



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

**DETERMINACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN EL MATERIAL
PARTICULADO EMITIDO POR LA QUEMA DE CAÑA DE AZÚCAR Y EL INGENIO LA
GLORIA, VERACRUZ**

GUISEL ALEYDA CASTRO GERARDO

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS

TEPETATES, MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO

2017

La presente tesis, titulada: **Determinación y distribución de metales pesados en el material particulado emitido por la quema de caña de azúcar y el ingenio La Gloria, Veracruz**, realizada por la alumna: Guisel Aleyda Castro Gerardo, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
AGROECOSISTEMAS TROPICALES

CONSEJO PARTICULAR

Consejero:

Dr. Cesáreo Landeros Sánchez

Asesor:

Dr. Juan Pablo Martínez Dávila

Asesor:

Dr. Gustavo López Romero

Asesor:

Dr. Eugenio Carrillo Ávila

Tepetates, Manlio F. Altamirano, Veracruz, 7 de marzo de 2017.

DETERMINACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN EL MATERIAL PARTICULADO EMITIDO POR LA QUEMA DE CAÑA DE AZÚCAR Y EL INGENIO LA GLORIA, VERACRUZ

Guisel Aleyda Castro Gerardo, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2017

La actividad agrícola es una de las principales fuentes de contaminación del medio ambiente. Entre éstas se encuentran la quema de caña de azúcar y el proceso agroindustrial realizado por los ingenios, los cuales emiten un gran volumen de material particulado, combinado con metales pesados como Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (Zn). Esto ha resultado en problemas serios de contaminación ambiental y afectaciones a la salud humana. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar las concentraciones y distribución espacial de metales pesados, tales como Cd, Cu, Pb y Zn, presentes en el material particulado emitido por el ingenio La Gloria y la quema de caña de azúcar en los agroecosistemas regionales, en función de la distancia a la que tal material se depositó durante el proceso de emisión. La investigación se realizó en áreas aledañas al ingenio La Gloria, Veracruz. Se establecieron dos zonas de estudio: la zona A, de los 50 a los 400 m y la zona B, de los 401 a los 900 m del ingenio La Gloria. En éstas se ubicaron, de manera aleatoria, 51 sitios de recolección de muestras de cenizas, 17 en la zona A y 34 en la B. Las muestras recolectadas fueron representativas del área de estudio, ya que en ésta se observó la mayor incidencia de material particulado. Se encontró, mediante un análisis de medias, que las concentraciones de Cd, Cu y Pb en la zona A fueron mayores que en la zona B, es decir: 100.6179 y 66.3614 $\mu\text{g g}^{-1}$; 92.2825 y 47.2526 $\mu\text{g g}^{-1}$; y 876 8559 y 701.3888 $\mu\text{g g}^{-1}$. No obstante, se observó una concentración media de Zn en la zona A menor que en la zona B, esto es, 28.5941 y 28.8798 $\mu\text{g g}^{-1}$. Además, no se observó diferencia estadística significativa entre zonas.

Palabras clave: Contaminación del aire, cenizas, metales pesados.

DETERMINATION AND DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN PARTICULATE
MATTER EMITTED BY SUGAR CANE BURNING AND SUGAR FACTORY LA GLORIA,
VERACRUZ

Guisel Aleyda Castro Gerardo, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2017

The agricultural activity is one of the main contamination sources for the environment. Among such sources that are taking place in the studied area the sugarcane burning and the sugar factory agroindustrial process cause the emission of a great volume of particulate matter (ashes) that carries along heavy metals like Cadmium (Cd), Copper (Cu), Lead (Pb), and Zinc (Zn). This has resulted in serious environmental contamination problems and affections to public health. Therefore, the aim of this study was to determine the spatial distribution and concentrations of heavy metals, such as Cd, Cu, Pb y Zn, which are present in the particulate matter emitted by the agroindustrial process of the sugar factory La Gloria, Veracruz and the sugarcane burning, which is deposited on the regional agroecosystems depending on their location. This research work was carried out at the surrounding areas of this sugar factory. Two zones were chosen for this study, i.e., A and B. The zone A sampling points were at 50 to 400 m and those of zone B at 401 to 900 m far from the sugar factory La Gloria. In these two zones, 51 particulate matter sampling points were selected at random for ashes sampling. Zone A included 17 ashes sampling points and 34 for zone B. The samples collected were representative of the studied area, since the major incidence of the particulate matter occurred in it. It was found through a means analysis that Cd, Cu y Pb concentrations in zone A were higher than those in zone B, that is: 100.6179 y 66.3614 $\mu\text{g g}^{-1}$; 92.2825 y 47.2526 $\mu\text{g g}^{-1}$; y 876 8559 y 701.3888 $\mu\text{g g}^{-1}$. However, it was observed a Zn mean concentration in zone A less than that in zone B, i.e., 28.5941 y 28.8798 $\mu\text{g g}^{-1}$. Furthermore, no statistical significant differences were found between zones.

Keywords: Air pollution, ashes, heavy metals.

DEDICATORIA

A Dios por permitirme tener a mi lado a mis padres Paz Gerardo Hernández y Fidel Castro Cortes, quienes han sido pilar en mi formación. Así como por el apoyo incondicional que me han brindado para cumplir cada uno de mis logros y por alentarme a seguir adelante. Les amo.

A mi hermano Fidel Castro Gerardo por su apoyo fraternal y formar parte de mi vida.

A mi abuelita Concepción Hernández Mauro[†], ya no estás aquí pero vivirás siempre en mi corazón, gracias por tus enseñanzas, por preocuparte por mí, consentirme y cuidarme.

A Marcos Ramírez Ramos por brindarme su apoyo incondicional y comprensión en esta etapa de mi formación académica.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo Nacional de ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante el periodo de mi formación en el postgrado de Agroecosistemas Tropicales.

Al Colegio de Postgraduados Campus Veracruz por permitirme ingresar y obtener la formación académica de un postgrado en esta prestigiada institución.

Al Dr. Cesáreo Landeros Sánchez por sus enseñanzas, consejos, dirección y paciencia en el desarrollo de mi formación académica.

Al Dr. Juan Pablo Martínez Dávila por su disposición de tiempo y paciencia de apoyarme y al Dr. Gustavo López Romero por sus valiosas observaciones y aportaciones en el presenta trabajo de investigación. Asimismo, al Dr. Eugenio Carrillo Ávila por formar parte de mi Consejo Particular y por sus aportaciones a la investigación.

Al Ing. Leopoldo Montero Ramírez y su brigada por el apoyo incondicional que me brindaron para el monitoreo de la zona aledaña al ingenio “La Gloria”.

A la Dra. María del Refugio Castañeda Chávez y a su equipo de trabajo por brindarme el apoyo para realizar cada uno de los análisis de laboratorio de las muestras de cenizas.

A Juan Manuel Hernández Pérez por brindarme su valiosa amistad y apoyo académico.

A mis compañeros de generación Xe-miyos y a todos aquellos con quienes entablé una bonita amistad, ha sido muy gratificante conocerlos y gracias por su apoyo incondicional.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	3
2.1. Teoría general de sistemas.....	3
2.2. Concepto de agroecosistemas.....	4
2.2.1. Conceptualización del agroecosistema caña de azúcar-metal pesado.....	5
2.3. Contaminación ambiental.....	8
2.4. Medio ambiente.....	8
3. MARCO DE REFERENCIA DE LITERATURA CONSULTADA.....	9
3.1. Material particulado.....	9
3.2. Fuentes de contaminación por metales pesados.....	9
3.3. Metales pesados.....	10
3.3.1. Cadmio (Cd).....	10
3.3.2. Cobre (Cu).....	11
3.3.3. Plomo (Pb).....	12
3.3.4. Zinc (Zn).....	13
3.4. Metales pesados en el suelo.....	13
3.4.1. Dinámica de los metales pesados en el suelo.....	14
3.5. Metales pesados en las plantas.....	15
3.5.1. Tolerancia de plantas a metales pesados.....	16
3.6. Metales pesados en cuerpos de agua.....	17
3.7. Quema de biomasa de caña de azúcar.....	17
4. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA.....	19
4.1. Definición del problema de investigación.....	19
5. HIPÓTESIS.....	22
6. OBJETIVO.....	22
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	23

7.1. Fases de la investigación.....	23
7.1.1. Fase 1. Selección del área de estudio.....	23
7.1.2. Fase 2. Recolección de muestras de material particulado.....	23
7.1.3. Fase 3. Análisis de las muestras de material particulado.....	25
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
8.1. Tendencia de la concentración total de metales pesados en relación con la zona de recolección	29
8.1.1. Cadmio.....	29
8.1.2. Cobre.....	31
8.1.3. Plomo.....	32
8.1.4. Zinc.....	34
8.2. Contenido de metales pesados en el material particulado.....	35
8.3. Análisis de Cd, Cu, Pb y Zn.....	36
8.4. Contrastación de hipótesis.....	45
9. CONCLUSIONES.....	46
10. LITERATURA CITADA.....	48

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Niveles de toxicidad.....	16
Cuadro 2. Programación del Horno de Microondas: método Soil HP500 para residuos sólidos.....	27
Cuadro 3. Concentraciones medias de cada uno de los metales pesados analizados.....	36
Cuadro 4. Análisis de la matriz de varianza explicada.....	39
Cuadro 5. Análisis de correlación de variables con componentes.....	40
Cuadro 6. Valores de concentración altos de Cd, Cu, Pb y Zn.....	42
Cuadro 7. Valores de concentración medios de Cd, Cu, Pb y Zn.....	42
Cuadro 8. Valores de concentración bajos de Cd, Cu, Pb y Zn.....	42

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Modelo conceptual del agroecosistema.....	7
Figura 2. Dinámica de los metales pesados en el suelo.....	15
Figura 3. Esquema de la situación problemática.....	21
Figura 4. Ubicación del área de estudio, aledaña al Ingenio La Gloria, Veracruz.....	23
Figura 5. Distribución y localización de las zonas A y B donde se distribuyeron los sitios de recolección de cenizas en el área de estudio.....	24
Figura 6. Procesos de 1) recolección; 2) tamizado; 3) pesado; y 4) empaquetado de las muestras de cenizas en los 51 sitios seleccionados.....	25
Figura 7. Matraces aforados con la solución final para su respectivo análisis.....	28
Figura 8. Uso del Espectrofotómetro de Absorción Atómica para determinar la concentración de los metales pesados estudiados.....	28
Figura 9. Distribución de las concentraciones del Cd en los 51 puntos de muestreo.....	30
Figura 10. Distribución de las concentraciones del Cu en los 51 puntos de muestreo.....	31
Figura 11. Distribución de las concentraciones del Pb en los 51 puntos de muestreo.....	33
Figura 12. Distribución de las concentraciones del Zn en los 51 puntos de muestreo.....	35
Figura 13. Análisis de varianza de la comparación entre zonas del material particulado: a) Cd; b) Cu; c) Pb; y d) Zn.....	38
Figura 14. Clasificación de los niveles de contaminación en grupos alto, medio y bajo, según el Índice obtenido del ACP.....	40

Figura 15.	Nivel de concentración de contaminantes.....	41
Figura 16.	Mapa de la distribución geográfica de los puntos de muestreo.....	44

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace mucho tiempo fueron notados diversos problemas de contaminación, toxicidad y ecotoxicidad en la atmósfera, atribuidos a ciertos metales pesados y a algunos de sus compuestos (Schinitman, 2004).

Actualmente se reconoce la importancia de evaluar las emisiones ocasionadas por la agroindustria azucarera, considerada como una de las actividades antropogénicas impulsora de la contaminación atmosférica. En este sentido, la actividad agrícola se encuentra inmersa en la problemática ambiental debido a procesos de transformación de la materia prima, siendo los ingenios azucareros los emisores de cenizas a la atmosfera de un alto volumen de material particulado en conjunto con una alta concentración de metales pesados como Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (Zn). Las altas concentraciones de metales pesados convergen en áreas expuestas, tales como: casas habitación, bienes materiales y, enfáticamente, los agroecosistemas. Asimismo, las áreas cercanas se vuelven muy vulnerables a estas concentraciones por su carácter no biodegradable y, además, los efectos negativos que ejercen sobre los diferentes cultivos y su biodisponibilidad pueden resultar peligrosos para la salud ambiental y humana (Méndez *et al.*, 2009).

La actividad productiva cañera es de gran importancia social, cultural, política y económica, ya que la agroindustria es una fuente muy importante de empleos. Esta agroindustria genera alrededor de dos millones de empleos en forma indirecta y directa, con prevalencia en la mayoría de las áreas tropicales y subtropicales (SE, 2012). Esto conlleva severos problemas de contaminación, por el aumento del volumen de material particulado industrial, agrícola y doméstico producidos por la actividad cañera, los cuales impactan negativamente la salud del medio ambiente (Basanta *et al.*, 2007).

Las partículas volátiles producidas por el proceso de combustión, como resultado de la quema y el proceso agroindustrial de transformación de la caña de azúcar dentro de los ingenios, poseen una propiedad higroscópica que facilita su adición con diversas sustancias que se encuentran en el aire y tienden a bioacumularse en las plantas. Este fenómeno contribuye a que los metales pesados se incorporen a la cadena trófica (Iannacone y Alvaríño, 2005).

En este sentido, en las zonas cañeras aledañas al ingenio La Gloria, Veracruz, se puede observar una lluvia de partículas volátiles durante el periodo de zafra. La presencia de dichas partículas causa problemas en el desarrollo de las plantas, alteraciones en cuerpos de agua y suelo, y un desgaste energético humano (Querol, 2008).

La determinación de la concentración de metales pesados presentes en las partículas volátiles emitidas por el ingenio La Gloria, sirve para valorar no solo su potencial toxicológico y sus implicaciones al medio ambiente; sino también contribuir al desarrollo de estrategias que permitan reducir y mitigar la contaminación del medio ambiente (Rovira *et al.*, 2010).

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar las concentraciones y la distribución espacial de los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn, presentes en el material particulado emitido por el ingenio La Gloria y la quema de caña de azúcar en los agroecosistemas regionales, en función de la distancia en que tal material se depositó durante el proceso de emisión.

2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

En este apartado se puntualizan las principales teorías y conceptos que respaldan la investigación.

2.1. Teoría general de sistemas

En un sentido amplio, se presenta como una forma sistemática y científica de aproximación y representación de la realidad, al mismo tiempo, esto permite una orientación hacia la práctica del pensamiento complejo (Arnold, 1998).

Existen varios enfoques para contribuir a la solución de problemas de tipo complejo, los cuales son lógicamente no homogéneos presentes en los modelos conceptuales. La teoría general de sistemas (TGS) también es identificada con la cibernética y la teoría de control. La cibernética, como teoría de los mecanismos de control en la tecnología y la naturaleza, fundada en los conceptos de información y retroalimentación, no es sino una parte de la teoría general de sistemas cibernéticos y que son un caso especial dentro de los sistemas que exhiben autorregulación (Bertalanffy, 1993).

Con base en lo anterior, Herrscher y Ackoff, (2003) demostraron que los sistemas no son un conjunto de elementos interrelacionados con un objetivo común. Al contrario, las personas hacemos al sistema, al verlo como sistema, al decidir considerarlo integrante de una categoría que tiene ciertas propiedades. Además, éste se comporta de forma variable con respecto al tiempo y se mantiene frente al entorno completo y cambiante gracias a la posición de una diferencia con respecto al mismo. Al mismo tiempo, conforme a su propia organización y en la que el entorno es fuente de constantes estímulos, se plantea como una conservación del sistema (Luhmann, 1998).

Los principales cambios han ocurrido, particularmente en aumento del interés puesto en la interacción entre los sistemas agrícolas, el ambiente y la sociedad. Por ello, la agricultura debe ser analizada como un sistema, si es que las soluciones quieren ser más congruentes con la realidad. Lo que concierne a la teoría ecológica y de sistemas en la agricultura es una herramienta de aplicación, con una visión y enfoque holístico de los agroecosistemas (Chiavenato, 1997). La TGS se caracteriza por su perspectiva holística e integradora, donde lo importante son las relaciones y los conjuntos que a partir de ellas emergen y se adecua para su interrelación.

2.2. Concepto de agroecosistema (AES)

Es necesario destacar algunas conceptualizaciones de autores que han profundizado en la estructuración y comprensión de los AES en la actualidad.

El agroecosistema es una palabra compuesta por los vocablos *agro* y *ecosistemas*, *agro* hace referencia al campo como fuente de producción, es un ecosistema que cuenta por lo menos con una población con valor agrícola (cultivos, animales o ambos), incluye una comunidad biótica y un ambiente físico con el que ésta interactúa.

En un AES, alguna de las poblaciones tiene un valor agrícola y difieren de los ecosistemas naturales en otro aspecto (Hart, 1985). En un enfoque de ecosistemas, se piensa no solamente en mejorar el rendimiento de las cosechas, sino también en determinar la estabilidad a largo plazo, de tales mejoras y su impacto en los AES en los entornos más allá de éstos donde se ubican los AES (Loucks, 1977). Este aspecto es tal vez tan importante como la existencia de poblaciones agrícolas, ya que el desempeño de los AES está regulado por la intervención del hombre (Hart, 1985).

Chiavenato (1997) señaló que la aplicación de la herramienta, teoría ecológica y de sistemas en la agricultura desde un enfoque holístico a los AES, ha permitido organizar el proceso agrícola en función del flujo de energía, materias e interacciones biológicas únicamente.

Existen 4 características de acuerdo con Odum (1994) que son principales de los AES, es decir: 1) Los AES requieren fuentes auxiliares de energía que pueden ser de origen humano, animal y mecánica mediante el uso de combustibles para aumentar la productividad de organismos específicos; 2) La diversidad puede ser muy reducida en comparación con la del ecosistema natural; 3) Los animales y plantas que dominan son seleccionados artificialmente y no por selección natural; y 4) Los controles del sistema son, en su mayoría, externos y no internos, ya que se ejercen por medio de aportes de energía auxiliar del sistema.

El AES es un modelo conceptual de la actividad agrícola en su nivel mínimo de control cibernético humano, y es considerado unidad óptima para el estudio de la agricultura y para su propia transformación; está integrado a un sistema agrícola y rural regional a través de cadenas producción-consumo, con interferencias de política y cultura de instituciones públicas y privadas. El AES es un sistema contingente abierto y construido a partir de la modificación social de un

sistema natural, para contribuir a: 1) La producción de alimentos, materias primas, y servicios ambientales que la sociedad en su conjunto demanda; 2) Al bienestar de la población rural; y 3) A su propia sostenibilidad ecológica. El AES posee procesos dinámicos de retroalimentación y control, regulados y autorregulados, como respuesta a variaciones internas y de su entorno. La dimensión espacial, biodiversidad y objetivos del AES dependen del tipo de controlador que regula, de los recursos que éste maneja y de su interrelación con el entorno complejo (Martínez *et al.*, 2011).

Sarandón (2002) mencionó que hasta el momento se ha privilegiado el estudio de los componentes del agroecosistema por sobre el conocimiento de las interrelaciones entre ellos. Se hace necesario entonces, incorporar la visión sistémica, esto es, abordarlos como un tipo de ecosistema, teniendo en cuenta las interacciones de todos sus componentes físicos, biológicos, socioeconómicos y el impacto ambiental que éstos producen.

2.2.1. Conceptualización del agroecosistema caña de azúcar- metal pesado

El modelo conceptual del agroecosistema caña de azúcar (Figura 1) explica, de forma abstracta, el espacio del ecosistema que ha sido modificado por el controlador (humano). Esto para la producción agrícola de caña donde intervienen subsistemas que tienen una interacción de factores bióticos y abióticos (flora y fauna, suelo, agua) que presentan una relación con factores externos (clima). De esta manera tienen una dinámica en cada uno de los funcionamientos que interactúan con los elementos. A partir de la interacción antes mencionada, se obtiene la materia prima (caña de azúcar) y para su transformación a azúcar refinada, desplazándose como producto en el mercado local y abastecer la demanda a nivel nacional.

Por otro lado, el proceso de producción y transformación de la materia prima conlleva a una importante actividad industrial con procesos no amigables con el medio ambiente, ya que la combustión genera emisiones de ceniza por la chimenea y volatiliza material particulado. Debido a estas actividades, el área de abastecimiento del ingenio La Gloria se ve afectada por la presencia de metales pesados adjuntos a las partículas volátiles. En relación con lo anterior, metales pesados como Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) son identificados como los principales contaminantes en una zona agroindustrial-urbana. Ciertamente, el medio ambiente se encuentra vulnerable a alteraciones, las cuales causan un efecto negativo sobre plantas, cuerpos de agua y suelo. Por lo anterior, este problema ambiental genera un interés para realizar

investigaciones que aporten conocimiento para contribuir a la identificación de medidas que permitan mitigar este tipo de contaminación del medio ambiente.

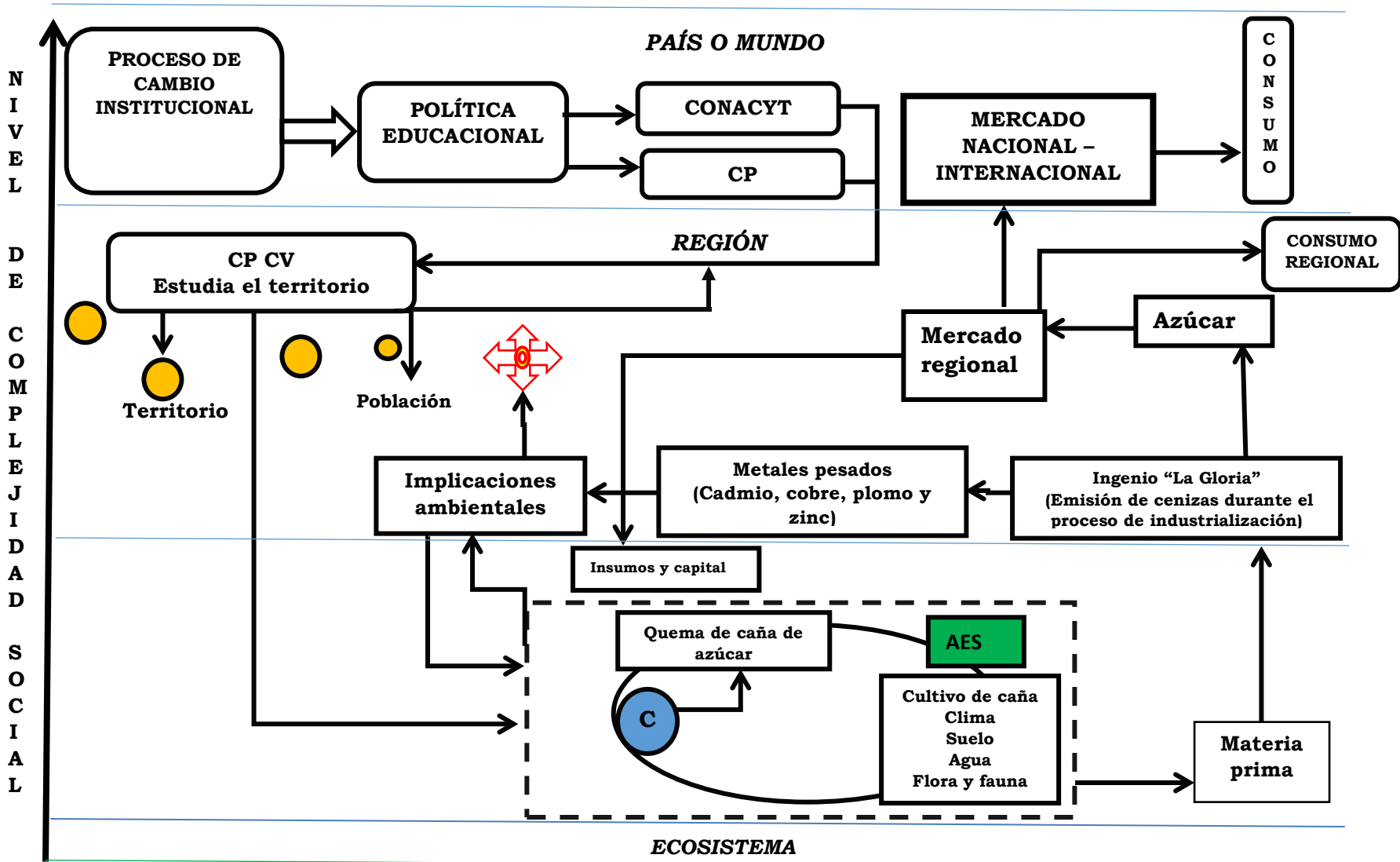


Figura 1. Modelo conceptual del agroecosistema (Martínez Dávila modificado por Castro-Gerardo, 2017).

2.3. Contaminación ambiental

La contaminación es un cambio indeseable en las características del ambiente; ésta puede ser física, química o biológica, y consiste frecuentemente en la liberación en agua, aire y suelo de cualquier forma de materia o energía con la intensidad, cantidad, concentración tal que pueda causar daños a la biota, impactando, en general, de distintas formas adversas en la flora y fauna, y en la salud de los seres humanos. Aunque se encuentren muchas variaciones de tal definición, éstas coinciden en dos aspectos: 1) la contaminación es una situación de carácter negativo, que provoca daños; y 2) la contaminación es causada por la presencia o liberación de formas de materia o energía. Por lo tanto, se puede representar en unidades físicas medibles y establecer normas en el fenómeno de contaminación en cuestión (Segura *et al.*, 2003).

2.4. Medio ambiente

Se refiere al área de sucesos y condiciones que influyen sobre el comportamiento de un sistema. En lo que a complejidad se refiere, nunca un sistema puede igualarse con el ambiente y seguir conservando su identidad como sistema. La única posibilidad de relación entre un sistema y su ambiente aplica que el primero debe absorber selectivamente aspectos del último. Sin embargo, esta estrategia tiene la desventaja de especializar la selectividad del sistema respecto a su ambiente, lo que disminuye su capacidad de reacción frente a los cambios externos, lo cual coincide directamente en la aparición o desaparición de sistemas abiertos.

El estado de salud del medio ambiente es un factor clave para el bienestar individual y colectivo. Un medio ambiente digno es un derecho fundamental de los ciudadanos (Rengifo-Cuellar, 2008). La contaminación se ha convertido en un problema severo que se agudiza en el periodo de zafra, debido a la emisión de partículas volátiles que ocasionan efectos ambientales negativos derivados de la intensificación de la actividad agrícola y agroindustrial.

3. MARCO DE REFERENCIA DE LITERATURA CONSULTADA

3.1. Material particulado

El material particulado es uno de los contaminantes atmosféricos más estudiados en el mundo. Este se define como el conjunto de partículas sólidas presentes en suspensión en la atmósfera que se originan a partir de fuentes antropogénicas y naturales, y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas. La presencia en conjunto de las partículas sólidas emitidas directamente al aire, resultantes de procesos productivos industriales (Kabata y Pendias, 2000), ocasionan una variedad de alteraciones en la vegetación, cuerpos de agua y bienes materiales, y se asocia con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en el hombre (Pope, 2004).

Es necesario hacer mención de las características que presenta el material particulado. Barrett *et al.* (2001) mencionaron que su composición es variada, ya que no se deposita en períodos cortos sino que permanece suspendido en el aire debido a su tamaño y densidad. Estas partículas en suspensión son una compleja mezcla de elementos químicos y biológicos como metales pesados, sales, materiales carbonosos, compuestos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos y endotoxinas que pueden interactuar entre si formando otros compuestos.

Los principales elementos encontrados por la quema de combustibles y transformación e incineración de materia prima en industrias son el plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), vanadio (V) y antimonio (Sb). Tener conocimiento de los elementos químicos como los metales pesados del material particulado presenta una relevancia actual en los aspectos ambientales y de salud humana debido a la calidad del aire que se respira en las ciudades (Pérez- Fadul, 2010).

3.2. Fuentes de contaminación por metales pesados

La actividad antropogénica es uno de los principales orígenes de los metales pesados, los contaminantes pueden encontrarse en forma disuelta o en suspensión, y ser orgánicos o inorgánico por su naturaleza química. Actualmente es difícil encontrar una actividad industrial o un producto manufacturado en los que no intervenga la emisión de metales pesados durante el proceso de transformación (Mayorquín, 2011), sin descartar los procesos de origen natural. Esto depende de la composición de metales pesados que se encuentran en

la roca madre debido a su alta concentración, sin que haya sufrido una contaminación puntual. Sin embargo, en términos generales, la contaminación de origen natural no puede ser tan grave como la de origen antropogénica (Albert, 1997).

3.3. Metales pesados

Se considera un metal pesado aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a cinco g cm^{-3} cuando está en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20. Los metales pesados más comunes y ampliamente distribuidos como contaminantes ambientales incluyen el Pb Cd, Mercurio (Hg) y el metaloide Arsénico (As) (Querol, 2008). Es importante hacer mención que los metales pesados, tanto en las plantas como en los seres vivos, son esenciales por ser componentes estructurales o catalizadores de los procesos bioquímicos de los organismos. Las actividades humanas son las causantes de la emisión de grandes cantidades de elementos que generan exceso de acumulación de Cd, Hg, Ni, y Pb, afectando así las relaciones de las plantas y organismos vivos, ello origina alteraciones en los ecosistemas (Reyes *et al.*, 2016).

Las características que resaltan ampliamente y de gran importancia de los metales pesados son las siguientes: presentan un grado de peligrosidad al bioacumularse en los diferentes cultivos; no se degradan o destruyen con facilidad de forma natural o biológica; y presentan un pequeño grado de incorporación a organismos vivos (animales y plantas), vía el alimento. Este proceso también ocurre a través del agua y aire dependiendo de la movilidad de dichos metales (Méndez *et al.*, 2009).

3.3.1. Cadmio (Cd)

El cadmio es un metal toxico, similar al Zn, que puede experimentar procesos geoquímicos juntos; su concentración es aún más elevada alrededor de zonas industriales, así como en las zonas urbanas; dicha concentración, disminuye con la distancia, siendo menor en áreas rurales, debido a que recorre grandes distancias con el viento y con el escurrimiento del agua (Jáuregui *et al.*, 2012). La población está expuesta al Cd, principalmente por dos vías: la oral a través del agua e ingesta de comida contaminada por Cd (hojas de vegetales granos, cereales, frutas y pescado); y la segunda por la inhalación de partículas de Cd durante la exposición de personas a actividades industriales al inhalar humos y vapores, o por ingesta de los polvos de óxido de cadmio y sus compuestos (Nava- Ruiz *et al.*, 2011).

Existe una facilidad de absorción del Cd por los vegetales, debido a que es uno de los pocos elementos capaces de bioacumularse en las plantas, pudiendo alcanzar niveles tóxicos para los humanos. En éstos últimos, suele entrar al torrente sanguíneo por absorción en el estómago o en los intestinos, a través de la ingesta de alimentos o agua, y por absorción en los pulmones después de la inhalación (Cedano y Requena, 2007). En el ambiente se adhiere fuertemente a las partículas del suelo y se disuelve fácilmente en el agua, no se degrada pero puede cambiar de forma; asimismo, este elemento puede ser absorbido por el organismo de los animales.

La concentración de Cd en el aire en áreas industriales varía de 9.1 a 26.7 $\mu\text{g m}^{-3}$ frente a 0.1 a 6 $\mu\text{g m}^{-3}$ en el aire de áreas rurales; de igual manera, su tiempo de permanencia en los suelos es de 300 años y el 90% permanece sin transformarse. Se incorpora al suelo agrícola por deposición aérea (41%), con los fertilizantes fosfatados (54%) y por aplicación de abono de estiércol (5%) (Lou *et al.*, 2009).

La concentración de Cd no es la misma en las diferentes partes de la planta. Generalmente la secuencia es: raíces, tallos, hojas, frutas y semillas. No obstante, las proporciones pueden cambiar según la especie y aún la etapa de crecimiento (Cieslinski *et al.*, 1996).

3.3.2. Cobre (Cu)

El Cu tiene un importante papel biológico en el proceso de la fotosíntesis en las plantas, aunque no es un componente de la clorofila. Los mecanismos de absorción del Cu por las plantas aún no están del todo claros, ya que se ha observado una absorción pasiva por las mismas. En ellas, la presencia de Cu provoca una reducción del crecimiento, la inhibición de fotosíntesis y la transpiración, la inhibición de las enzimas del ciclo de Calvin, la inhibición de la síntesis de clorofila y la alteración en la concentración de Ca y K (Gardezi *et al.*, 2006).

Los iones de Cu se ligan a las membranas celulares obstruyendo el proceso de transporte en las paredes celulares y tiene una movilidad relativamente baja respecto a otros elementos en las plantas, permaneciendo en el tejido de las raíces y hojas hasta su senescencia. En los tejidos de la raíz, el Cu se encuentra casi completamente en formas complejas. Sin embargo, es muy probable que el metal ingrese a las células de las raíces en formas

disociadas y a tasas diferentes, según la especie del metal (Pérez-Fadul, 2010). De cierta manera el Cu es un elemento esencial para las plantas, ya que activa a numerosas enzimas que participan en reacciones redox y es constituyente de la citocromo oxidasa en el proceso de respiración (Kabata-Pendias y Sadurski, 2004).

El Cu suele ser esencial para mantener un correcto metabolismo en los seres vivos y en particular en el cuerpo humano. Sin embargo, en concentraciones más altas a las normales puede conducir al envenenamiento, lo cual podría resultar vía la cadena alimenticia, por ejemplo, de la contaminación del agua potable, de las altas concentraciones en el aire cerca de las fuentes de emisión o como producto de la cadena alimenticia (Kabata-Pendias, 2000).

3.3.3. Plomo (Pb)

El Pb es un elemento altamente tóxico en el medio ambiente, su presencia se debe, principalmente, a la actividad antropogénica como la industria (Méndez *et al.*, 2009).

Las plantas, por su parte, manifiestan los síntomas más visibles de la fitotoxicidad por metales pesados, con características como: reducción del crecimiento, sobre todo en raíces, clorosis y necrosis en hojas y, posteriormente, síntomas de senescencia y abscisión. El síntoma más característico de la toxicidad por metales pesados es la reducción del crecimiento radical, dado que las membranas y la pared celular son potencialmente el blanco de acción inicial que experimenta cambios en las propiedades de semi-permeabilidad y de transporte, en un caso; y, en otro, de extensibilidad y crecimiento. Con base en lo anterior, se llega a comprender la multiplicidad de procesos fisiológicos que secundariamente pueden ser modificados (Llugany *et al.*, 2007).

La sensibilidad de las especies a los metales pesados varía considerablemente a través de reinos y *phyla*, siendo las plantas vasculares ligeramente más tolerantes. Las diferentes respuestas de las plantas vasculares a metales pesados pueden ser atribuidas a factores genéticos y fisiológicos, así como a las rutas toxicológicas y el destino ambiental de los tóxicos (Iannacone y Alvariño, 2005).

3.3.4. Zinc (Zn)

Este elemento tiene un papel dual, al ser esencial para el desarrollo de plantas y, a su vez, puede ser dañino en altas concentraciones. Este elemento participa en varios procesos metabólicos y es un componente de varias enzimas. En cuanto a la movilización y lixiviación del Zn, éstas son mayores al incrementar la competencia con otros cationes por los sitios de intercambio, particularmente es uno de los micronutrientes que se encuentran en las plantas en concentraciones de 20 mg por kg de peso seco (Salisbury y Ross, 1991).

De acuerdo con Lasat (2002), las plantas utilizan el Zn como parte del proceso de formación de la clorofila y también es un elemento importante en la activación de varias enzimas, principales en el crecimiento de la planta. Este mineral se estabiliza en la molécula de clorofila, interfiere en la síntesis y conservación de auxinas, así como de hormonas vegetales involucradas en el crecimiento. La deficiencia de Zn en la planta ocasiona que las hojas más jóvenes presenten zonas cloróticas que terminan necrosándose y a todo el parénquima foliar (López-Romaña *et al.*, 2010).

El Zn presenta afinidad con los óxidos de hierro y materia orgánica, siendo uno de los metales más móviles, aunque esa movilidad depende del pH del área donde se encuentra (Brune, 1994).

3.4. Metales pesados en el suelo

A diferencia del agua y aire, que poseen estrictos estándares de calidad, para el suelo es difícil cuantificar o definir cierto estándar, pues depende del uso al que se destine (agrícola, forestal, urbano e industrial). Los metales pesados afectan la calidad del suelo, ya que se encuentran de forma natural o ingresan de forma antropogénica (García *et al.*, 2002).

El suelo es un cuerpo natural y dinámico que cambia con el tiempo y el espacio, es soporte de una gran variedad de organismos, entre ellos la vegetación. Existe una movilidad natural de los metales pesados en los suelos a consecuencia de la actividad biológica, de las interacciones solido-líquido y de la acción del agua (Zúñiga, 1999).

Desde el punto de vista holístico, en los suelos de los agroecosistemas se encuentran interacciones bióticas. Es por ello que la toxicidad de un metal en el suelo depende de la posibilidad de que varios de esos metales tengan efectos sinérgicos. Puede ser que uno solo

no sea tan peligroso, pero si existen más de uno sí pueden llegar a serlo (García *et al.*, 2002).

Un suelo contaminado es considerado como aquel que ha superado su capacidad de amortiguamiento para una o varias sustancias y, como consecuencia, pasa a actuar de ser un sistema protector a ser causa del problema para el agua, la atmósfera y los organismos (Solano, 2008).

3.4.1. Dinámica de los metales pesados en el suelo

Los metales pesados son absorbidos como iones por las plantas a través de su sistema radical y son transportados a los sitios metabólicamente activos en la planta donde ejercen sus efectos tóxicos. Por lo que es necesario conocer sus variaciones en cuanto a su reactividad química y a su movilidad en el suelo (Gardezi *et al.*, 2006).

La dinámica de los metales pesados presentes en el suelo, en lo que se refiere a contenido de humedad, temperatura, disponibilidad de nutrimentos, microorganismos, prácticas culturales, degradación y contaminación, como el caso de los metales pesados, puede afectar la simbiosis entre los elementos de la planta (Figura 2) (Aguirre *et al.*, 2012). Para que la referida dinámica ocurra en el suelo existen 4 aspectos, es decir: 1) movilización de tales elementos hacia las aguas superficiales o subterráneas; 2) transferencia a la atmósfera por volatilización; 3) absorción por las plantas e incorporación a la cadena trófica; y 4) retención de metales pesados en el suelo de distintas maneras: disueltos o fijados, retenidos por adsorción, complejación y precipitación (Navarro-Aviñón *et al.*, 2007).

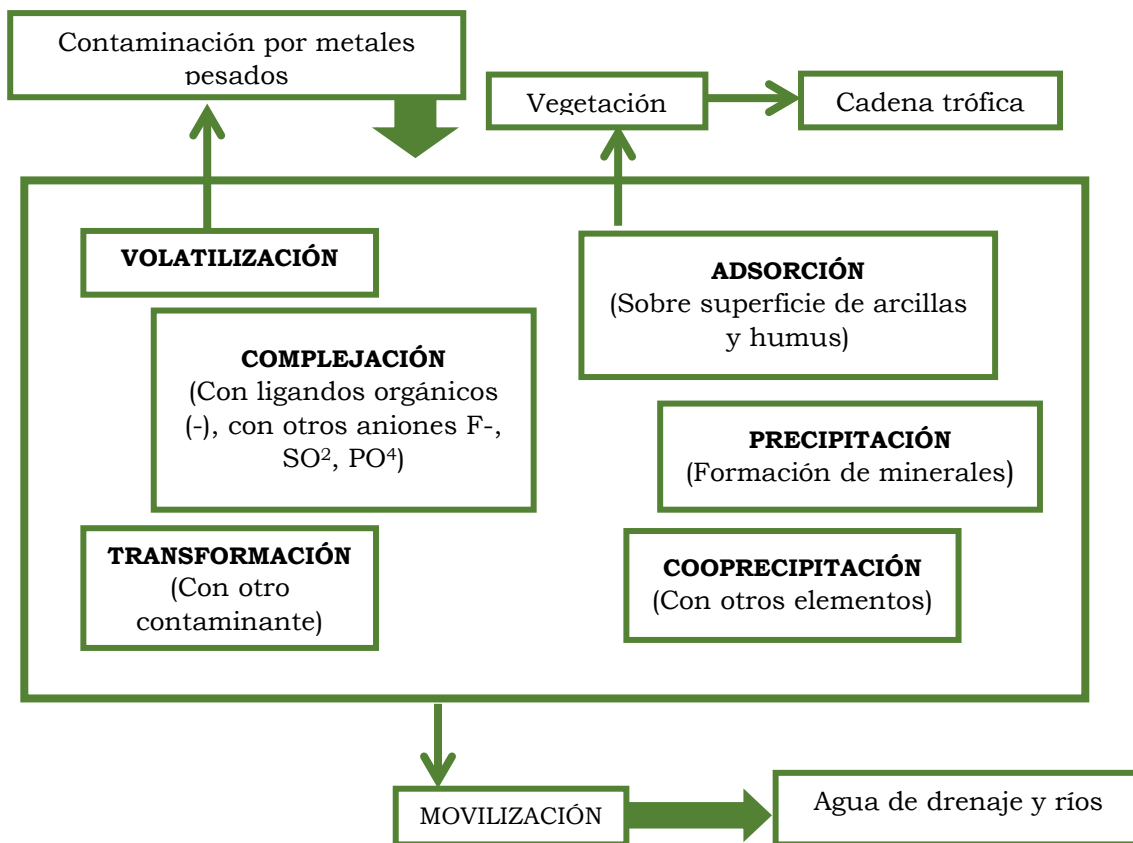


Figura 2. Dinámica de los metales pesados en el suelo (García *et al.*, 2002).

3.5. Metales pesados en las plantas

La absorción de metales pesados por las plantas es el principio de su entrada a la cadena alimenticia. Debido a esto, la toxicidad de los metales depende no sólo de su concentración, sino de igual manera de la movilidad y reactividad que poseen con otros componentes del ecosistema (Aguirre *et al.*, 2012).

Los metales pesados se consideran muy peligrosos para los seres vivos en general, ya que poseen una gran toxicidad debido a la elevada tendencia de bioacumularse. La bioacumulación en seres vivos u organismos biológicos es un aumento de la concentración de un producto químico en un cierto plazo, de forma que ésta llega a ser superior a la del producto químico en el ambiente (Navarro *et al.*, 2007).

La complejidad del proceso ocurre durante la incorporación en los distintos niveles de la cadena trófica, debido a que el grado de incorporación sufre un fuerte incremento a lo largo de sus diferentes eslabones, siendo los superiores donde se hallan los mayores niveles de

contaminantes. Así mismo, pueden tener efectos mutagénicos en el genoma, pero este efecto no es muestra convincente de la toxicidad de los metales pesados.

Lerda (1992) mencionó que el Pb reduce el crecimiento radical y la frecuencia de células mitóticas, y el incremento de la frecuencia de células aberrantes en *A. cepa*. La intensidad del efecto está en función de la concentración del Pb. Las plantas de las familias *Poaceae*, *Liliaceae*, *Cucurbitaceae* y *Umbelliferaceae* manifiestan una tendencia moderada a la acumulación de metales pesados como es el caso del Cd.

El Cuadro 1 describe la concentración de metales pesados considerados como tóxicos en las plantas y los niveles críticos de toxicidad.

Cuadro 1. Niveles de toxicidad.

Metal	Intervalo de concentración mg kg ⁻¹	
	Mínimo	Máximo
Cd	1.0	14500.0
Cu	1.0	29.0
Pb	0.1	7.8
Zn	6.0	67.0

3.5.1. Tolerancia de plantas a metales pesados

Las plantas han desarrollado mecanismos específicos para absorber y acumular sustancias (Lasat, 2002). Las plantas absorben metales pesados del suelo donde se encuentran pero en distinto grado, dependiendo de la especie vegetal, características y concentración de metales en el suelo. Dichas plantas pueden optar por distintas estrategias frente a la presencia de metales en su entorno, debido a que la planta se protege formando complejos metálicos menos tóxicos como quelatos, los cuales, actúan antagónicamente para evitar la toxicidad por metales pesados (fitoquelatinas, ácidos orgánicos, aminoácidos o fenoles). Éstos se presentan, a nivel celular, en el interior de las vacuolas o en la pared celular donde no puedan ocasionar efectos adversos (Llugany *et al.*, 2007).

Brune *et al.* (1994) describieron los mecanismos de tolerancia al Zn en plantas y propusieron cinco mecanismos para su regulación citoplasmática, estos son: 1) baja

absorción a través de la membrana plasmática; 2) secuestro en organelos subcelulares; 3) precipitación como sales insolubles; 4) utiliza un mecanismo de complejación en el interior de la célula para detoxificar (amortiguar) los metales pesados, uniendo a ellos ligandos para formar complejos y 5) extrusión activa desde la membrana plasmática hacia el apoplasto.

3.6. Metales pesados en cuerpos de agua

Los metales pesados ingresan al ambiente acuático, principalmente, por descargas directas de fuentes industriales, las cuales son las fuentes de contaminación más importantes para estos ambientes (Alloway y Ayres 1993).

La circulación de metales en el agua está influenciada por el balance hídrico del agua en el suelo, donde interviene la cantidad de precipitación, evaporación, escorrentía e infiltración del agua, en función de las propiedades físico-químicas del suelo (Solano, 2008).

Los drenajes urbanos, industriales y agrícolas se consideran los principales aportes del hombre a la alteración de la composición química de los recursos acuáticos. Asimismo, el desarrollo tecnológico, el consumo masivo e indiscriminado, y la producción de desechos, principalmente urbanos, han provocado la presencia de muchos metales en cantidades importantes en el ambiente. Lo que causa numerosos efectos sobre la salud y un desequilibrio en los ecosistemas (Brune *et al.*, 1994).

El agua superficial también recibe material particulado en suspensión. El Cd en áreas no contaminadas se presenta en concentraciones muy bajas que varían de 0.04 a 0.3 $\mu\text{g l}^{-1}$ en océanos y en ríos la cantidad es de un $\mu\text{g l}^{-1}$. En lugares con contaminación severa por Cd se ha presentado la cantidad de 0.0001 hasta 0.115 $\mu\text{g l}^{-1}$. Cabe resaltar que la importancia de estas concentraciones en el agua varían según el uso que el ser humano le dé a este recurso (Cedano y Requena, 2007).

3.7. Quema de biomasa cañera

La biomasa consiste, principalmente, en carbono y oxígeno. También contiene hidrógeno, un poco de nitrógeno, azufre, ceniza y agua, dependiendo de la humedad relativa. Cuando ésta se quema, se efectúa una reacción química que combina su carbono con oxígeno del ambiente, formándose dióxido de carbono (CO_2) y combinando el hidrógeno con oxígeno para formar vapor de agua (Network, 2002). No obstante, cuando la combustión no es

completa, se forman monóxido de carbono (CO), hidrocarburos y otros materiales. Estos sí pueden generar impactos negativos severos en la salud de los usuarios y también son gases de efecto invernadero. Por lo que se debería minimizar la formación de éstos (Álvarez, 2007).

Cuando la combustión se completa, la biomasa se quema totalmente y todo el carbón se transforma en CO₂. Sin embargo, los árboles y plantas que están creciendo capturan nuevamente el CO₂ de la atmósfera y al usar la biomasa en forma sostenible, en términos netos, no se agrega CO₂ a la atmósfera. La exposición a estas altas concentraciones de contaminación atenta contra la salud de los agroecosistemas y medio ambiente; así como de los individuos que inhalan este tipo de aire contaminado. Lo anterior resulta en diversas enfermedades respiratorias, cardiovasculares, reproductivas y neurológicas (Sanhueza *et al.*, 2006).

Nava-Ruiz *et al.* (2011) mencionaron que las condiciones climatológicas y las características aerodinámicas de las partículas emitidas por el ingenio y la quema de cañaverales, logran viajar largas distancias. Por lo que sus concentraciones pueden afectar no solo las regiones aledañas a los sitios de la emisión; éstas logran viajar distancias de hasta 50 km a partir de la fuente emisora.

Por otra parte, considerando que los metales pesados son los que enriquecen a los residuos sólidos de la gasificación (ceniza volátil) y ocurre la separación de éstos de la corriente gaseosa. Lo que genera la volatilización de los mismos y depende de la especiación química inicial, la atmósfera de gasificación, la dinámica, la cinética de difusión de los metales pesados dentro de las partículas de los residuos sólidos y la cinética de reacción entre los metales pesados y los componentes mayoritarios de las mismas (Toledo, 2005).

La concentración de estos elementos en los residuos sólidos de gasificación y su movilidad establecerán las condiciones de disposición final de los mismos (Rodríguez, 2009).

4. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

La industria azucarera ha sido de gran importancia económica para la población, ya que funge como la principal fuente de empleo en las zonas colindantes del ingenio La Gloria, Veracruz. Este estado, Veracruz, es uno de los principales productores de azúcar a nivel nacional, aportando dos millones de toneladas por año (SE, 2012).

Los métodos industriales involucran un conjunto de operaciones para la transformación de la materia prima, dicho proceso implica la producción de ciertas sustancias volátiles que expulsa la chimenea. La estructura química de las partículas emitidas presenta una concentración de Cd, Cu, Pb y Zn. Estos metales pesados se liberan hacia el ambiente mediante la combustión. De acuerdo con investigaciones realizadas, la actividad industrial es una de las fuentes emisoras más importantes de contaminación por dichos metales. En cierta manera, cada uno de los metales mencionados anteriormente repercute negativamente en el desarrollo de las plantas, ocasiona alteraciones en cuerpos de agua y en la calidad del aire respirable por el ser humano.

En consideración a lo antes mencionado, se realizó el estudio en la zona ocupada por el ingenio La Gloria, en el Estado de Veracruz, a fin de realizar un análisis de la concentración química de los metales pesados, los cuales se encuentran suspendidos en la atmósfera y, eventualmente, se depositan en cuerpos de agua, suelo y plantas. Asimismo, con base en una revisión bibliográfica, determinar el grado de afectación en los agroecosistemas en función de su concentración.

4.1. Definición del problema de investigación

La concentración de metales pesados en las partículas emitidas por el ingenio La Gloria ha tomado cierta importancia por las implicaciones ambientales que ocasionan. Los metales pesados que se desprenden del proceso de combustión suelen ir acompañados de más elementos como humo, dioxinas, furanos e hidrocarburos. Estas sustancias forman una compleja mezcla de contaminantes compuestos, que se volatilizan hacia el medio ambiente y son transportados hacia las poblaciones aledañas, y más cercanas a la fuente de emisión. Éstas últimas podrían ser las más afectadas. Las partículas volátiles dispersas en el ambiente pueden permanecer durante días y viajar largas distancias.

A continuación se refleja la complejidad que engloba el tema de investigación. La Figura 1 incluye los siguientes planos: tecnológico, económico, social y ambiental; muestra, de manera esquemática, la situación problemática que en términos generales se describió anteriormente.

Con base en lo anterior, el problema de investigación se enuncia en la pregunta siguiente:

¿Cuál es la concentración y distribución espacial de los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn presentes en el material particulado que emite el ingenio La Gloria y la quema de caña de azúcar en los agroecosistemas regionales, en función de la distancia en que tal material se depositó durante el proceso de emisión?

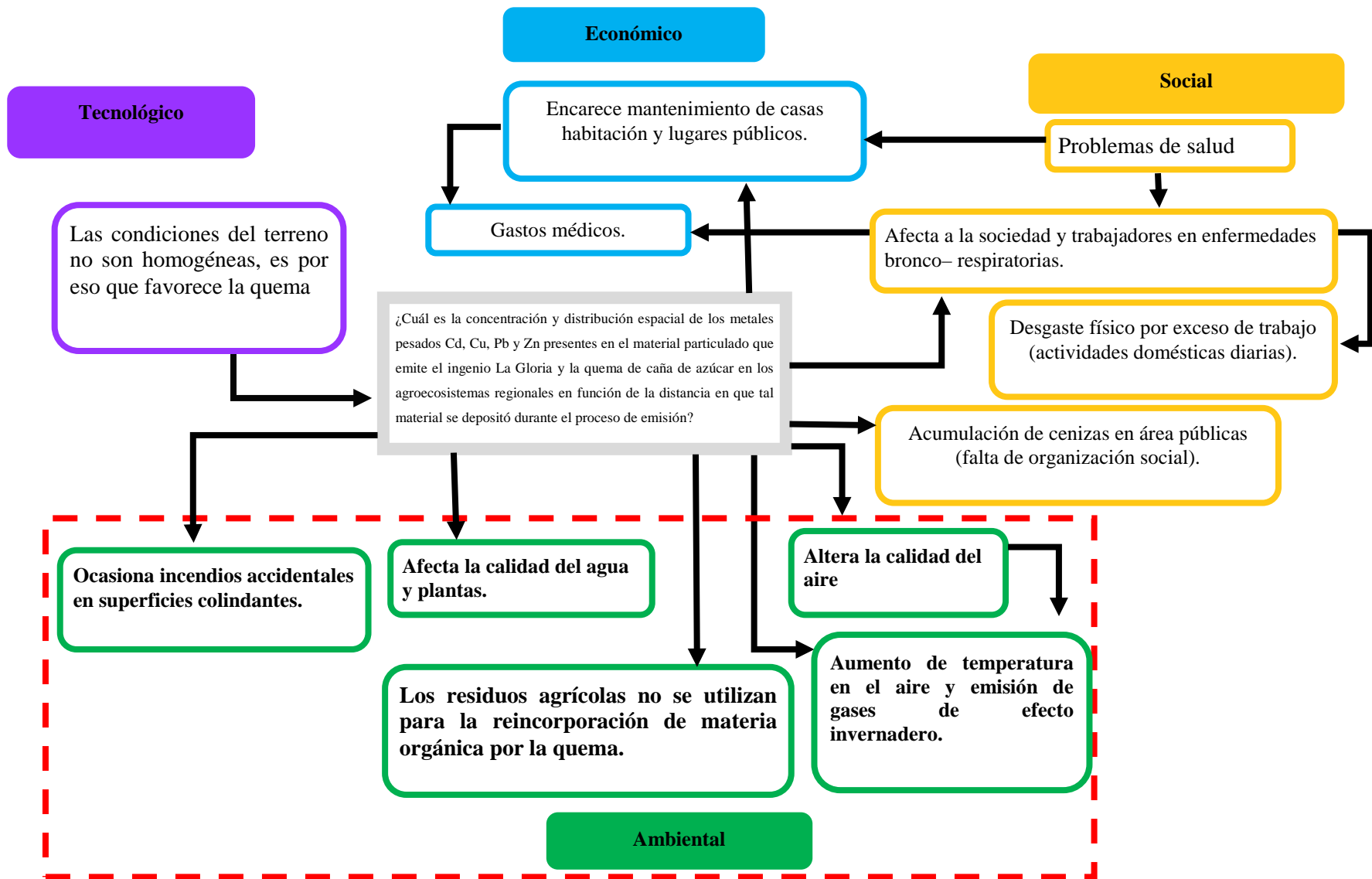


Figura 3. Esquema de la situación problemática.

5. HIPÓTESIS

Las concentraciones y distribución espacial de metales pesados como Cd, Cu, Pb y Zn, presentes en el material particulado emitido por el ingenio La Gloria y la quema de caña de azúcar en los agroecosistemas regionales, están en función de la distancia en que tal material se depositó durante el proceso de emisión.

6. OBJETIVO

Determinar las concentraciones y la distribución espacial de los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn, presentes en el material particulado emitido por el ingenio La Gloria y la quema de caña de azúcar en los agroecosistemas regionales, en función de la distancia en que tal material se depositó durante el proceso de emisión.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Fases de la investigación

7.1.1. Fase 1. Selección del área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo del mes de diciembre de 2015 al mes de abril de 2016 en las zonas de abasto y habitacional del ingenio La Gloria, Veracruz (Figura 4). Éstas se encuentran geográficamente en los $19^{\circ} 29'$ y $19^{\circ} 23'$ L. N. y entre $96^{\circ} 21'$ y $96^{\circ} 31'$ L.O. en la planicie costera central del estado de Veracruz, México, con velocidad de vientos de 43 km/h promedio en la zona de establecimiento.



Figura 4. Ubicación del área de estudio, aledaña al Ingenio La Gloria, Ver.

7.1.2. Fase 2. Recolección de muestras de material particulado

Para la recolección de las muestras de material particulado se seleccionaron dos zonas de estudio, zona A y zona B; siendo la zona A la más cercana al ingenio La Gloria (Figura 5). Ambas zonas que reunieron las condiciones propias para el monitoreo atmosférico.



Figura 5. Distribución y localización de las zonas A y B donde se distribuyeron los sitios de recolección de cenizas en el área de estudio.

Se instalaron bandejas de plástico en 51 sitios de muestro, incluyendo casas habitación, en la zona de influencia del ingenio La Gloria para la recolección de muestras de material particulado (cenizas). Las muestras se tamizaron con la malla No 60 de 250 μm para la eliminación del material no deseable. El peso de cada una de las muestras fue de 50 g, las cuales se empaquetaron en bolsas ziploc de 16.5 x 14.9 cm, previamente etiquetadas. Las bolsas con muestras se conservaron en desecadores cerrados para evitar la absorción de humedad del medio; éstas permanecieron en ellos hasta el momento de su análisis en el laboratorio. Tal análisis se realizó mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (Figura 6).



Figura 6. Procesos de 1) recolección; 2) tamizado; 3) pesado; y 4) empaquetado de las muestras de cenizas en los 51 sitios seleccionados.

7.1.3. Fase 3. Análisis de las muestras de material particulado

A continuación se describe la técnica de análisis aplicada a las muestras de cenizas, con el uso del Espectrofotómetro de absorción atómica instalado y operado en el Laboratorio del Instituto Tecnológico de Boca del Rio, Ver.

1.- Preparación de material de laboratorio para análisis de las muestras de material particulado (cenizas). La preparación del material empleado en el laboratorio, se realizó bajo las especificaciones para el análisis de metales pesados, de acuerdo a las NOM-117-SSA1-1994 y NOM-242-SSA1-2009, en las que se describe el método de prueba para la determinación de Cd, Pb, Cu, y Zn en alimentos, agua potable, agua purificada y sustratos específicos por espectrometría de absorción atómica.

2.- Limpieza de material de teflón y vidrio para análisis de muestras. La limpieza del material de teflón para realizar la digestión y la cristalería de vidrio se efectuó con jabón neutro, libre de fosfato al 10 % por litro de agua destilada. Este jabón se utilizó con el fin de evitar interferencias iónicas en la lectura del espectrofotómetro. Después de enjabonar el material y

enjuagarlo con agua corriente, se sumergió en solución de agua destilada con ácido nítrico (HNO_3) al 20 % (por cada litro).

El material, como vasos de teflón, permanecieron entre 1 y 2 horas en esta solución, mientras la cristalería permaneció 24 horas. Una vez que se concluyó el proceso de remoción de cualquier residuo de metales en la solución de HNO_3 , el material se sumergió, en agua Tipo II o bidestilada; allí permanecieron la cristalería y los vasos de teflón hasta 24 horas, para asegurar la remoción completa del ácido.

Finalmente, el material se retiró del agua tipo II y se escurrió, sobre el material absorbente. El material limpio y seco se colocó, adecuadamente, en bolsas de cierre hermético (ziploc) o recipientes con tapa, debidamente etiquetados.

3.- Digestión de las muestras de material particulado. Se pesaron 0.5 g de muestra de material particulado; cada muestra se depositó en un vaso de teflón tipo HP-500, a las cuales se les adicionaron 10 ml de HNO_3 grado reactivo al 70% o suprapuro. Previamente, se colocó una membrana de seguridad dentro de cada válvula o tapón azul. La válvula se colocó en la tapa del vaso y se ajustó suavemente hasta el fondo. Posteriormente se colocaron en el horno de microondas Marca CEM modelo MARS X.

Previo a iniciar el proceso digestión en el horno, la preparación de la muestra consistió en adicionar a 0.5 g de material particulado, 10 ml de HNO_3 grado reactivo al 70% (suprapuro). Todas las muestras fueron analizadas con una muestra en blanco, que contenía 0.5 ml de agua bidestilada y 10 ml de HNO_3 de las mismas características; y un control de referencia. La programación del proceso de digestión fue el Método Soil-3051 HP500

La potencia se ajustó con base en el número de vasos utilizados: 1-3 (300 w), 4-6 (600 w) y 6-12 (1200 w).

Cuadro 2. Programación del Horno de Microondas: método Soil-3051 HP 500 para residuos sólidos.

Etapas	Potencia máxima (W)	Rampa (min) %	Presión (PSI*)	Temperatura (°C)	Mantenimiento (min)	
1	1200	100	2:00	300	165	0:00
2	1200	100	10:00	300	175	5:00

*Es una unidad de presión y significa **libra-fuerza por pulgada cuadrada**.

Una vez concluida la digestión, los vasos de teflón se extrajeron del horno y después éstos se colocaron en la campana de extracción para vapores tóxicos, empleándose las medidas de seguridad requeridas, tales como el uso de gafas, mascarilla y guantes, a fin de facilitar el manejo de las muestras. Se abrió con cuidado la válvula azul de los vasos para que la presión descendiera gradualmente. Posteriormente, se abrieron cuidadosamente los vasos para evitar que el cambio de presiones expulsara la muestra al exterior del mismo.

Las muestras obtenidas se filtraron usando una botella Nalgene con un filtro millipore de 0.45 μm y una bomba de vacío. El filtrado se vertió a un matraz volumétrico de 25 ml y aforado con agua Tipo II o bidestilada. Los matraces aforados se agitaron para homogeneizar la muestra y después se vertieron a un recipiente ámbar de vidrio o plástico, previamente etiquetado. Finalmente, se colocó parafilm en la boca de los frascos ámbar y se depositaron en bolsas herméticas (ziploc) para su refrigeración a 4° C aproximadamente, hasta el momento de su lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica (Figura 7).



Figura 7. Matraces aforados con la solución final para su respectivo análisis.

De acuerdo con Blanco *et al.* (1998), el método más utilizado para la determinación de cada uno de los metales pesados es la Espectrofotometría de Absorción Atómica (Figura 8). Se caracteriza por ser automatizado, simple y cuya precisión y exactitud son similares o superiores al procedimiento conocido y recomendado, como lo es la cámara de Delves.



Figura 8. Uso del Espectrofotómetro de Absorción Atómica para determinar la concentración de los metales pesados estudiados.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del análisis de las muestras de material particulado recolectadas de los 51 sitios muestreados de las zonas A y B, aledañas al Ingenio La Gloria, Ver.

8.1. Tendencia de la concentración total de metales pesados en relación con la zona de recolección

A continuación se muestran las concentraciones totales de cada una de las muestras en las diferentes zonas de recolección, en función de la distancia. Cabe destacar que de un total de 51 muestras, las que corresponden a los sitios del 1 al 17 se recolectaron en la zona A; éstas fueron representativas de las distancias de 50 a 400 m de la fuente de emisión de cenizas. De igual manera, las muestras recolectadas de los sitios del 18 al 51, los cuales pertenecieron a la zona B; éstas fueron representativas de las distancias dentro del intervalo de 401 a 900 m de la fuente de emisión

8.1.1. Cadmio

Al Cd se conoce como uno de los metales pesados con mayor tendencia a acumularse en las plantas. El Cd causa severos desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte de agua en las plantas.

Se encontró que las concentraciones de Cd, en las muestras analizadas, variaron en un rango de para ambas zonas de recolección (Figura 9). En la zona A se registraron las mayores concentraciones de Cd; sin embargo, éstas no superaron el rango de valores reportados por Pais y Beton (1997), quienes reportaron concentraciones entre 1 000 a 3 000 $\mu\text{g g}^{-1}$. Por otra parte, se encontró que el Cd superó el límite máximo permisible para uso industrial de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2014), el cual corresponde a 39 $\mu\text{g g}^{-1}$. Asimismo, éste superó la concentración de 6 $\mu\text{g g}^{-1}$ que establece la Norma Sanitaria establecida por la Comisión Federal para la Protección de Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) para moluscos bivalvos como límite permisible de consumo y, se estima que representa un riesgo para la salud humana (Landeros-Sánchez *et al.*, 2010). Es importante enfatizar que estas concentraciones se encontraron solamente en 50 g de material particulado.

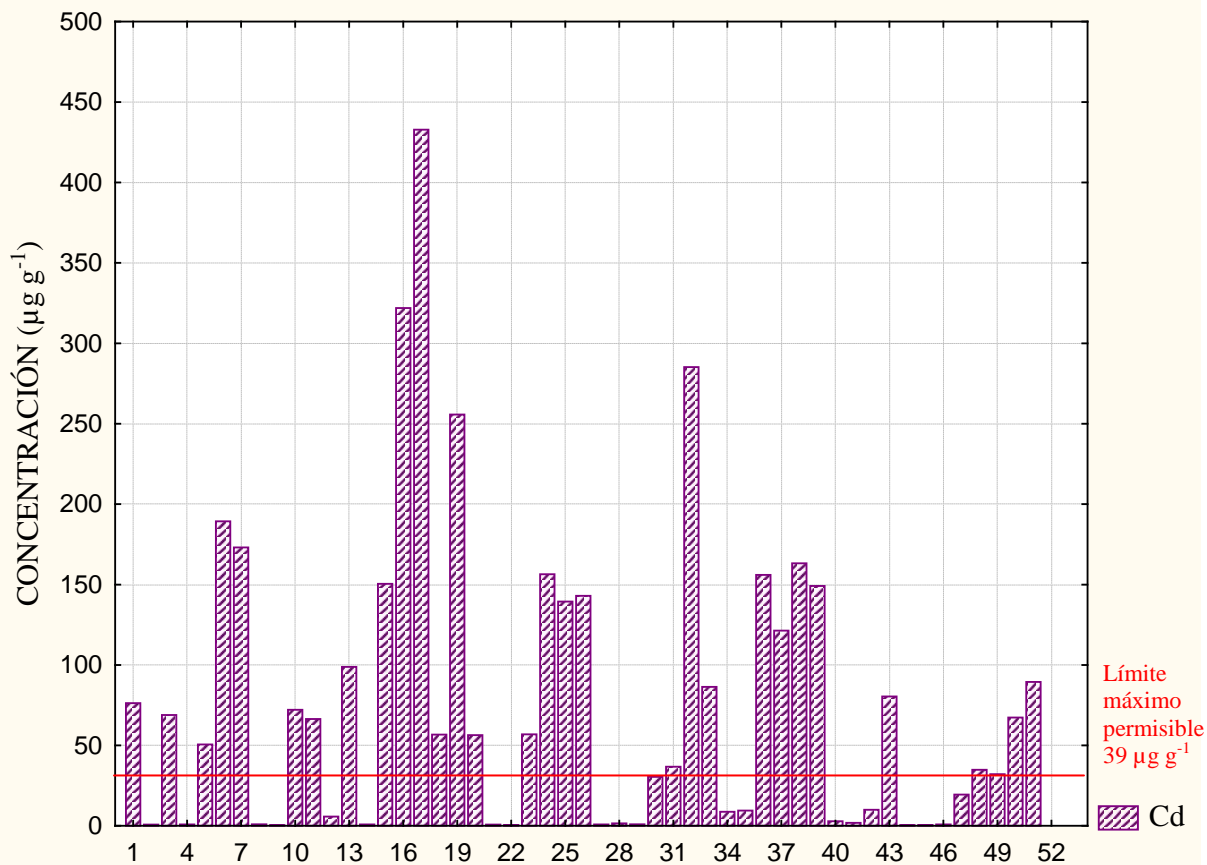


Figura 9. Distribución de las concentraciones del Cd en los 51 puntos de muestreo.

De igual manera, se han encontrado metales pesados en diferentes concentraciones en peces, carnes y leche resultado de la bioacumulación y a su movilidad desde el ambiente a fuentes hídricas. Algunas especies tales como ostras, mariscos y moluscos acumulan el Cd provenientes del agua en forma de péptidos ligadores hasta alcanzar valores de concentración entre 100 y 1 000 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Li *et al.*, 2015).

Reyes *et al.* (2016) mencionaron que el Cd, con valores de concentración superiores a 50 $\mu\text{g g}^{-1}$ en las actividades industriales representa un riesgo para la salud pública, si éste es inhalado por personas laboralmente expuestas a tales concentraciones.

Como resultado del crecimiento poblacional, el ser humano ha sido el principal afectado por el desarrollo industrial. De esta manera, diversos estudios han detectado que el órgano más susceptible a un daño potencial, ocasionado por la inhalación de Cd, es el pulmón. Asimismo, se han reportado enfermedades crónicas obstructivas de las vías respiratorias asociadas a la

exposición prolongada por una intensa inhalación de Cd. Entre otros padecimientos, también se han encontrado registros de desarrollo de cáncer pulmonar (WHO, 1992).

8.1.2. Cobre

En la Figura 10 se muestra la concentración de Cu; en ésta se observan valores en un rango de 0.034 a 356.91 $\mu\text{g g}^{-1}$. Los puntos de muestreo más cercanos a la fuente de emisión presentaron las mayores concentraciones de este metal. Lo anterior, puede atribuirse a la emisión vehicular de este metal que ocurrió cerca de estos puntos (Mohanraj *et al.*, 2004).

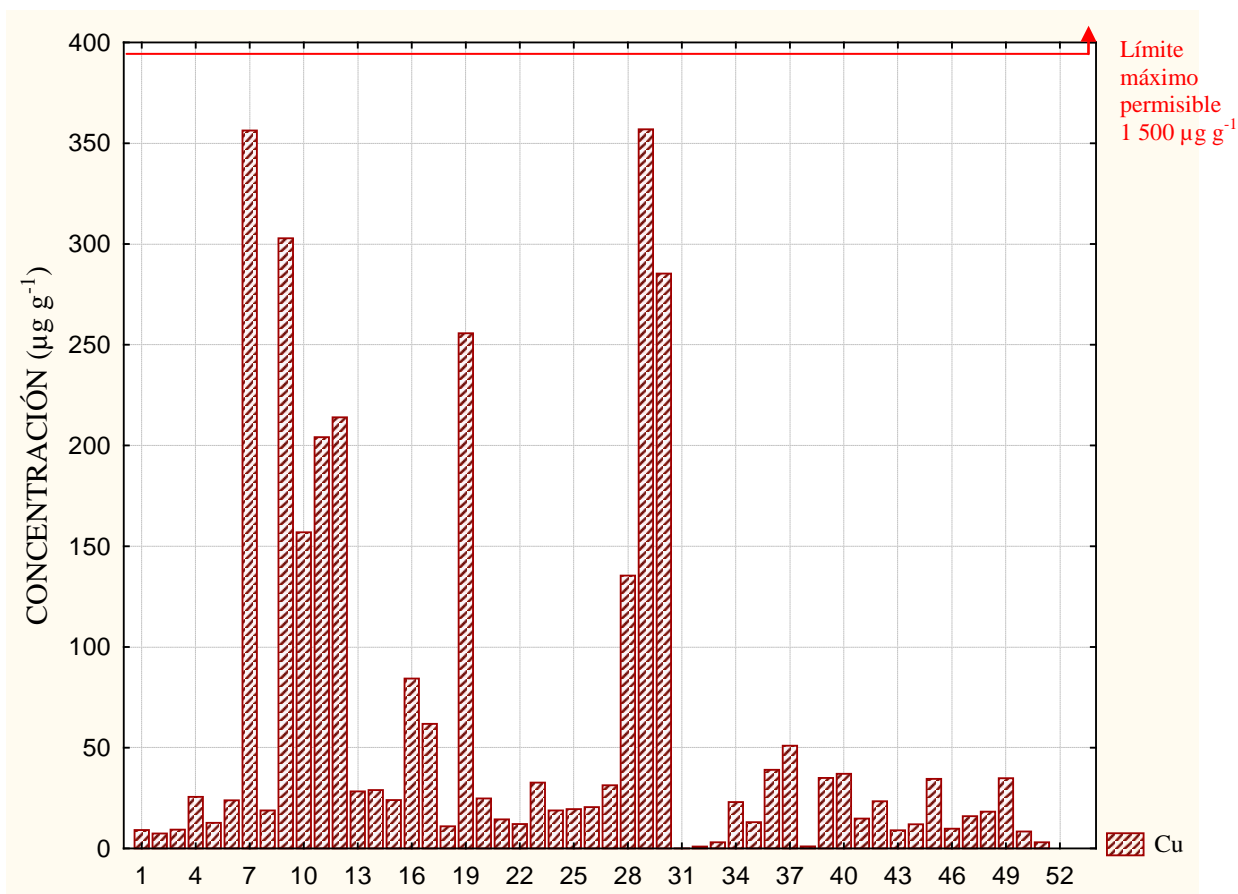


Figura 10. Distribución de las concentraciones del Cu en los 51 puntos de muestreo.

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, establece como límite máximo permisible la cantidad de 1

500 $\mu\text{g g}^{-1}$ en concentración en sedimentos superficiales urbanos, en el presente estudio se encontraron niveles inferiores a los establecidos.

La concentración de Cu que se encontró en 50 g de muestra de material particulado, fue mayor a la cantidad determinada como umbral crítico del Cu en suelos agrícolas de la cuenca del Río Aconcagua (Región de Valparaíso, Chile), el cual tiene un valor de 0.2 $\mu\text{g g}^{-1}$. Lo anterior, ocasiona que las plantas muestren susceptibilidad a la concentración de Cu en estos suelos, debido a sus efectos fitotóxicos (Kabata-Pendias, 2000).

El Cu en condiciones naturales puede llegar a tener concentraciones de 1 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ en el suelo; no obstante, el nivel de Cu en el suelo no excede el valor de 500 $\mu\text{g g}^{-1}$ y, al presentarse un valor mayor, éste ocasiona un impacto negativo en el suelo como resultado de la actividad antropogénica (Marbán, 2003).

Por otra parte, los niveles de Cu que se encontraron en la comunidad de La Gloria no rebasan los niveles de concentración máximos permisible de este metal, presente en el material particulado.

La llegada del Cu a cuerpos de agua y, posteriormente, a corrientes subterráneas, está en función de las actividades agrícolas e industriales que emiten este elemento en forma de material particulado (Herrera-Núñez *et al.*, 2013). La concentración promedio de Cu que se encontró en aguas del Río Chico, Colombia, fue de 11.52 $\mu\text{g g}^{-1}$; esta concentración fue similar al valor máximo que se estableció para ambientes no contaminados. Sadiq (1992) reportó que para el Río Boca de Paparo, Venezuela, el nivel del Cu fue superior a 46.1 $\mu\text{g g}^{-1}$, debido a que éste se encuentra en una zona contaminada por actividades industriales.

En este sentido, la concentración de Cu que se encontró, para una muestra de 50 g en esta zona de estudio, no implica daños severos a la salud humana ni tampoco al medio ambiente. Sin embargo, existe un riesgo potencial a futuro, por la adhesión de este metal pesado en el tejido humano, de animales y plantas.

8.1.3. Plomo

El Pb presentó una disposición ascendente en sus concentraciones, las cuales se observaron en un rango de 101.45 a 1892.1 $\mu\text{g g}^{-1}$ (Figura 11). Pons (2013) reportó que las concentraciones de Pb presentaron un comportamiento de manera ascendente a partir de los 600 hasta los 6 000 m, en relación con la fuente emisora.

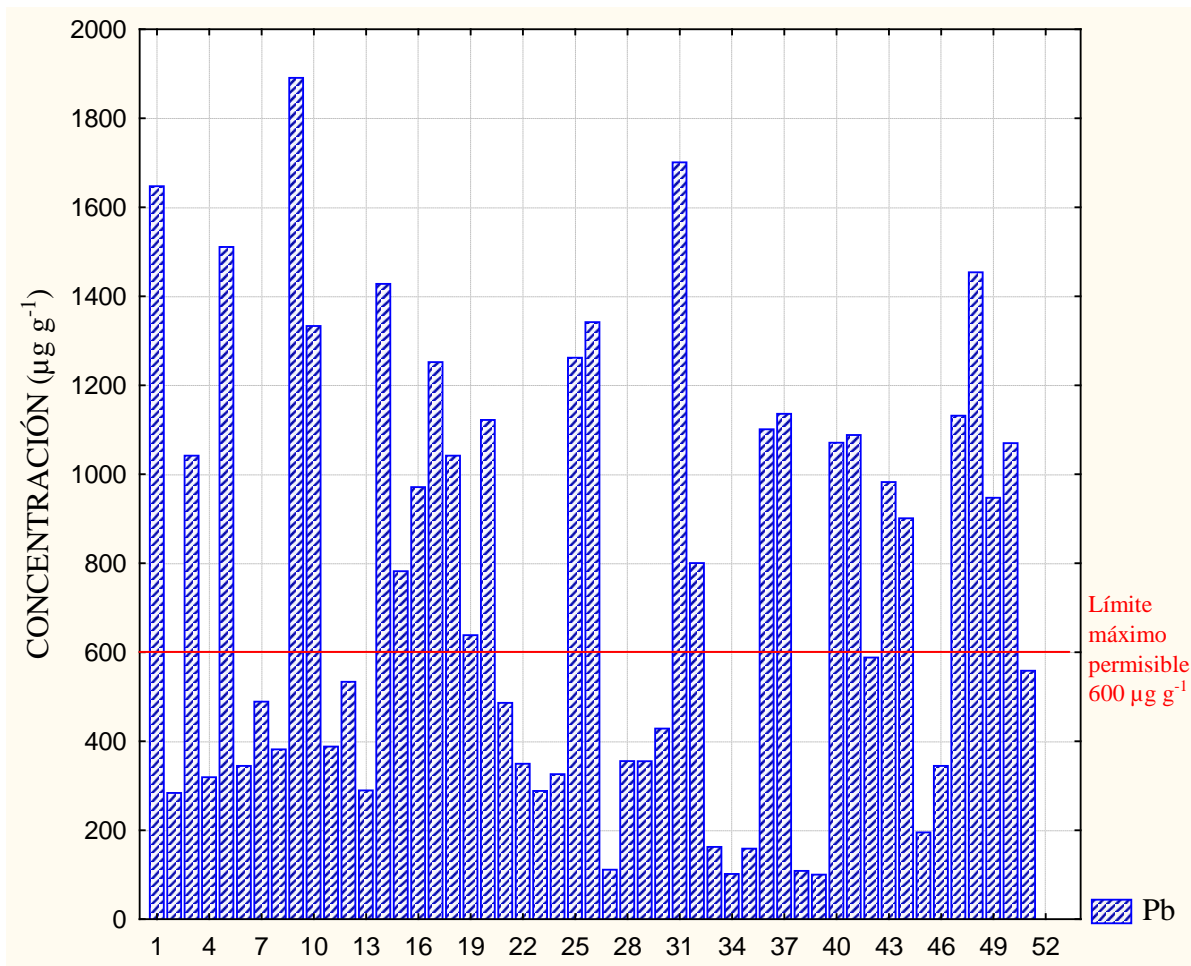


Figura 11. Distribución de las concentraciones del Pb en los 51 puntos de muestreo.

La NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2014 estableció un límite máximo permisible de 600 $\mu\text{g g}^{-1}$ para la concentración de Pb en zonas industriales. En contraste con los resultados obtenidos en el área de estudio, aledaña al ingenio La Gloria, se observó que los niveles de concentración son mayores a los niveles establecidos por esta norma, lo que pone en evidencia que el medio

ambiente está siendo afectados tales concentraciones de Pb presentes en el material particulado, emitido por este ingenio y la quema de la caña de azúcar.

Sánchez (2000) indicó que el Pb que se encuentra disperso en la atmósfera, adherido al material particulado que resulta de productos de procesos industriales y agroindustriales, es responsable de causar efectos dañinos sobre la salud de las personas, animales y plantas.

Por otra parte, se ha reportado que algunas especies de plantas tienen un nivel de tolerancia menor a $1 \mu\text{g g}^{-1}$ de bioacumulación de Pb en el suelo. Cuando este nivel es superado, los órganos de las plantas no asimilan este metal y, por lo tanto, mueren. Asimismo, el Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios y Codex Alimentarius (JECFA) estableció el nivel máximo permisible de Pb en plantas hortícolas en un rango de 100 a $300 \mu\text{g g}^{-1}$.

Los límites máximos permisibles que se encuentran descritos en estas normas se utilizan como referencia para establecer criterios de inocuidad para productos agrícolas destinados para consumo humano. En este sentido, las concentraciones de Pb que se encontraron dentro de la zona de estudio fueron superiores a las que se indican en estas normas. Por lo tanto, las plantas hortícolas que se encuentran sembradas dentro o cercanas al área de estudio están expuestas a la contaminación por Pb adherido al material particulado.

8.1.4. Zinc

Este elemento presentó las menores concentraciones en comparación con los otros metales pesados que se determinaron en la zona de estudio. Dichas concentraciones se encontraron en el rango de 6.83 a $56.39 \mu\text{g g}^{-1}$ (Figura 12). Al respecto, Machado *et al.* (2008) reportaron concentraciones de $7.41 \mu\text{g g}^{-1}$ en material particulado dentro de una zona industrial de la ciudad de Buenos Aires, Argentina, donde, además, se observó un alto tráfico vehicular de motores operados con diésel.

Tembo *et al.* (2006) reportaron también que la concentración de este elemento disminuye en el suelo, plantas y cuerpos de agua, debido a factores como temperatura, lluvia y humedad del

suelo; así como a procesos de lixiviación y dispersión de este elemento por el aire. Este último proceso está también en función de la distancia de los sitios de muestreo a la fuente de emisión.

Marbán *et al.* (2003) encontraron valores de 0.573 a 0.928 $\mu\text{g g}^{-1}$ en sedimentos superficiales para una zona industrial de Buenos Aires, Argentina. Las concentraciones de Zn que se observaron en este estudio fueron mayores a las reportadas por estos autores.

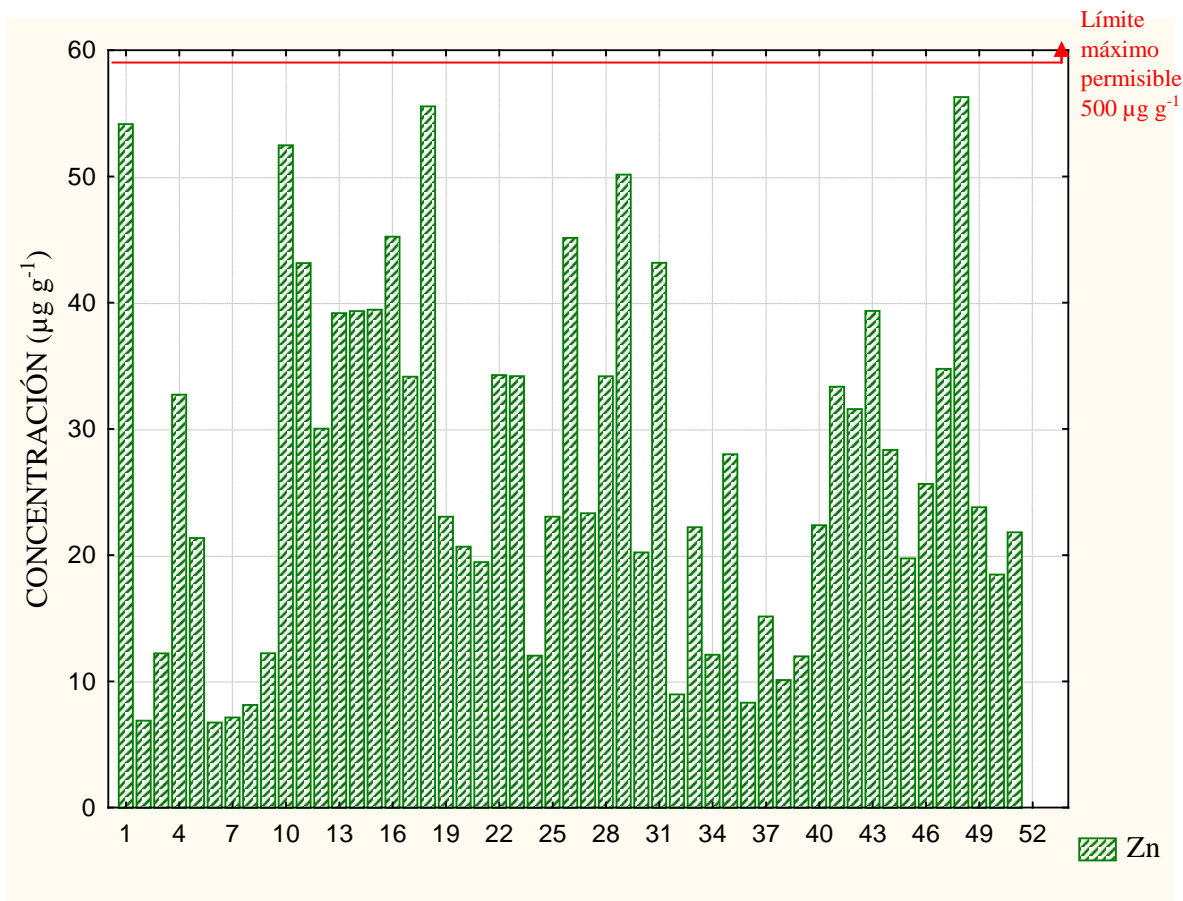


Figura 12. Distribución de las concentraciones del Zn en los 51 puntos de muestreo.

La Normativa Nacional Venezolana establece en el Decreto 2635 Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de los desechos peligrosos, 500 $\mu\text{g g}^{-1}$ como límite máximo permisible para este metal. Aun cuando las concentraciones de Zn observadas en este estudio, fueron menores a los establecidos por la norma, en comparación con aquellas encontradas para Cd, Cu y Pb, esto no indica que no exista un riesgo para los agroecosistemas,

ya que una prolongada exposición a este metal puede causar alteraciones o disminuciones en la producción agrícola (Risser y Baker, 1990).

8.2. Contenido de metales pesados en el material particulado

En el Cuadro 3 se describen las concentraciones medias de las muestras analizadas del material particulado emitido por el ingenio La Gloria y la quema de la caña de azúcar.

Cuadro 3. Concentraciones medias de cada uno de los metales pesados analizados en este estudio.

METALES PESADOS	ZONA A	ZONA B
	($\mu\text{g g}^{-1}$)	
Cadmio	100.6179	66.3614
Cobre	92.2825	47.2506
Plomo	876.8579	701.3888
Zinc	28.5941	26.8798

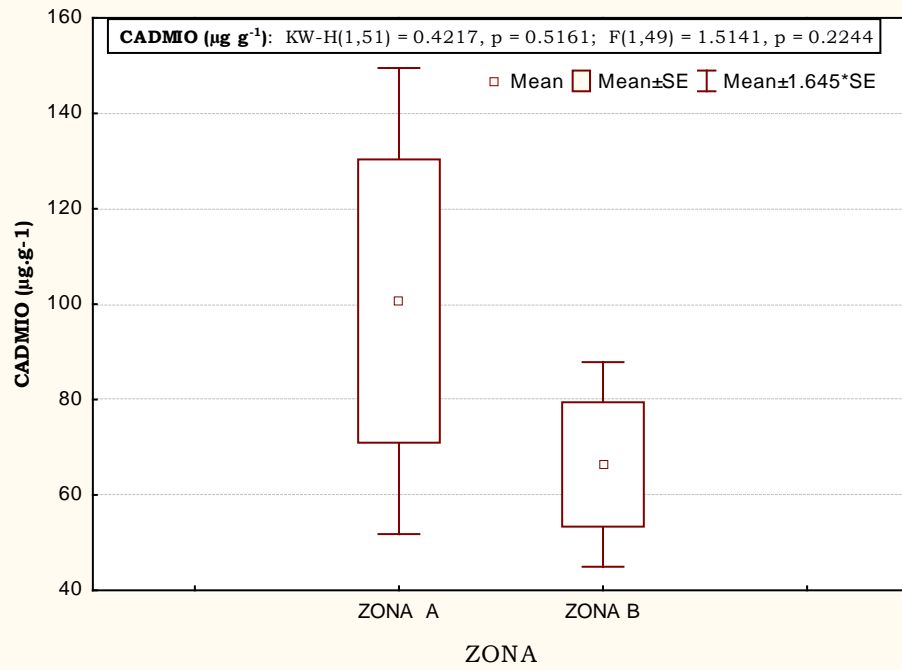
Se observó que el Pb presentó una mayor concentración en la zona aledaña al ingenio La Gloria. Wedge y Hutton (1985) encontraron altas concentraciones de Pb como resultado de la incineración de residuos agrícolas.

8.3. Análisis de Cd, Cu, Pb y Zn

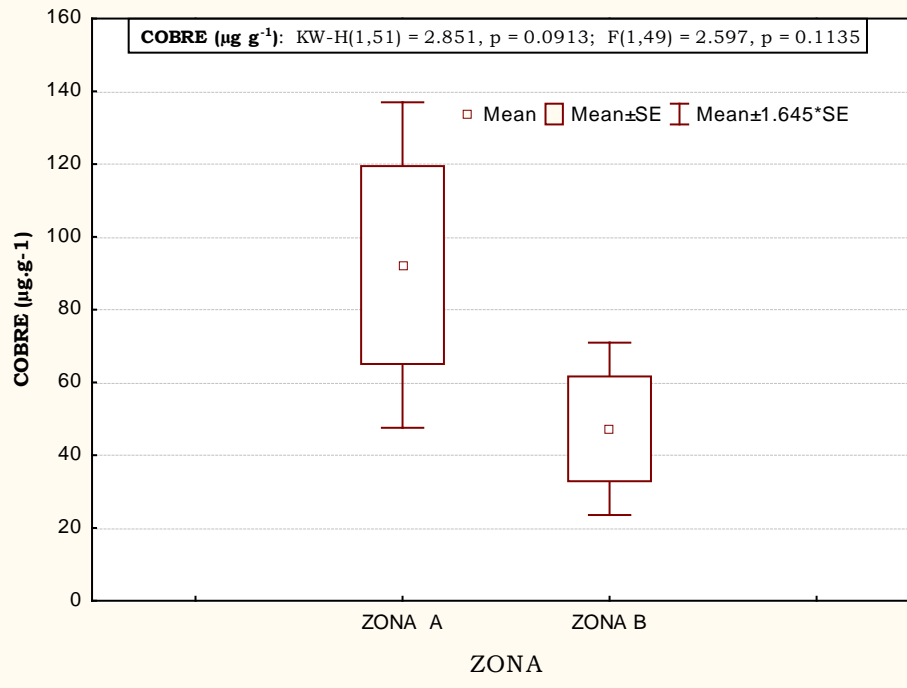
A continuación se presentan los resultados del análisis estadístico de comparación de medias de concentración entre las zonas A y B (Figura 13). La dispersión de material particulado, el cual está compuesto por diversos elementos químicos como producto de la combustión, se puede dar en distancias de hasta 15 km, siendo las partículas de menor diámetro ($0.1 \mu\text{m}$) las que se depositan sobre la superficie más cercana al punto emisor (Gildo, 2008).

Es importante mencionar que el material particulado que se identificó, a simple vista, está compuesto de partículas finas y gruesas. Baird (2001) señaló que las partículas gruesas son similares a las partículas del suelo, mientras las finas son predominantemente de sulfatos y aerosoles.

a)



b)



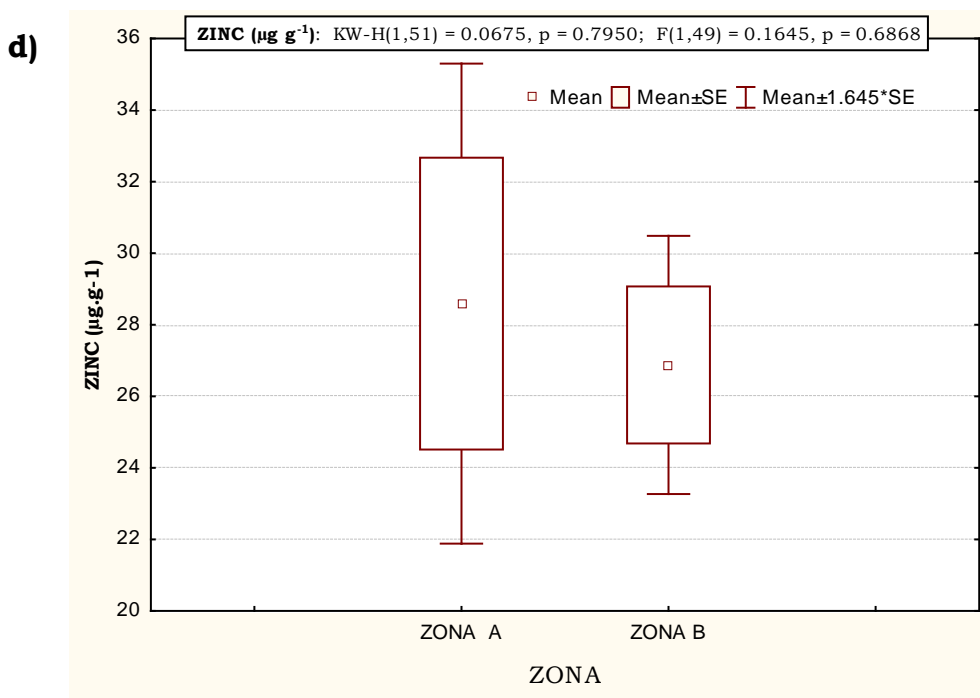
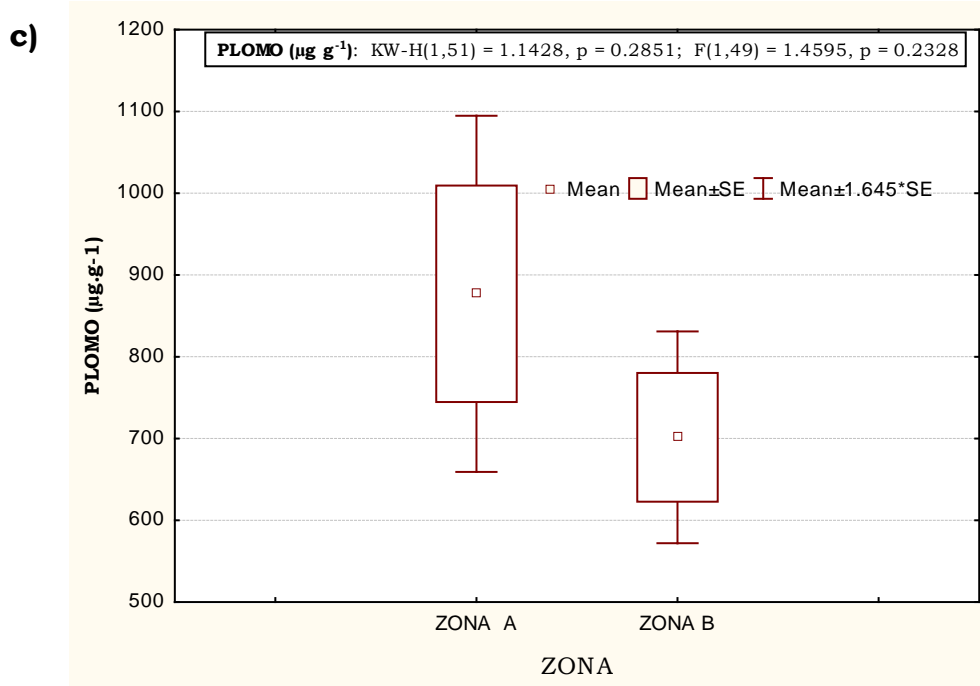


Figura 13. Análisis de varianza de la comparación entre zonas del material particulado: a) Cd; b) Cu; c) Pb; y d) Zn.

Los valores de concentración de Cd, Cu, Pb y Zn encontrados en las muestras de material particulado, recolectadas en las zonas de muestro A y B del área de estudio, no presentan diferencias estadísticas significativas. Lo anterior podría atribuirse, en parte, al hecho de que se consideró un solo ingenio con una fuente emisión de importancia considerable. Sin embargo, en este análisis se observó que el Pb presentó una mayor concentración en comparación con los otros metales pesados identificados en este estudio.

Se construyó un índice de metales pesados a través de un Análisis de Componentes Principales (ACP) para las concentraciones de material particulado recolectado en los puntos de muestreo bajo estudio. Mediante este análisis, se identificaron los valores propios para cada componente, observándose asimismo la varianza explicada y la cantidad de información que tiene cada componente. Posteriormente, se eligió el componente uno (C_1) por su mayor varianza explicada (Cuadro 4).

Cuadro 4. Análisis de la matriz de varianza explicada.

Factor	Valor propio	Varianza total (%)	Valor total acumulativo	Acumulativo (%)
1	1.345087	33.62718	1.345087	33.6272
2	1.058501	26.46252	2.403588	60.0897
3	0.999191	24.97978	3.402779	85.0695
4	0.597221	14.93052	4.000000	100.0000

De acuerdo al ACP esto indica que el primer componente (Factor) tiene el mayor valor propio de los factores, distinguiendo el de valor mayor y menor de los componentes. En el Cuadro 5 se observa que el factor uno presenta una alta correlación con el Pb y Zn, lo cual las hacen las más representativas.

Cuadro 5. Análisis de correlación de variables con componentes.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Plomo	0.824600	-0.174427	0.168783	-0.511001
Cadmio	0.031627	-0.910306	0.319654	0.261083
Cobre	-0.006231	-0.394737	-0.912337	-0.108556
Zinc	0.814912	0.208812	-0.190171	0.506113
Variable exploratoria	1.345087	1.058501	0.999191	0.597221
Proporción total	0.336272	0.264625	0.249798	0.149305

Además con el ACP se obtuvieron las cargas factoriales (índice) de cada variable, en la cual se detectaron los sitios con mayor concentración y baja concentración de los metales pesados (Figura 14).

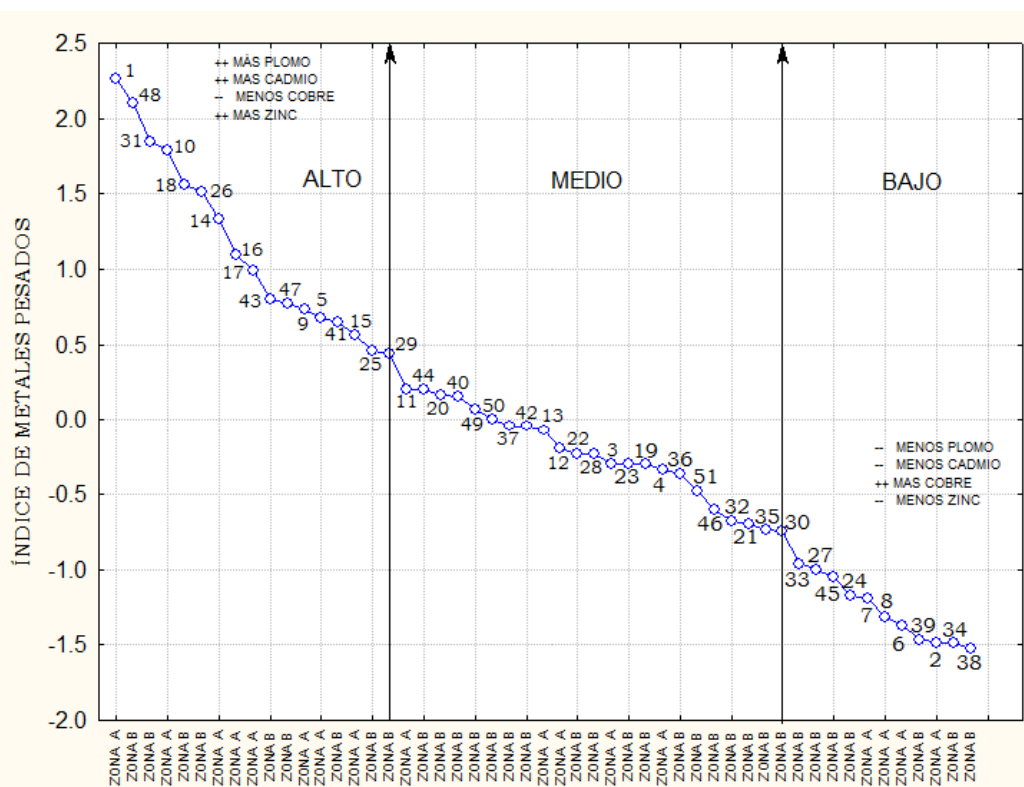


Figura 14. Clasificación de los niveles de contaminación en grupos alto, medio y bajo, según el Índice obtenido del ACP.

Se observó, por medio de un análisis de varianza de los tipos de concentración (alto, medio y bajo), que al menos un tipo es diferente ($p=0.0001$) En la Figura 15 puede verse que no hay

traslape entre las ramas de las cajas, lo cual indica que se está en presencia de tres poblaciones estadísticas diferentes.

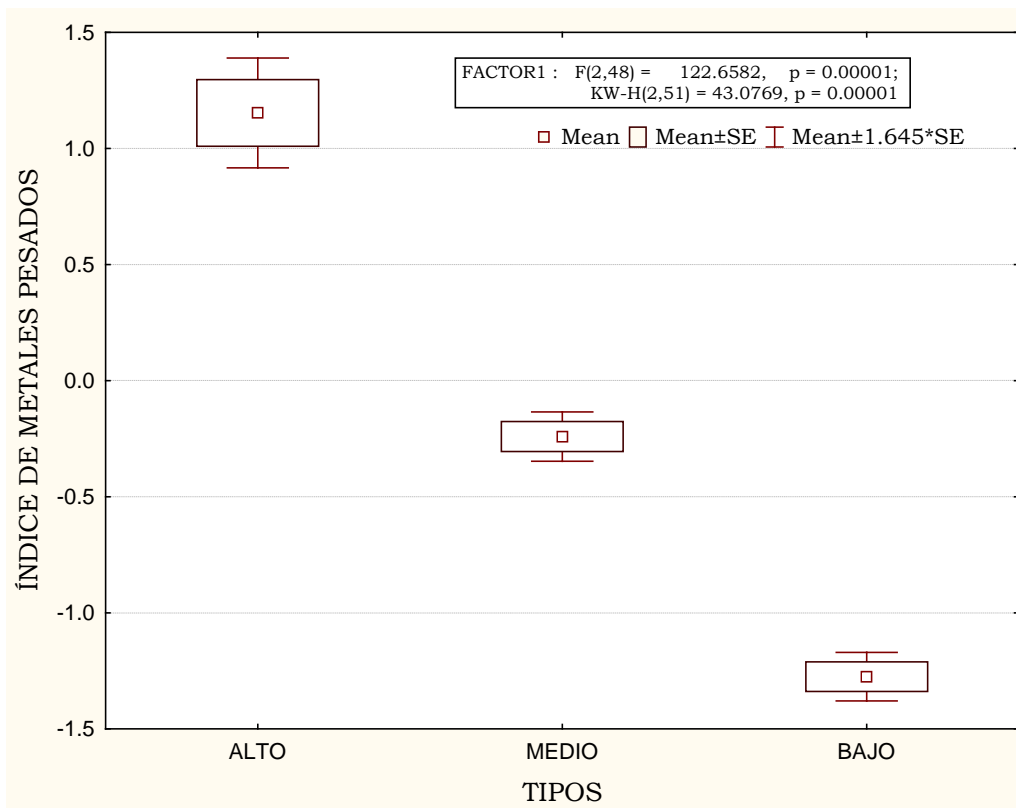


Figura 15. Nivel de concentración de contaminantes.

En los Cuadros 6, 7, y 8 se muestran los valores de cada uno de los niveles de concentración de metales pesados por zona que aportan la actividad agroindustrial y la quema de la caña de azúcar.

Cuadro 6. Valores de concentración altos de Cd, Cu, Pb y Zn.

ALTO				
ZONA	CADMIO ($\mu\text{g g}^{-1}$)	COBRE ($\mu\text{g g}^{-1}$)	PLOMO ($\mu\text{g g}^{-1}$)	ZINC ($\mu\text{g g}^{-1}$)
ZONA A	1105.535	680.786	10824.86	299.0860
ZONA B	513.456	466.277	10368.73	381.6510
Total	1618.991	1147.063	21193.59	680.7370

Cuadro 7. Valores de concentración medios de Cd, Cu, Pb y Zn.

MEDIO				
ZONA	CADMIO ($\mu\text{g g}^{-1}$)	COBRE ($\mu\text{g g}^{-1}$)	PLOMO ($\mu\text{g g}^{-1}$)	ZINC ($\mu\text{g g}^{-1}$)
ZONA A	240.756	481.467	2577.80	157.7400
ZONA B	1177.548	993.283	12364.93	420.0820
Total	1418.304	1474.750	14942.73	577.8220

Cuadro 8. Valores de concentración bajos de Cd, Cu, Pb y Zn.

BAJA				
ZONA	CADMIO ($\mu\text{g g}^{-1}$)	COBRE ($\mu\text{g g}^{-1}$)	PLOMO ($\mu\text{g g}^{-1}$)	ZINC ($\mu\text{g g}^{-1}$)
ZONA A	364.2130	406.5500	1503.892	29.2750
ZONA B	565.2850	146.9630	1113.557	112.1810
Total	929.4980	553.513	2617.449	141.4560

La emisión del material particulado es mediante la chimenea industrial, la cual, mientras más alta sea, mayor será la probabilidad que los contaminantes se dispersen y diluyan antes de afectar a poblaciones vecinas. La emanación visible de la chimenea se llama pluma, la altura está determinada por la velocidad y empuje de los gases que salen por la chimenea (Li *et al.*, 2015). De acuerdo con (Segura *et al.*, 2003) la distancia a la que ocurren las mayores concentraciones de material particulado no depende de la velocidad del viento, su mayor concentración se mantiene en una distancia de 500 m del foco emisor, generalmente el viento favorece la dispersión de los contaminantes y la humedad juega un papel negativo en la dispersión de los mismos, al aumentar la concentración de humo y material particulado.

La distribución del material particulado del área aledaña al ingenio La Gloria y la quema de caña de azúcar, presenta un alto nivel de concentración en los sitios más cercanos a la fuente de emisión, siendo los sitios alejados los que presentan media y baja concentración, esto, se atribuye a la dispersión, es decir, el transporte del material particulado en el aire y depende de las condiciones meteorológicas como: turbulencias atmosféricas, velocidad y dirección del viento, los diferentes tipos de fenómenos de dispersión de las partículas volátiles provocan la acumulación en zonas próximas a la fuente de emisión o transporte de los mismos a zonas menos alejadas.

En la Figura 16 se observa la localización de los sitios de muestreo. En ésta se indican los niveles de concentración alto, medio y bajo por medio de los colores rojo, verde y negro, respectivamente.

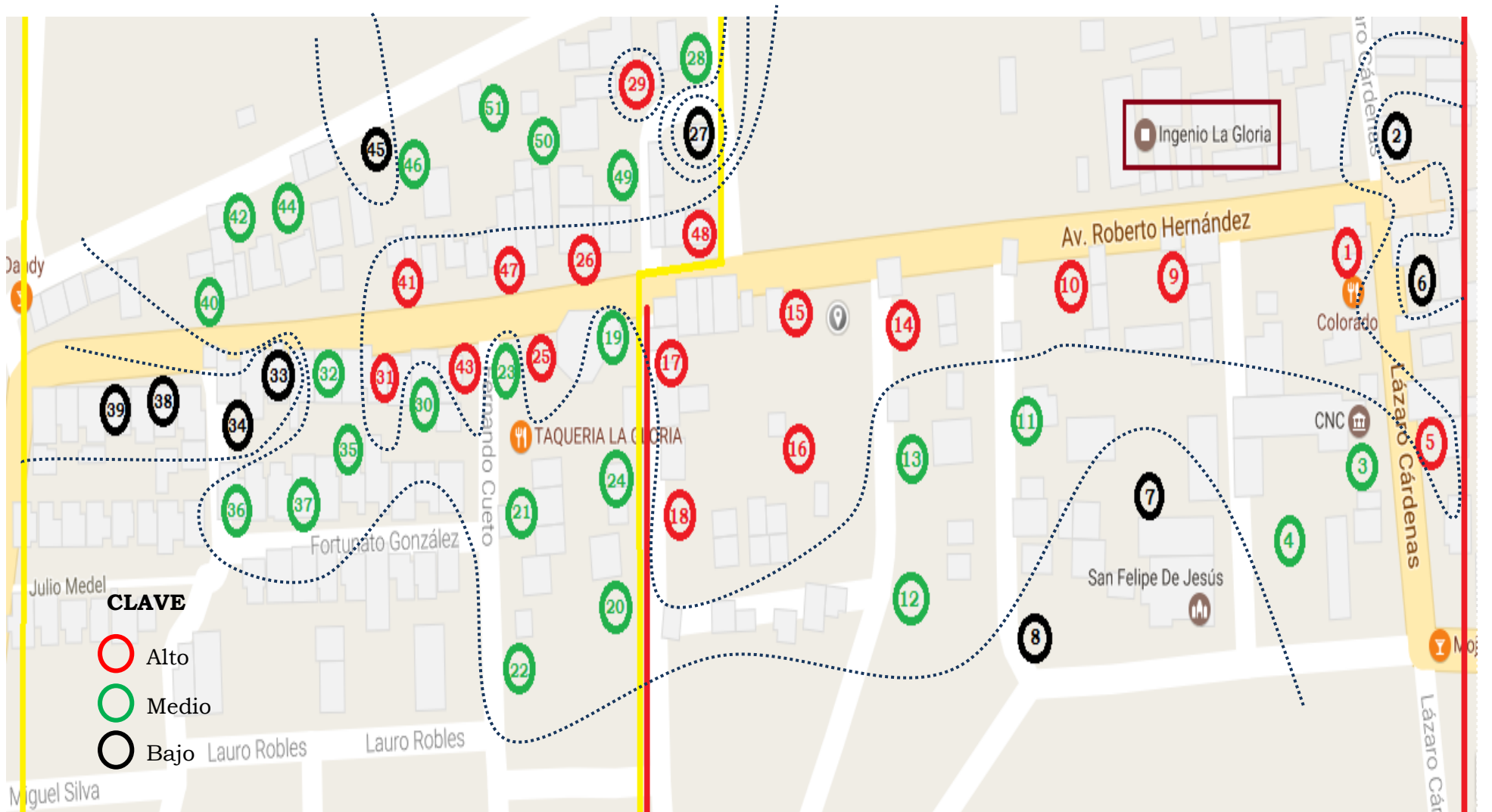


Figura 16. Distribución geográfica de los sitios de muestreo y niveles de concentración de los metales estudiados.

8.4. Contratación de hipótesis

Tal como se observó en los resultados se tiene que:

La hipótesis general enuncia que las concentraciones y distribución espacial de metales pesados como Cd, Cu, Pb y Zn, presentes en el material particulado emitido por el ingenio La Gloria y la quema de caña de azúcar en los agroecosistemas regionales, están en función a la distancia en que tal material se depositó durante el proceso de emisión.

Respecto a lo anterior se encontró que existe presencia de metales pesados en el material particulado emitido por el ingenio La Gloria y la quema de caña de azúcar con concentraciones que rebasan los límites máximos permisibles de la norma establecida por SEMARNAT, tal como se postuló en la hipótesis general. Asimismo, la distribución del material particulado se encuentra en mayor concentración y acumulación en el área más cercana a la fuente de emisión durante la época de zafra, muchas veces la concentración de contaminantes es determinada en gran medida por el clima y topografía del área, lo cual, nos da elementos suficientes para establecer que la hipótesis planteada **NO SE RECHAZA**.

9. CONCLUSIONES

En el contexto de la hipótesis de investigación planteada en este estudio se concluye que respecto a los metales pesados analizados, es decir, Cd, Cu, Pb y Zn, si se encontraron concentraciones de metales pesados en las zonas A y B aledañas al ingenio la Gloria, sin presentar diferencia significativa entre éstas.

En particular cada uno de los metales presentó diferentes concentraciones. El Cd rebasó los niveles máximos permisibles establecidos por la norma NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2014, en cuanto a concentraciones de metales pesados en zonas industriales. Asimismo, en dicha norma se establecen los límites máximos permisibles para el Pb; este metal rebasó, en este estudio, los límites máximos permisibles que establece esta norma

En el caso de Cu y Zn presentaron concentraciones bajas. Sin embargo, su mínima presencia no los hace menos peligrosos para los agroecosistemas regionales.

También se construyó un análisis de componentes principales, del cual derivó un análisis multivariado y fue posible encontrar el componente con mayor varianza explicada. Asimismo, resultó un índice de metales pesados, con el cual se realizó una clasificación de concentración en las categorías de alto, medio y bajo, la cual demostró que existen diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los valores de concentración de metales pesados. De esta manera se encontró que la zona más cercana al ingenio La Gloria presenta altos niveles de concentración de los metales pesados estudiados.

El material particulado emitido por el ingenio La Gloria presenta concentraciones elevadas de los metales pesados estudiados, los cuales afectan, como se mencionó en párrafos anteriores, la flora, fauna y agua de los agroecosistemas de la región, debido a que en las plantas presenta modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración e inhibe la síntesis de clorofila, también, degrada los suelos y cambia su alcalinidad.

La realización de esta investigación proyecto resultó un gran reto, debido a la presencia de nortes, los cuales dificultaron enormemente la colección de muestras de ceniza en los sitios estudiados. Lo anterior, nos deja la tarea de desarrollar equipo e instrumental apropiado para realizar un monitoreo de las concentraciones de metales pesados y otros elementos en el material particulado emitido por el ingenio La Gloria y la quema de la caña de azúcar.

Metales pesados como el Cd y Pb, son considerados cancerígenos para los seres humanos y representan un riesgo latente de enfermedades bronco-respiratorias y oculares a los pobladores que viven en el área donde se realizó este estudio.

10. LITERATURA CITADA

- Aguirre, W., Fischer G., y D. Miranda. 2012. Tolerancia a metales pesados a través del uso de micorrizas arbusculares en plantas cultivadas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(1):141-154.
- Albert, L., 1997. Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. Xalapa: Sociedad Mexicana de Toxicología. [Http://www.bvsde.paho.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf).
- Alloway, B. J. and D. Ayres. 1993. *Chemical principles of environmental pollution*. Blackie Academic and Professional, Nueva York, 291pp.
- Álvarez, E. 2007. La caña de azúcar: ¿Una amarga externalidad? *Desarrollo y Sociedad*, 59:117-164.
- Arnold, M. 1998. Introducción a los conceptos básicos de la Teoría General de Sistemas. *Cinta de Moebio. Revista de Epistemología de Ciencias Sociales*, 1(3):42.
- Barrett, C., Barbier E. B. and T. Reardon. 2001. Agro-industrialization, globalization and international development: the environmental implications. *Environment and Development Economics*, 6:419-433.
- Basanta R., Delgado, M., Martínez, J., Vázquez, H., y G. Vázquez. 2007. Sostenibilidad del reciclaje de residuos de la agroindustria azucarera: una revisión Sustainable recycling of waste from sugarcane agroindustry: A Review. *Cyta-Journal of Food*, 5(4):293-305.
- Bertalanffy Von, L. 1993. *Teoría general de los Sistemas*. Fondo de Cultura Económica.
- Brune, A., Urbach W., and K. Dietz. 1994. Compartmentation and transport of zinc in barley primary leaves as basic mechanisms involved in zinc tolerance. *Plant Cell Environment*, 17:153-162.
- Cedano-Villanueva, K. y L. L. Requena-Castellares. 2007. Estudio toxicológico de los niveles de concentración de Cadmio, Magnesio y Plomo, en sangre y/u orina en personas expuestas en las AVS. Abancay y Alfonso Ugarte de la ciudad de Lima. Tesis. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

- Chiavenato, I. 1997. Entrenamiento y desarrollo del personal. Administración de Recursos Humanos. Atlas, México D.F, 456.
- Cieslinski, G., Van Rees, K., Huang, P.M., Kozak, L.M., Rostad, H.P., and D.R. Knott. 1996. Cadmium uptake and bioaccumulation in selected cultivars of durum wheat and flax as affected by soil type. *Plant Soil*, 182:115-124.
- Conway, G. R. 1987. The properties of agroecosystems. *Agricultural Systems*, 24(2):95-117.
- García, C., Moreno, J. L., Hernández, M. T., y A. Polo. 2002. Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. Madrid, España. <http://hdl.handle.net/10261/111812>
- Gardezi, A. K., Barcelo-Quintal, I. D., Cetina-Alcalá, V. M., Bussy, A. L., Pérez-Nieto, J., y M. A. Borja-Salin. 2006. Absorción de cobre y características de *Leucaena leucocephala* asociada con *Glomus spp.* Y *Rhizobium* en suelo contaminado del Río Lerma, México. *Terra Latinoamericana*, 24(3):347-354.
- Hart, R. D. 1985. Conceptos básicos sobre agroecosistemas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba. Costa Rica. Serie Materiales de Enseñanza No. 1. 159 p.
- Herrera-Núñez, J., Rodríguez-Corrales, J., Coto-Campos, J. M., Salgado-Silva, V., y H. Borbón-Alpizar. 2013. Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del Río Pirro. *Revista Tecnología en Marcha*, 26 (1): 27-36.
- Herrscher, E. G., y R. L. Ackoff. 2003. Pensamiento sistémico: Caminar el cambio o cambiar el camino. Ediciones Granica S.A. (1):36.
- Iannacone, J. O., and L. F. Alvariño. 2005. Ecotoxicological effects of three heavy metals on the root growth of four vascular plants. *Agricultura Técnica*, 65(2):198-203.
- Jáuregui, J. A., Morales, F. A. B., Castorena, C. Á., Fuentes, H. R., Ortíz, J. C. R., Ramírez, J. G. L., y A. H. Montoya. 2012. Metales pesados como indicador de impacto de un sistema ecológico fragmentado por usos de suelo, San Luis Potosí, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 44(2):15-29.
- JECFA (Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios y Codex Alimentarius) 2006 Programa Conjunto FAO/OMS sobre Normas alimentarias. Propuestas, 4: 25.

- Kabata-Pendias, A. 2000. Biogeochemistry of Cadmium. *Zeszyty Naukowe Komitetu Czlowiek Srodowisko*, 26:17-24.
- Kabata-Pendias, A., and W. Sadurski. 2004. Trace elements and compounds in soil. *Elements and Their Compounds in the Environment: Occurrence, Analysis and Biological Relevance*, Second Edition, 79-99.
- Landeros-Sánchez, C., Lango-Reynoso, F and M. D. R. Castañeda-Chávez. 2010. Bioaccumulation of Cadmium (Cd), Lead (Pb) and Arsenic (As) in *Crassostrea virginica* (Gmelin 1791), from Tamiahua Lagoon system, Veracruz, Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 26(3): 201-210.
- Lasat, M. M. 2002. Phytoextraction of toxic metals: a Review of Biological Mechanisms. *Journal Environment*. 31:109-120.
- Lerda, D. 1992. The effect of lead on *Allium cepa* L. *Mutation Research Letters*, 281(2):89-92.
- Llugany, M., Tolrà, R., Poschnrieder, C., y J. Barceló. 2007. Hiperacumulación de metales: ¿Una ventaja para la planta y para el hombre? *Revista Ecosistemas*, 16(2):6-12.
- López-Romaña, D., Castillo, C. D., D. Diazgranados. 2010. El Zinc en la salud humana. II. *Revista Chilena de Nutrición*, 37(2):240-247.
- Loucks, O. L. 1977. Emergence of research on agro-ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 8 (1): 173-192.
- Luhmann, N. 1998 *Sistemas sociales: lineamientos para una Teoría General* Anthropos Editorial, Vol.15.
- Luo, W., Tong, X., Wang, B., Shi, Y., Wang T., Naile J., and J. P. Giesy. 2009 Distribution of copper, cadmium, and lead in soils from former industrialized urban areas of Beijing, China. *Bull Environment Contamination and Toxicology*; 82:378-383.
- Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., y H. Velásquez. 2008. Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 24(4):171-182.
- Martínez D., J. P., Gallardo L., L. F. Bustillos G., y A. Pérez. 2011. El agroecosistema, unidad de estudio y transformación de la diversidad agrícola. *La biodiversidad en Veracruz: Estudio*

- de Estado. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. CONABIOS. Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A. C. pp: 451-541.
- Mayorquín, C. M. 2011. Estudios de la contaminación de los recursos hídricos en la cuenca del Río San Pedro, previos a la construcción de una hidroeléctrica (Las Cruces) en Nayarit, México. Tesis. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias.
- Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, D. R., and García, F. P. 2009. Plant Contamination and Phytotoxicity due to heavy metals from soil and water. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1):29-44.
- Mohanraj, R., Azeez, P. A., and T. Priscilla. 2004. Heavy metals in airborne particulate matter of urban Coimbatore. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 47(2):162-167.
- Navarro-Aviñón, J. P., Alonso, I. A., y J. R. López-Moya. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Revista Ecosistemas*, 16(2).
- Nava-Ruíz, C., y M. Méndez-Armenta. 2011. Efectos neurotóxicos de metales pesados (Cadmio, Plomo, Arsénico y Talio). *Archivos Neurocientíficos (México)*, 16(3):140-147.
- Network, B. U. 2002. Manuales sobre energía renovable: Biomasa. Biomass Users Network. San José, Costa Rica. <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/cuadernos/investigacion/article/download/1271/1150:pdf#page=13>.
- Odum, H. T, 1994. *Ecológicos y sistemas generales: Una Introducción a la Ecología de Sistemas*, Prensa de la Universidad de Colorado, Ecología de Sistemas, p. 644.
- Oficial, G. 1998. Normas para el control de la recuperación de materiales peligrosos y el manejo de desechos peligrosos. Decreto 2,635, Gaceta Oficial N 5.245, Extraordinario de la República de Venezuela. Imprenta Nacional. Caracas. Venezuela.
- Pais, I., and J. J. Benton. 1997. *The Handbook Trace Elements*. Lucie Press. 222 pp.

- Pérez-Fadul, L. F. 2010. Determinación de metales pesados en partículas respirables e identificación de fuentes de emisión, a partir de un muestreo atmosférico en la localidad de Puente Aranda. Bogotá, Colombia. [Http://hdl.handle.net/10185/14803](http://hdl.handle.net/10185/14803).
- Pope, C.A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., and G. D. Thurston. 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulates air pollutions. *Journal Jama*, 287(9):1132-1141.
- Querol, X. 2008. Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de Salud Pública*, 82 (5):447-454.
- Rengifo-Cuéllar, H. 2008. Conceptualización de la salud ambiental: teoría y práctica (parte 1). *Revista Peruana de medicina experimental y salud pública*, 25(4):403-409.
- Reyes, y C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., y E. E. González. 2016. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2):66-77.
- Rovira, J., Nadal, M., Schuhmacher, M., and J. L. Domingo. 2010. Environmental monitoring of metals, PCDD/Fs and PCBs as a complementary tool of biological surveillance to assess human health risks. *Chemosphere*, 80(10):1183-1189.
- Salisbury, F., and C. Ross. 1991. *Plant Physiology*. Edition. John Wiley and Sons. New York, 656 pp.
- Sánchez L. 2000. Deposición atmosférica de especies químicas contaminantes en la Ciudad de Maracaibo. Facultad Experimental de Ciencias. Universidad del Zulia. 86 pp.
- Sanhueza, P., Vargas, C., y P. Mellado. 2006. Impacto de la contaminación del aire por PM₁₀ sobre la mortalidad diaria en Temuco. *Revista Médica de Chile*, 134(6):754-761.
- Sarandón, S. J. 2002. *Agroecología*. Edición Científica Americana. La Plata. 556 pp.
- Schinitman, N. I. 2004. Metales pesados, ambiente y salud. *Ecoportal.net*. http://www.ecoportal.net/TemasEspeciales/Contaminacion/Metales_Pesados_Ambiente_y_Salud (Consultada: Enero 2016).
- SE (Secretaría de Economía).2012. Análisis de la situación económica, tecnología y de política comercial del sector edulcorantes en México. 94 p.

- Segura, L. M. S., y J. A. L Arriaga. 2003. Principios básicos de contaminación ambiental. Universidad Autónoma del Estado de México. https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=pKP2BHi8FVsC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Segura,+L.+M.+S.,+y++Arriaga,+J.+A.+L.+2003.+Principios+básicos+de+contaminación+ambiental.+&ots=4Y7246j fj_&sig=TVs-RnvXZbgbgSY91BfZgPGVKXQ#v=onepage&q&f=false
- Solano, A. M. 2008. Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del Zinc. Universidad de Murcia. <https://digitum.um.es/xmlui/bitstream/10201/190/11/Tasm11de16.pdf>
- Tembo, B. D., Sichilongo, K., and J. Cernak. 2006. Distribution of copper, lead, cadmium and zinc concentrations in soils around Kabwe town in Zambia. *Chemosphere*, 63(3):497-501.
- WHO. 1992. Arsenic and Arsenic Compounds. Environmental Health Criteria 224.
- Zúñiga, F. B. 1999. Introducción al Estudio de la Contaminación del suelo por metales pesados. Vol. 1.