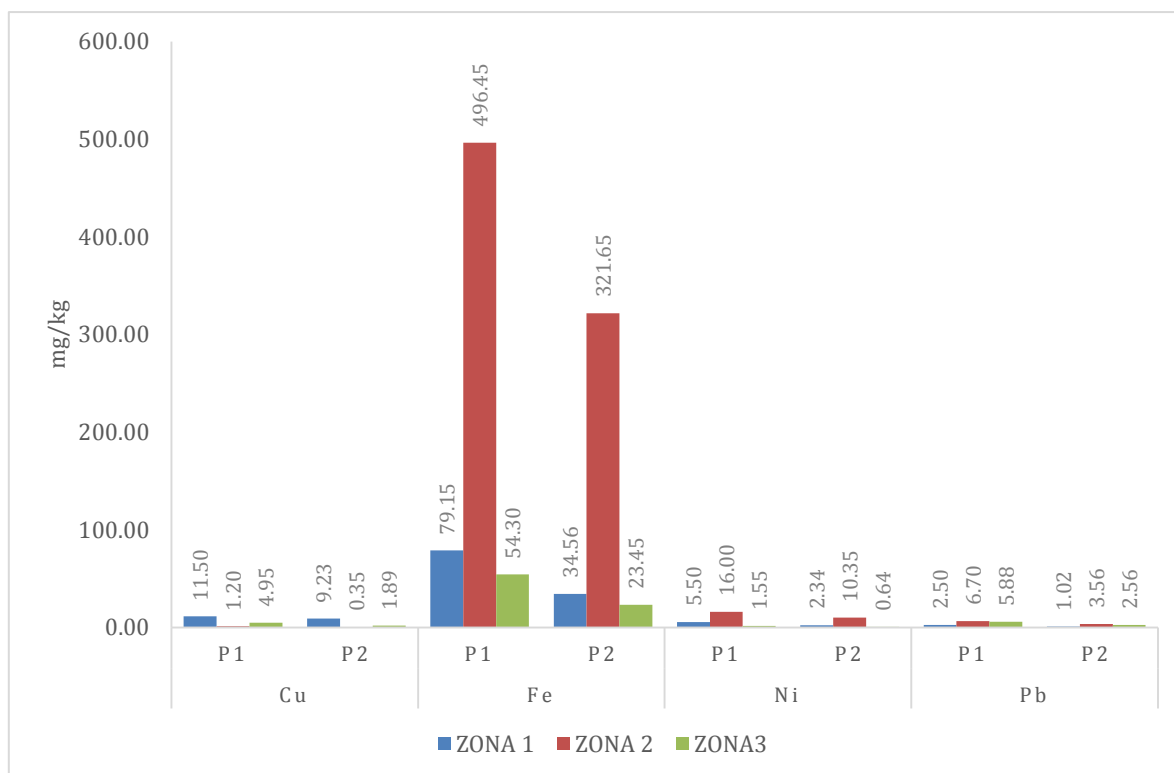
Para el P2, los coeficientes de correlación son: Cu-Fe: 0.98, Ni-Pb: 0.70, Ni-Zn: 0.89, Ni-Mn: 0.82, Pb-Cd: 0.62, Cr-Cd: 0.67 y finalmente para Zn-Mn: 0.99. Estos coeficientes de correlación mostrados ( $R^2$ ), son los que fueron únicamente  $>0.6$ , los cuales, muestran el grado de relación de dos variables, en este caso en particular, de dos metales pesados. Al ser positiva la correlación, existe un incremento positivo al estar presentes los dos metales pesados en una especie vegetal.

En la figura 10, se muestra los metales adsorbidos cuantificados en las muestras de *Eucalyptus camuldalensis*, en los dos periodos de muestreos realizados. El metal Cu, presentó el valor más alto en el P1 en la zona 1 con  $11.5 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que el menor valor fue en la zona 2 con  $1.20 \text{ mg kg}^{-1}$ , en el segundo

periodo, la zona 1 tuvo un valor de 9.23 mg kg<sup>-1</sup>, seguido por la zona 3 y 2 con 1.89 mg kg<sup>-1</sup> y 0.35 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

El Fe se presentó en mayor concentración en la zona 2 con 496.45 mg kg<sup>-1</sup> en el P1, mientras en el P2, disminuyó a una concentración de 321.65 mg kg<sup>-1</sup>. La menor concentración se presentó en el P2 en la zona 2, con 23.45 mg kg<sup>-1</sup>. Con respecto al Ni los valores oscilaron de 16.00 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 1 a 1.55 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 3 en el P1, mientras que en el P2, los valores oscilaron entre 10.32 de la zona 2 a 0.64 mg kg<sup>-1</sup>, de la zona 3.

En el caso del Pb, la concentración con mayor presencia fue en la zona 2 con 6.70 mg kg<sup>-1</sup> en el P1, mientras que el de menor presencia fue en la zona 3 con 2.56 mg kg<sup>-1</sup>, en el P2.



**Figura 10.** Metales adsorbidos en *Eucalyptus camuldalensis*.

En relación al Cr, la zona 3 fue la que presentó la concentración más alta con 43.50 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 2 con 34.20 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con

23.60 mg kg<sup>-1</sup>, en el P1, mientras que en el P2, la concentración más alta se presentó en la zona 3 con 32.10 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 2 y por último la zona 3 con 12.35 mg kg<sup>-1</sup>. Con respecto al Cd adsorbido, la mayor presencia se tuvo en la zona 2 en el P1 con 1.60 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de la zona 1 con 1.00 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 3 con 0.93 mg kg<sup>-1</sup>. Respecto al P2, la zona 2 fue la más alta, con 0.67 mg kg<sup>-1</sup>, seguida por la zona 1 y finalmente la de menor valor la zona 3 con 0.24 mg kg<sup>-1</sup>.

En base al zinc, la mayor presencia en el P1, se encontró en la zona 2, con 32.10 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que el valor más bajo en este mismo periodo fue en la zona 1, con 7.20 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona 2 fue la de mayor presencia con 26.63 mg kg<sup>-1</sup> y la de menor presencia fue la zona 1, con 5.76 mg kg<sup>-1</sup>.

Con respecto al Mn, las concentraciones en las zonas 1 y 2 del P1, presentaron valores muy similares, mientras que el mayor valor se presentó en la zona 3 con 238.48 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2 la zona 1 presentó la mayor concentración con 156.78 mg kg<sup>-1</sup>, tomando en cuenta, que en contraste con el P1, la zona 3 fue la que presentó el menor valor con 135.89 mg kg<sup>-1</sup>.

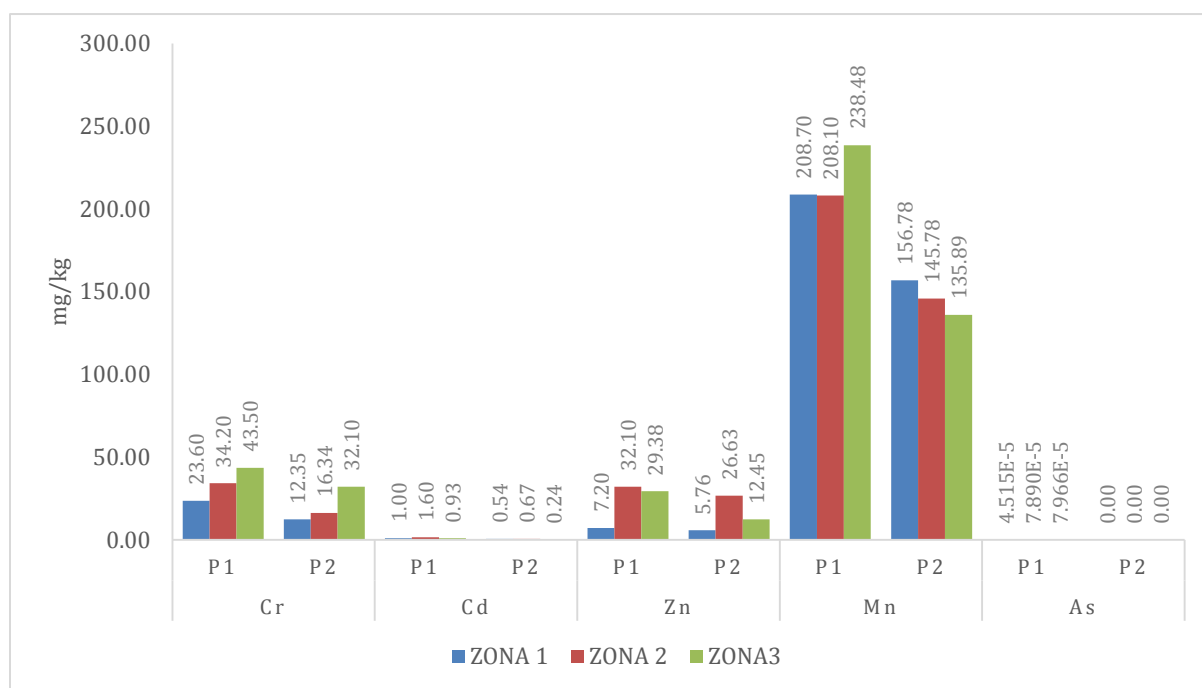
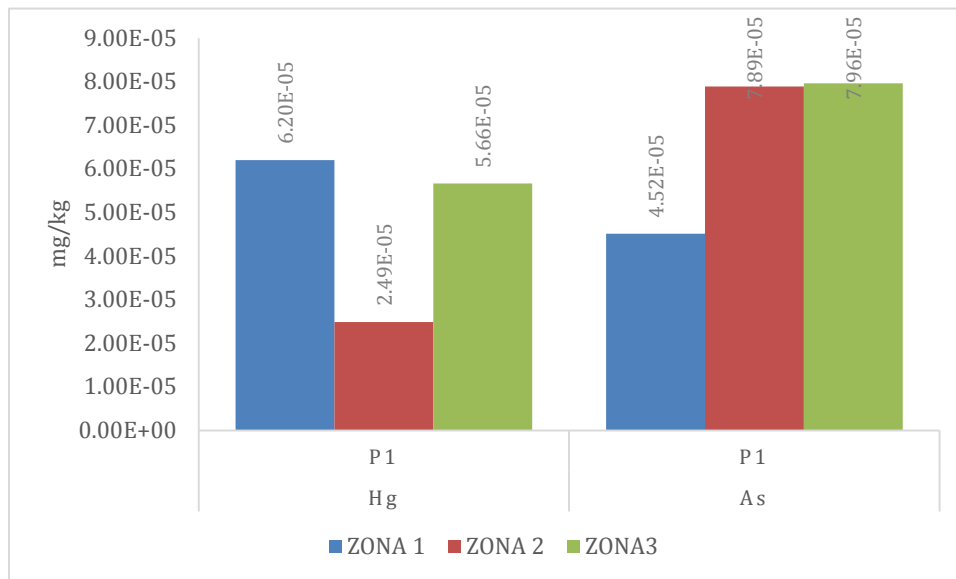


Figura 11. Metales adsorbidos en *Eucalyptus camuldalensis*.

En relación al Hg, se tuvo presencia únicamente en el P1 en las tres zonas, mostrándose el mayor valor en la zona 1, en contraste con la zona 2, que fue la de menor concentración.

Con respecto al metal Arsénico, en el P1, la zona 3 fue la que presentó el mayor valor con  $7.96 \times 10^{-5}$  mg kg<sup>-1</sup> y la de menor valor fue la zona 1 con  $4.51 \times 10^{-5}$  mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, en ninguna de las 3 zonas, fue detectable dicho metal.



**Figura 12.** Hg y As adsorbido en *Eucalyptus camuldaensis*.

Para la especie *Eucalyptus camuldaensis*, los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos, en el P1, son los siguientes: Cu-Hg: 0.85, Fe-Ni: 0.97, Fe-Pb: 0.61, Fe-Cu: 0.99, Ni-Cd: 0.98, Pb-Cr: 0.78, Pb-Zn: 0.99, Pb-As: 0.97, Cr-Zn: 0.83, Cr-Mn: 0.83, Cr-As: 0.89 y por último para Zn-As: 0.99.

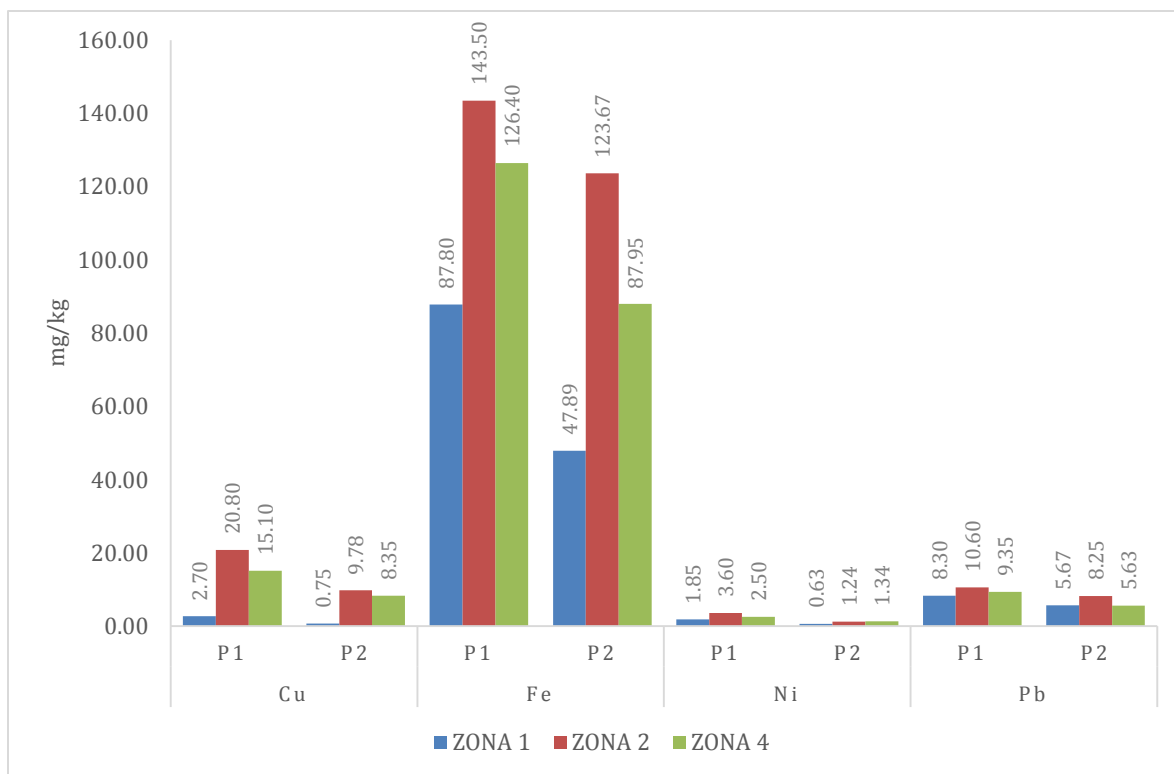
Para el segundo periodo (P2), los coeficientes de correlación son los siguientes: Cu-Mn: 0.79, Fe-Ni: 0.99, Fe-Pb: 0.77, Fe-Cd: 0.75, Fe-Zn: 0.93, Ni-Pb: 0.68, Ni-Cd: 0.83, Ni-Zn: 0.88, Pb-Zn: 0.94 y finalmente Cd-Mn: 0.65.

En la figura 13, se presenta los valores obtenidos adsorbidos en la especie vegetal *Jinipperus deppeana*, la cual se muestra, que el Cu, presentó la mayor concentración en la zona 2 con 20.80 mg kg<sup>-1</sup> y la menor concentración en la zona 1 con 2.70 mg kg<sup>-1</sup>, ambos, del P1, en relación al P2, se comportó de la misma manera con 9.78 y 0.75 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

En relación al Fe, la zona que presentó la mayor concentración en el P1, fue en la zona 2 con 143.50 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 4 y la zona 1, con 87.80 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona 2 tuvo un el valor más alto de 123.67 y la zona 1, el menor valor reportado, con 47.89 mg kg<sup>-1</sup>.

El elemento Ni, estuvo presente en la zona 2 con 3.60 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 4 con 2.50 y por último la zona 1 con 1.85 mg kg<sup>-1</sup>, en relación al P1. Los valores presentados en el P2, se invirtieron, ya que la zona 4 presentó la mayor concentración, con 1.34 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 2 y por último la zona 1 con 0.63 mg kg<sup>-1</sup>.

En el caso del Pb adsorbido, en el P1 la zona que tuvo la mayor presencia, es la zona 2 con 10.60 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que la de menor presencia fue la zona 1 con 8.30 mg kg<sup>-1</sup>. En lo que respecta al P2, la zona 2 fue el valor más alto, con 8.25 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 1 y finalmente la zona 4 con 5.63 mg kg<sup>-1</sup>.



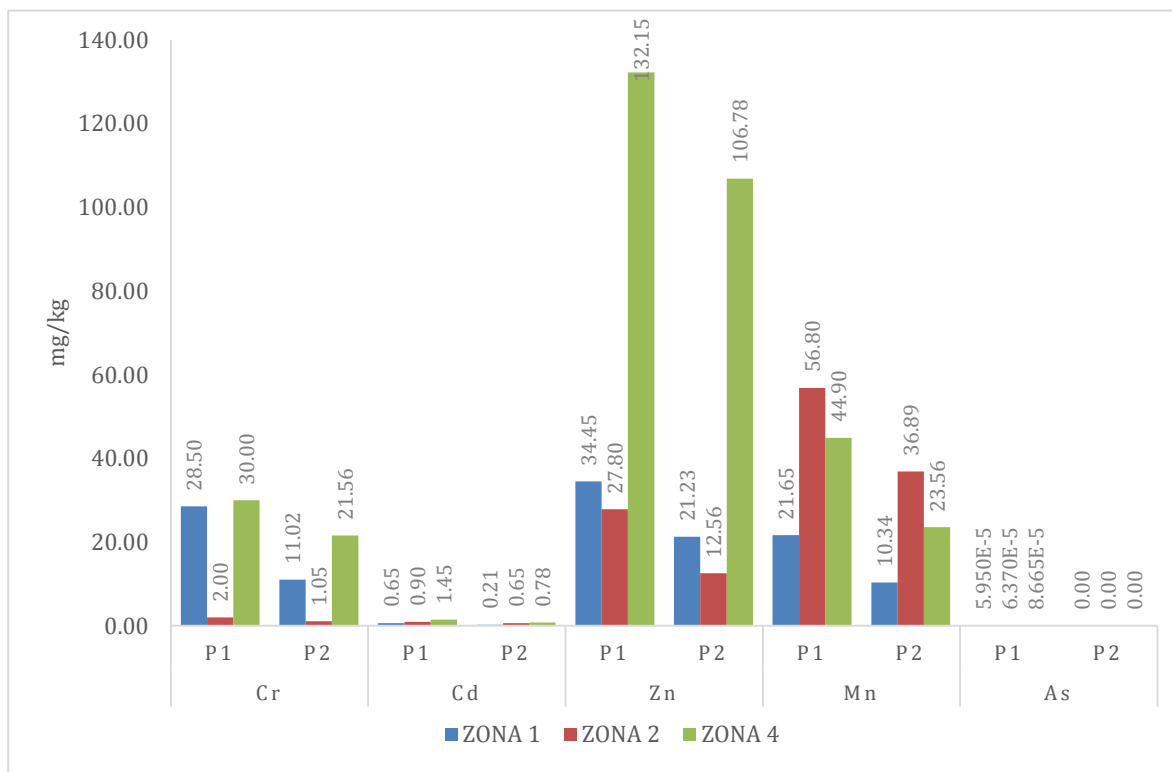
**Figura 13.** Metales adsorbidos en *Juniperus deppeana*.

El Cr, se presentó en mayor concentración en el P1 en la zona 4, con  $30 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que la zona 2, presentó la menor concentración, con solamente  $2 \text{ mg kg}^{-1}$ . En relación al P2, la zona 4 presentó el mayor valor y la zona 2 la de menor valor, con  $21.56 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $1.05 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente.

La adsorción del Cd, se presentó en mayor concentración en la zona 4 con  $1.45 \text{ mg kg}^{-1}$  y la menor fue la zona 1 con  $0.65 \text{ mg kg}^{-1}$ , en el P1. En el P2, la zona 4 registró el valor más alto, con  $0.78 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 1, el valor más bajo, con  $0.21 \text{ mg kg}^{-1}$ .

El Zn, se comportó atípicamente, ya que en la zona 4, presentó una concentración muy por arriba de las zonas 1 y 2, con  $132.15$ ,  $34.45$  y  $27.80 \text{ mg kg}^{-1}$  respectivamente, en el P1. En el P2, la zona 4, también se presentó por arriba de las otras 2 zonas, con  $106.78 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 4 y  $12.56 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 2.

Con respecto al elemento Mn, la zona 2 registró el mayor valor con 56.80 mg kg<sup>-1</sup>, seguido por la zona 4 con 44.90 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con 21.65 mg kg<sup>-1</sup>, en el P1, en siguiente periodo (P2), la zona 2 cuantificó 36.89 mg kg<sup>-1</sup>, la cual es el valor más alto, mientras que la zona 1, fue la de menor valor con 10.34 mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 14.** Metales adsorbidos *Juniperus deppeana*.

La determinación del Hg, se presentó únicamente en el P1, teniendo la mayor presencia en la zona 2 con  $7.24 \times 10^{-5}$  mg kg<sup>-1</sup>, en contraste con la zona 4, que presentó la menor, con  $3.75 \times 10^{-5}$  mg kg<sup>-1</sup>.

El As, se detectó solamente en el P1, zona 4 > zona2 > zona 1, con los siguientes valores,  $8.66 \times 10^{-5}$ ,  $6.37 \times 10^{-5}$  y  $5.95 \times 10^{-5}$  mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.



**Figura 15.** Hg y As adsorbido en *Juniperus deppeana*.

La estadística que se aplicó a estos últimos datos para obtener los coeficientes de correlación se presentan a continuación: para el periodo 1, Cu-Fe: 0.99, Cu-Ni: 0.93, Cu-Pb: 0.96, Cu-Mn: 0.99, Fe-Ni: 0.93, Fe-Pb: 0.96, Fe-Mn: 0.99, Ni-Pb: 0.99, Ni-Hg: 0.73, Ni-Mn: 0.94, Pb-Hg: 0.66, Pb-Mn: 0.97, Cd-Zn: 0.93, Cd-As: 0.98 y Zn-As: 0.97.

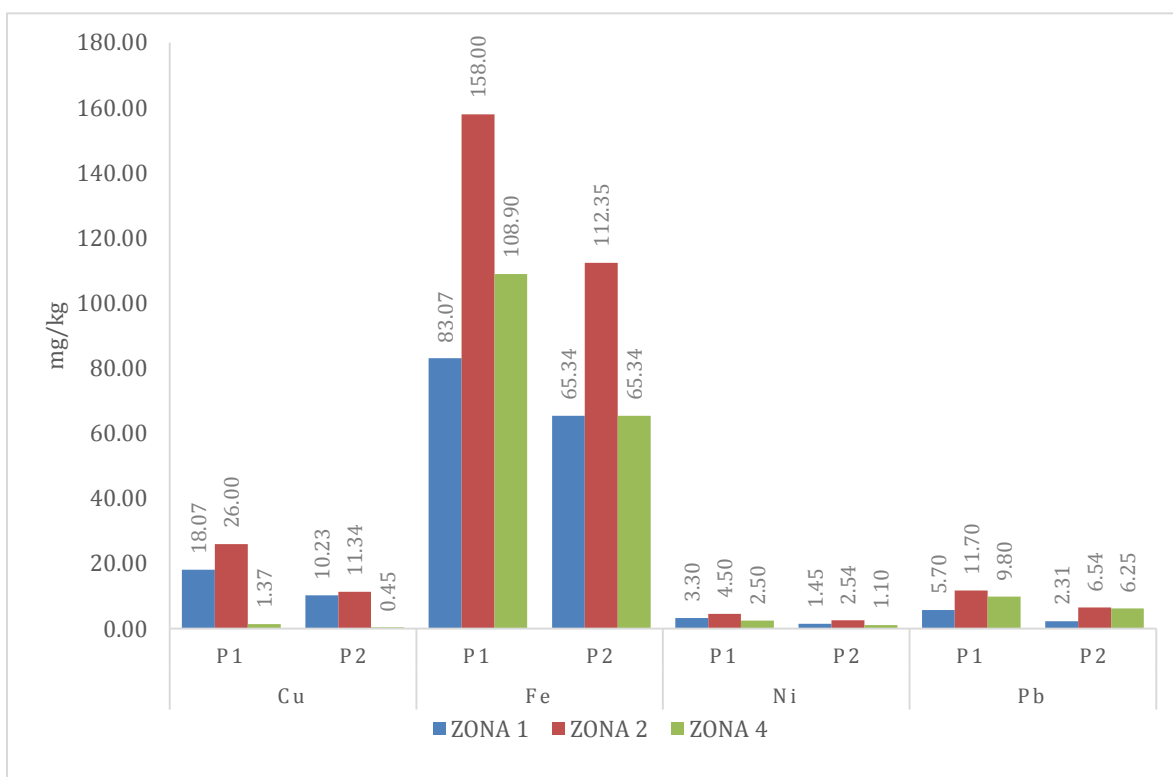
En el segundo periodo de muestreo, el coeficiente de correlación de los resultados son: Cu-Fe: 0.94, Cu-Ni: 0.96, Cu-Pb: 0.61, Cu-Cd: 0.93, Cu-Mn: 0.92, Fe-Ni: 0.81, Fe-Pb: 0.84, Fe-Cd: 0.75, Fe-Ni: 0.99, Ni-Cd: 0.99, Ni-Mn: 0.79, Pb-Mn: 0.86, Cr-Zn: 0.91, Cd-Zn: 0.61 y Cd-Mn: 0.73.

La especie vegetal, *Junnipereus flaccida*, presento los resultados mostrados en las figuras 16 y 17, las cuales muestran la cuantificación de los diversos metales adsorbidos. El resultado en el P1 del Cu, muestra la máxima adsorción en la zona 2 con 26.00 mg kg<sup>-1</sup> y la mínima en la zona 4, con solo 1.37 mg kg<sup>-1</sup>. Con respecto al P2, el valor máximo se presentó en la zona 2 con 11.34 mg kg<sup>-1</sup>, seguido por la zona 1 y finalmente la zona 4, con 0.45 mg kg<sup>-1</sup>.

En relación al Fe, la zona 2 fue la de mayor concentración, con 158.00 mg kg<sup>-1</sup> y la de menor fue la zona 1 en P1. En el P2, la zona 2 fue la de mayor presencia, con 112.35 mg kg<sup>-1</sup>, seguidas de la zona 1 y 4, ambas con 65.34 mg kg<sup>-1</sup>.

El elemento Ni, mostro el valor más alto en la zona 2, con 4.50 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que en la zona 4 la de menor valor con 2.50 mg kg<sup>-1</sup>, en el P1. En el P2, la zona 2 fue la más alta con 2.54 mg kg<sup>-1</sup> y la más baja, la zona 4, con 1.10 mg kg<sup>-1</sup>.

Con respecto al Pb adsorbido, su mayor presencia fue en la zona 2, con 11.70 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 4 y finalmente la zona 1, con 5.70 mg kg<sup>-1</sup>, todo esto en el P1. En segundo periodo muestreado, se observa que el mayor valor se presentó, en la zona 2 con 6.54 mg kg<sup>-1</sup> y la de menor la zona 1, con 2.31 mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 16.** Metales adsorbidos en *Junniperus flaccida*.

El Cr adsorbido en *Junniperus flaccida*, presentó el mayor valor en la zona 1 con 18.00 mg kg<sup>-1</sup> y el menor valor en la zona 2 con 4.00 mg kg<sup>-1</sup>, en el P1. En relación

al P2, el mayor valor fue nuevamente en la zona 1, con 13.25 mg kg<sup>-1</sup> y el menor valor con 2.34 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 2.

Con respecto al Cd, la mayor concentración cuantificada fue en la zona 4 con 1.47 mg kg<sup>-1</sup>, seguida por la zona 2 con 1.30 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1, con 0.17 mg kg<sup>-1</sup>. El P2, el orden es similar, la zona 4 con 0.56 mg kg<sup>-1</sup>, la zona 2 con 0.34 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con únicamente 0.02 mg kg<sup>-1</sup>.

En la determinación del Zn adsorbido, la zona 4 fue la que presento la mayor concentración con 42.87 mg kg<sup>-1</sup> y la de menor fue la zona 1 con 12.43 mg kg<sup>-1</sup>, en el muestreo del P1. En el segundo periodo, la zona 4, tuvo 23.69 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 2 con 16.78 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1, con 12.34 mg kg<sup>-1</sup>.

El metal Mn, la zona 1 se comportó por arriba de las otras dos zonas, con 222.70 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 2 con 61.70 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 4, con 44.40 mg kg<sup>-1</sup>, en el P1. En el segundo periodo, la zona 1 fue la más alta con 112.45 mg kg<sup>-1</sup> y la más baja para la zona 4 con 23.56 mg kg<sup>-1</sup>.

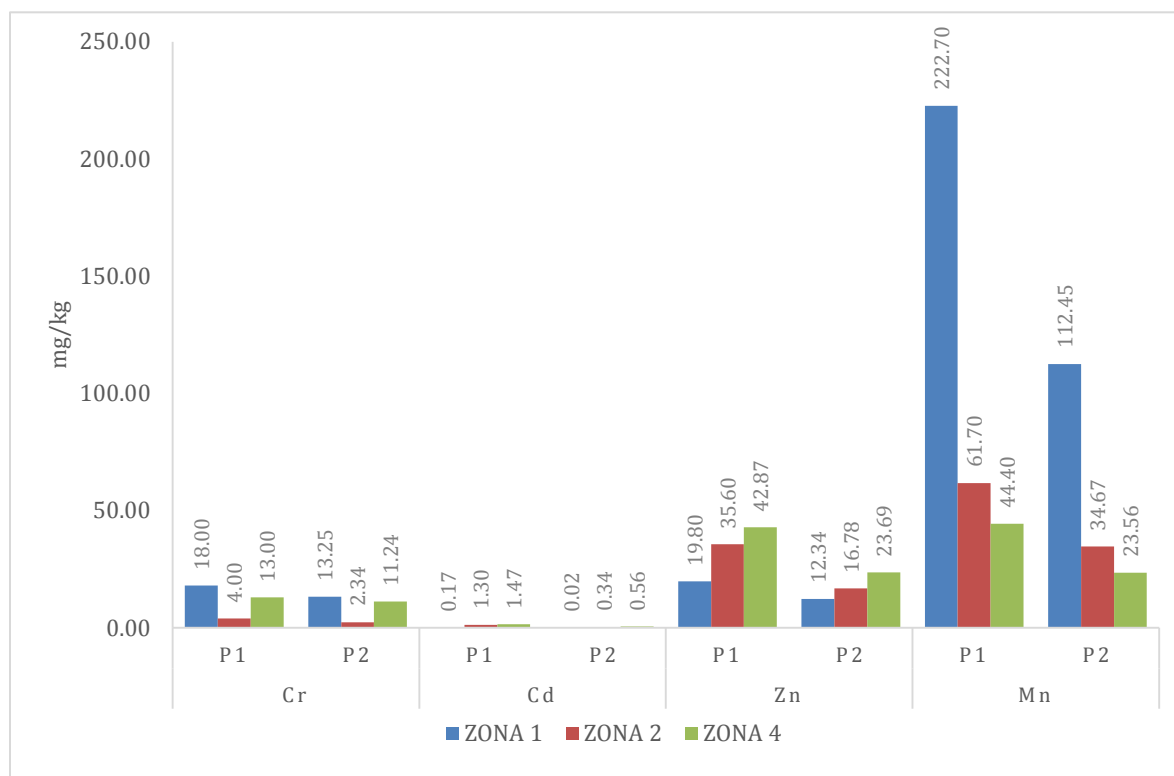
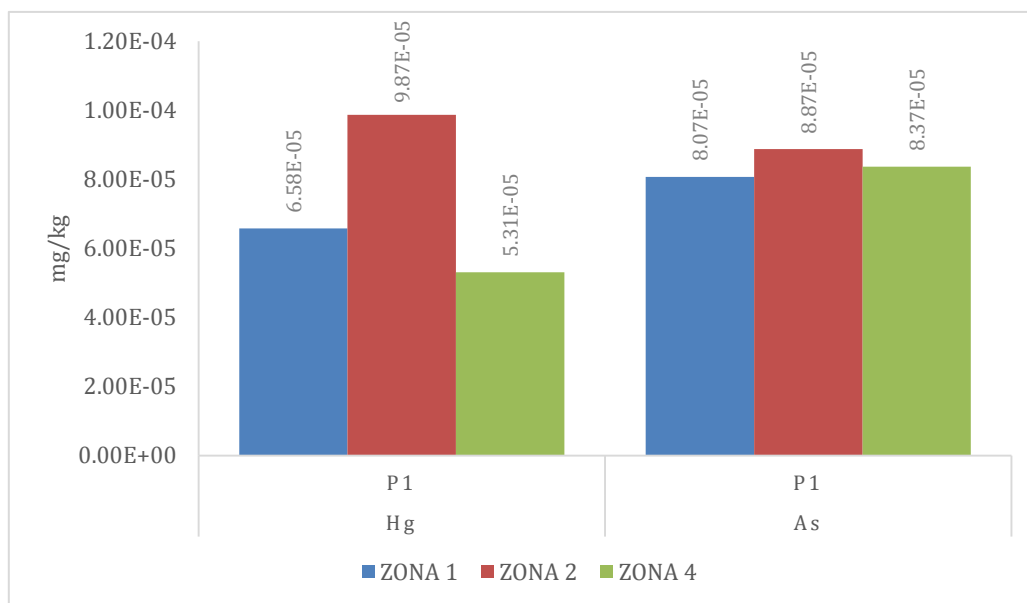


Figura 17. Metales adsorbidos en *Junnipereus flaccida*.

El Hg, se detectó únicamente en el P1, con la mayor presencia en la zona 2, con  $9.87 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$ , seguida de la zona 1 con  $6.58 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$  y finalmente la zona 4, con  $5.31 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$ .

El As, tuvo presencia únicamente en el P1, presentando concentraciones muy similares en las tres zonas, teniendo la más la alta la zona 2 con  $8.87 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$ , seguida de la zona 4 y finalmente la zona 1 con  $8.07 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$ .



**Figura 18.** Hg y As adsorbidos en *Junnipereus flaccida*.

Los coeficientes de correlación de Pearson, obtenido de los metales pesados adsorbidos en la especie *Junnipereus fláccida*, en el P1 son: Cu-Ni: 0.94, Cu-Hg: 0.89, Fe-Ni: 0.72, Fe-Pb: 0.92, Fe-Hg: 0.81, Fe-Cd: 0.68, Fe-As: 0.99, Ni-Hg: 0.99, Ni-As: 0.70, Pb-Cd: 0.90, Pb-Zn: 0.80, Pb-As: 0.93, Hg-As: 0.79, Cr-Mn: 0.71, Cd-Zn: 0.98, Cd-As: 0.70.

Para el P2, los coeficientes son: Cu-Ni: 0.75, Fe-Ni: 0.97, Pb-Cd: 0.88, Pb-Zn: 0.75 y finalmente Cd-Zn: 0.97.

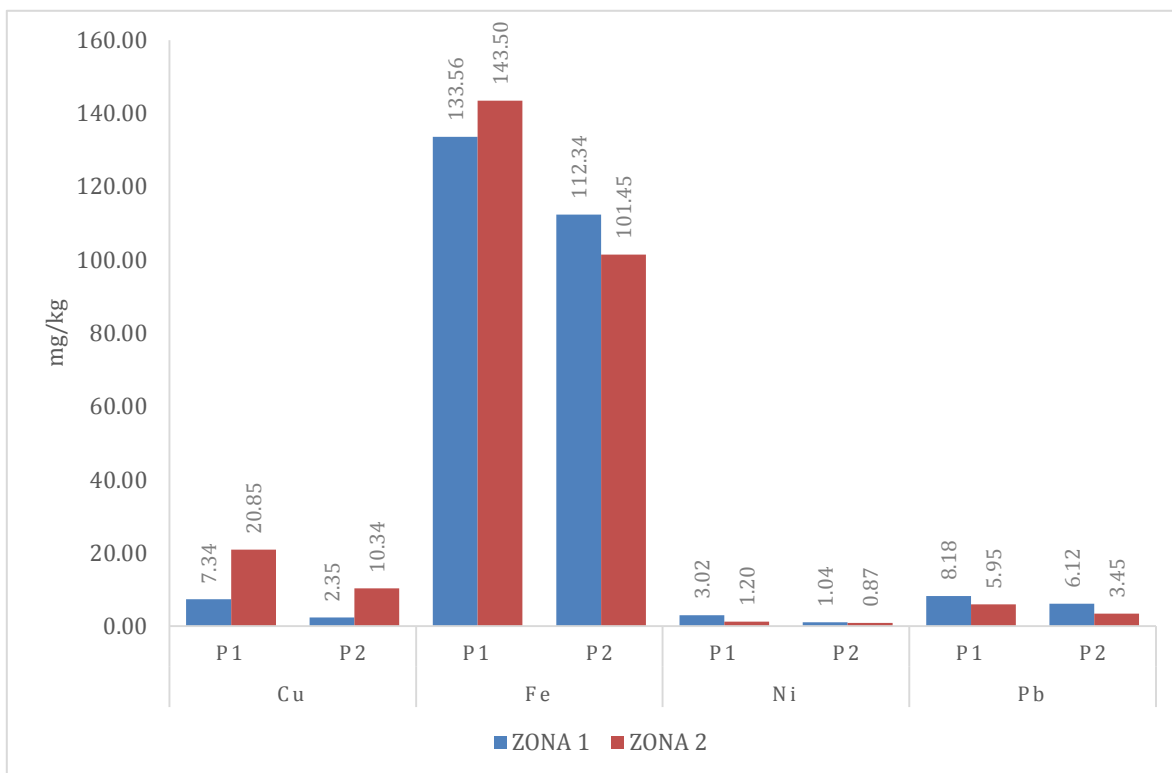
En la especie *Quercus rugosa*, se cuantificaron los metales adsorbidos, como se muestra en las figuras 19 y 20, la cuales se puede observar, que el Cu, estuvo

presente en las zonas 1 y 2, con 7.34 y 20.15 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. En el segundo periodo, la zona 2 presentó una concentración de 10.34 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con 2.35 mg kg<sup>-1</sup>.

El Fe se presentó en el P1, con 143.50 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 2 y en la zona 1, se presentó en menor concentración con 133.56 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, se comportó inversamente, ya que la zona 1 tuvo una mayor presencia con 112.34 mg kg<sup>-1</sup> en relación a la zona 2 con 101.45 mg kg<sup>-1</sup>.

Con respecto al Ni, en el P1, la zona 1 presentó 3.02 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 presentó 1.20 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona 1, tuvo 1.04 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 con 0.87 mg kg<sup>-1</sup>.

El metal pesado Pb, se cuantificó en mayor concentración en la zona 1 con 8.18 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 con 5.95 mg kg<sup>-1</sup>, en lo que respecta al primer periodo. En el P2, la zona 2, presentó 6.12 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1, únicamente 3.45 mg kg<sup>-1</sup>.



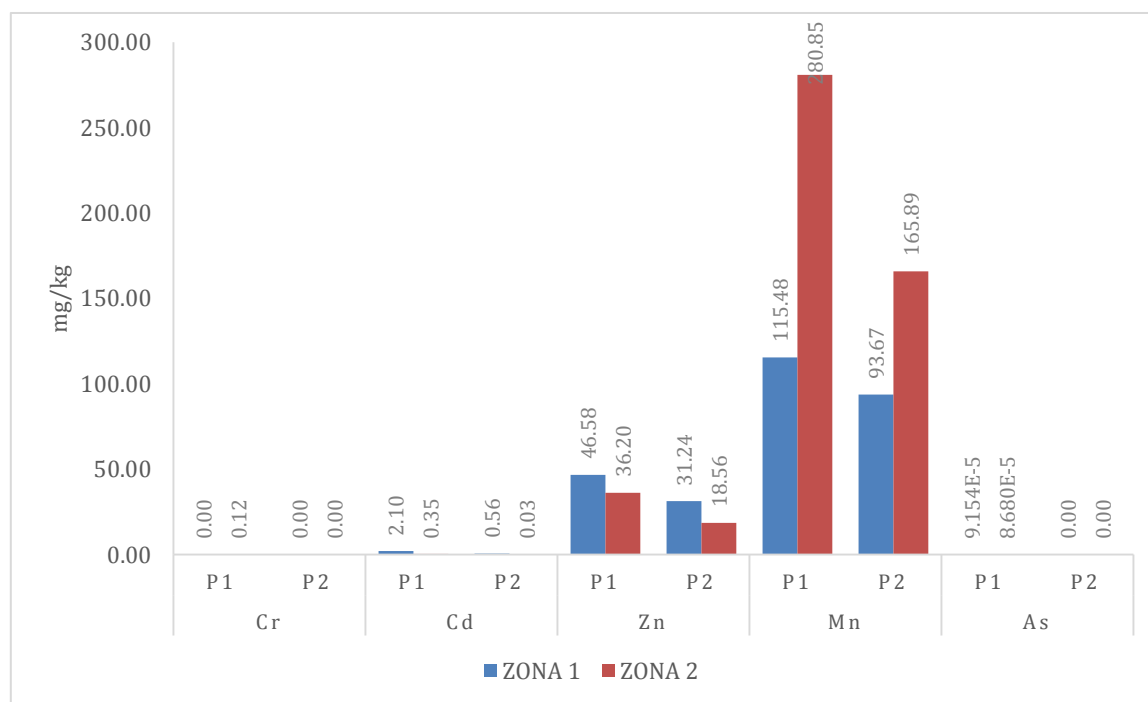
**Figura 19.** Metales adsorbidos en *Quercus rugosa*.

La determinación realizada a la especie vegetal *Quercus rugosa*, se muestran en la figuras 20 y 21, donde muestran la concentración adsorbida del Cr, la cual, en la zona 1 no fue detectable, solamente en la zona 2 con un valor de 0.12 mg kg<sup>-1</sup>, en el primer periodo de muestreo. En el P2, no se detectó concentración alguna, en ninguna de las dos zonas.

El Cd adsorbido del P1, se determinó en la zona 1 con un valor de 2.15 mg kg<sup>-1</sup> y en la zona 2 un valor de 0.35 mg kg<sup>-1</sup>. En relación al segundo periodo, la zona 1 presentó un valor de 0.56 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2, con un valor menor de 0.03 mg kg<sup>-1</sup>.

El elemento Zn, fue determinado en las zonas 1 y 2, con 46.58 mg kg<sup>-1</sup> y 36.20 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente, en lo que respecta al P1. La zona 1 en el P2, presentó un valor de 31.24 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 con 18.56 mg kg<sup>-1</sup>, en este último periodo.

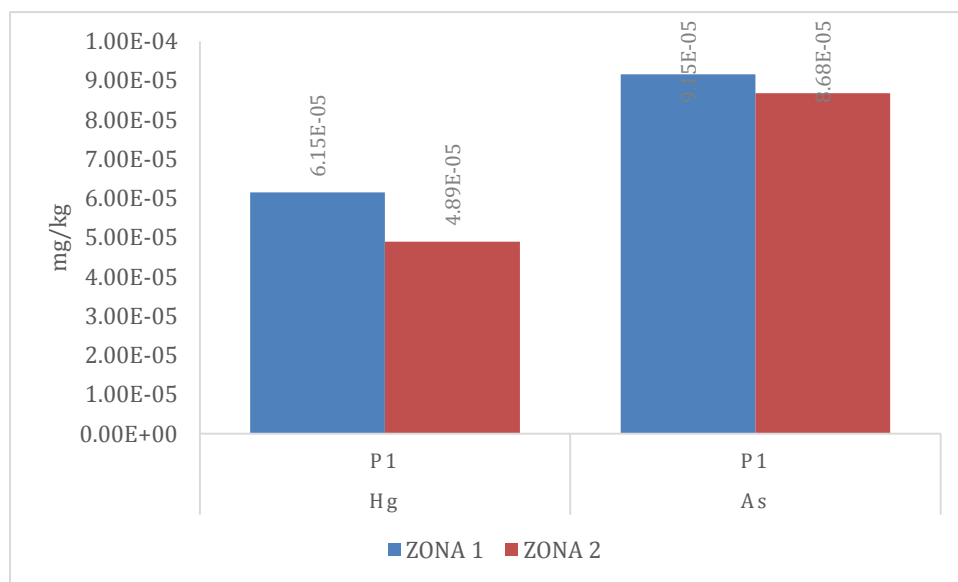
El elemento Mn adsorbido, en el primer periodo, la zona 2 presentó una concentración en mayor proporción a la zona 1, con 280.85 mg kg<sup>-1</sup> y 115.48 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente En el P2, la zona 2 presentó una concentración de 165.89 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con una concentración de 93.67 mg kg<sup>-1</sup>.



**Figura 20.** Metales adsorbidos en *Querecus rugosa*.

El Hg, se detectó únicamente en el P1, con concentraciones de  $6.14 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$  y  $4.89 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$ , para las zonas 1 y 2, respectivamente.

El As, se determinó solamente en el P1, con un valor de  $9.15 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 1 y de  $8.68 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 2.



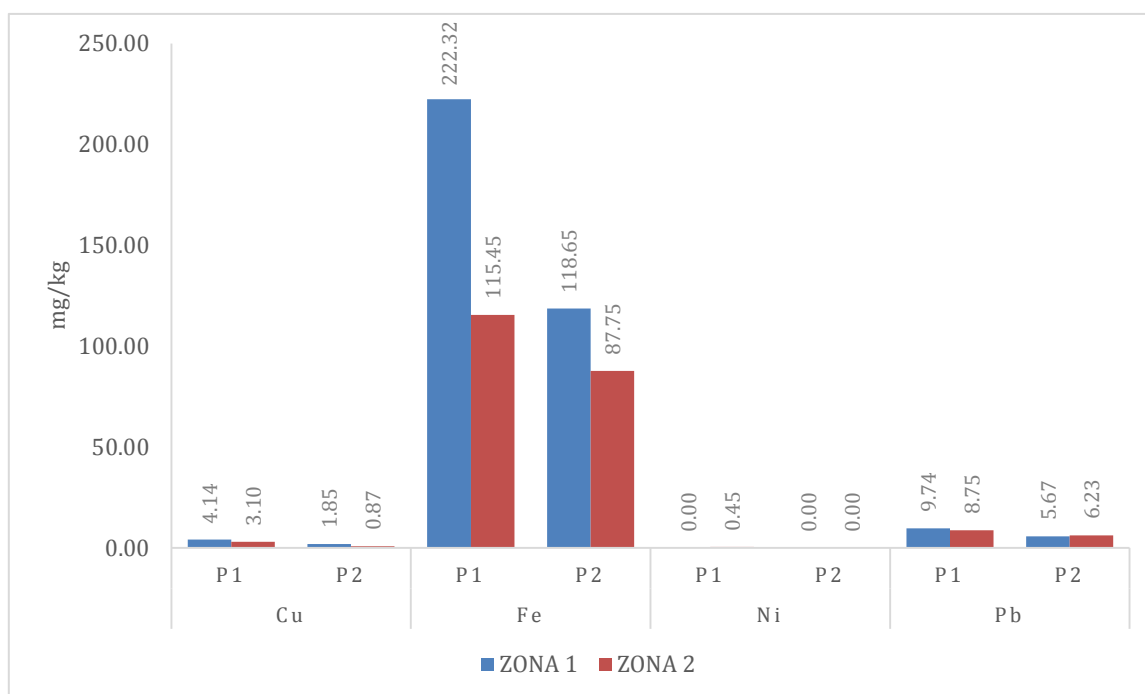
**Figura 21.** Hg y As adsorbidos en *Quercus rugosa*.

En las figuras 22 y 23, se presenta la determinación de los diversos metales pesados adsorbidos cuantificados en la especie *Quercus mexicana*, la cual, con respecto al Cu, en el periodo 1, la zona 1 tuvo mayor presencia en relación a la zona 2, con  $4.14 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $3.10 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. En el P2, la zona 1 presentó un valor de  $1.85 \text{ mg kg}^{-1}$  mientras que la zona 2 un valor de  $0.87 \text{ mg kg}^{-1}$ .

El metal Fe determinado en el primero periodo, la zona 1 presento mayor concentración que la zona 2, con  $222.32 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $115.65 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. En el segundo periodo, la zona 1 presentó  $118.65 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 2 un valor de  $87.75 \text{ mg kg}^{-1}$ .

El Ni, en el P1, se identificó solamente en la zona 2 con  $0.45 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que en el P2, no se determinó este metal.

En relación al Pb, la zona 1 presento un valor de  $9.74 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 2 de  $8.75 \text{ mg kg}^{-1}$ , en el P1. En el P2, su comportamiento fue inverso, ya que la zona 2 presentó un valor mayor que la zona 1, con  $6.23 \text{ mg kg}^{-1}$  y  $5.67 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente.



**Figura 22.** Metales adsorbidos en *Quercus mexicana*.

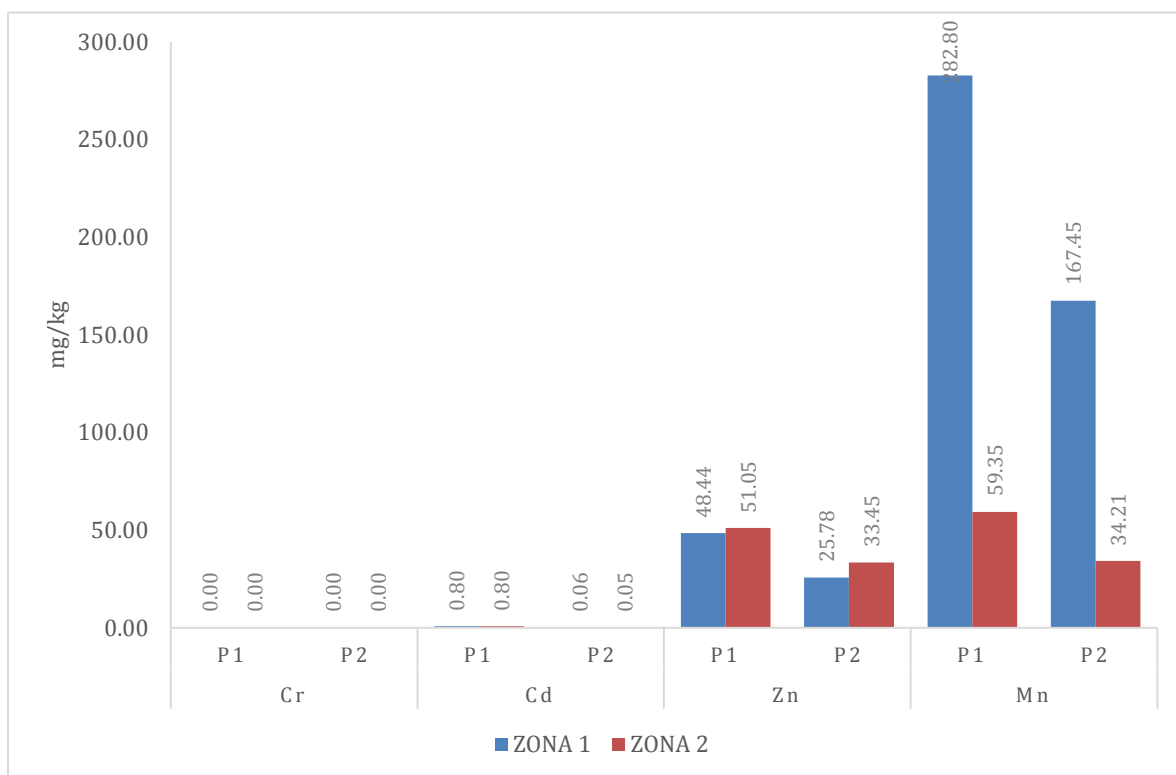
Con respecto al Cr adsorbido, no se presentó en ninguna de las dos zonas este elemento, en ambos periodos.

El Cd, en la zona 1 y en la zona 2, presento valores iguales, con  $0.80 \text{ mg kg}^{-1}$ , en el primer periodo. En el P2, la zona 1, tuvo una concentración de  $0.06 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 2 una concentración de  $0.05 \text{ mg kg}^{-1}$ .

El metal Zn, se presentó en la zona 2 con un valor de  $51.05 \text{ mg kg}^{-1}$  y en la zona 1 con  $48.44 \text{ mg kg}^{-1}$ , en el P1. Con respecto al segundo periodo, la zona 2 tuvo se

determinó una concentración de  $33.45 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que la zona 1 de  $25.78 \text{ mg kg}^{-1}$ .

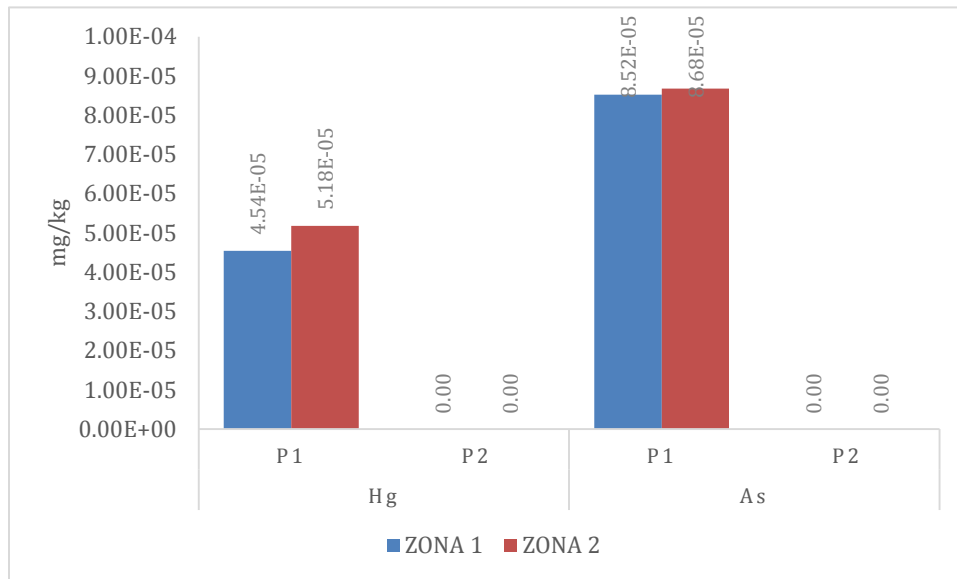
El Mn, tuvo una importante presencia en la zona 1 con  $282.80 \text{ mg kg}^{-1}$  y con menor presencia en la zona 2, con  $59.35 \text{ mg kg}^{-1}$ , en el primero periodo. En el P2, la zona de mayor valor fue la 1, con  $167.45 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 2, presentó un valor de  $34.21 \text{ mg kg}^{-1}$ .



**Figura 23.** Metales adsorbidos en *Quercus mexicana*.

El metal Hg, únicamente se detectó en el P1 en ambas zonas, en la zona 2 con un valor de  $5.17 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 1.

Con respecto al As adsorbido, se presentó únicamente en el P1, con  $8.68 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$  para la zona 2 y  $8.52 \times 10^{-5} \text{ mg kg}^{-1}$  para la zona 1.



**Figura 24.** Hg y As adsorbidos en *Quercus mexicana*.

### 3.2 Metales Absorbidos

En relación a la determinación de los metales absorbidos en las diferentes especies vegetales, se muestra a continuación los resultados de la especie *Eucalyptus globulus*, donde el metal pesado Cu, en el P1, se mostró con mayor presencia en la zona 1 con  $2.15 \text{ mg kg}^{-1}$ , seguida de la zona 3 con  $1.34 \text{ mg kg}^{-1}$  y finalmente la zona 2 con  $0.23 \text{ mg kg}^{-1}$ . En el P2, la zona 1 presentó la mayor concentración de los dos periodos, con  $57 \text{ mg kg}^{-1}$  y la de menor concentración, la zona 2, con  $0.11 \text{ mg kg}^{-1}$ .

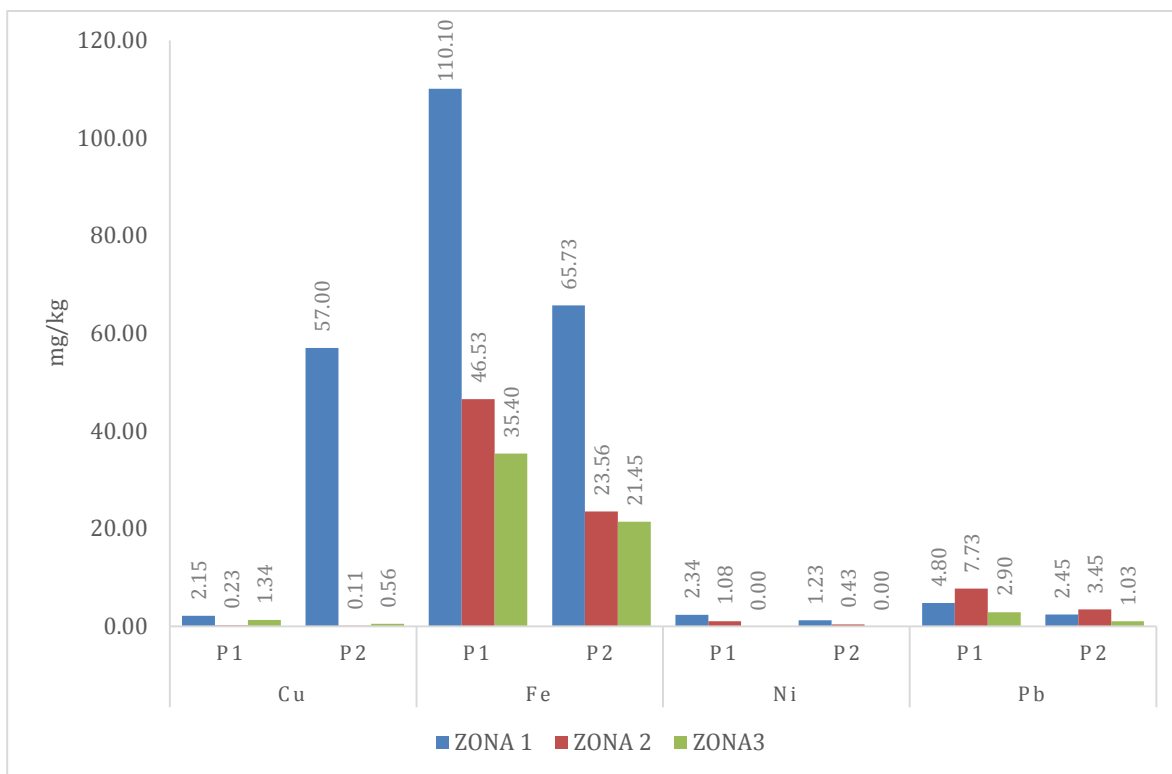
Con estos resultados se observa que la concentración de la zona 1 en el P2, excede los niveles críticos de toxicidad en vegetales según Kramer (2010), la cual, señala un rango de  $20\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$ .

El Fe absorbido, se presentó el valor más alto en la zona 1, con  $110.10 \text{ mg kg}^{-1}$  y el más bajo en la zona 3 con  $35.40 \text{ mg kg}^{-1}$  en el periodo 1. En el segundo periodo, nuevamente la zona 1 presentó la mayor presencia con  $65.73 \text{ mg kg}^{-1}$ , seguido de la zona 2 y finalmente la zona 3, con  $21.45 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estas concentraciones, no exceden los niveles críticos de toxicidad en vegetales.

La absorción del Ni, en el P1, únicamente se presentó en la zona 1 con  $2.34 \text{ mg kg}^{-1}$  y en la zona 2 con  $1.08 \text{ mg kg}^{-1}$ . En el P2, la zona 1 tuvo un valor de  $2.34 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 2 un valor  $0.43 \text{ mg kg}^{-1}$ , las cuales, no rebasan los niveles críticos de toxicidad.

El metal pesado Pb, tuvo una presencia en la zona 2 de  $7.73 \text{ mg kg}^{-1}$ , en la zona 1 de  $4.80 \text{ mg kg}^{-1}$  y en la zona 3 de  $2.90 \text{ mg kg}^{-1}$ , respecto al P1. En el segundo periodo, la mayor presencia fue en la zona 2 con  $3.45 \text{ mg kg}^{-1}$  y la menor presencia fue en la zona 3, con  $1.03 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estas zonas 1, 2 y 3 en ambos periodos se encuentran en el rango crítico de toxicidad en vegetales, la cual, de acuerdo a Kramer (2010), señala un rango de  $0.6\text{-}28 \text{ mg kg}^{-1}$ .

El Hg, no tuvo presencia en ninguno de los dos periodos del muestreo.



**Figura 25.** Metales absorbidos en *Eucalytus globulus*.

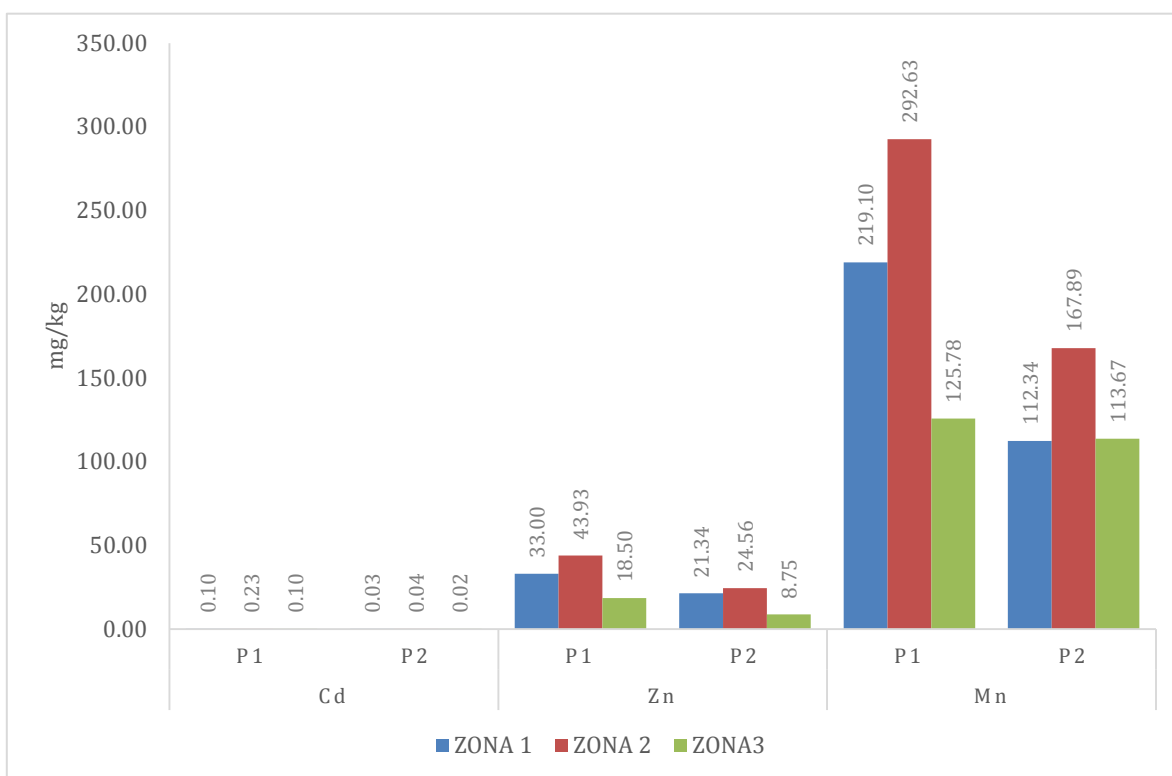
En relación al Cr, su determinación no fue detectable en ninguno de los dos periodos en ninguna de las 3 zonas (1, 2 y 3).

El Cd, se determinó en la zona 2 con  $0.23 \text{ mg kg}^{-1}$  y en la zona 1 y zona 2 con  $0.10 \text{ mg kg}^{-1}$  en el P1. En el segundo periodo, la zona 2 presentó un valor de  $0.04 \text{ mg kg}^{-1}$ , seguida de la zona 1 con  $0.03 \text{ mg kg}^{-1}$  y finalmente la zona 3 con  $0.02 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estos valores presentados en todas las zonas, se encuentran por debajo del valor mínimo del rango de los niveles críticos de toxicidad en vegetales.

El metal Zn, en el P1 se cuantificó en mayor presencia en la zona 2 con  $43.93 \text{ mg kg}^{-1}$  y la de menor presencia la zona 3 con  $18.50 \text{ mg kg}^{-1}$ . En el P2, la zona 2 fue la de mayor valor con  $24.56 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 3 la de menor con  $8.75 \text{ mg kg}^{-1}$ . La presencia de este metal, se encuentra por debajo de los niveles críticos de toxicidad.

La absorción del Mn, la zona 2 fue la de mayor valor con 292.63 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 1 con 219.10 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 3 con 125.78 mg kg<sup>-1</sup>, en lo que respecta al P1. El en segundo periodo, la zona 2 presentó el valor más alto de 167.89 mg kg<sup>-1</sup> y el más bajo la zona 1 con 112.34 mg kg<sup>-1</sup>. La zona 1 y 2, que se encuentran por arriba de 200 mg kg<sup>-1</sup>, se consideran que se encuentra dentro del rango de toxicidad crítica en vegetales.

El metal pesado As, no tuvo presencia en los dos periodos de muestreo en las zonas 1, 2 y 3.



**Figura 26.** Metales absorbidos en *Eucalyptus globulus*.

Para estos datos mostrados en *Eucalyptus globulus*, los coeficientes de correlación de los metales absorbidos en el P1 son: Cu-Fe: 0.73, Fe-Ni: 0.94, Pb-Cd: 0.92, Pb-Zn: 0.97, Pb-Mn: 0.98, Cd-Zn: 0.82, Cd-Mn: 0.82 y por último Zn-Mn: 0.99.

Para el segundo periodo de muestreo, los coeficientes de correlación obtenidos son: Cu-Fe: 0.99, Cu-Ni: 0.93, Fe-Ni: 0.95, Ni-Zn: 0.62, Pb-Cd: 0.99, Pb-Zn: 0.97, Pb-Mn: 0.79, Cd-Zn: 0.94, Cd-Mn: 0.85 y finalmente Zn-Mn: 0.64.

El vegetal *Eucalyptus camuldaensis* presentó los siguientes valores de metales absorbidos, en las diferentes zonas, como a continuación se detalla:

El Cu, se presentó en baja concentración, teniendo la mayor presencia en la zona 1 con  $3.12 \text{ mg kg}^{-1}$  y la menor en la zona 2 con  $0.75 \text{ mg kg}^{-1}$  en lo que respecta al primer periodo. En el P2, la zona 1 presentó  $1.23 \text{ mg kg}^{-1}$ , seguido de la zona 3 con  $1.34 \text{ mg kg}^{-1}$  y finalmente la zona 2 con  $0.35 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estas concentraciones, se encuentran por debajo de los niveles críticos de toxicidad en vegetales.

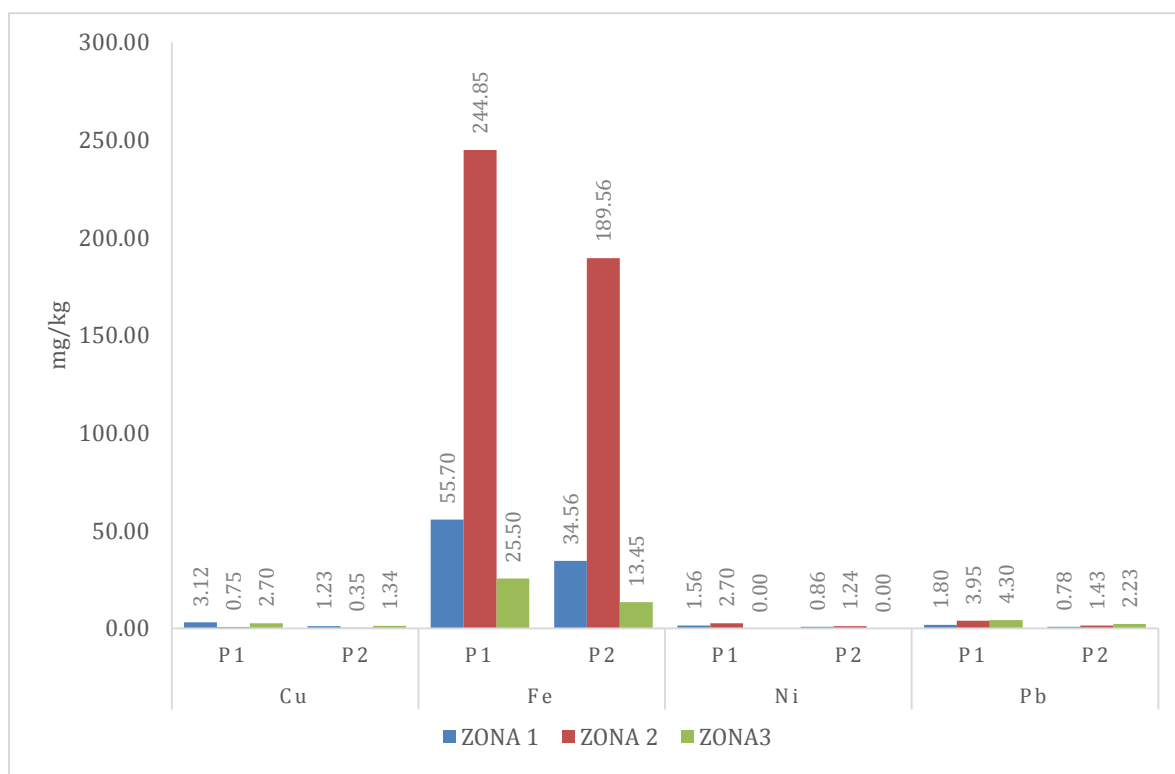
El metal Fe, en el P1 muestreado, tuvo una alta presencia en la zona 2 con respecto a las demás zonas, con  $244.85 \text{ mg kg}^{-1}$ , la zona 1 con un valor de  $55.70 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 3 con  $22.50 \text{ mg kg}^{-1}$ . En el segundo periodo, la zona 2 tuvo una concentración de  $189.50 \text{ mg kg}^{-1}$ , posteriormente la zona 1 con  $55.70 \text{ mg kg}^{-1}$  y finalmente la zona 3 con  $13.45 \text{ mg kg}^{-1}$ . La zona 2 en los dos periodos se encuentra en el rango crítico de toxicidad en vegetales, la cual, señala Well, *et al*; 1993, que es entre  $70\text{-}300 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Con respecto al Ni, las concentraciones fueron bajas, ya que en el P1, la zona 2 presentó un valor de  $2.70 \text{ mg kg}^{-1}$ , la zona 1 con  $1.56 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 3, no se detectó dicho metal. En el P2, la zona 2 tuvo una concentración de  $1.24 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 1 con  $0.86 \text{ mg kg}^{-1}$ . Por lo tanto, estas concentraciones no son críticas en toxicidad.

El Pb absorbido en el primer periodo de muestreo, fue de  $4.30 \text{ mg kg}^{-1}$  para la zona 3, de  $3.95 \text{ mg kg}^{-1}$  para la zona 2 y de  $1.80 \text{ mg kg}^{-1}$  para la zona 1. En el P2, la zona 3 tuvo un valor de  $2.23 \text{ mg kg}^{-1}$ , la zona 2 un valor de  $1.43 \text{ mg kg}^{-1}$  y finalmente de  $0.78 \text{ mg kg}^{-1}$  para la zona 1. De acuerdo con estas cifras, las zonas

muestreadas, se encuentran en el rango de toxicidad crítica, ya que, se encuentra en el rango de 0.6 -28 mg kg<sup>-1</sup>.

El Hg, no se presentó en ninguna de las zonas para este vegetal, en ambos periodos de muestreo.



**Figura 27.** Metales absorbidos en *Eucalyptus camuldalensis*.

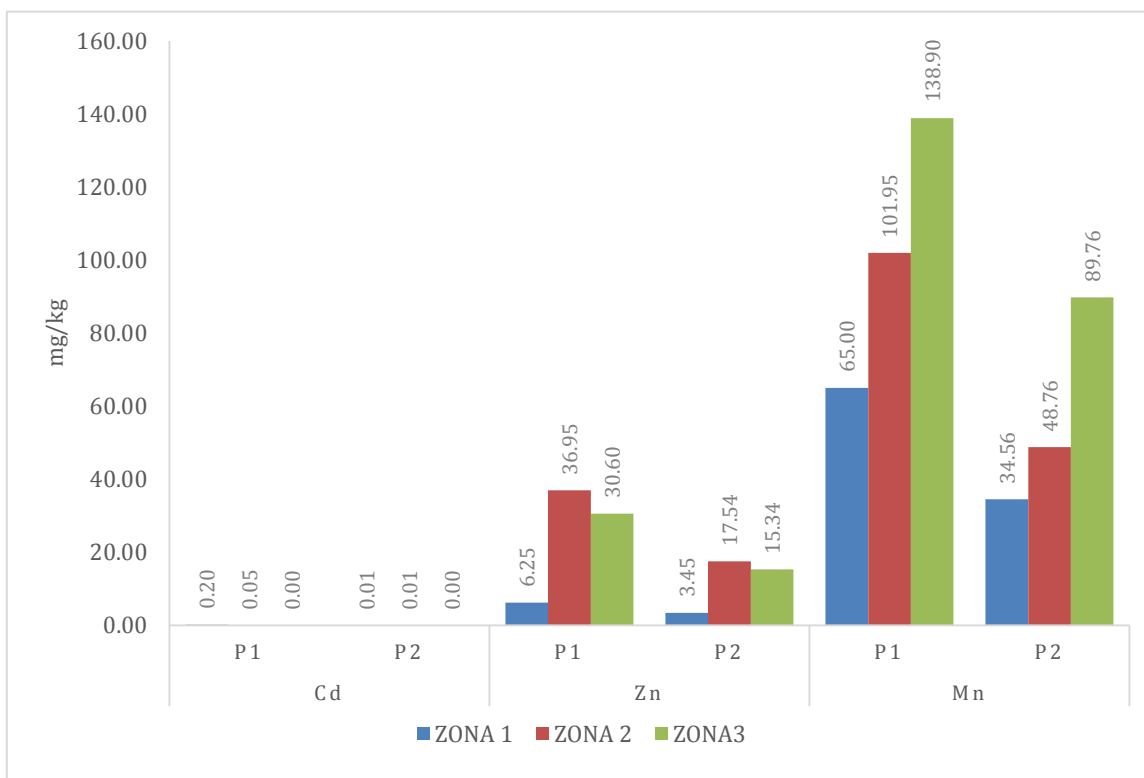
La determinación en *Eucalyptus camuldalensis*, el Cr, no se presentó en ninguna de las zonas en ambos periodos. El Cd, tuvo una presencia baja, en la zona 1 con 0.20 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 con 0.05 mg kg<sup>-1</sup> en el primer periodo. En el P2, las zonas 1 y 2 tuvieron una concentración de 0.01 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que la zona 3 no fue detectable el metal antes mencionado. Estas concentraciones, no presentan riesgos de toxicidad crítica.

En relación al Zn, en el P1, la zona 2 tuvo una concentración de 36.95 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de la zona 3 con 30.60 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con 6.25 mg kg<sup>-1</sup>. En el segundo periodo, la zona 2 presento un valor de 17.54 mg kg<sup>-1</sup>, la zona 3 un valor de 15.34 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con 3.45 mg kg<sup>-1</sup>. Estos valores se encuentran por debajo del rango de toxicidad crítica en vegetales.

El Mn absorbido, se presentó en mayor concentración con 138.90 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 3, 101.95 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 2 y 65.00 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 1, en relación al P1.

En el P2, la zona 3 tuvo un valor de 89.76 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de la zona 2 con 48.76 mg kg<sup>-1</sup> y las más baja la zona 1 con 34.56 mg kg<sup>-1</sup>. En este metal, el rango de toxicidad crítica se señala en un rango de 100-300 mg kg<sup>-1</sup>, por lo cual, se encuentran las zonas reportadas por debajo de este rango.

El metal As, no tuvo presencia en las tres diferentes zonas muestreadas en los dos diferentes periodos.



**Figura 28.** Metales absorbidos en *Eucalyptus camuldalensis*.

Los coeficientes de correlación de los resultados cuantificados en la especie *Eucalyptus camuldalensis*, para el P1, se muestran a continuación: Fe-Ni: 0.88, Pb-Zn: 0.94, Pb-Mn: 0.92 y Zn-Mn: 0.75.

Para el P2, la correlación de los valores de metales pesados son: Fe-Ni: 0.80, Ni-Cd: 0.95, Pb-Zn: 0.74 y Pb-Mn: 0.97.

La determinación de los metales pesados absorbidos en *Junnipperus deppeana*, en los dos periodos, se describen a continuación:

En el primer periodo el Cu, se presentó en la zona 2 con una concentración de 10.40 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 4 con 6.57 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con 1.12 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona con mayor presencia fue la zona 2 con 5.67 mg kg<sup>-1</sup>, posteriormente la zona 4 con 2.45 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con 0.53 mg kg<sup>-1</sup>, por lo cual, con estos valores reportados, no presentan riesgo de toxicidad crítica, ya que se encuentran los valores por debajo del rango establecido.

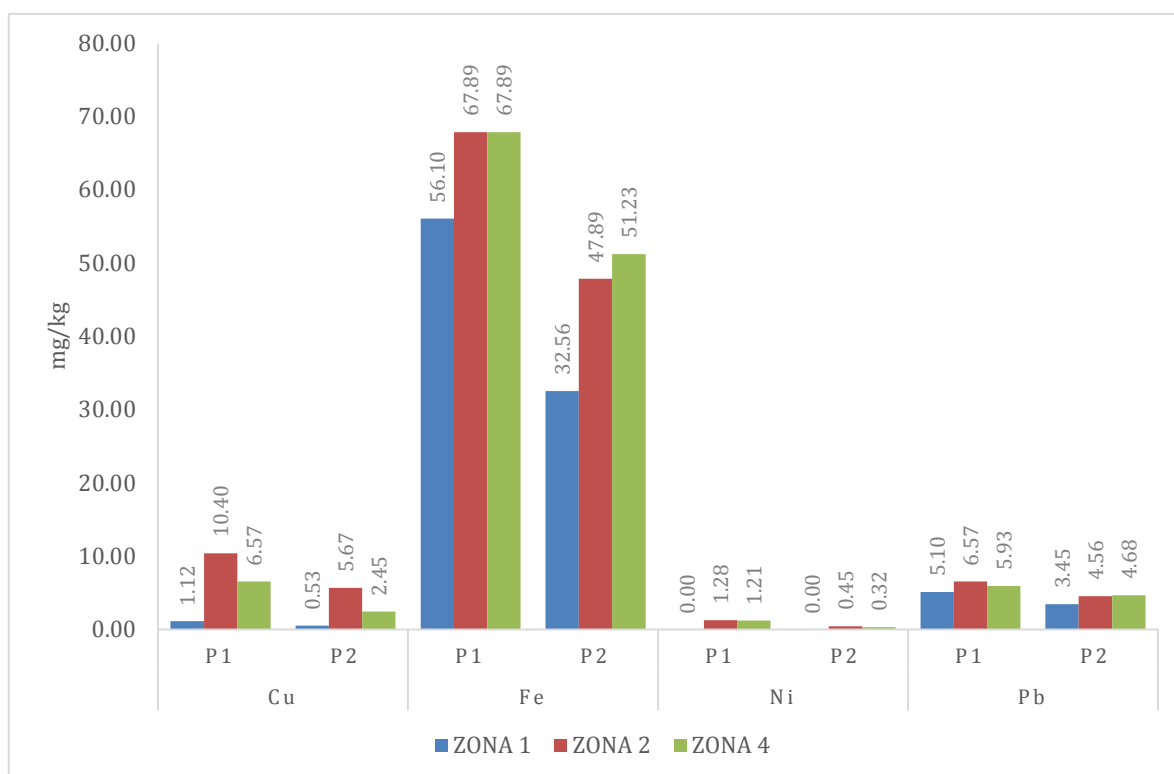
Con respecto al Fe, en el P1, los valores obtenidos en la zona 2 y 4 son iguales, con 67.89 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que la zona 1 presento un valor de 56.10 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la mayor presencia se tuvo en la zona 4 con 51.23 mg kg<sup>-1</sup> y la de menor presencia la zona 1 con 32.56 mg kg<sup>-1</sup>. Estas concentraciones determinadas, no rebasan el rango de toxicidad crítica establecido por Kramer (2010).

El Ni absorbido en el P1, la zona 2 presento un valor de 1.28 mg kg<sup>-1</sup>, la zona 4 de 1.21 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 no presento concentración alguna. Con respecto al P2, la zona 2, el valor obtenido fue de 0.45 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de la zona 4 con 0.32 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 sin presencia. Con estos valores reportados, se encuentra muy por debajo de los niveles críticos de toxicidad.

El Pb determinado en la zona 2 fue de 6.57 mg kg<sup>-1</sup>, seguido por la zona 4 con 5.93 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con 5.10 mg kg<sup>-1</sup>, con respecto al primer

periodo. En el P2, la zona 4 presento una concentración de 4.68 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 2 con 4.56 mg kg<sup>-1</sup> y por último la zona 1 con 3.45 mg kg<sup>-1</sup>. Los valores determinados en las zonas antes mencionadas, se encuentran dentro del rango de niveles críticos tóxicos.

El metal pesado Hg, no fue detectable en ninguna de las zonas muestreadas en los dos periodos.



**Figura 29.** Metales absorbidos en *Juniperus deppeana*.

El Cr determinado en el P1, muestra que en la zona 4 tuvo una concentración de 19.00 mg kg<sup>-1</sup>, posteriormente la zona 1 con 12.00 mg kg<sup>-1</sup> y por último la zona 2 con 0.78 mg kg<sup>-1</sup>. En el segundo periodo, la zona 4 fue la que presentó el valor más alto con 9.89 mg kg<sup>-1</sup> y la de menor valor la zona 2 con 0.34 mg kg<sup>-1</sup>. Por tal motivo, las zonas 1 y 4 sobre pasan los niveles de toxicidad mientras que la zona 2, se encuentran dentro del rango en el P1 y en el P2 nuevamente las zonas 1 y 4, exceden los niveles de toxicidad, mientras que la zona 2, se encuentra en dicho rango.

Las concentraciones de Cd fueron bajas, en el P1 la zona 4 se presentó un valor de 0.67 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de la zona 2 con 0.37 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con 0.20 mg kg<sup>-1</sup>. Con respecto al segundo periodo, la zona 4 tuvo un valor 0.34 mg kg<sup>-1</sup>, la zona 2 tuvo un valor de 0.16 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con 0.05 mg kg<sup>-1</sup>. Estos valores, se encuentran por debajo de la toxicidad en vegetales.

La absorción del Zn, se presentó en el primer periodo en la zona 4 con 76.23 mg kg<sup>-1</sup>, en la zona 2 con 19.87 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con 9.30 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona 4 tuvo una concentración de 56.78 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de la zona 2 con 12.35 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con 4.56 mg kg<sup>-1</sup>. Por lo tanto, no presenta problemas de toxicidad, con dicho metal pesado absorbido.

El metal Mn absorbido, tuvo una presencia en el P1 de 36.89 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 2, una concentración de 22.89 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 4 y de 14.90 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 1. Para este metal, el rango de toxicidad es de 200-3 500 mg kg<sup>-1</sup>, por lo cual, se encuentran muy por debajo de dicho rango.

El As, no tuvo presencia en ninguna de las tres zonas determinadas y ambos periodos.

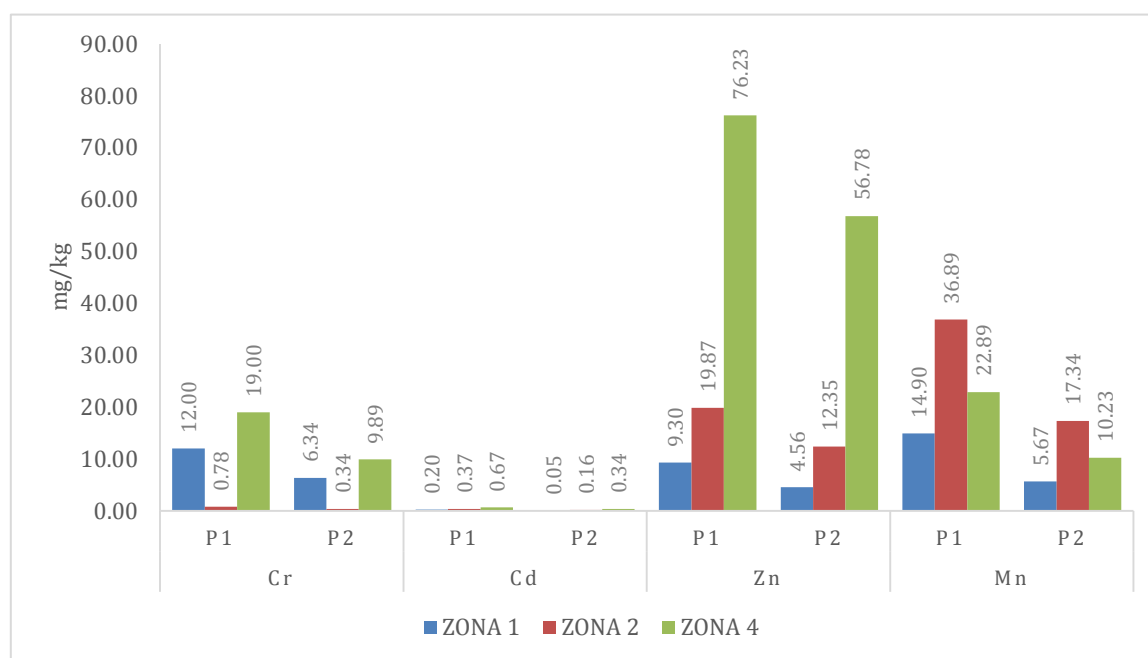


Figura 30. Metales absorbidos en *Junippereus deppeana*.

La correlación de los resultados de metales absorbidos en la especie *Junnipperus deppeana*, en el P1, son los siguientes: Cu-Fe: 0.91, Cu-Ni: 0.93, Cu-Pb: 0.99, Cu-Mn: 0.96, Fe-Ni: 0.99, Fe-Pb: 0.90, Fe-Cd: 0.76, Fe-Zn: 0.62, Fe-Mn: 0.77, Ni-Pb: 0.92, Ni-Cd: 0.73, Ni-Mn: 0.80, Pb-Mn: 0.97, Cr-Zn: 0.69, y por último Cd-Zn: 0.97.

Para el segundo periodo de muestreo, los coeficientes de correlación de Pearson, son como a continuación se muestran: Cu-Fe: 0.66, Cu-Ni: 0.92, Cu-Pb: 0.72, Cu-Mn: 0.99, Fe-Ni: 0.89, Fe-Pb: 0.99, Fe-Cd: 0.88, Fe-Zn: 0.73, Fe-Mn: 0.68, Ni-Pb: 0.93, Ni-Mn: 0.93, Pb-Cd: 0.84, Pb-Zn: 0.68, Pb-Mn: 0.74, Cr-Zn: 0.68 y Cd-Zn: 0.96.

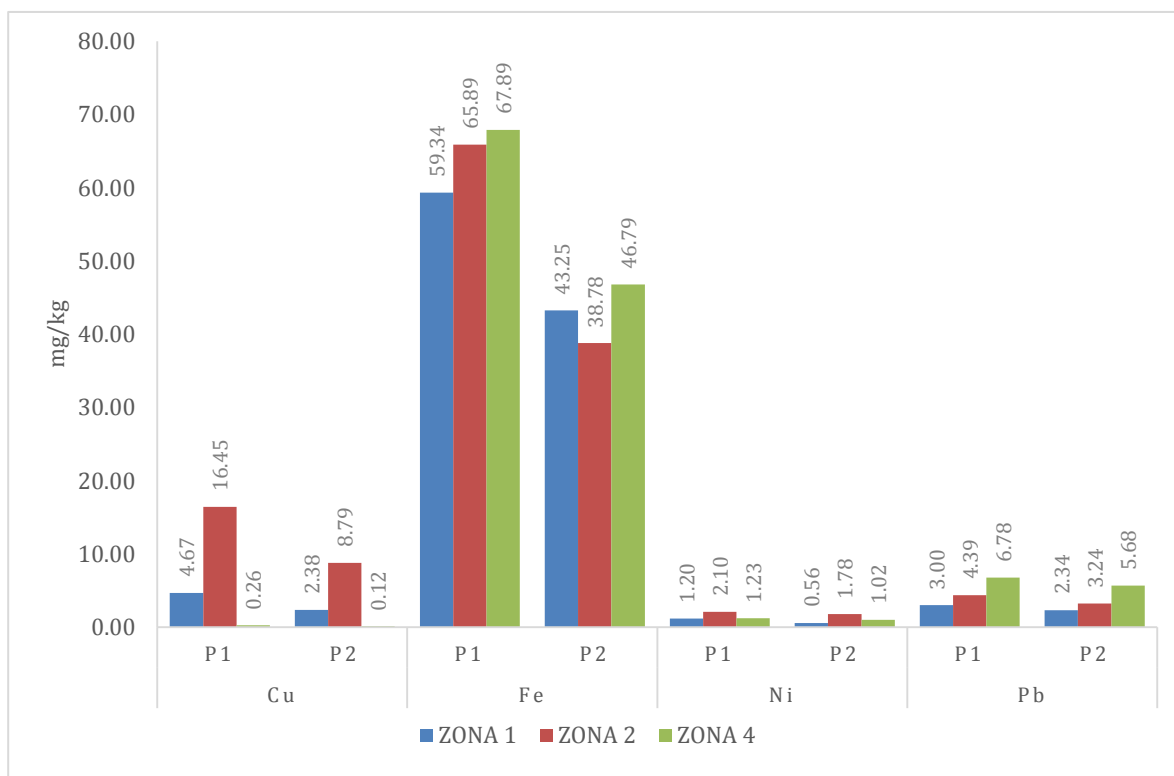
La especie vegetal *Juniperus flaccida*, le fueron determinados diferentes metales pesados, teniendo los resultados del Cu en el P1 de 16.45 mg kg<sup>-1</sup> en la zona 2, seguida de la zona 1 con 4.67 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 4 con 0.26 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona que tuvo mayor presencia fue la zona 2 con 8.79 mg kg<sup>-1</sup> y la de menor presencia la zona 1 con 0.12 mg kg<sup>-1</sup>. Estas concentraciones determinadas, no exceden los niveles críticos de toxicidad.

El metal pesado Fe, presento valores altos, con respecto a los demás metales, teniendo la mayor concentración en el P1 en la zona 4 con 67.89 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de la zona 2 con 65.89 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con 59.34 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona 4 tuvo una concentración de 46.79 mg kg<sup>-1</sup>, la zona 1 de 43.25 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 con 38.78 mg kg<sup>-1</sup>, por lo cual, todas las zonas presentan valores menores a los niveles de toxicidad crítica.

En relación al Ni, en el primer periodo se cuantificó en la zona 2 un valor de 2.10 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 4 con 1.23 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con 1.20 mg kg<sup>-1</sup>. Para el P2, la zona 2 tuvo un valor de 1.78 mg kg<sup>-1</sup>, la zona 4 un valor de 1.02 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 únicamente 0.56 mg kg<sup>-1</sup>. Estos valores, no presentan problemas de toxicidad en relación al Ni Absorbido.

El metal pesado Pb tuvo una presencia en el P1, en la zona 4 con 6.78 mg kg<sup>-1</sup>, en la zona 2 con 4.39 mg kg<sup>-1</sup> y en la zona 1 con 3.00 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona 4 presentó una concentración de 5.68 mg kg<sup>-1</sup>, la zona 2 con 3.24 mg kg<sup>-1</sup> y por último la zona 1 con 2.34 mg kg<sup>-1</sup>. Con las concentraciones presentadas, las tres zonas en ambos periodos de muestreo, se encuentran dentro del rango de toxicidad, la cual comprende de 0.6-28 mg kg<sup>-1</sup>.

El Hg, no fue detectable en ninguna de las zonas reportadas, en ambos periodos muestreados.



**Figura 31.** Metales absorbidos en *Junnipereus flaccida*.

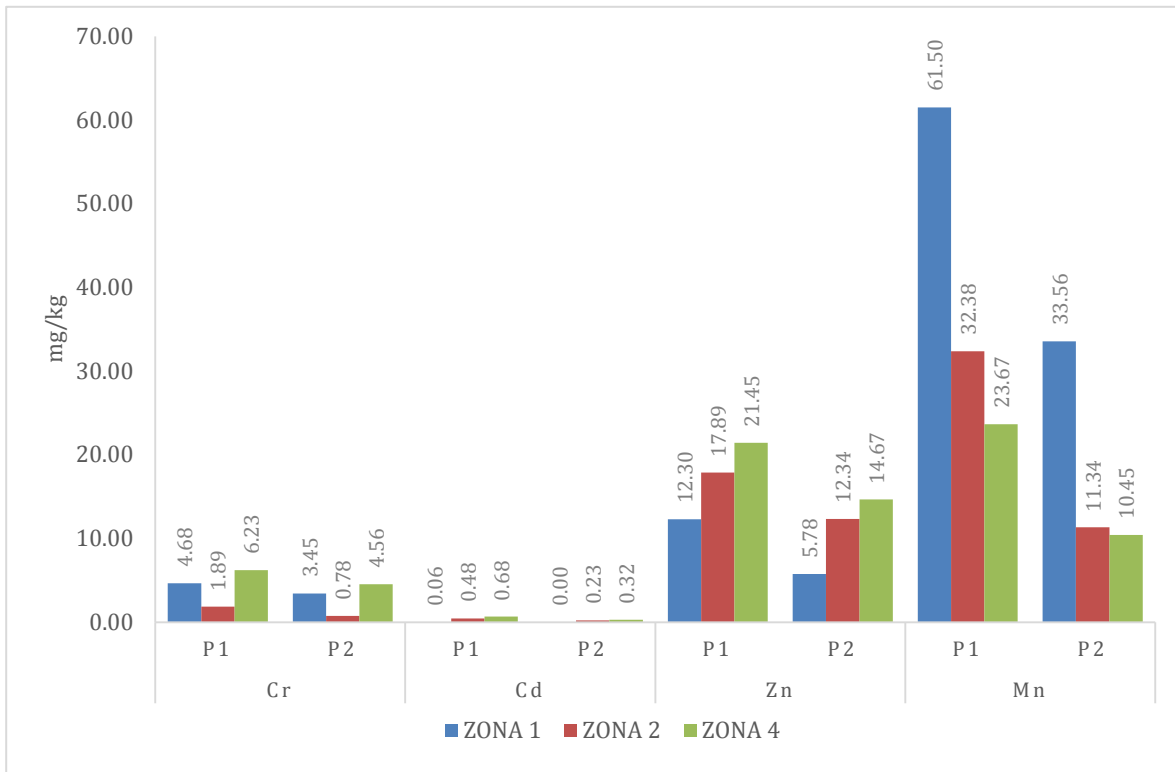
El Cr en *Juniperus flaccida*, se presentó en la zona 4 con 6.23 mg kg<sup>-1</sup> seguido de la zona 1 con 4.68 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 2 con 1.89 mg kg<sup>-1</sup> en el P1. Los resultados obtenidos en el P2, se muestra que la zona 4 tuvo un valor de 4.56 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 1 con 3.45 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 con 0.78 mg kg<sup>-1</sup>. Teniendo en cuenta que el rango de toxicidad del Cr, se establece de 0.2-1 mg kg<sup>-1</sup>, las tres zonas muestreadas en ambos periodos, se encuentran dentro de este rango.

El metal Cd, se presentó en la zona 4 con 0.68 mg kg<sup>-1</sup>, en la zona 2 con 0.48 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 con únicamente 0.06 mg kg<sup>-1</sup>. En el segundo periodo muestreado el resultado de la zona 4 fue de 0.32 mg kg<sup>-1</sup>, el de la zona 2 fue de 0.23 mg kg<sup>-1</sup> y en la zona 1 no tuvo presencia. Con dichos valores reportados, se encuentran muy por debajo del rango de toxicidad reportado.

En relación al Zn cuantificado, la zona 4 tuvo la mayor concentración con 21.45 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 1 la menor concentración con 12.30 mg kg<sup>-1</sup>. En el segundo periodo, la zona 4 presento un valor de 14.67 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 2 con 12.34 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 1 con 5.78 mg kg<sup>-1</sup>, por lo que las zonas muestreadas, no presentan riesgo de toxicidad crítica.

El Mn tuvo una presencia alta en la zona 1 con 61.50 mg kg<sup>-1</sup>, seguida por la zona 2 con 32.38 mg kg<sup>-1</sup> y por último la 4 con 23.67 mg kg<sup>-1</sup>, con respecto al P1. En el segundo periodo, nuevamente la zona 1 fue la de mayor presencia con 33.56 mg kg<sup>-1</sup>, seguida de la zona 2 con 11.34 mg kg<sup>-1</sup> y finalmente la zona 3 con 10.45 mg kg<sup>-1</sup>. En relación a este metal, no se rebasa en ninguna de las zonas, el valor mínimo reportado como crítico toxico, el cual es de 100 mg kg<sup>-1</sup>.

El As absorbido no fue detectable en ninguna de las tres zonas en ambos periodos muestreados.



**Figura 32.** Metales absorbidos en *Juniperus flaccida*.

El coeficiente de correlación lineal de los metales absorbidos en la especie *Juniperus flaccida*, en el P1, son como a continuación se detallan: Cu-Ni: 0.95, Fe-Pb: 0.90, Fe-Cd: 0.99, Fe-Zn: 0.98, Pb-Cd: 0.93, Pb-Zn: 0.96 y Cd-Zn: 0.99.

Para el P2, la correlación es la siguiente: Cu-Ni: 0.80, Fe-Pb: 0.65, Fe-Cr: 0.98, Ni-Zn: 0.60, Pb-Cd: 0.87, Pb-Zn: 0.86 y por último Cd-Zn: 0.99.

La determinación de metales pesados en la especie *Quercus rugosa*, se detallan a continuación:

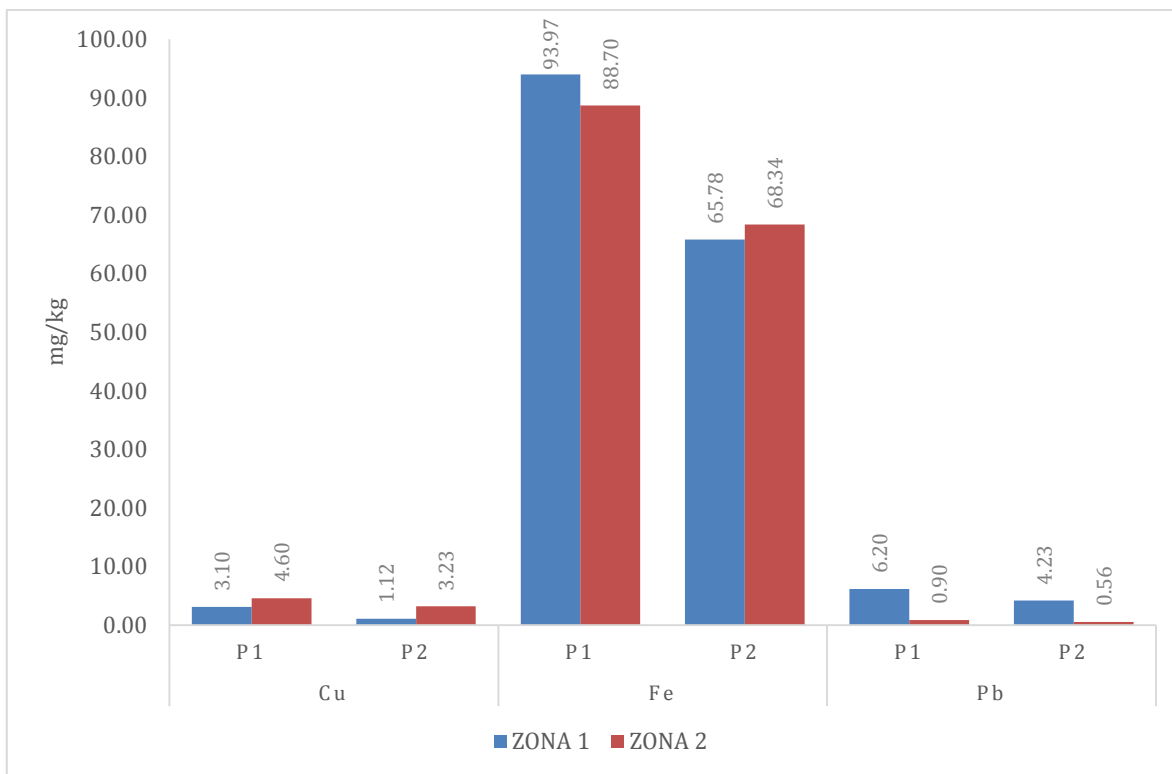
El Cu, se determinó en la zona 2 con un valor de  $4.60 \text{ mg kg}^{-1}$ , mientras que en la zona 1 son un valor de  $3.10 \text{ mg kg}^{-1}$ , correspondiente al P1. Con respecto al P2, la zona 2 tuvo una concentración de  $3.23 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 1 de  $1.12 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estos valores reportados, se encuentran por debajo del rango  $20\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$ , reportado por su toxicidad crítica en vegetales.

El metal Fe, en el primer periodo tuvo una cuantificación en la zona 1 de  $93.97 \text{ mg kg}^{-1}$  y en la zona 2 de  $88.70 \text{ mg kg}^{-1}$ . En el P2, los resultados fueron inversos, ya que se encontró mayor presencia en la zona 2 con  $68.34 \text{ mg kg}^{-1}$  con respecto a la zona 1, la cual tuvo una concentración de  $65.78 \text{ mg kg}^{-1}$ . Con respecto al P1, los valores reportados, se encuentran dentro del rango de toxicidad crítica, mientras que en el P2, se encuentran por debajo de dicho rango.

El Ni en esta especie vegetal, no fue detectable en ningún periodo en las zonas 1 y 2.

El metal pesado Pb, presento un valor de  $6.20 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 1 y de  $0.90 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 2, con respecto al P1. En el P2, la zona 1 tuvo una concentración de  $4.23 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 2 de  $0.56 \text{ mg kg}^{-1}$  solamente. El Pb absorbido, únicamente la zona 1 en el P1, se encuentra dentro del rango reportado de toxicidad crítica.

El Hg, no tuvo presencia en ningún periodo en las dos zonas tanto en la 1 como en la 2.



**Figura 33.** Metales absorbidos en *Quercus rugosa*.

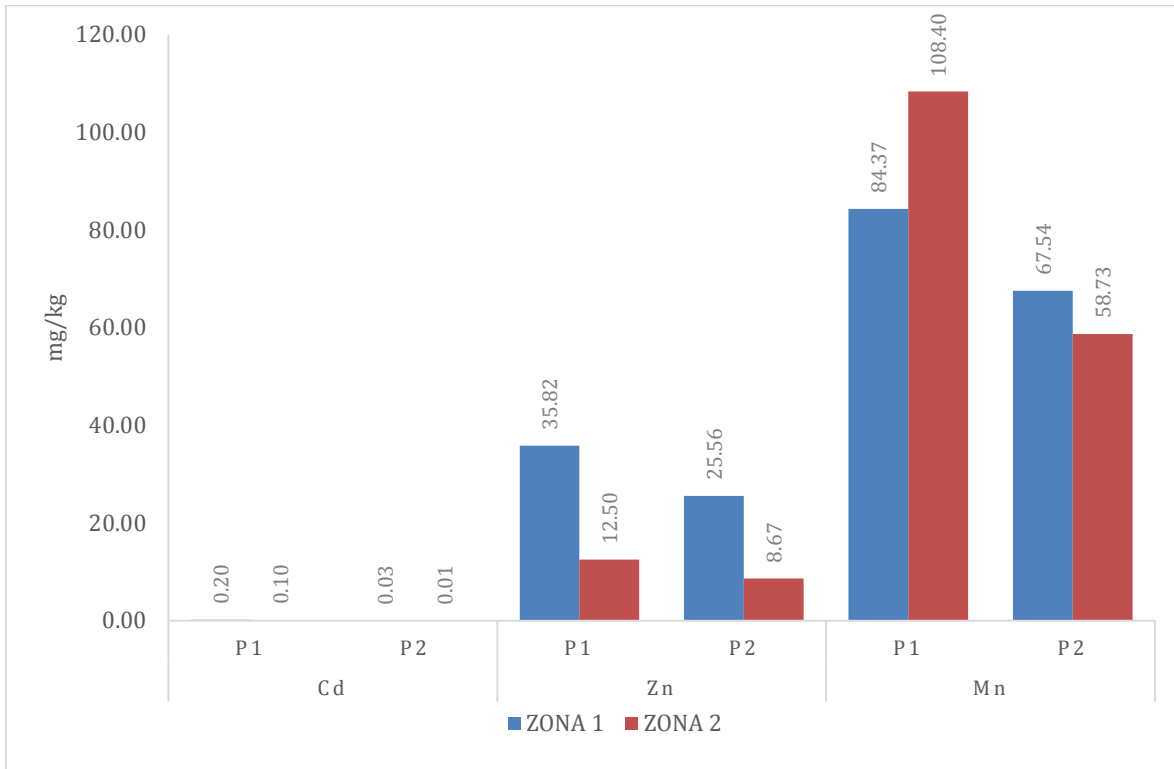
El metal Cr, no presentó absorción en la especie *Quercus rugosa*, en ambos periodos en las zonas 1 y en la zona 2.

El metal pesado Cd, se cuantificó en el P1 en la zona 1 con un valor de 0.20 mg kg<sup>-1</sup> y en la zona 2 con un valor de 0.10 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2 de muestreo, la zona 1 presento un resultado de 0.03 mg kg<sup>-1</sup> mientras que la zona 2 un resultado de 0.01 mg kg<sup>-1</sup>, por lo cual, no representa problemas de toxicidad crítica con respecto a este metal.

La absorción del Zn, se detectó en la zona 1 con un valor de 35.82 mg kg<sup>-1</sup> y en la zona 2 con un valor de 12.50 mg kg<sup>-1</sup> en los que respecta al primer periodo de muestreo. En el P2, la zona 1 la concentración del Zn fue de 25.56 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 de 8.67 mg kg<sup>-1</sup>. Teniendo en cuenta que el valor mínimo del rango de toxicidad es 100 mg kg<sup>-1</sup>, las zonas presentadas se encuentran por debajo de dicho valor en ambos periodos de muestreo.

En relación al Mn absorbido en el P1, la determinación de la zona 2 arrojó un valor de 108.40 mg kg<sup>-1</sup> y de la zona 1 de 84.37 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona 1 tuvo una concentración de 67.54 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 de 58.73 mg kg<sup>-1</sup>. Las dos zonas, se encuentran por debajo del rango crítico de toxicidad en ambos periodos.

El As, no fue detectable en ninguna de las zonas, tanto la zona 1 como en la zona 2, en los dos periodos muestreados.



**Figura 34.** Metales absorbidos en *Quercus rugosa*.

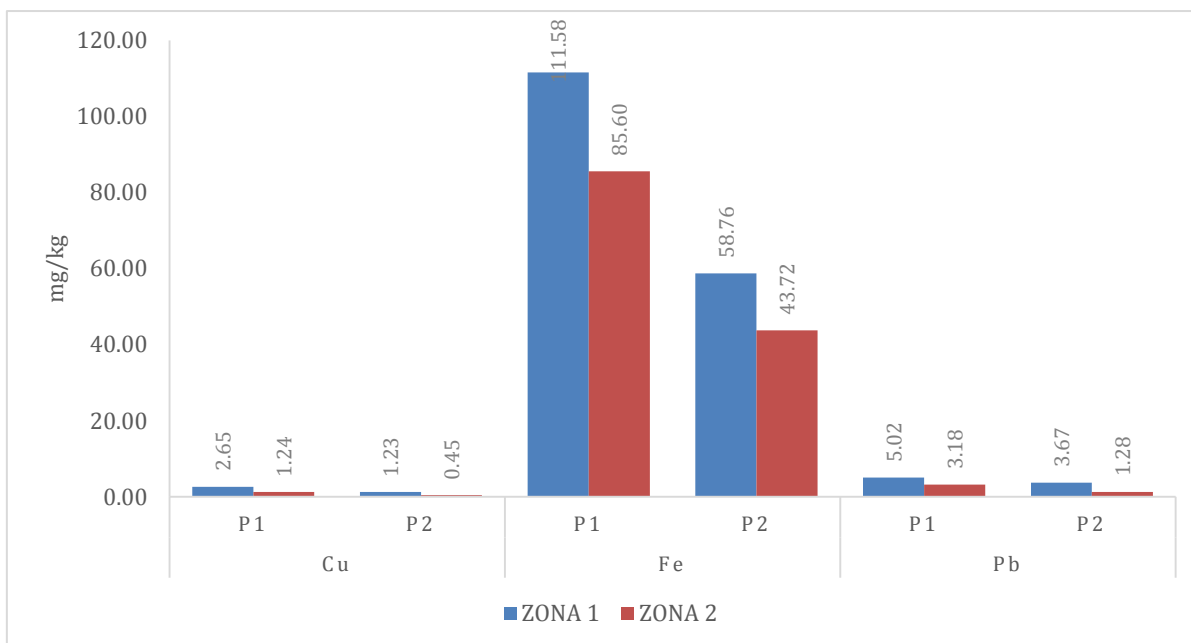
La determinación de los diferentes metales pesados, realizados al vegetal *Quercus mexicana*, se muestra que el Cu, estuvo presente en la zona 1 con 2.65 mgkg<sup>-1</sup> y en la zona 2 con 1.24 mg kg<sup>-1</sup>, en relación al primer periodo. En el P2, los valores obtenidos en la zona 1 es de 1.23 mg kg<sup>-1</sup> y en la zona 2 de 0.45 mg kg<sup>-1</sup>. Ambas zonas, no rebasan el valor mínimo del rango de toxicidad crítica en vegetales.

El Fe, se determinó en primer periodo en la zona 1 con una concentración de 111.56 mg kg<sup>-1</sup> mientras que en la zona 2 con 85.60 mg kg<sup>-1</sup>. En el P2, la zona que presento la mayor presencia fue la zona 1 con 58.76 mg kg<sup>-1</sup>, mientras que la zona 2 fue de 43.72 mg kg<sup>-1</sup>. En lo que respecta al P1, las dos zonas se encuentran en el rango de toxicidad crítica, mientras que en lo que respecta al P2, se encuentran por debajo de dicho rango.

El Ni, no fue detectable en ninguna de las dos zonas (1 y 2) en ambos periodos de muestreo.

La absorción del Pb se presentó en la zona 1 con un valor de 5.02 mg kg<sup>-1</sup> y en la zona 2 con 3.18 mg kg<sup>-1</sup>, en relación al P1. En el segundo periodo de muestreo, la zona 1 presento un valor de 3.67 mg kg<sup>-1</sup> y la zona 2 un valor de 1.28 mg kg<sup>-1</sup>. En ambos periodos, las zonas 1 y 2, se encuentran dentro del rango crítico de toxicidad en vegetales.

El Hg, no fue detectable en ninguna de las dos zonas muestreadas (1 y 2) en ambos periodos.



**Figura 35.** Metales absorbidos *Quercus mexicana*.

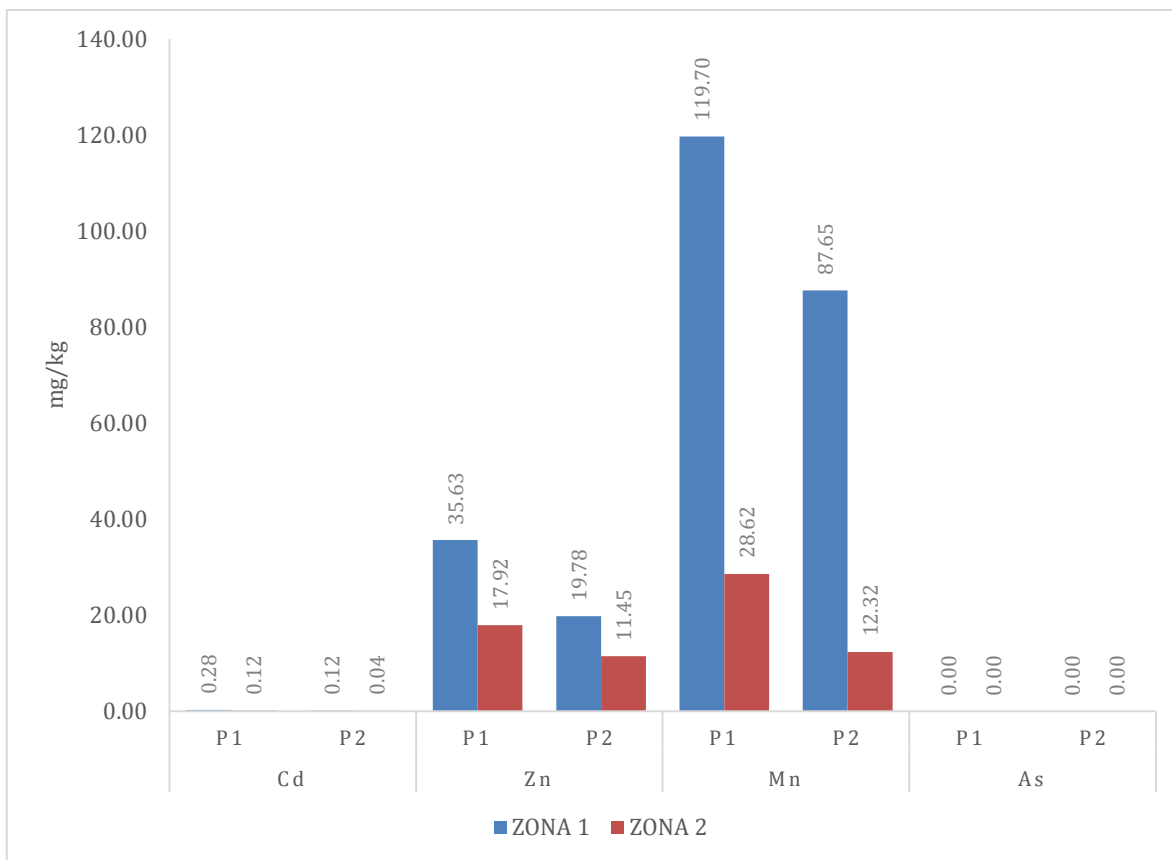
El Cr detectado en la especie *Quercus mexicana*, no presentó valor alguno, en ninguna de las zonas, en los dos periodos muestreados.

El metal Cd absorbido en el P1, presentó una concentración de  $0.28 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 1, mientras que en la zona 2 de  $0.12 \text{ mg kg}^{-1}$ . En el P2, la zona 1 tuvo una concentración de  $0.12 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 2 de  $0.04 \text{ mg kg}^{-1}$ . Dichos resultados, no representa problemas en toxicidad crítica en vegetales.

El Zn, en el P1, tuvo una concentración de  $35.63 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 1 y de  $17.92 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 2, mientras que en el segundo periodo, tuvo una presencia de  $19.78 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 1 y de  $11.45 \text{ mg kg}^{-1}$  en la zona 2, lo cual, no presentan problemas de toxicidad.

Con respecto al Mn absorbido, en el primer periodo la zona 1 presento una concentración de  $119.70 \text{ mg kg}^{-1}$  y la zona 2 de  $28.62 \text{ mg kg}^{-1}$ . En el P2, la zona 1 tuvo un valor de  $87.65 \text{ mg kg}^{-1}$  mientras que la zona 2 de  $12.32 \text{ mg kg}^{-1}$ . Estos valores se encuentran por debajo del límite menor del rango ( $200 \text{ mg kg}^{-1}$ ), para presentar problemas de toxicidad.

El Metal pesado As, no fue detectado en ninguna de las 2 zonas (1 y 2) en los dos periodos de muestreo.



**Figura 36.** Metales absorbidos en *Quercus mexicana*.

En la figura 37, se muestra la ubicación y los alrededores del Parque Estatal Gral. Lázaro Cárdenas “Flor del Bosque”, en donde se observa la fuerte influencia de los Parques Industriales que se encuentran en la parte Norte del Parque Estatal, lo cual, se puede deducir, que teniendo en cuenta que los vientos predominantes por las mañanas en la ciudad de Puebla, provienen del Norte, los metales pesados que fueron detectados en el follaje de los diversos vegetales, tanto adsorbidos como absorbidos, pudieran venir de las emisiones de los diferentes tipos de industrias establecidas en los diferentes Parques Industriales, así como la gran afluencia vehicular que se presenta de manera frecuente, tanto por la zona industrial establecida, así como la intersección de autopistas de gran importancia para el país.



**Figura 37.** Ubicación de zonas de muestreo y sus alrededores

## 4. CONCLUSIONES

En base a los resultados presentados en esta investigación se muestra la presencia de los metales pesados adsorbidos: Cu, Fe, Ni, Pb, Hg, Cr, Cd, Zn, Mn, y As, en las cinco especies de vegetales, en los dos periodos muestreados, dentro del Parque Estatal General Lázaro Cárdenas “Flor del Bosque”, a excepción del As y Hg en el segundo periodo en todas las zonas, así como el Cr en la zona 1 del P1 y en ambas zonas en el P2 en relación a la especie *Quercus rugosa*, así mismo, no fue detectable para Ni en las zona 1 en el P1, para la zona 1 y 2 en el P2 y el Cr en ambos periodos en las dos zonas (1 y 2) en lo que respecta a la especie *Quercus mexicana*.

La presencia de estos metales pueden ser influenciada por la meteorología que presenta la ciudad de Puebla, la dirección de los vientos predominantes, así como la presencia de industrias aledañas a dicho Parque.

Es importante conocer que la adsorción de los metales pesados cuantificados en los vegetales, puede impactar de forma negativa en los seres vivos, ya que pueden presentarse procesos de bioacumulación, fenómenos de biomagnificación, así como también, se pueden solubilizarse con el agua de las precipitaciones pluviales, transportándolos a otros medios, ya sea, suelo, agua o resuspenderse en el aire, teniendo otro destino final, llegando afectar a los diferentes seres vivos, ya sea seres humanos, planta y/o animales.

Con respecto a los diez metales determinados absorbidos en las especies de vegetales, se compararon los resultados con los valores críticos de toxicidad reportados, los cuales se destaca lo siguiente:

Para el *Eucaliptus globulus*: el Cu presenta valores de toxicidad crítica en la zona 1 en el P2, el metal Pb, presenta valores de toxicidad en la zona 1, zona 2 y zona 3 en los dos periodos muestreados, el Mn, se encuentra en concentraciones tóxicas en las zonas 1 y 2 en el periodo 1.

En relación al *Eucalyptus camuldalensis*: El Fe, se encuentra en valores críticos de toxicidad en la zona 2 en el P1 y en el P2, el metal Pb, presento valores críticos de toxicidad en las zona 1, zona 2 y zona 3 en los dos periodos de muestreo.

Con respecto a la especie *Juniperus deppeana*, el Pb, presenta concentraciones críticas de toxicidad en las zonas: 1, 2 y 4 tanto en el periodo 1, como en el 2.

La absorción presentada en la especie *Juniperus flacciada*, muestra que el Cu, presentó valores críticos de toxicidad en vegetales en la zonas: 1, 2 y 4 en los periodos 1 y 2, el metal Cr, se encuentra en el rango de toxicidad crítica en las zonas 1, 2 y 4, en ambos periodos.

Los valores críticos de toxicidad para la especie *Quercus rugosa* presentada, fue en relación al Fe, en las zonas 1 y zona 2, únicamente en el P1, mientras que el Pb, se presentó en la zona 1 en el P1.

La especie *Quercus mexicana*, mostró concentraciones críticas de toxicidad en las zonas 1 y 2 del P1, con la presencia del Fe y de la zona 1 y zona 2 de ambos periodos, con la presencia del Pb.

Las zonas antes descritas, que presentan valores críticos de toxicidad por metales pesados absorbidos, en las diferentes especies, presentarán diversos problemas directamente en los vegetales a corto, mediano y largo plazo, como son: efectos citotóxicos, aumento de nivel de estrés oxidativo, problemas en su morfología, en su crecimiento, en sus procesos fotosintéticos, e inclusive la muerte, teniendo como resultado, el desequilibrio y perdida en la biodiversidad de los ecosistemas que se relacionen entre si.

Es importante continuar con el monitoreo de la calidad del aire dentro de la zona, para identificar las fuentes de contaminación mas importantes y exhortarlos a que implementen procesos mas limpios y/o que establezcan medidas de mitigación para minimizar el impacto al medio ambiente que se ha efectuado, a lo largo de los años.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anze, R.; Franken, M.; Zaballa, M.; Pinto, M. R.; Zeballos, G.; Cuadros, M. A.; Canseco, A.; De la Rocha, A.; Estellano, V. H.; Del Granado, S. 2007. *Bioindicadores en la detección de la contaminación ambiental en Bolivia*. Revista Virtual REDESMA. Unidad de Calidad Ambiental. Instituto de Ecología. p. 74.
- Blaylock MJ, Huang JW, 2000. *Phytoextraction of metals*. In: Raskinl, Ensley BD (eds) *Phytoremediation of toxic metals-using plants*.
- Cakmak, I. Marshner, H. 1993. *Effect of zinc nutritional status on superoxide radical and hydrogen peroxide scavenging enzymes in bean leaves*. In: Barrow NJ (ed) *Plant nutrition-from genetic engineering field practice*. Kluwer, The Netherlanads, pp 133–137.
- Chiron M., P. Quenel et D. Zmirou, 1997. *La pollution atmosphérique d'origine automobile et la santé publique*. *Poll. Atm., Janvier - Mars*, pp. 41-52.
- Clijsters, H. Van Assche, F. 1985. *Inhibition of photosynthesis by heavy metals*. *Photosynth Res* 7:31–40.
- Das, P. Samantaray, S. Rout, G.R. 1997. *Studies on cadmium toxicity in plants: a review*. *Environ Pollut* 98:29–36.
- Davies, F.T., Puryear, J.D., Newton, R.J., Egilla, J.N., Grossi, J.A.S. 2002. *Mycorrhizal fungi increase chromium uptake by sunflower plants: influence on tissue mineral concentration, growth, and gas exchange*. *J Plant Nutr* 25:2389–2407.
- Dockery D.W., C.A. Pope, X. Xu, J.D. Spengler, M.E. Ware, B.G. Fay, Jr. Ferris and F.E. Speizer, 1993. *An association between air pollution and mortality in six US cities*. *N. Eng. J. Med.*, N°329, pp. 1753 –1759.

- Fageria, N.K., Baligar, V.C. and C. A: Jones, 2014. *Mineral Nutrition of Rice* Ed. CRS Press Taylor & Francis Group, Boca del Rio, Fl. 457 pp.
- Gimeno-Garcia E, Andreu V, Boluda R, 1996. *Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils*. Environ Pollu 92:19–25.
- Gupta, U. C. and Gupta, S. C.: 1998, Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health: Implication for management, Commun. Soil. Sci. Plant Anal. 29, 1491–1522.
- Han, F.X., Su, Y., Monts, D.L., Waggoner, A.C., Plodinec, J.M. 2006. *Binding distribution and plant uptake of mercury in a soil from Oak Ridge*. Tennessee USA. Sci Total Env 368:753–768.
- Janssen N. A. H., D. F.M. Van Mansom, K. Van Der Jagd, H. Harsema and G. Hoek, 1997. *Mass concentration and elemental composition of airborne particulate matter at street and background locations*. Atm. Env., Vol. 31, N°8, pp. 1185-1193.
- Krämer U 2010, *Metal hyperaccumulation in plants*. Annu Rev Plant Biol 61:28.1–28.18
- Lewis S, Donkin ME, Depledge MH, 2001. *Hsp 70 expression in Enteromorpha intestinalis (Chlorophyta) exposed to environmental stressors*. Aqua Toxicol 51:277–291.
- López D.M.G. 2009, Distribución y fitodisponibilidad de metales pesados (Sb, Hg, As) en los jales de la mina de antimonio de wadley, Estado de San Luis Potosí. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Madejón, P. 2003. *Elementos Traza y nutrientes en álamo blanco tras vertido tóxico de las minas de Aznalcóllar*. Invest. Agrar: Sist. de Recur. For. 12(3): 19-32.
- Market, B. 2007. *Definitions and principles for bioindication and biomonitoring of trace metals in the environment*. Third International Fesdem Symposium. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology. 21 SI: 77-82.
- Marschner H, 1995. *Mineral nutrition of higher plants*, 2da Edición. Academic Press, Toronto.
- Martínez-Tabche I, Gómez-oliván I, Martínez m, Castillo c and Santiago a 2000. *Toxicity of nickel in artificial sediment on acetylcholinesterase activity and hemoglobin concentration of the aquatic flea, moina macrocopa*. Journal of environmental hidrology PP. 1-10.
- Martínez, M. 1963. *Los Juniperus Mexicanos*. Pináceas mexicanas. Tercera Edición. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México, México, Distrito Federal. pp. 289-400.
- Monni S, Salemma M, Millar N, 2000. *The tolerance of Empetrumnigrum to copper and nickel*. Environ Pollut 109:221–229.
- Moragues J.A. 2010. *Manual de tecnologías de medición de concentración de gases y material particulado en chimeneas y atmósfera*. Programa Desarrollo Institucional Ambiental Control de Contaminación Industrial. Argentina.
- Nagajyoti, P.C, Lee, K.D, Sreekanth, T.V.M, 2010. *Heavy metals, occurrence and tpxicity for plants: a review*, Springer-Verlang.
- Nava, R.C. y Méndez, A.M., (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). Archivos de Neurociencias, pp. 140 - 147.

Patra M, Bhowmik N, Bandopadhyay B, Sharma A 2004, *Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance*. Environ Exp Bot 52:199–223.

PNUMA 2002, *Perspectivas del medio ambiente mundial GEO-3*. Grupo Mundi-Prensa. España.

Pope C.A., M.J. Thun, M. Namboodira, D.W. Dockery, J.S. Evans, F.W. Speizer and Jr. C. W. Heath, 1995. *Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults*. Am. J. Respir. Crit. Care Med., Vol. 151, N°3, pp. 669-674.

Reddy, A.M., Kumar, S.G., Jyotsnakumari, G., Thimmanayak, S., Sudhakar, C. 2005. *Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram. Macrotyloma uniflorum*. 60: 97–104.

Ros R, Cook DavidT, Picazo CarmenMartinez-Cortinalsabel, 1992. *Nickel and cadmium-related changes in growth, plasma membrane lipid composition, atpase hydrolytic activity and proton pumping of rice. Shoots*. J Exp Bot 43:1475–1481.

Ross, R. 1974. *La Industria y la Contaminación del Aire*. Ed. Diana, México.

Schroeder W.H. 1987, *Toxic trace elements associated with airborne particulate matter, a review*. JAPCA, Vol 37, N°11, pp. 1267 – 1285.

SEMARNAT 2012, *Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental*, capítulo 5.

SEMARNAT. SMRN, 2006-2011. *Programa de gestión de calidad del aire de la zona metropolitana del valle de Puebla*.

Tlapa A.M. 2011, *Áreas naturales protegidas periurbanas del área metropolitana del Estado de Puebla*. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados, Puebla, Pue.

Tomašević, M., Rajšić, S., Đorđević, D., Tasić, M., Krstić, J., Novaković, V. 2004. *Heavy metals accumulation in tree leaves from urban areas*. Environ Chem Let: 151-154

Zhang, W.H., Tyerman, S.D. 1999. *Inhibition of water channels by HgCl<sub>2</sub> in intact wheat root cells*. Plant Physiol 120:849–857.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

BVSDE 2014. Contaminación Atmosférica. Disponible en <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-02a9.pdf>. Consultado el 25 de Octubre de 2014.

EPA, 2010. *Air pollution*. Disponible en <http://www.epa.gov/airtrends/2010/report/airpollution.pdf>. Consultado el 26 de Septiembre de 2014.

INECC, 2014. *Contaminación del aire*. Disponible en <http://www.inecc.gob.mx/calair-info/informacion-basica/521-calair-cont-air>. Consultado el 7 de Septiembre de 2014.

SEMARNAT, 2008. Compendio Estadísticas Ambientales 2008. Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_2008/compendio\\_2008/compendio\\_2008/10.100.8.236\\_8080/ibi\\_apps/WFServlete5c8.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/compendio_2008/compendio_2008/10.100.8.236_8080/ibi_apps/WFServlete5c8.html). Consultado el 2 de Diciembre de 2014.

Infojardín, 2012. Fichas de plantas. Disponible en: <http://fichas.infojardin.com/bonsai/eucalyptus-globulus-eucalipto-blanco-gomero-azul-bonsai.htm>. Consultado el 6 de Enero de 2015.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 2012. *Eucalyptus camaldulensis*. Disponible en: <http://www.biodiversidad.gob.mx/Difusion/cienciaCiudadana/urbanos/ficha.php?item=Eucalyptus%20camaldulensis>. Consultado el 10 de Enero de 2015.

Viades T. J. 2013. Fenómenos de superficie. Adsorción. Disponible en: [http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorcion\\_23226.pdf](http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3.Fenomenosuperficiales.Adsorcion_23226.pdf). Consultado el 6 de Enero de 2015.