



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN  
EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

**CAMPUS TABASCO**

**PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO**

**METALES PESADOS EN SUELOS CULTIVADOS  
CON CAÑA DE AZÚCAR EN LA CHONTALPA, TABASCO**

**ALFREDO DE LA CRUZ PONS**

**TESIS**

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

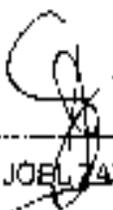
**MAESTRO EN CIENCIAS**

**H. CÁRDENAS, TABASCO. DICIEMBRE DE 2008**

La presente tesis, titulada: **Metales pesados en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco**, realizada por el alumno: **Alfredo de la Cruz Pons** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN  
PRODUCCIÓN AGROALIMENTARIA EN EL TRÓPICO**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO \_\_\_\_\_  
  
DR. JOEL ZAVALA CRUZ

ASESOR: \_\_\_\_\_  
  
DR. ARMANDO GUERRERO PEÑA

ASESOR: \_\_\_\_\_  
  
DR. SERGIO SALGADO GARCÍA

ASESOR: \_\_\_\_\_  
  
DRA. LUZ DEL CARMEN LAGUNES ESPINOZA

ASESOR: \_\_\_\_\_  
  
DR. FRANCISCO GAVI REYES

**H. Cárdenas, Tabasco, 11 de Diciembre de 2008**

## RESUMEN

### Metales pesados en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco

Alfredo de la Cruz Pons, Mc.  
Colegio de Postgraduados, 2008

La actividad industrial y agrícola pueden ser fuentes de metales pesados que en concentraciones críticas en los suelos afectan el desarrollo de las plantas. En la Chontalpa, Tabasco, el cultivo de la caña de azúcar es importante por su extensión, producción de azúcar y la generación de empleos. En las zonas de abastecimiento del cultivo, existen dos ingenios azucareros que emiten gases a la atmósfera durante la zafra, así como una batería de separación de hidrocarburos que durante muchos años emitió gases a la atmósfera. La presente investigación se planteó como objetivos determinar el contenido de metales pesados en suelos y hojas de caña de azúcar en la zona cañera de la Chontalpa cercanos a la actividad petrolera y agroindustrial. El muestreo se realizó en suelos Vertisoles y Fluvisoles (0-20 cm de profundidad) y en plantas (hojas), de dos industrias: el Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ) y la batería de separación de hidrocarburos Cárdenas (BC); a partir de cada fuente, para cada suelo se seleccionó un transecto con tres distancias de muestreo (0.6, 3 y 6 km), se tomaron muestras compuestas con 3 repeticiones. Los contenidos de metales en suelo y planta se determinaron con espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS, por sus siglas en ingles). Los contenidos de los metales totales Cd, Pb, Ni, V, Fe, Cu, Zn y Mn encontrados en suelos con caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en transectos al suroeste de la BC y del IPBJ, no representan riesgo de contaminación en el suelo. No se detectó V y Cd extractable, y los contenidos de Pb, Ni, Fe, Cu, Zn y Mn extractables en los suelos cercanos a la BC e IPBJ, no indican contaminación. El Ni fue el único metal que se correlacionó en sus formas totales y extractables en los Fluvisoles area estudiada de las dos industrias, sin llegar a ser tóxico para los cultivos. No se detectó Pb, Ni y Cd en las hojas de la caña de azúcar, solo V, Fe, Cu, Zn y Mn en la planta pero en cantidades que no representan toxicidad.

**Palabras clave:** Metales pesados, caña de azúcar, suelos.

## ABSTRACT

### Heavy metals in soil cultivated with sugarcane in the Chontalpa, Tabasco

Alfredo de la Cruz Pons, Mc.

Colegio de Postgraduados, 2008

Industrial and agricultural activity can be sources of heavy metals in soils in critical concentrations that affect the development of plants. In Chontalpa, Tabasco, the cultivation of sugarcane is important for its cultivated extension, sugar production and employment generation. In the areas where sugar cane is cultivated, there are two sugar factories that emit gases into the atmosphere during the harvest. In addition there is a hydrocarbons battery separation plant that for many years delivered gases into the atmosphere. This research was raised as targets to determine the content of heavy metals in the soil and leaves of sugarcane in the area of Chontalpa close to the oil industry and agribusiness. The sampling was done in Vertisols and Fluvisols soils (0-20 cm depth) and in plants (leaves) at two industries: President Benito Juárez factory (IPBJ) and the hydrocarbons battery separation plant Cardenas (BC) from each source, a transect for each soil sampling was selected, with three distances (0.6, 3 and 6 km); composite samples were taken with three replicates. The metals contents in soil and plant were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The contents of the total metals Cd, Pb, Ni, V, Fe, Cu, Zn and Mn found in soils with sugarcane (*Saccharum spp.*) on transects in the southwest of BC and IPBJ do not represent a risk of contamination in the soil. There was not detected Cd and V, and the contents of Pb, Ni, Fe, Cu, Zn and Mn extractable in the soil near the BC and IPBJ did not indicate contamination. Ni was the only metal to be correlated in its total and extractable forms in Fluvisols in studied areas of the two industries, without being toxic to crops. There were no detected Pb, Ni and Cd in the leaves of sugarcane, only V, Fe, Cu, Zn and Mn in the plants but in quantities that does not represent toxicity.

**words:** Heavy metals, sugar cane, soils.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo económico durante mis estudios de postgrado.

Al proyecto “Estudio integral de la cuenca del río Tónala y lagunas del Carmen y Machona”, financiado por la línea de investigación 1; manejo sustentable de los recursos naturales del Colegio de Postgraduados, por los diversos apoyos otorgados durante la realización del trabajo de investigación.

Al Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, por haber permitido mi estancia en sus aulas para mi desarrollo profesional y académico.

Al Dr. Joel Zavala Cruz por guiarme en el proceso de investigación, por su paciencia y valiosísimo apoyo en la realización de este trabajo. Muchas gracias por darme la oportunidad de ser su alumno.

A mi demás cuerpo de asesores de tesis: Dr. Armando Guerrero Peña, Dr. Sergio Salgado García, Dra. Luz del Carmen Lagunes Espinoza y Dr. Francisco Gavi Reyes por su valiosa aportación al trabajo con sus observaciones y correcciones del mismo.

A todos los profesores del Colegio de Postgraduados por aportar parte de sus conocimientos y experiencia en la docencia e investigación para formar parte de mi crecimiento personal, profesional e intelectual.

A la Dra. Sandra Grisell Mora Ravelo y al Dr. Hector Flores Magdaleno por su apoyo en la realización de los análisis de muestras de suelos y plantas, con el equipo ICP-MS en el Laboratorio de Análisis de Contaminación Ambiental en el CP Campus Montecillos.

A la Q.A. Edith Hernández Nataren y los Técnicos laboratoristas del LASPA CP Campus Tabasco: Martha, Esteban y Bernardo por su compañerismo, amistad y apoyo desinteresado mostrado antes, durante y después del desarrollo de este trabajo.

A Thelma, encargada de la biblioteca del CP Campus Tabasco, mi amiga desde la universidad, por su apoyo moral he incondicional durante mi desarrollo educativo en la carrera universitaria y de postgrado.

Al Ing. Antonio López Castañeda por su apoyo en la realización de los mapas de muestreo.

A todos los compañeros de generación PROPAT 2006-2007, sin ellos no sería lo mismo el camino recorrido.

Y a todos y cada una de las personas que directa e indirectamente formaron parte de este logro en mi vida.

## DEDICATORIA

A **Dios** todo poderoso por darme la conciencia de crecer y creer día a día.

A mi padre **Manuel de la Cruz Vinagre** y a mi madre **Teodora Pons Solís**, ya que sin ellos, sin su apoyo, entusiasmo y amor no hubiese podido lograr todo lo hasta ahora logrado en mi vida. Gracias por darme la luz de la vida.

A mi esposa y amiga **Elda Moreno May** por apoyarme en continuar con mis estudios, por ser el pilar de mi hogar y paño de lágrimas en los momentos difíciles que la vida nos ha presentado.

A mi pequeño hijo Alfredo de la Cruz Moreno, para que este esfuerzo lo motive el día de mañana a ser un hombre de provecho en la vida con base en el estudio, el esfuerzo y el trabajo.

Al pequeño ser que esta por llegar a formar parte de mi vida familiar. Una bendición más en mi vida.

A mis hermanos Patricio, Manuel, Liliana y Angélica. Por su apoyo moral, amor y cariño desinteresado. Son parte de este logro.

A mis sobrinos Ángel Antonio, Rodolfo, Evelin Odalis, Lenin Patricio (el peque), Jesús Antonio, Jacqueline, Yazmín, Yahir y Andrea.

## CONTENIDO

	PAGINA
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS E HIPOTESIS .....	3
2.1. Objetivo general.....	3
2.2. Objetivos particulares .....	3
2.3. Hipótesis .....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
3.1. Contaminación .....	4
3.2. Metales pesados.....	4
3.3. Fuentes de metales pesados.....	5
3.4. Contenidos de metales en suelos y plantas .....	8
3.4.1. Suelos.....	8
3.4.2. Plantas.....	11
3.5. Interacción de metales pesados y propiedades del suelo .....	14
3.6. El Cultivo de caña de azúcar .....	18
3.6.1. Generalidades .....	18
3.6.2. Elementos esenciales.....	19
4. MATERIALES Y METODOS .....	21
4.1. Área de estudio.....	21
4.2. Muestreo de suelos y planta.....	23
4.3. Análisis de laboratorio .....	24
4.3.1. Determinación de metales pesados .....	25
4.3.2. Evaluación de la Fertilidad de los Suelos.....	25
4.4. Diseño Experimental y Análisis Estadístico .....	25
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	27
5.1. Propiedades físicas y químicas de suelos .....	27
5.1.1. Materia orgánica (MO).....	27
5.1.2. pH .....	29
5.1.3. Conductividad eléctrica (CE) .....	30
5.1.4. Textura del suelo .....	31
5.1.4.1 Arcilla, limo y arena .....	31
5.1.4.2. Clase textural.....	33
5.1.6. Capacidad de intercambio cationico (CIC) .....	34
5.2. Metales Pesados en Suelos .....	35
5.2.1. Metales pesados totales.....	35
5.2.1.1. Cadmio total (Cd <sub>t</sub> ).....	35
5.2.1.2. Vanadio total (V <sub>t</sub> ) .....	35
5.2.1.3. Plomo total (Pb <sub>t</sub> ) .....	36
5.2.1.4. Niquel total (Ni <sub>t</sub> ) .....	37
5.2.1.5. Hierro total (Fe <sub>t</sub> ).....	38
5.2.1.6. Cobre total (Cu <sub>t</sub> ) .....	39
5.2.1.7. Zinc total (Zn <sub>t</sub> ).....	41
5.2.1.8. Manganeso total (Mn <sub>t</sub> ) .....	41
5.2.1.9. Tendencias de los metales pesados totales por transectos y distancia....	43
5.2.1.10. Correlación de metales pesados totales y variables del suelo .....	44

5.2.2. Metales pesados extractables .....	48
5.2.2.1. Cadmio extractable (Cd <sub>e</sub> ) y Vanadio extractable (V <sub>e</sub> ).....	48
5.2.2.2. Plomo extractable (Pb <sub>e</sub> ).....	48
5.2.2.3. Niquel extractable (Ni <sub>e</sub> ).....	48
5.2.2.4. Hierro extractable (Fe <sub>e</sub> ) .....	49
5.2.2.5. Cobre extractable (Cu <sub>e</sub> ).....	49
5.2.2.6. Zinc extractable (Zn <sub>e</sub> ) .....	52
5.2.2.7. Manganeso extractable (Mn <sub>e</sub> ).....	53
5.2.2.9. Tendencias de los metales extractables por transectos y distancia.....	54
5.2.2.10. Correlación de metales totales y metales extractables .....	55
5.3. Metales pesados totales en planta .....	58
5.3.1. Cadmio (Cd <sub>p</sub> ), Plomo (Pb <sub>p</sub> ), Niquel (Ni <sub>p</sub> ) y Vanadio (V <sub>p</sub> ) en planta. ....	58
5.3.2. Hierro en planta (Fe <sub>p</sub> ) .....	58
5.3.6. Cobre en planta (Cu <sub>p</sub> ).....	59
5.3.7. Zinc en planta (Zn <sub>p</sub> ) .....	59
5.3.8. Manganeso en planta (Mn <sub>p</sub> ) .....	60
5.3.9. Tendencias de metales pesados en planta, por transecto y por distancia...	61
5.2.3.10. Correlación de metales extractables y totales en planta .....	62
6. CONCLUSIONES .....	65
7. LITERATURA CITADA .....	66
ANEXO 1. Mapa de localización de los sitios de muestreo a partir del IPBJ. ....	74
ANEXO 2. Mapa de localización de los sitios de muestreo a partir de la BC.....	75
ANEXO 3. Fotografías de fuentes de contaminación, muestreo de suelos y plantas y actividades de laboratorio.....	76

## LISTA DE CUADROS

	PAGINA
Cuadro 1. Fuentes de metales pesados.....	7
Cuadro 2. Valores de metales encontrados por emisión de cenizas provenientes de actividad volcánica. ....	8
Cuadro 3. Concentración de metales pesados en suelos. ....	9
Cuadro 4. Concentración de metales pesados totales en suelos. ....	9
Cuadro 5. Concentraciones consideradas como tóxicas de algunos metales trazas en el suelo.....	9
Cuadro 6. Metales pesados totales en suelos de la llanura aluvial en Tabasco. ....	10
Cuadro 7. Concentración de metales en biosólidos y límites de metales para suelos aplicados en E.U. y otros países.....	11
Cuadro 8. Concentración de metales pesados en plantas. ....	13
Cuadro 9. Concentraciones consideradas como tóxicas de algunos metales trazas en plantas. ....	13
Cuadro 10. Niveles críticos de toxicidad de microelementos en plantas. ....	13
Cuadro 11. Requerimientos climatológicos de la caña de azúcar.....	18
Cuadro 12. Análisis de laboratorio para determinación de fertilidad de las muestras de suelo. ....	26
Cuadro 13. Contenido de la materia orgánica (MO) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	28
Cuadro 14. Valores de pH en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	29
Cuadro 15. Valores de conductividad eléctrica en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	30
Cuadro 16. Valores del contenido de arcilla en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	32
Cuadro 17. Valores del contenido de limo en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	32
Cuadro 18. Valores del contenido de arena en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	33
Cuadro 19. Clasificación textural de los suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	33
Cuadro 20. Capacidad de intercambio catiónico en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	34
Cuadro 21. Contenido de vanadio total ( $V_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	36
Cuadro 22. Contenido de plomo total ( $Pb_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	37
Cuadro 23. Contenido de níquel total ( $Ni_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	38
Cuadro 24. Contenido de hierro total ( $Fe_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	39
Cuadro 25. Contenido de cobre total ( $Cu_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	40

Cuadro 26. Contenido de zinc total ( $Zn_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	42
Cuadro 27. Contenido de manganeso total ( $Mn_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	43
Cuadro 28. Comparación de medias de contenidos de metales totales por industria, suelo y distancias. ....	44
Cuadro 29. Correlación entre propiedades del suelo y metales totales en Vertisoles del IPBJ. ....	46
Cuadro 30. Correlación entre propiedades del suelo y metales totales en Fluvisoles del IPBJ. ....	46
Cuadro 31. Correlación entre propiedades del suelo y metales totales en Vertisoles de la BC. ....	47
Cuadro 32. Correlación entre propiedades del suelo y metales totales en Fluvisoles de la BC. ....	47
Cuadro 33. Contenido de plomo extractable ( $Pb_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	50
Cuadro 34. Contenido de níquel extractable ( $Ni_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	51
Cuadro 35. Contenido de hierro extractable ( $Fe_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	51
Cuadro 36. Contenido de cobre extractable ( $Cu_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	52
Cuadro 37. Contenido de zinc extractable ( $Zn_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	53
Cuadro 38. Contenido de manganeso extractable ( $Mn_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. ....	54
Cuadro 39. Comparación de medias de contenidos de metales extractables por transecto y grupo de suelo. ....	55
Cuadro 40. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Vertisoles del IPBJ. ....	56
Cuadro 41. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Fluvisoles del IPBJ. ....	56
Cuadro 42. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Vertisoles de la BC. ....	57
Cuadro 43. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Fluvisoles de la BC. ....	57
Cuadro 44. Contenido de hierro en planta de caña de azúcar ( $Fe_p$ ) en suelos de la Chontalpa, Tabasco. ....	58
Cuadro 45. Contenido de cobre en planta de caña de azúcar ( $Cu_p$ ) en suelos de la Chontalpa, Tabasco. ....	59
Cuadro 46. Contenido de zinc en planta de caña de azúcar ( $Zn_p$ ) en suelos de la Chontalpa, Tabasco. ....	60
Cuadro 47. Contenido de manganeso en planta de caña de azúcar ( $Mn_p$ ) en suelos de la Chontalpa, Tabasco. ....	61
Cuadro 48. Comparación de medias de contenidos de metales totales en planta por transecto y grupo de suelo. ....	62

Cuadro 49. Correlación entre metales extractables y totales en plantas en Vertisoles del IPBJ. ....	63
Cuadro 50. Correlación entre metales extractables y totales en plantas en Fluvisoles del IPBJ. ....	63
Cuadro 51. Correlación entre metales extractables y totales en plantas en Vertisoles de la BC. ....	64
Cuadro 52. Correlación entre metales extractables y totales en plantas en Fluvisoles de la BC. ....	64

## LISTA DE FIGURAS

PAGINA

Figura 1. Adsorción metales en función del pH en tres diferentes materiales. ....	16
Figura 2. Relación pH y la adsorción de Cd en diversos tipos de suelos. ....	17
Figura 3. Localización del área de estudio. ....	21
Figura 4. Ubicación de transectos para el muestreo de suelo y planta a partir de la fuente emisora de contaminantes, considerando tres zonas de concentración de metales (PEC: Punto de emisión del contaminante, AI: área industrial, AT: área de transición, AC: área control), en función de la dominancia de los vientos). ....	24

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación es un problema que va en aumento día con día en el planeta. La generación de desechos industriales y agrícolas impacta a los recursos naturales suelo, agua, planta y atmósfera. Uno de los problemas de contaminación consiste en la acumulación de metales pesados en el suelo y su posible traslocación a las plantas en concentraciones que pueden ser tóxicas, incluso para el ser humano. En las zonas de abastecimiento del ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ) e Ingenio Santa Rosalía (ISR), en la Región Chontalpa, Tabasco, se encuentran ubicadas instalaciones de la industria petrolera y, de los propios ingenios, así como vertederos públicos los cuales pueden ser fuente de emisión de metales al ambiente. La caña de azúcar (*Saccharum spp.*) es importante en la Región Chontalpa del estado de Tabasco, por el número de productores dedicados al cultivo y por ser parte de los productos que conforman la canasta básica, sin embargo se desconoce si los metales pesados en el suelo son absorbidos por la planta y pasan a formar parte de las cadenas tróficas.

En el estado de Tabasco y en la Región Chontalpa, son pocas las investigaciones realizadas sobre la concentración de metales pesados en suelos y plantas. Zavala *et al.* (1995) cuantificaron Pb, Cd, Cr, V y Zn en Vertisoles y Fluvisoles del Plan Chontalpa; los metales Pb y Cd mostraron altas concentraciones en las presas de descarga de los pozos petroleros y en algunos casos en los suelos ubicados a 100 m de distancia, aguas bajo del sitio de descarga. Trujillo *et al.* (1995) reportan contenidos altos de metales pesados (Ni, Zn, Cu y Cr) en la capa de 0 a 30 cm de profundidad en Gleysoles, Fluvisoles y Vertisoles, en varios campos petroleros de Tabasco.

En la zona de influencia del campo petrolero Samaria, ubicado en la región Chontalpa, se encontraron contenidos totales de Cd, Ni, Pb, V y Zn en el horizonte A de Gleysoles y Fluvisoles, por encima de los niveles críticos lo que indica que la industria petrolera es fuente de emisión de dichos metales (Zavala *et al.* 2003).

Debido a la gran actividad de la industria petrolera que existe en la zona cañera del plan Chontalpa y aunado a la actividad de la agroindustria de procesamiento de caña de azúcar como son los ingenios azucareros, existe desde hace varias décadas una fuente de emisión de contaminantes por quema de gases derivados de hidrocarburos, durante todo el año. Por lo que es importante generar conocimiento sobre los contenidos de metales pesados en suelos con actividad agrícola y petrolera, y conocer si están disponibles para ser absorbidos por la caña de azúcar.

El presente trabajo está dividido en siete capítulos y el primero consiste en la introducción al tema de interés dando visión general de la problemática a estudiar. En el capítulo dos se plantean los objetivos e hipótesis de la investigación. En el capítulo tres se definen los conceptos de contaminación y metales pesados, y se hace una revisión de literatura sobre las fuentes de metales pesados, contenidos en suelos y plantas, interacción con las propiedades del suelo y generalidades sobre el cultivo de la caña de azúcar. En el capítulo cuatro, se describen los materiales y métodos para la realización del trabajo de investigación, tanto en campo como en laboratorio. En el capítulo cinco, se presentan los resultados y su discusión, separándolos en metales totales y extractables en suelos, y metales totales en el follaje de caña de azúcar. En el capítulo seis se establecen las conclusiones de la investigación, dando respuesta a los objetivos e hipótesis planteados. Y en el capítulo siete se escribe la bibliografía citada en la tesis.

## **2. OBJETIVOS E HIPOTESIS**

### **2.1. Objetivo general**

Determinar el contenido de metales pesados en suelos de la zona de la Chontalpa, Tabasco cercanos a la actividad petrolera y agroindustrial.

### **2.2. Objetivos particulares**

- Cuantificar el contenido total y extractable de metales (Pb, Ni, V, Cd, Fe, Zn, Cu y Mn) en suelos cañeros de la Chontalpa, Tabasco.
- Cuantificar el contenido total de metales (Pb, Ni, V, Cd, Fe, Zn, Cu y Mn) en caña de azúcar (*Saccharum spp.*) cultivada en los suelos de la Chontalpa, Tabasco.

### **2.3. Hipótesis**

- ❖ Existen altas concentraciones de metales pesados en los suelos cañeros de la Chontalpa cercanos a la industria petrolera y los ingenios azucareros.
- ❖ Los metales pesados presentes en suelos cañeros de la Chontalpa Tabasco no son absorbidos por la planta de caña de azúcar.

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1. Contaminación**

La contaminación es el aporte de un elemento o de un compuesto químico desde el exterior del lugar, que provoca un aumento respecto a la concentración inicial, esto produce efectos desfavorables, tanto por su acción desactivadora, como si provoca un aumento excesivo de la actividad; provoca una perturbación al suelo; lo cual, se traduce en una pérdida de calidad y aptitud para el uso o lo hace inutilizable (Porta *et al.*, 1999).

La contaminación es la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio (LGEEPA, 2006), que al incorporarse o actuar en el suelo o cualquier elemento natural altera o modifica su composición o condición natural.

#### **3.2. Metales pesados**

El término de metal pesado es usado comúnmente en materia de contaminación ambiental, una de las definiciones más comunes se aplica a metales con una densidad (gravedad específica) mayor a  $5 \text{ g cm}^3$ . Sin embargo, dentro de esta clasificación también se incluyen elementos (no metales) con propiedades químicas muy diferentes, además, la gravedad específica no es significativa en cuanto a la reactividad, toxicidad o eco toxicidad de un metal (Volke *et al.*, 2005).

Metales pesados son aquellos elementos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios. Los más importantes son: Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercurio (Hg), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Estaño (Sn) y Zinc (Zn) (Fergusson, 1990).

Los metales se hallan presentes formando parte de los seres vivos y de la corteza terrestre, existe un balance muy delicado entre los organismos y el ambiente, este

balance esta influenciado no solamente por la abundancia y disponibilidad de los metales en la corteza terrestre, sino también por las transformaciones que sufren estos elementos a consecuencia de las actividades humanas (Páez-Osuna, 2005). Los metales pesados se pueden acumular en exceso en el suelo, ocasionado una contaminación que puede durar muchos años (Fuentes, 2001).

Metales tóxicos son aquellos cuya concentración en el ambiente puede causar daños a la salud de las personas. Los términos metales pesados y metales tóxicos se usan como sinónimos pero sólo algunos de ellos pertenecen a ambos grupos. Algunos metales son considerados elementos esenciales para la nutrición de las plantas, ya que forman parte de sistemas enzimáticos, como el Cu, Zn, Mo, Fe y Zn. Su ausencia contribuye a la aparición enfermedades y su exceso a intoxicaciones (Harte *et al.*, 1991).

Los cationes de varios metales (Ca, Fe, Cu, Na, K, Mg, Zn, Mn y Cr) son importantes como elementos traza en reacciones bioquímicas y en el metabolismo humano. Otros elementos, como Al, Si, As y Ni también se encuentran en el cuerpo, pero su función no se ha determinado. Ciertos metales funcionan como "venenos" metabólicos, ya que pueden reaccionar e inhibir una serie de sistemas enzimáticos; algunos iones de estos elementos ( $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  y  $\text{Ag}^+$ ) forman complejos tóxicos inespecíficos en la célula, lo que produce efectos tóxicos para cualquier función biológica (Volke *et al.*, 2005).

### **3.3. Fuentes de metales pesados**

La distribución de los elementos traza en el ambiente está condicionada por el origen geoquímico y por aportes antrópicos o derivados de actividades contaminantes; los contaminantes inorgánicos como el Pb, Cr, Zn, Cu, As, Ni, Cd y Hg son producto de la actividad industrial (petroquímicas, refinerías, minas, etc.) y la actividad agrícola es fuente de elementos como Cd (fertilizantes), Cu, Zn y Mn (estiércoles y purines) (Porta *et al.*, 1999). Los elementos trazas son liberados en la atmósfera durante la combustión de combustibles fósiles y madera, también de altas temperaturas de procesos industriales e incineración; la emisión natural resulta de una variedad de procesos

accionados en la corteza mineral, incluyendo erosión por vulcanismo y vientos superficiales así como de incendios forestales y océanos (Petaloti *et al.*, 2006).

Entre las sustancias que se incorporan al suelo vía el agua residual, se encuentran los metales pesados, los cuales pueden participar en una serie de procesos, tales como incorporación al ciclo del agua principalmente en la fase relacionada con el suelo y agua subterránea; también ocasionan una acumulación en tejido vegetal, debido a su asimilación por las plantas, o en el suelo, resultado de transformaciones químicas vía procesos de adsorción, solubilización, precipitación y cambios en su estado de oxidación. La presencia inducida de metales pesados en los suelos, también se genera debido a las actividades propias de la producción agrícola, la cual hace uso de insumos que en su estructura contienen diferentes tipos de metales pesados (Vázquez, 1999).

En la actualidad, las fuentes más importantes de Pb ambiental son las partículas emitidas por la combustión de la gasolina con plomo, partículas residuales de aerosol de plomo, el polvo cerca de las carreteras por desgaste de neumáticos y el humo de tabaco. El Cd se emite al medio ambiente por la quema de carbón, la incineración de plásticos y otros materiales que lo contienen como pigmento o como estabilizante (Baird, 2002).

La actividad industrial es fuente importante de contaminación por metales pesados en México. Los más comunes, derivados de estos procesos son Pb, Cd, Zn, As, Se y Hg. No se descarta el aporte de metales por actividades agropecuarias, principalmente las realizadas en las partes más altas de las cuencas, que involucran la producción de cultivos que requieren altos insumos de fertilizantes y plaguicidas (Siebe *et al.*, 2005; Volke *et al.*, 2005).

En la industria petrolera, la quema de combustibles fósiles es la principal fuente de metales hacia la atmósfera y fuente potencial de contaminación de cuerpos superficiales de agua (Volke *et al.*, 2005). En las cenizas provenientes de combustión,

el metal que se vierte en mayor cantidad es el Mn, seguido del Cr, Zn y Ni (Doménech, 2000). El suelo es un medio receptor de una gran cantidad de residuos metálicos en el ambiente y el 75% de la cantidad de metales que recibe corresponde a las cenizas procedentes de la combustión de carburantes, principalmente carbón y derivados de hidrocarburos (Doménech, 2000). En el Cuadro 1 se muestran las fuentes de metales pesados de acuerdo con varios autores.

Cuadro 1. Fuentes de metales pesados.

Metal	Fuentes	Autores
V	Combustión de hidrocarburos, cenizas de combustión, aguas residuales, fertilizantes.	Zavala <i>et al.</i> , 2003; Mugica <i>et al.</i> , 2003
Cd	Combustión de hidrocarburos y carbón, aguas residuales, fertilizantes, petroquímicas.	Zavala <i>et al.</i> , 2003; Porta <i>et al.</i> , 1999; Baird, 2002
Cu	Aguas residuales, zona industrial.	Mugica <i>et al.</i> , 2003; Zavala <i>et al.</i> , 2003; Porta <i>et al.</i> , 1999
Cr	Cenizas de combustión, aguas residuales combustión de hidrocarburos, petroquímicas.	Mugica <i>et al.</i> , 2003; Zavala <i>et al.</i> , 2003; Doménech, 2000
Ni	Cenizas de combustión, aguas residuales combustión de hidrocarburos.	Mugica <i>et al.</i> , 2003; Porta <i>et al.</i> , 1999; Doménech, 2000
Pb	Combustión de gasolina, aguas residuales, petroquímicas.	Mugica <i>et al.</i> 2003; Porta <i>et al.</i> , 1999; Baird, 2002
Zn	Cenizas de combustión, aguas residuales, petroquímicas, fertilizantes.	Mugica <i>et al.</i> , 2003; Zavala <i>et al.</i> , 2003; Porta <i>et al.</i> , 1999; Doménech, 2000

Las cenizas provenientes de plantas petroquímicas aportan al ambiente concentraciones de Cd, Ni, Cu, Pb, Zn y V que son superiores en comparación a las concentraciones de cenizas provenientes de plantas carboeléctricas, de carbón y cenizas volátiles; siendo el V y el Pb los metales más abundantes en estas cenizas. Mugica *et al.* (2003) encontraron en estos tipos de cenizas concentraciones de 5, 125, 166 y 180 mg kg<sup>-1</sup> para Cd, Pb, Zn y V, respectivamente.

Para suelos y aguas la fuente general de metales es el material parental de los suelos y las reacciones de equilibrio que ocurren en los materiales de formación de las aguas. Además de estas fuentes naturales, diversas actividades antropogénicas introducen metales al ambiente (Siebe *et al.*, 2005).

La deposición natural de metales a la atmósfera por actividad volcánica es relativamente alta, especialmente para Hg, Pb y Ni (Cuadro 2). Altas cantidades de metales transportados en la atmósfera son de origen antropogénico por combustión, incineración y explotación de minas (Ross, 1994).

Cuadro 2. Valores de metales encontrados por emisión de cenizas provenientes de actividad volcánica.

Elemento	Emisión de volcanes (mg m <sup>-3</sup> )
Cr	45-67
Mn	55-1300
Co	4.5-27
Ni	330
Cu	200-300
Zn	1000
Cd	8-92
Hg	18-250
Pb	27-1200

Fuente: Ross (1994).

### 3.4. Contenidos de metales en suelos y plantas

#### 3.4.1. Suelos

La norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2001) establece los valores de normalidad y límite crítico en la concentración de algunos elementos tóxicos para suelo (Cuadro 3).

Zavala *et al.* (2003) reportan datos de concentraciones críticas de metales pesados totales en suelos a partir de varios autores, información que se utiliza como referencia para investigación sobre contaminación edáfica (Cuadro 4). Y en el Cuadro 5 se muestran las concentraciones consideradas como tóxicas en el suelo, presentado por Ross (1994).

Algunos metales como Cd, Cu, Pb y Zn son volatilizados durante al combustión, y bajo enfriamiento estos metales se condensan sobre el suelo en partículas de cenizas; el Cu, Fe y Mn son metales no volátiles en la combustión pero están unidos a la matriz de partículas de cenizas (Ross, 1994).

Cuadro 3. Concentración de metales pesados en suelos.

Clase	Cd	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )	Ni
Normal	0.35	35	50
Peligroso	3 – 5	100 - 300	100

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMERNAT, 2001).

Cuadro 4. Concentración de metales pesados totales en suelos.

Metal	Concentración critica mg kg <sup>-1</sup>	Fuente
Cd	> 5	Alloway, 1990
Cr	> 100	Alloway, 1990
Cu	60 – 125	Alloway, 1990
Ni	100 – 200	Kabata-Pendias y Pendias, 1984
Pb	100 – 400	Freedman, 1889
V	50 – 100	Alloway, 1990
Zn	70-400	Alloway, 1990

Fuente: Zavala *et al.* (2003).

Cuadro 5. Concentraciones consideradas como tóxicas de algunos metales trazas en el suelo.

Elemento	Concentración total considerada toxica (µg g <sup>-1</sup> )
Cr	75-100
Mn	1500-3000
Co	25-50
Ni	100
Cu	60-125
Zn	70-400
Cd	3-8
Hg	0.3-5
Pb	100-400

Fuente: Ross (1994).

Garcia *et al.* (2006) reportan contenidos altos de metales pesados en suelos, enriquecidos por fuentes antropogénicas, en áreas afectadas por derrames de hidrocarburos. Además, Siebe *et.al.* (2005) estudiaron suelos aluviales en la cuenca baja del río Tonalá, en transectos a partir de zonas con actividad petrolera hasta zonas sin esta actividad con un radio de 2 Km, y encontraron contenidos de Ni, V, Cu, Zn y Cr que rebasaron ligeramente los niveles considerados como normales (Cuadro 6), pero no encontraron diferencias significativas en el contenido de metales pesados totales entre los tratamientos (sitios de control y los sitios ubicados en campos petroleros).

Estudios en diferentes países han generado una serie de datos de concentraciones y límites de metales pesados en diferentes partes del mundo que pueden ser usadas como base de referencia en los contenidos de estos en suelos (Cuadro 7).

Cuadro 6. Metales pesados totales en suelos de la llanura aluvial en Tabasco.

Metal	Concentración mg Kg <sup>-1</sup>
Cr	54.3
Ni	67.6
Cu	24.7
Zn	44.5
Pb	18.4
V	82.7
Cd	0.90

Fuente: Siebe *et al.* (2005)

Cuadro 7. Concentración de metales en biosolidos y límites de metales para suelos aplicados en E.U. y otros países.

Elemento	Rango histórico reportado mg kg <sup>-1</sup>	E.U. (*EPA) mg kg <sup>-1</sup>	Unión Europea mg kg <sup>-1</sup>	Ontario Canada mg kg <sup>-1</sup>	Alemania mg kg <sup>-1</sup>
Zn	101-49000	2800	2500-4000	4200	2500
Cd	1-3410	39	20-40	34	10
Cu	84-17000	1500	1000-1750	1700	800
Ni	2-8330	420	300-400	420	200
Pb	13-26000	300	750-1200	1100	900
As	ND	41	ND	170	ND
Hg	0.6-110	17	16-25	11	8
Cr	10-99000	ND	ND	2800	900

Fuente: He *et al.* (2005). ND=No Detectados. \*Agencia de Protección al Ambiente por sus siglas en ingles.

### 3.4.2. Plantas

Ross (1994) menciona que las plantas de las familias *Gramineae*, *Illiaceae*, *Cucurbitaceae* y *Umbelliferaceae* manifiestan una tendencia moderada a la acumulación de metales como es el caso del Cd, así mismo otras familias de plantas manifiestan baja acumulación (*Leguminoseae*) y/o alta acumulación (*Chenopodiaceae*, *Cruciferae*, *Solanaceae* y *Compositae*) de este elemento.

Es importante señalar que con el cultivo de caña de azúcar existen pocos trabajos en los cuales se ha evaluado la asimilación de metales pesados, los trabajos existentes son principalmente realizados en Brasil. Estos trabajos realizados sobre metales pesados se han enfocado a estudiar los efectos de lodos residuales de aguas municipales como fuentes de abono, y la caña de azúcar como planta util para la fitoremediación de suelos impactados por derrames de hidrocarburos.

En suelos Gleysols y Fluvisols, en la zona del campo petrolero Samaria, Tabasco, pequeñas cantidades de los metales Ni, Pb, y Cd, están pasando del suelo al grano de

maíz. El Cd en el maíz se relaciona con el Cd intercambiable del suelo; esto indica que este elemento es fácilmente disponible por las plantas (Zavala *et al.*, 2003).

En una área con caña de azúcar irrigada con desechos del drenaje municipal y desechos de aguas residuales en Brasil, las concentraciones de metales en la raíz fueron: Cd,  $0.22 \pm 0.12$ ; Cr,  $74.3 \pm 84.7$ ; Cu,  $140.6 \pm 27.7$ ; Hg,  $0.04 \pm 0.02$ ; Mn,  $561.6 \pm 283.3$ ; Pb,  $7.9 \pm 2.1$  y Zn,  $177.4 \pm 64.9$  ( $\text{mg kg}^{-1}$ ). El contenido de metales en el tallo fue superior de 80 a 90% respecto a los encontrados en la raíz, mientras que las concentraciones detectadas en las hojas fueron significativamente más bajas en comparación con las de raíz (Segura *et al.*, 2005). Sereno *et al.* (2007) mencionan que las plantas de caña de azúcar son capaces de traslocar cantidades de Cu en solución sin afectar el peso seco de la planta.

Ng Kee-Kwong *et al.* (2005) reportan que concentraciones de metales pesados (Cd, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn) en caña de azúcar tratadas con lodos residuales a razón de  $60 \text{ t ha}^{-1}$  fueron similares al testigo, y sugieren que los campos de caña de azúcar pueden ser una opción para la disposición de lodos de aguas residuales.

Los contenidos de V, tanto en grano de maíz como en hojas de pasto egipto cultivados en suelos de un campo petrolero, superaron el nivel crítico de 10 ppm, pero no mostraron síntomas de daños (Lagunes *et al.*, 1995). Ambos cultivos presentaron contenidos normales de Al, Cu, Zn y no se detectaron contenidos de Cr, Ni y Pb.

Las altas concentraciones de elementos traza o metales pesados en los organismos vegetales producen efectos negativos de tipo tóxico, que alteran algunas funciones fisiológicas de las plantas dependiendo del elemento que se encuentre en exceso en el organismo vegetal (Cervantes y Moreno, 1999).

Datos de concentración de metales pesados en plantas se muestra en el Cuadro 8, las concentraciones metales pesados consideradas como tóxicas en plantas y niveles críticos de toxicidad de microelementos en plantas, se presentan en los Cuadros 9 y

10 respectivamente.

Cuadro 8. Concentración de metales pesados en plantas.

Metal	Intervalo de concentración (mg kg <sup>-1</sup> )	
	Mínimo	Máximo
Al	1.0	14500.0
Cd	0.01	0.66
Cu	1.0	29.0
Cr	0.01	3.4
Pb	0.1	7.8
Zn	6.0	67.0

Fuente: Cervantes y Moreno (1999).

Cuadro 9. Concentraciones consideradas como tóxicas de algunos metales trazas en plantas.

Elemento	Concentración (µg g <sup>-1</sup> )
Cr	5-3
Mn	300-500
Co	15-50
Ni	10-100
Cu	20-100
Zn	100-400
Cd	5-30
Hg	1-3
Pb	10-300

Fuente: Ross (1994).

Cuadro 10. Niveles críticos de toxicidad de microelementos en plantas.

Elemento	Niveles críticos de toxicidad (µg g <sup>-1</sup> )
Mn	200
Bo	75
Ni	5
Cu	20
Zn	200

Fuente: Hopkins y Hüner (2004).

En principio, los metales pesados pueden tener efectos mutagenicos en el genoma, pero esto no es evidencia convincente que muestre el efecto importante que juega en la toxicidad de los metales en las plantas, el Ni inhibe funciones de las raices y la fotosíntesis, concentraciones elevadas de este elemento afecta el metabolismo de las plantas y depende del tipo de planta afectada y las condiciones ambientales (Küpper y Kroneck, 2007).

Algunos efectos fisiológicos provocados por metales pesados en las plantas de acuerdo con Cervantes y Moreno (1999), son:

Cd: Reducción del crecimiento, inhibición de la fotosíntesis y la transpiración, inhibición de las enzimas del ciclo del Calvin, inhibición de la síntesis de clorofila, alteración en la concentración de Mn, Ca y K.

Cu: Reducción del crecimiento, alteración de la permeabilidad membranal, desbalance iónico, inhibición de la fotosíntesis y la respiración, interferencia de la síntesis de pigmentos y lipidos.

Pb: Inhibición del crecimiento, alteración de la concentración de Ca y K, inhibición de la mitosis, inhibición de los procesos de fotosíntesis, respiración y adsorción de agua.

Zn: Inhibición del transporte de electrones fotosintéticos, alteraciones en la concentración de Cu, Fe, Ca y Mg, modificación de la permeabilidad de membranas.

### **3.5. Interacción de metales pesados y propiedades del suelo**

En los suelos muchos de los metales son insolubles, una fracción esta irreversiblemente en las partículas del suelo. La fracción soluble y una parte del ion metal en solución tiene varias ligaduras semejantes a  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ . Generalmente

sólo una pequeña porción soluble de  $\text{Cu}^{2+}$  esta actualmente presente como una especie de ion libre de  $\text{Cu}^{2+}$  en la solución del suelo (Sauve *et al.*, 1996).

En suelos con textura arcillosa los metales pesados como Cu, Pb, Zn y V se acumulan con mucha mayor facilidad en los primeros horizontes; no así en las texturas arenosas en donde los metales pesados no son fuertemente retenidos (Atanassova y Okazaki, 1996; Zavala *et al.*, 2003).

El contenido de arcilla influye en la adsorción de iones metálicos. Por ejemplo, la caolinita y la calcita adsorben entre 30 y 40 % de los metales Cu, Zn y Pb a pH 3.5, la arena sólo adsorbe un 20 % de Zn y Pb a pH 4 (Ramachandran y D'Souza, 1998). Este comportamiento en la adsorción de los metales también se debe a que la caolinita y la calcita tienen mayor cantidad de arcillas (2:1 y 1:1 respectivamente), en cambio las arenas poseen poco material arcilloso y menores sitios de intercambio de cargas. Los metales pesados Cu, Co, Ni, Mn, V y Cr pueden ser atraídos a sitios de intercambio de arcillas solamente por fuerzas electrostáticas, la fuerza de atracción metal depende del cambio y grado de hidratación del catión metal (Ross, 1994).

Petrovich *et al.* (1998) estudiaron la adsorción de iones metálicos (Zn, Pb y Cu) en función del pH en tres clases de material mineral: arena, calcita y caolinita (Figura 1). En donde la menor adsorción de los tres iones se presenta a un pH menor a 3.3 y el porcentaje de adsorción de Pb y Zn tiende a estabilizarse a pH 4 en los tres materiales; el Cu presentó mayor porcentaje de adsorción en los tres materiales. En caolinita, el 80 % del Cu es adsorbido a pH 4.5; en calcita la mayor adsorción ocurre a pH de 3.6 y en pH mayor o inferior la adsorción disminuye. En arena, el porcentaje de adsorción tiene un comportamiento lineal en el intervalo de pH entre 2.5 y 5.5.

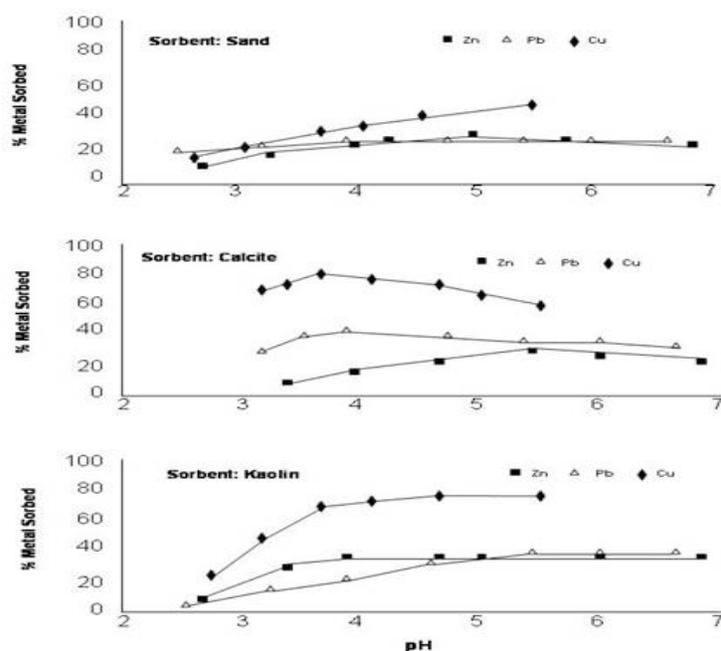


Figura 1. Adsorción metales en función del pH en tres diferentes materiales. (Petrovich *et al.*, 1998)

En los suelos ácidos, la concentración de Cd puede ser importante, ya que este ion se adsorbe débilmente en las arcillas y otras partículas materiales. Sin embargo, por encima de un pH de 7 el Cd precipita como sulfuro, carbonato o fosfato (Baird, 2002). El pH del suelo es una variable que influye en la adsorción, retención y movimiento de los metales pesados (de Matos *et al.*, 2000).

La capacidad de adsorción del Cd está relacionado con el valor de pH y las características de los suelos (Figura 2). En Ultisoles, Alfisoles y Entisoles la menor adsorción del Cd en niveles de pH menor a 7.3 es inferior a los 200  $\mu\text{g}$  de Cd  $\text{g}^{-1}$  de suelo, pero en los Vertisoles, cuando el pH es mayor a 7.3, la adsorción del metal varía entre 200 y 500  $\mu\text{g}$  de Cd  $\text{g}^{-1}$  de suelo (Ramachandran y D'Souza, 1998).

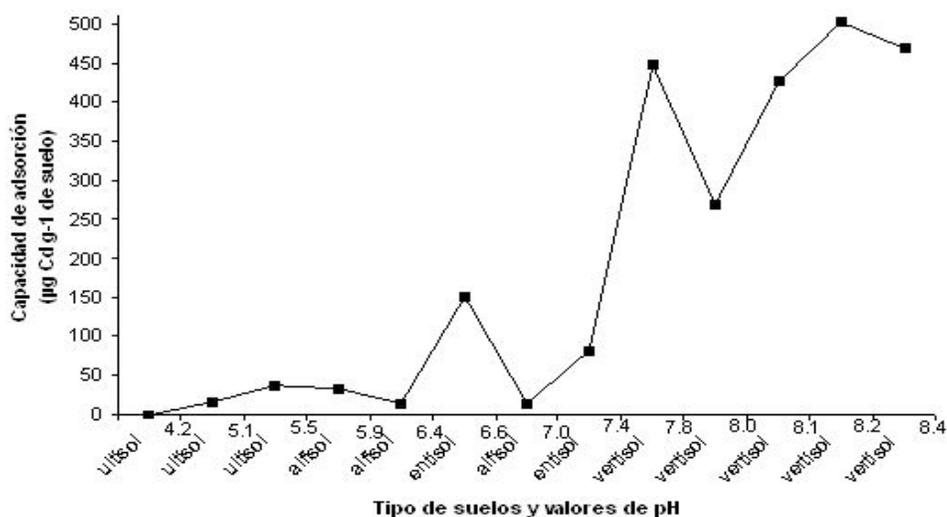


Figura 2. Relación pH y la adsorción de Cd en diversos tipos de suelos. (Adaptado de Ramachandran y D'Souza, 1998).

La materia orgánica presente en los suelos y en aguas naturales es químicamente reactiva hacia los minerales sólidos y los metales disueltos; en sitios donde esta materia llega acumularse existe una continua transformación geoquímica (Cervantes y Moreno, 1999).

Sauve *et al.* (1996) encontraron que la materia orgánica tiene una relación directamente proporcional al contenido de cobre (Cu) total en suelo (por digestión  $\text{HNO}_3$ ) al hacer pruebas en muestras de 68 sitios.

La materia orgánica mejora la condición estructural tanto de los suelos arenosos como arcillosos y posee propiedades de intercambio de cationes similares al de las arcillas (Ortiz y Ortiz, 1993). La presencia de ácidos húmicos, disueltos o acumulados en la superficie mineral, influye considerablemente la fijación de metales pesados. Varios efectos dependen del tipo de mineral, concentración húmica e ion metal específico (Petrovich *et al.*, 1998).

### 3.6. El Cultivo de caña de azúcar

#### 3.6.1. Generalidades

El principal producto de la caña de azúcar es el azúcar. La caña de azúcar pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae) y al género *Saccharum*. Las variedades cultivadas comercialmente se les llaman cañas nobles (Salgado *et al.*, 2003). Flores (2001) menciona que el género *Saccharum* se clasifica en 6 especies: *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. barberi*, *S. sinence*, *S. robustum*, *S. edule*.

Los requerimientos climatológicos que influyen en el buen desarrollo de la caña de azúcar, así como aquellos que la afectan negativamente se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Requerimientos climatológicos de la caña de azúcar

Temperatura ambiental	>21 °C	Crecimiento efectivo en la caña de azúcar.
	>36 °C	Las plantas pueden mostrar signos de marchites.
	32-38 °C	Buena germinación
	<20 °C	Retraso en el crecimiento
Temperatura del suelo	27 °C	Juega un papel importante en el desarrollo radical, en la absorción de los nutrimentos y en la actividad biológica. Valores inferiores a 21 °C, comienzan a ser un factor limitativo.
Precipitación	1500-2500 mm	

Fuente: Salgado *et al.* (2003).

La caña de azúcar es un cultivo que se adapta a una gran diversidad de suelos. En Tabasco se cultiva en Fluvisoles, Vertisoles, Gleysoles, Leptosoles y Luvisoles (Palma *et al.*, 2007; Salgado *et al.*, 2008).

El 65 % de la superficie mundial cultivada con caña de azúcar se encuentra en seis países, entre los cuales Brasil ocupa el primer lugar y México figura en la 6ª posición (ASERCA, 2006). La producción de caña de azúcar en México genera 440 mil empleos directos y 2.5 millones indirectos. Nuestro país ocupa el 7º lugar mundial en el consumo de azúcar (Unión Nacional de Cañeros, 2006).

Los estados con mayor superficie cultivada en nuestro país son Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí (ASERCA, 2006). Tabasco ocupa la 9ª posición a nivel nacional por el volumen de producción de azúcar de caña, y posee tres ingenios azucareros de los cuales dos se ubican en el municipio de Cárdenas (Presidente Benito Juárez y Santa Rosalía) y uno en el municipio de Tenosique (AZSUREMEX). En el municipio de Cárdenas, para el periodo 2003/2004 se tenía sembrada una superficie de 17,111 ha de caña de azúcar, que corresponde al 60.9 % de la superficie total sembrada en el estado de Tabasco, con una producción de 1, 208,827 t y un rendimiento promedio de 72.2 ton ha<sup>-1</sup> (INEGI, 2005).

El cultivo de caña de azúcar en el estado de Tabasco es esencialmente de temporal; en los últimos años se ha introducido el riego rodado y por goteo, con la finalidad de abastecer de agua al cultivo en las etapas críticas (Salgado *et al.*, 2003).

### **3.6.2. Elementos esenciales**

Algunos nutrimentos son requeridos por la caña de azúcar en cantidades mayores a 500 mg kg<sup>-1</sup> que se clasifican como macronutrimentos (N, P, K, Ca, Mg, y S) y los utilizados en cantidades menores a 50 mg kg<sup>-1</sup> como Cl, Bo, Zn, Fe, Mn, Cu, Mo y Ni son considerados micronutrimentos (Buckman y Brady, 1991; Marshner, 1995), que tienen funciones esenciales para la planta, la deficiencia o abundancia de uno o más nutrimentos en el suelo se manifiesta en síntomas visuales en las hojas (Salgado *et al.*, 2009).

De todos los micronutrientes, el Fe es requerido por las plantas en mayores cantidades ya que es activador de procesos bioquímicos en la respiración, la fijación simbiótica del nitrógeno y la síntesis de clorofila en la fotosíntesis; El Zn es un activador de varios sistemas enzimáticos importantes y la deficiencia en plantas provoca entrenudos cortos y hojas pequeñas; el Cu forma quelatos con ácidos húmicos de la fracción orgánica del suelo y rara vez se observa que el suministro de este elemento sea contemplado como

tóxico; el Mn funciona como activador de enzimas en los procesos de crecimiento y altas concentraciones pueden inducir la deficiencia de hierro; El Ni es un elemento metálico abundante que es absorbido por las raíces, además lo requiere la planta como cofactor para las enzimas ureasa y deshidrogenasa (Hopkins y Hüner, 2004; Salgado *et al.*, 2009).

Estos elementos son absorbidos por las plantas de caña de azúcar de la solución del suelo por tres mecanismos: intercepción, flujo de masas y difusión (Rosolem, 1994).

Greulach y Adams (1980), mencionan que los iones de ciertos elementos son tóxicos para las plantas, cuando menos en cantidades excesivas (Cu, Bo, Pb, Mg, Mo, Ni y Zn); aunque algunos de estos elementos son esenciales para la nutrición de las plantas, las concentraciones ligeramente más altas que las requeridas pueden ser tóxicas.

Los micronutrientes esenciales juegan un papel importante en la bioquímica y fisiología de las plantas y su ausencia es caracterizada por uno o más síntomas de deficiencia; los elementos esenciales, especialmente los micronutrientes, pueden ser tóxicos para las plantas cuando están presentes en cantidades excesivas (Hopkins y Hüner, 2004).

## 4. MATERIALES Y METODOS

### 4.1. Área de estudio

El área de estudio se ubica en la zona de abastecimiento de caña de azúcar del Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ), cuyas coordenadas geográficas son 17° 56' y 18° 24' LN, y 93° 17' y 94° 08' LO (Figura 3), su altitud sobre el nivel del mar es de 11 m, y comprende parte de los municipios de Cárdenas y Huimanguillo, Tabasco. El clima es de tipo cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am), la temperatura media anual es de 26 °C y una precipitación media anual de 2163 mm. Esta situada sobre la provincia fisiográfica LLanura Costera del Golfo Sur (INEGI, 2005, Salgado *et al.*, 2009).

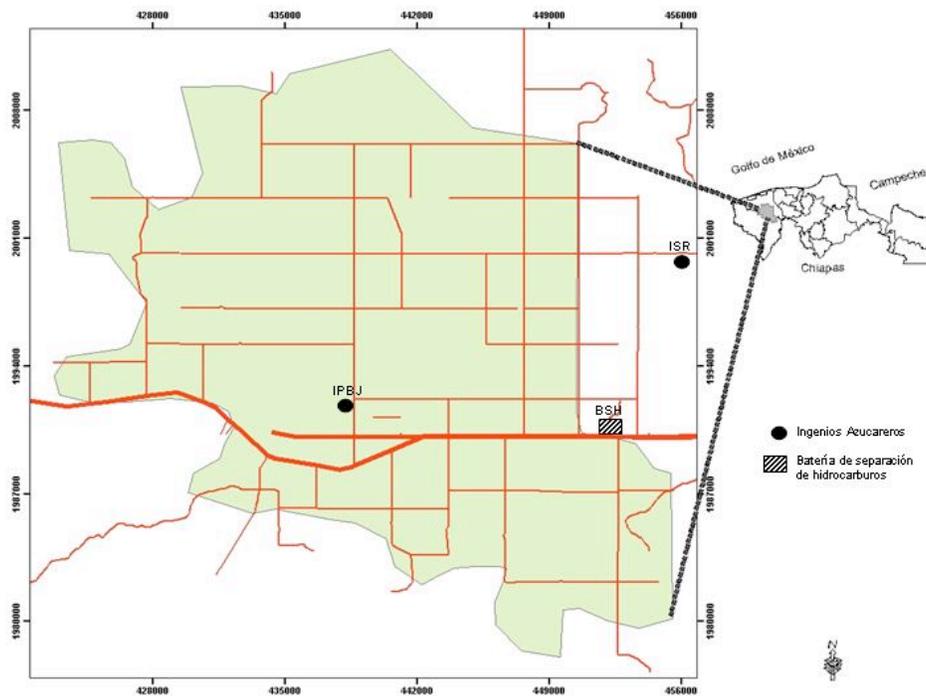


Figura 3. Localización del área de estudio.

(IPBJ= Ingenio Presidente Benito Juárez, BC= Batería Cárdenas de separación de hidrocarburos).

Los suelos dominantes pertenecen a los grupos Vertisoles (VR), Cambisoles (CM), Gleysoles (GL), y Fluvisoles (FL) (Palma-López *et al.*, 2007; Palma-López y Triano, 2002; Salgado *et al.*, 2004), el origen aluvial de la zona define la mayor parte de las

características de los suelos y su fisiografía plana (Salgado, 2009).

Los Gleysoles presentan propiedades gléyicas (saturación con agua durante ciertos períodos del año que manifiestan procesos evidentes de reducción, los que se observan en el perfil por la presencia de colores azulosos o verdosos, ya sea como color dominante o como moteado asociado con colores rojizos, amarillentos u ocre) a menos de 50 cm de profundidad. Poseen buenos a altos contenidos de nutrimentos y materia orgánica, textura franca en la superficie y arcillo limosa en el horizonte C, pH ácido, son suelos profundos y con manto freático cercano a la superficie la mayor parte del año (Salgado *et al.*, 2003).

Los Fluvisoles son suelos que tienen material flúvico que inicia desde la superficie del suelo hasta los 25 cm de profundidad, que reciben material fresco a intervalos regulares, o lo han recibido en el pasado reciente, provenientes de depósitos aluviales. En el área se encuentran dos subunidades, los Fluvisoles éutricos que tienen una saturación de bases mayor del 50 % entre los 20 y 50 cm de profundidad y los Fluvisoles dístricos que tienen una saturación de bases menor del 50 % entre los 20 y 50 cm de profundidad (Fitzpatrick, 1996).

Los Vertisoles se caracterizan por tener un horizonte vértico, el cual es subsuperficial y arcilloso (motmorilonita); poseen grietas que se forman la mayor parte de los años debajo de la superficie. La gran cantidad de arcillas expandibles que contienen, los convierte en suelos pesados, ya que en la época de lluvias se anegan fácilmente volviéndose resbalosos e impermeables; en la época de secas son duros y con grietas profundas, por lo cual se dificulta la labranza y se rompen las raíces de las plantas (Palma y Triano, 2002; Salgado *et al.*, 2004).

## 4.2. Muestreo de suelos y planta

El muestreo de suelos se efectuó en Vertisoles y Fluvisoles por ser los más representativos dentro de la zona cañera, donde se ubican campos petroleros y actividad agroindustrial (Palma y Cisneros, 2000; Palma y Triano, 2002; Salgado *et al.*, 2004).

Se seleccionaron dos posibles fuentes de metales pesados como punto de referencia: 1) el Ingenio Presidente Benito Juárez (IPBJ) donde se procesa la caña de azúcar, ubicado en el centro de la zona de abastecimiento y 2) la batería Cárdenas (BC) donde se separan los hidrocarburos, ubicada al este de la zona de estudio. A partir de cada fuente, para cada suelo se seleccionó un transecto y tres distancias de muestreo:

1. Área Industrial (AI) a 0.6 km de la fuente.
2. Área de transición (AT) a 3 km de la fuente.
3. Área control (AC) o testigo a 6 km de la fuente.

El área control es la más alejada de la actividad industrial y sirvió como testigo para comparar las concentraciones de metales respecto a las áreas AI y AT. La localización de los transectos consideró la dirección de los vientos de noreste a suroeste dominantes en la región (West *et al.*, 1987; López, 2003; García, 2003), como se muestra en la Figura 4.

En cuanto al muestreo de suelo, en cada distancia se tomaron muestras compuestas de 15 submuestras, con 3 repeticiones. El material se colectó con una barrena de acero inoxidable en zig-zag a una profundidad de 0-20 cm, donde se encuentra el 80% de las raíces del cultivo. Las submuestras se mezclaron y homogenizaron, y por cuarteo se redujo la muestra hasta 2 kg de suelo (Salgado *et al.*, 2003) (Anexo 3). Este se colocó en bolsas de plástico para su transportación al laboratorio de suelos. Los sitios de muestreo se localizaron con geoposicionador satelital (GPS) para su ubicación en un mapa (Anexos 1 y 2).

En los mismos sitios de muestreo de suelos, se colectaron muestras vegetales de la misma etapa fenológica (4 meses de desarrollo) de las plantas de caña de azúcar, tomando 3 muestras compuestas de hojas a partir de la colecta de 15 hojas (submuestras); hojas de la 3 a la 5 a partir de la hoja principal (Anexo 3). La colecta de hojas se realizó en zig-zag (Salgado *et al.*, 2003).

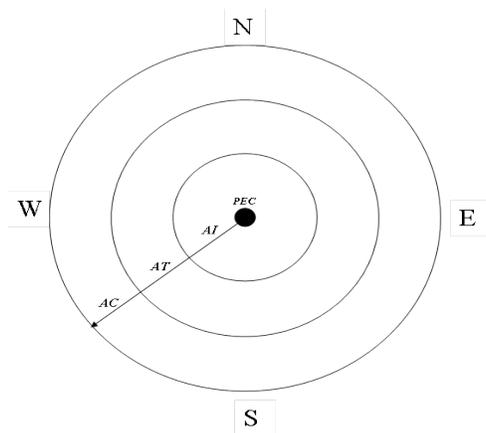


Figura 4. Ubicación de transectos para el muestreo de suelo y planta a partir de la fuente emisora de contaminantes, considerando tres zonas de concentración de metales (PEC: Punto de emisión del contaminante, AI: área industrial, AT: área de transición, AC: área control), en función de la dominancia de los vientos).

### 4.3. Análisis de laboratorio

El manejo y proceso de las muestras para su análisis químico se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Análisis de Suelo, Plantas y Aguas (LASPA) del Campus Tabasco, Colegio de Posgraduados. Para el control de las muestras se preparó una hoja de custodia con la siguiente información: número de muestra, fecha y sitio de muestreo, distancia al punto de emisión, profundidad de muestreo y responsable del muestreo, entre otros.

#### **4.3.1. Determinación de metales pesados**

Las muestras de suelos se secaron a temperatura ambiente y fueron molidas en molino eléctrico y pasadas por tamiz (malla de 2 mm). Los metales pesados que se analizaron son: Pb, Ni, V, Cd, Fe, Zn, Cu y Mn. Se cuantificaron en sus formas totales, mediante el método de digestión con HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> (Allan, 1971) y formas extractables utilizando el método del ácido dietilen-penta-acético (DTPA), con base en el método AS-14 de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2001). La cuantificación de ambas formas se hizo en el Laboratorio de Análisis Contaminación Ambiental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, utilizando la técnica de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS) por sus siglas en inglés (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), que es una variante de las técnicas de análisis por espectrometría de masas.

Las muestras de planta fueron lavadas con HCl al 2% y agua destilada, secadas en estufa a 70-72 °C, molidas con molino eléctrico tipo Wiley y tamizadas con malla de 0.5 mm. La cuantificación se hizo en los laboratorios referidos y se determinaron los contenidos totales de los mismos metales en suelos, mediante el método de digestión con HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub> (Allan, 1971) y se cuantificaron por la técnica ICP-MS.

#### **4.3.2. Evaluación de la Fertilidad de los Suelos**

Los análisis de suelos para estimar su fertilidad se realizaron con base a las metodologías especificadas en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2001), se presentan en el Cuadro 12.

#### **4.4. Diseño Experimental y Análisis Estadístico**

El diseño experimental en campo fue un factorial 2 x 2 x 3 (dos suelos: Vertisol y Fluvisol; dos fuentes: BC y IPBJ; tres distancias: 0.6, 3 y 6 Km).

El análisis estadístico de los datos consistió en análisis de la varianza y la prueba de medias de Tukey ( $p \leq 0.05$ ), y correlaciones tipo Pearson ( $p \leq 0.01$  y  $0.05$ ). Se utilizaron los programas estadísticos SAS (Rebolledo, 1999) y SPSS 15.0 para Windows (Darren

y Mallery, 2000).

Cuadro 12. Análisis de laboratorio para determinación de fertilidad de las muestras de suelo.

Análisis	Metodología de laboratorio
pH	Relación 1:2.5 (suelo: agua)
Textura	Método de Bouyoucos.
Materia orgánica (MO)	Método de Walkley y Black.
Bases intercambiables (K, Ca, Mg, Na)	Extracción con acetato de amonio y cuantificación por espectrofotometría de absorción atómica.
Conductividad eléctrica (CE)	Medición en el extracto de saturación.
Capacidad de Intercambio catiónico (CIC)	Método del acetato de amonio.

Fuente: NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2001)

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.1. Propiedades físicas y químicas de suelos**

Las propiedades físicas y químicas de los suelos tienen gran importancia en el estudio de los suelos, debido a que estas interactúan con los elementos que se encuentran en estado natural. Estas propiedades (MO, pH, CE, CIC y arcillas, entre otras) pueden influir en el comportamiento de los metales pesados en el suelo y su movilidad.

#### **5.1.1. Materia orgánica (MO)**

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza para el contenido de MO, se observaron diferencias estadísticas entre transectos, grupos de suelos y distancias del área de estudio y sus interacciones. El coeficiente de variación fue de 10.3%, lo cual indica que la MO se encuentra en concentraciones similares en los transectos muestreados (Cuadro 13).

El transecto donde existe mayor contenido de MO es en la BC, siendo 0.4% más rico con respecto al IPBJ. Lo cual se atribuye a la mecanización del suelo como resultado de la nueva siembra de caña de azúcar. La poca diferencia porcentual entre ambos transectos se debe posiblemente a que el sistema de cosecha para este cultivo requiere de quema, lo que elimina los restos vegetales que pueden acumularse en el suelo y debido al laboreo mecánico (Salgado *et al.*, 2003; Salgado *et al.*, 2008).

Los Vertisoles presentaron mayor contenido de MO con respecto a los Fluvisoles, esto debido a que los Vertisoles retienen mayor humedad que permite una descomposición más lenta del material orgánico por los microorganismos. Estos resultados son similares a los contenidos de MO reportados por Ribón *et al.* (2003) para Vertisoles cultivados con caña de azúcar en el Ingenio Santa Rosalía, en la Chontalpa, Tabasco.

Entre distancias, el mayor contenido de MO se presentó a los 3 km y el menor en la distancia 0.6 km, esto se debe posiblemente al manejo de residuos en las parcelas de muestreo, ya que en la distancia de 3.0 km no se identificó rastros de quema de paja, no así en la distancia más corta al punto de emisión donde se observó quema de residuos de hojarasca.

En términos agronómicos no hay diferencia en los contenidos de MO entre los suelos y se clasifican como medios (SEMARNAT, 2001). Sin embargo, se requiere aportación de material vegetal y manejo agronómico que favorezca el incremento de MO como fuente de nutrimentos y mejorador de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En este sistema de producción, se quema la caña de azúcar antes de cosechar, esto reduce la cantidad de residuos vegetales aportados y su transformación en MO en el suelo, por lo que se debe evitar en lo posible la quema de caña e incorporar residuos de cosecha para mejorar el contenido de MO en los Vertisoles y Fluvisoles (Salgado *et al.*, 2008).

Cuadro 13. Contenido de la materia orgánica (MO) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (Km)	MO (%)	Prueba de medias			
				Transectos	Suelos	Distancias	
IPBJ	Vertisol	0.6	2.6	2.1 b	2.5 a	2.1 b	
		3.0	2.4			2.5 a	
		6.0	2.5			2.4 ab	
	Fluvisol	0.6	1.6		2.1 b	2.1 b	
		3.0	1.8				
		6.0	2.0				
BC	Vertisol	0.6	2.4	2.5 a			
		3.0	3.0				
		6.0	2.6				
	Fluvisol	0.6	2.1				
		3.0	2.8				
		6.0	2.5				

C.V (%): 10.3  
Media 2.3

Prueba de F para:  
Transecto (W): 0.01\*  
Suelo (S): 0.01\*  
Distancia (D): 0.01\*

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

### 5.1.2. pH

Los valores de pH mostraron diferencias estadísticas altamente significativas en transectos y distancias, y entre grupos de suelos no hubo diferencia significativa. El coeficiente de variación fue de 3.2% (Cuadro 14).

Cuadro 14. Valores de pH en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	pH	Prueba de Medias			
				Transectos	Suelos	Distancia	
IPBJ	Vertisol	0.6	6,3	6.1 a	5.8 a	5.6 b	
		3.0	6,4			5.8 ab	
		6.0	6,3			5.9 a	
	Fluvisol	0.6	5,5		5.7 a		
		3.0	5,9				
		6.0	6,3				
BC	Vertisol	0.6	5,1	5.4 b			
		3.0	5,4				
		6.0	5,5				
	Fluvisol	0.6	5,6				
		3.0	5,5				
		6.0	5,6				
C.V.	3,2	Prueba de F para:		Interacción:			
Media	5,7	Transecto (W)	0.01**	W x S	0.01**	MSD (W)	0,13
		Suelo (S)	0.09 NS	W x D	0.33 NS	MSD (S)	0,13
		Distancia (D)	0.01**	S x D	0.14 NS	MSD (D)	0,19
				W x S x D	0.01**		

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

El valor de pH en el transecto IPBJ es 0.7 veces mayor con respecto al BC, sin embargo, ambas lecturas están en el intervalo de clasificación como suelos moderadamente ácidos (SEMARNAT, 2001). Entre suelos, el valor de pH es similar y entre distancias el sitio cercano a la fuente de contaminación mostró un pH ligeramente más ácido con respecto al sitio más alejado. En general el valor de pH de la zona de estudio es moderadamente ácido lo cual es considerado como óptimo para el desarrollo del cultivo de la caña de azúcar (Salgado *et al.*, 2003).

### 5.1.3. Conductividad eléctrica (CE)

El nivel promedio de conductividad eléctrica en el área de estudio es de 0.03 dS m<sup>-1</sup> considerado como bajo o de efecto despreciable (NOM-021-RECNAT, 2001) (Cuadro 15), con un coeficiente de variación de 25.5%. No existe diferencia estadísticamente significativa entre transectos y distancias. Aunque hay diferencias estadísticas entre suelos, en términos agronómicos no existe ningún grado de salinidad lo que es favorable para el establecimiento del cultivo de caña de azúcar (SEMARNAT, 2001; Salgado *et al.*, 2006).

Cuadro 15. Valores de conductividad eléctrica en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	ds ms <sup>-1</sup>	Prueba de Medias			
				Transectos	Suelos	Distancia	
IPBJ	Vertisol	0.6	0,0517	0.0269 b	0.0367 a	0.0344 a	
		3.0	0,0474			0.0340 a	
		6.0	0,0063			0.0277 a	
	Fluvisol	0.6	0,0055		0.0270 b		
		3.0	0,0059				
		6.0	0,0444				
BC	Vertisol	0.6	0,0431	0.0372 b			
		3.0	0,0430				
		6.0	0,0304				
	Fluvisol	0.6	0,0375				
		3.0	0,0394				
		6.0	0,0296				
C.V.	25,5	Prueba de F para:		Interacción:			
Media	0,03	Transecto (W)	NS	W x S	0.02 NS	MSD (W)	0,0057
		Suelo (S)	0.01**	W x D	0.33 NS	MSD (S)	0,0057
		Distancia (D)	NS	S x D	0.01**	MSD (D)	0,0084
				W x S x D	0.01**		

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P ≤ 0.05)

#### **5.1.4. Textura del suelo**

La textura del suelo es uno de los aspectos importantes a considerar dentro de la investigación edafológica, por lo que en el Cuadro 19 se muestra las diferentes clases texturales encontradas en los suelos del área de estudio, basados en la metodología planteada en la norma oficial mexicana vigente (SEMARNAT, 2001).

##### **5.1.4.1 Arcilla, limo y arena**

El contenido de arcilla promedio encontrada en el área de estudio fue 18%, y de acuerdo al análisis de varianza se observó diferencia estadísticamente significativa entre transectos, suelos y distancias (Cuadro 16). Para transectos, existe mayor contenido de arcilla en la BC, siendo sólo 6% mayor con respecto al IPBJ. La misma situación se observó entre suelos ya que los Fluvisoles presentaron un contenido ligeramente superior al de los Vertisoles, en la capa de 0 a 20 cm.

El contenido promedio de limo en el área fue 32% con un coeficiente de variación de 13%. Se observó diferencia estadísticamente significativa entre transectos, suelos y no así entre distancias de acuerdo al análisis de varianza (Cuadro 17). Para transectos, existe mayor contenido de limo en el IPBJ, siendo 6% mayor con respecto a la BC. La misma situación se observó entre suelos ya que los Fluvisoles presentaron un contenido ligeramente superior al de los Vertisoles.

El contenido promedio de arena en el área fue 50% con un coeficiente de variación de 13%. Se observó diferencia estadísticamente significativa entre suelos y distancias, no así entre las fuentes de acuerdo al análisis de varianza (Cuadro 18). Existe el mismo contenido de arena para ambas industrias, siendo 1% mayor en la BC con respecto al IPBJ. Se observó que los Fluvisoles presentaron un contenido ligeramente superior al de los Vertisoles. El contenido de arena fue similar en las distancias 3 y 6 km.

Cuadro 16. Valores del contenido de arcilla en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	%	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	7	15b	15b	24a
		3.0	15			15b
		6.0	12			16b
	Fluvisol	0.6	14		21a	
		3.0	18			
		6.0	25			
BC	Vertisol	0.6	40	21a		
		3.0	5			
		6.0	14			
	Fluvisol	0.6	34			
		3.0	20			
		6.0	14			

C.V. 35,3 Prueba de F para: Interacción:

Media 18	Transecto (W)	0,01*	W x S	0,283	MSD (W)	4,43
	Suelo (S)	0,01*	W x D	0,00**	MSD (S)	4,43
	Distancia (D)	0,00*	S x D	0,2835	MSD (D)	6,57
			W x S x D	0,,0308		

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

Cuadro 17. Valores del contenido de limo en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	%	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	33	35a	30b	32a
		3.0	34			32a
		6.0	33			32a
	Fluvisol	0.6	45		33a	
		3.0	40			
		6.0	25			
BC	Vertisol	0.6	23	28b		
		3.0	26			
		6.0	30			
	Fluvisol	0.6	27			
		3.0	29			
		6.0	32			

C.V. 13.15 Prueba de F para: Interacción:

Media 32	Transecto (W)	0,00**	W x S	0,89NS	MSD (W)	2.87
	Suelo (S)	0,01*	W x D	0,00**	MSD (S)	2.87
	Distancia (D)	0,40NS	S x D	0,01*	MSD (D)	4.26
			W x S x D	0,02NS		

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

Cuadro 18. Valores del contenido de arena en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	%	Prueba de Medias			
				Transectos	Suelos	Distancia	
IPBJ	Vertisol	0.6	60	50a	55a	44b	
		3.0	55			53a	
		6.0	50			54a	
	Fluvisol	0.6	40		46b		
		3.0	42				
		6.0	49				
BC	Vertisol	0.6	37	51a			
		3.0	68				
		6.0	57				
	Fluvisol	0.6	39				
		3.0	51				
		6.0	54				
C.V.	13.36	Prueba de F para:		Interacción:			
Media	50	Transecto (W)	0.5540 NS	W x S	0.27NS	MSD (W)	4.65
		Suelo (S)	0.00*	W x D	0,00**	MSD (S)	4.65
		Distancia (D)	0.00*	S x D	0,34 NS	MSD (D)	6.89
				W x S x D	0,03 NS		

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

#### 5.1.4.2. Clase textural

Las texturas en promedio son francas en Fluvisoles, transectos del IPBJ y en la distancia de 0.6 km. Y las texturas migajón arenosas a migajón arcillo arenosas se encuentran en los Vertisoles, transectos de la BC y en las distancias de 3 y 6 km (Cuadro 19).

Cuadro 19. Clasificación textural de los suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

	Clave	Arena	Limo	Arcilla	Textura
INDUSTRIA	IPBJ	50%	35%	15%	Franco
	BC	51%	28%	21%	Migajón arcillo-arenoso
SUELOS	Vertisol	55%	30%	15%	Migajón arenoso
	Fluvisol	46%	33%	21%	Franco
DISTANCIAS	0.6	44%	32%	24%	Franco
	3.0	53%	32%	15%	Migajón arenoso
	6.0	52%	32%	16%	Migajón arenoso

### 5.1.6. Capacidad de intercambio cationico (CIC)

La CIC promedio encontrada en el área de estudio fue 23 cmol(+)Kg<sup>-1</sup>, y de acuerdo al análisis de varianza se observó diferencia altamente significativa entre suelos y distancias, y significativa entre transectos (Cuadro 20).

Para transectos, existe mayor contenido de CIC en la BC, siendo 11% mayor con respecto al IPBJ. La misma situación se observó entre suelos ya que los Vertisoles presentaron una CIC ligeramente superior a la de los Fluvisoles. La reserva nutrimental en Fluvisoles y Vertisoles, en ambos transectos y entre distancias se considera de clase media de acuerdo a la NOM-021-RECNAT, 2000 (SEMARNAT, 2001). Esto indica que ambos suelos presentan buena disponibilidad de nutrientes (K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) para las plantas y favorecer la retención de elementos contaminantes (Porta *et al.*, 1999).

Cuadro 20. Capacidad de intercambio cationico en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	cmol(+)kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias			
				Transectos	Suelos	Distancia	
IPBJ	Vertisol	0.6	24,4	21.8 b	24.9 a	20.4 b	
		3.0	21,8			22.6 b	
		6.0	27,4			26.3 a	
	Fluvisol	0.6	15,6		21.3 b		
		3.0	19,6				
		6.0	21,9				
BC	Vertisol	0.6	18,4	24.5 a			
		3.0	28,7				
		6.0	29,0				
	Fluvisol	0.6	23,1				
		3.0	20,5				
		6.0	27,0				
C.V.	14,5	Prueba de F para:		Interacción:			
Media	23	Transecto (W)	0.01*	W x S	0.12 NS	MSD (W)	2,32
		Suelo (S)	0.01**	W x D	0.49 NS	MSD (S)	2,32
		Distancia (D)	0.01**	S x D	0.51 NS	MSD (D)	3,45

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

## **5.2. Metales Pesados en Suelos**

### **5.2.1. Metales pesados totales**

#### **5.2.1.1. Cadmio total ( $Cd_t$ )**

El contenido de  $Cd_t$  no fue detectable en suelos del área de estudio. Este resultado contrasta con lo reportado por Zavala *et al.* (2003) y Siebe *et al.* (2005), quienes encontraron concentraciones medias y bajas en suelos con industria petrolera y derrames de hidrocarburos. Y coincide con Tembo *et al.* (2006) quienes reportan baja a nula concentración de Cd en suelos al alejarse del punto de emisión de contaminantes. El cadmio es ampliamente distribuido en niveles muy bajos en el medio ambiente y se considera un metal no esencial para los humanos, animales y plantas (Paez-Osuna, 2005).

#### **5.2.1.2. Vanadio total ( $V_t$ )**

El contenido de  $V_t$  mostró diferencias altamente significativas entre transectos y distancias, y no significativa entre suelos. La concentración promedio en el área de estudio fue  $3.47 \text{ mg kg}^{-1}$  con un coeficiente de variación que indica una variación baja (Cuadro 21). Existe 20% más  $V_t$  en el transecto de la BC con respecto al transecto IPBJ. En cuanto a distancias, el sitio ubicado a 6 km registró 21% más  $V_t$  en comparación con el sitio cercano a las fuentes de emisión, esto posiblemente se debe deposición de contaminantes debido a la quema de gas en la batería Cárdenas y combustible en el ingenio azucarero. No obstante estas variaciones, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT 2001 (SEMARNAT, 2001) son bajos, e inferiores a las concentraciones reportadas por Siebe *et al.* (2005) y García *et al.* (2006) en zonas afectadas por derrames de petróleo.

### 5.2.1.3. Plomo total (Pb<sub>t</sub>)

El contenido de Pb<sub>t</sub> mostró diferencias estadísticas significativas entre distancias y no significativas entre transectos y suelos. La concentración media de Pb<sub>t</sub> en el área de estudio fue 0.43 mg kg<sup>-1</sup> con un coeficiente de variación de 20.73 (Cuadro 22). Entre distancias, a partir del sitio a 0.6 km se encontró una tendencia ascendente en el contenido de este elemento hasta el sitio ubicado a 6 km. Esto se puede asociar a las emisiones atmosféricas de las dos fuentes, debido a la quema de combustibles. Al respecto, Petaloti *et al.* (2006) reportan que el Pb<sub>t</sub> se encuentra en forma de partículas suspendidas en la atmósfera cercanas a áreas industriales. Sin embargo, de acuerdo con la NOM-021-RECNAT 2001 (SEMARNAT, 2001), los contenidos de Pb<sub>t</sub> son bajos. Del Águila-Juárez *et al.* (2005) y Garcia *et al.* (2006) reportan contenidos superiores a 28 mg kg<sup>-1</sup> en suelos similares enriquecidos por fuentes antropogénicas, por lo que las concentraciones de Pb<sub>t</sub> encontrados en los suelos cañeros de la Chontalpa, por lo que no representan riesgo de contaminación en el suelo.

Cuadro 21. Contenido de vanadio total (V<sub>t</sub>) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	3.29	3.15 b	3.54 a	3.06 b
		3.0	3.06			3.67 a
		6.0	3.46			3.69 a
	Fluvisol	0.6	2.49		3.40 a	
		3.0	3.51			
		6.0	3.09			
BC	Vertisol	0.6	3.10	3.79 a		
		3.0	4.17			
		6.0	4.18			
	Fluvisol	0.6	3.38			
		3.0	3.93			
		6.0	4.00			

C.V.	8.66	Prueba de F para:	Interacción:
Media	3.47	Transecto (W)	W x S
		Suelo (S)	W x D
		Distancia (D)	S x D
			W x S x D

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P ≤ 0.05)

Cuadro 22. Contenido de plomo total ( $Pb_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	0.46	0.40 a	0.45 a	0.35 b
		3.0	0.34			0.46 a
		6.0	0.45			0.47 a
	Fluvisol	0.6	0.29		0.41 a	
		3.0	0.53			
		6.0	0.35			
BC	Vertisol	0.6	0.32	0.45 a		
		3.0	0.53			
		6.0	0.58			
	Fluvisol	0.6	0.33			
		3.0	0.43			
		6.0	0.51			
C.V.	20.73	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	0.43	Transecto (W)	0.11 ns	W x S	0.59 ns	
		Suelo (S)	0.20 ns	W x D	0.04 ns	
		Distancia (D)	0.01*	S x D	0.15 ns	
				W x S x D	0.01*	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

#### 5.2.1.4. Niquel total ( $Ni_t$ )

Los resultados del análisis de varianza indican que el contenido de  $Ni_t$  presenta diferencias significativas para transectos y tipo de suelos; y altamente significativa entre distancias. No obstante, el contenido medio en suelos es sumamente bajo en comparación con lo reportado por otras investigaciones en la región (Siebe *et.al* 2005, García *et.al*, 2006) y se ubican dentro de los límites permisibles establecidos en la norma oficial mexicana vigente (SEMARNAT, 2001). El coeficiente de variación fue de 14.67% (Cuadro 23). El transecto BC presentó mayor contenido de  $Ni_t$  con respecto al encontrado en el IPBJ. Los Vertisoles presentaron mayor contenido de  $Ni_t$  en comparación con los Fluvisoles, esto se debe a que los metales pesados son retenidos en los sitios de intercambio de las arcillas con mayor fuerza (Ross, 1994), a pesar de que los Fluvisoles presentaron mayor contenido de arcilla (Cuadro 16).

Cuadro 23. Contenido de níquel total ( $Ni_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias			
				Transectos	Suelos	Distancia	
IPBJ	Vertisol	0.6	5.64	4.99 b	5.74 a	4.21 b	
		3.0	4.98			5.65 a	
		6.0	5.80			6.15 a	
	Fluvisol	0.6	3.32		4.94 b		
		3.0	5.38				
		6.0	4.85				
BC	Vertisol	0.6	3.58	5.68 a			
		3.0	6.93				
		6.0	7.51				
	Fluvisol	0.6	4.34				
		3.0	5.33				
		6.0	6.42				
C.V.	14.67	Prueba de F para:		Interacción:			
Media	5.34	Transecto (W)	0.01 *	W x S	0.55 ns		
		Suelo (S)	0.01*	W x D	0.01*		
		Distancia (D)	0.01**	S x D	0.81 ns		
				W x S x D	0.01*		

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

Entre distancias, el mayor contenido de  $Ni_t$  se presentó a los 6.0 km y el menor en la distancia 0.6 km. La presencia del metal posiblemente obedece al uso de fertilizantes en esta actividad, que constituye una fuente de incorporación al suelo agrícola (Doménech, 2000; Del Aguila-Juarez *et al.*, 2005), así como derivado de la actividad industrial (Porta *et al.*, 1999; Volke *et al.*, 2005; Siebe *et al.* 2005) presente en la zona.

### 5.2.1.5. Hierro total ( $Fe_t$ )

De acuerdo con los resultados obtenidos, el contenido de hierro total ( $Fe_t$ ) mostró diferencias estadísticamente significativas entre transectos, suelos y distancias. El contenido medio de  $Fe_t$  fue de 556 mg kg<sup>-1</sup> con un coeficiente de variación de 2.8% (Cuadro 24). Estos niveles encontrados se encuentran por encima de los niveles considerados como críticos para el cultivo de caña de azúcar (Salgado *et al.*, 2003).

Se encontró mayor contenido de  $Fe_t$  en el transecto BC, siendo 8% más alto con respecto al encontrado en el IPBJ. Posiblemente los rodillos estriados de hierro de los implementos agrícolas dejan residuos de este elemento en el suelo. Y entre transectos, el contenido del elemento fue mayor en el sitio de 6 km y menor en el sitio más cercano a la fuente. El Fe es un metal no volátil en la combustión (Ross, 1994) por lo que su origen no puede asociarse a emisiones de las industrias, pero puede haber aportaciones por uso mas intensivo de fertilizantes inorgánicos en el cultivo (Porta *et al.*, 1999; Doménech, 2000).

Cuadro 24. Contenido de hierro total ( $Fe_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	526.93	542.861 b	564.21 a	545.96 b
		3.0	532.91			572.99 a
		6.0	564.82			579.56 a
	Fluvisol	0.6	519.29		568.13 a	
		3.0	572.54			
		6.0	540.67			
BC	Vertisol	0.6	556.80	589.480 a		
		3.0	596.17			
		6.0	607.63			
	Fluvisol	0.6	580.81			
		3.0	590.34			
		6.0	605.12			

C.V.	2.80	Prueba de F para:	Interacción:	
Media	566.17	Transecto (W)	W x S	0.81 ns
		Suelo (S)	W x D	0.60 ns
		Distancia (D)	S x D	0.07 ns
			W x S x D	0.01*

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

### 5.2.1.6. Cobre total ( $Cu_t$ )

Los valores de  $Cu_t$  observaron diferencias estadísticas altamente significativas en transectos y significativa entre suelos, pero no significativa entre distancias. El valor promedio de  $Cu_t$  en suelos fue de 2.04 mg kg<sup>-1</sup> con un coeficiente de variación de

19.60% (Cuadro 25). El valor de  $Cu_t$  en el transecto IPBJ fue ligeramente superior al observado en el transecto BC, esto tal vez se deba a la adición de paja o follaje de la misma plantación al suelo, como lo mencionan Narwal y Singh (1998); aunado posiblemente a la aplicación de sulfato de cobre en plantaciones de cacao alrededor del área de muestreo. Los Vertisoles mostraron 0.44 veces más  $Cu_t$  con respecto a los Fluvisoles, posiblemente debido al mayor contenido de MO en los primeros suelos por lo que pueden retener más a este elemento como lo reportan Sauve *et al.* (1996). El promedio de  $Cu_t$  en suelos, transectos y distancias indica que es un contenido normal ya que es inferior a los niveles reportados como concentraciones tóxicas por Alloway (1990), Ross (1994) y He *et al.* (2005), y por debajo de los encontrados en suelos con industria petrolera (Zavala *et al.*, 2003; Siebe *et al.*, 2005).

Cuadro 25. Contenido de cobre total ( $Cu_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	4.47	2.27 a	2.40 a	2.13 a
		3.0	2.49			2.10 a
		6.0	1.92			1.88 a
	Fluvisol	0.6	1.29		1.67 b	
		3.0	1.66			
		6.0	1.77			
BC	Vertisol	0.6	1.35	1.82 b		
		3.0	2.28			
		6.0	1.92			
	Fluvisol	0.6	1.40			
		3.0	2.01			
		6.0	1.94			
C.V.	19.60	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	2.04	Transecto (W)	0.01*	W x S	0.01**	
		Suelo (S)	0.01**	W x D	0.01**	
		Distancia (D)	0.28 ns	S x D	0.01*	
				W x S x D	0.01*	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

#### **5.2.1.7. Zinc total ( $Zn_t$ )**

El análisis de varianza para el contenido de  $Zn_t$  mostró diferencias estadísticas altamente significativas para transectos, significativas entre distancias y similares entre suelos (Cuadro 26). El contenido medio fue de  $4.73 \text{ mg kg}^{-1}$  con un coeficiente de variación de 11.62%. Entre transectos, BC exhibió mayor contenido con respecto a IPBJ, posiblemente debido a la aplicación de fertilizantes inorgánicos en la actividad agrícola que también implica deposición de Zn (Mugica *et al.* 2003). Y la distancia de 6 km registró la mayor concentración en comparación con el sitio próximo a la fuente. Al respecto, Tembo *et al.* (2006) reportan un comportamiento contrario para este elemento en un transecto de 20 km, disminuyendo la concentración conforme aumenta la distancia y lo relacionó con factores climáticos y edafogénicos.

Los niveles de  $Zn_t$  encontrados en los suelos cañeros no se consideran tóxicos (Alloway, 1990; Ross, 1994; He *et al.*, 2005) y son inferiores a los reportados por Zavala *et al.* (2003) y Siebe *et al.* (2005) para suelos con industria petrolera. En Brasil se han encontrado contenidos de  $<12$  a  $193 \text{ mg kg}^{-1}$  de este elemento en suelos cañeros (Rayment *et al.*, 2008), concentraciones que están por encima de lo encontrado en esta investigación.

#### **5.2.1.8. Manganeso total ( $Mn_t$ )**

El contenido de manganeso total ( $Mn_t$ ), mostró diferencias estadísticamente significativas entre transectos y suelos, pero no entre distancias. El contenido medio de  $Mn_t$  fue de  $24.04 \text{ mg kg}^{-1}$ , con un coeficiente de variación de 19.5% (Cuadro 27). Este contenido está por arriba de lo reportado para Fluvisoles y Vertisoles cultivados con caña de azúcar (Salgado *et al.*, 2008) y suelos con actividad agrícola (Micó *et al.*, 2007).

Entre transectos, el contenido de  $Mn_t$  fue 23% mayor en BC con respecto a IPBJ. Este metal no es volátil en la combustión (Ross, 1994) por lo que la fuente no es la industria,

y puede asociarse al uso de agroquímicos y a contenidos naturales en el suelo. Entre suelos, los Fluvisoles presentaron 18% más  $Mn_t$  con respecto a los Vertisoles, debido al mayor contenido de arcillas que favorecen una mayor retención de este metal. Esto concuerda con Ross (1994) y Atanassova y Okazaki (1996) quienes mencionan que el contenido de arcilla influye en la adsorción de iones metálicos los que se acumulan con mayor facilidad en los primeros horizontes del suelo.

Cuadro 26. Contenido de zinc total ( $Zn_t$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	4.61	4.28 b	4.89 a	4.15 b
		3.0	4.15			4.87 a
		6.0	5.02			5.16 a
	Fluvisol	0.6	3.47		4.56 a	
		3.0	4.26			
		6.0	4.20			
BC	Vertisol	0.6	4.07	5.17 a		
		3.0	5.97			
		6.0	5.55			
	Fluvisol	0.6	4.43			
		3.0	5.12			
		6.0	5.89			
C.V.	11.62	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	4.73	Transecto (W)	0.01**	W x S	0.13 ns	
		Suelo (S)	0.08 ns	W x D	0.04 ns	
		Distancia (D)	0.01*	S x D	0.93 ns	
				W x S x D	0.02 ns	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

Cuadro 27. Contenido de manganeso total (Mn<sub>t</sub>) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	19.026	20.64 b	22.01 b	21.09 a
		3.0	18.59			25.33 a
		6.0	18.85			25.69 a
	Fluvisol	0.6	13.92		26.07 a	
		3.0	34.97			
		6.0	18.46			
BC	Vertisol	0.6	27.60	27.45 a		
		3.0	17.18			
		6.0	30.85			
	Fluvisol	0.6	23.83			
		3.0	32.04			
		6.0	33.18			
C.V.	19.49	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	24.04	Transecto (W)	0.01*	W x S	0.79 ns	
		Suelo (S)	0.01*	W x D	0.01*	
		Distancia (D)	0.04 ns	S x D	0.01**	
				W x S x D	0.85 ns	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

### 5.2.1.9. Tendencias de los metales pesados totales por transectos y distancia

En el Cuadro 28 se muestra el contenido medio de metales pesados en tres distancias, dos grupos de suelos y dos industrias. En los transectos del IPBJ los contenidos de Pb<sub>t</sub>, V<sub>t</sub>, Fe<sub>t</sub> y Zn<sub>t</sub> fueron similares en las diferentes distancias, tanto en Vertisoles como en Fluvisoles. No se observan tendencias claras en la concentración de metales pesados, excepto en el Ni<sub>t</sub>, Cu<sub>t</sub> y Mn<sub>t</sub> en Fluvisoles, cuyos contenidos son mayores en las distancias de 3 y 6 km. En el caso del Ni<sub>t</sub> posiblemente se debe a la deposición por vía atmosférica (Doménech, 2000; Múgica *et al.*, 2003), aunado a la aplicación de fertilizantes inorgánicos al suelo para el Cu<sub>t</sub> y Mn<sub>t</sub> (Porta *et al.*, 1999; Volke *et al.*, 2005).

En los transectos de la BC, en Vertisoles y Fluvisoles, se observa una tendencia consistente de mayores contenidos de Pb, Ni, V, Fe, Cu, Zn y Mn en las distancias de 3 y 6 km; esto posiblemente se asocia a la deposición de metales por vía atmosférica debido a la quema de gases en la batería de separación Cárdenas, como lo mencionan

Doménech (2000) y Petaloti *et al.* (2006). También, puede ser resultado de la aplicación más intensa de fertilizantes inorgánicos a los suelos cañeros (Vázquez, 1999; Volke *et al.*, 2005).

Cuadro 28. Comparación de medias de contenidos de metales totales por industria, suelo y distancias.

Industria	Suelos	Distancias (km)	Metales (mg kg <sup>-1</sup> )							
			Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>	Cd <sub>t</sub>	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>
IPBJ	Vertisol	0.6	0.46 a	5.64 a	3.29 a	nd	526.93 a	4.47 a	4.61 a	19.03 a
		3.0	0.34 a	4.98 a	3.06 a	nd	532.91 a	2.47 b	4.15a	18.59 a
		6.0	0.45 a	5.80 a	3.46 a	nd	564.82 a	1.92 b	5.02 a	18.45 a
	Fluvisol	0.6	0.29 a	3.32 b	2.49 a	nd	519.29 a	1.29 b	3.47 a	13.92 b
		3.0	0.53 a	5.38 a	3.50 a	nd	572.74 a	1.66 ab	4.26 a	34.97 a
		6.0	0.35 a	4.85 a	3.09 a	nd	540.67 a	1.77 a	4.20 a	18.47 b
BC	Vertisol	0.6	0.32 b	3.58 b	3.10 b	nd	556.80 c	1.36 b	4.07 b	27.60 ab
		3.0	0.53 a	6.93 a	4.17 a	nd	596.17 b	2.28 a	5.97 a	17.19 b
		6.0	0.58 a	7.51 a	4.18 a	nd	607.63 a	1.92 ab	5.55 a	30.84 a
	Fluvisol	0.6	0.32 b	3.58 b	3.10 b	nd	556.80 c	1.36 b	4.07 b	27.59 ab
		3.0	0.53 a	6.93 a	4.17 a	nd	596.16 b	2.27 a	5.97 a	17.18 b
		6.0	0.58 a	7.51 a	4.18 a	nd	607.63 a	1.92 ab	5.55 a	30.84 a

IPBJ= Ingenio Presidente Benito Juárez; BC= Batería Cárdenas; nd = No detectado

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

### 5.2.1.10. Correlación de metales pesados totales y variables del suelo

El contenido de MO no se correlacionó con los metales totales, excepto el Cu<sub>t</sub> en los Fluvisoles de la agroindustria IPBJ. En contraste, en la BC la MO se correlacionó positivamente con Cu<sub>t</sub> y V<sub>t</sub> en los dos suelos, seguido de Zn<sub>t</sub> en Vertisoles y Pb<sub>t</sub> en Fluvisoles (Cuadros 29, 30, 31 y 32). Lo que indica que en los suelos cañeros de BC, al aumentar el contenido de MO se incrementa la retención y el contenido de varios metales en el horizonte superficial de los suelos. Esto es congruente con lo mencionado por Ortiz y Ortiz (1993), Baird (2002) y de Matos *et al.* (2000), quienes mencionan que el contenido de MO se puede correlacionar con el contenido de los metales pesados. Y Petrovich *et al.* (1998) quienes explican la fijación de los metales por el efecto de la queletación.

El pH se correlacionó positivamente con los metales Fe<sub>t</sub>, Cu<sub>t</sub>, Zn<sub>t</sub>, Pb<sub>t</sub>, Ni<sub>t</sub> y V<sub>t</sub> en los Vertisoles de BC, y sólo con el Cu<sub>t</sub> en los Fluvisoles del IPBJ (Cuadros 29, 30, 31 y 32), indicando que al aumentar el pH del suelo se incrementa el contenido de los metales. La mayor asociación de metales en Vertisoles de BC se debe posiblemente a la mayor acumulación de los elementos y al pH más ácido en comparación con los transectos de IPBJ (Cuadro 14). En los suelos más ácidos la disponibilidad de los metales es mayor (Petrovich *et al.*, 1998) así como su movilidad (de Matos *et al.*, 2000).

La arcilla se correlacionó negativamente con los contenidos de metales pesados, sobre todo Pb<sub>t</sub> y Ni<sub>t</sub> en los Vertisoles de ambas industrias y los Fluvisoles de la BC (Cuadros 29, 30, 31 y 32). Otros metales que se asociaron con la arcilla de los Fluvisoles en la BC fueron Fe<sub>t</sub>, Cu<sub>t</sub>, Zn<sub>t</sub>, y V<sub>t</sub>. Esta correlación negativa indica que al aumentar la arcilla el contenido de los metales disminuye. Esto es contrario a lo reportado por varios autores (Ross, 1994; Atanassova y Okazaki, 1996; Ramachandran y D'Souza, 1998) quienes reportan que las arcillas retienen metales pesados debido a la atracción electrostática de sus cargas. Pero puede ser que la presencia no tenga que ver con el suelo.

La CIC mostró correlación positiva con los metales Fe<sub>t</sub>, Zn<sub>t</sub>, Pb<sub>t</sub>, Ni<sub>t</sub> y V<sub>t</sub> en los Vertisoles de ambas industrias, y Fe<sub>t</sub>, Zn<sub>t</sub>, Ni<sub>t</sub> en Fluvisoles de la BC (Cuadros 29, 30, 31 y 32). Esta asociación se debe a que los metales forman compuestos que participan en el complejo de intercambio de cationes. Al respecto, Jenne (1998) menciona que los metales Pb, Zn y Ni, compiten por sitios de adsorción y desplazan cationes cuando se adsorben en el suelo. Por fuentes, la CIC de la BC se correlacionó con un mayor número de metales (Cuadros 29, 30, 31 y 32). Esto se debe posiblemente a que la batería de separación de PEMEX es fuente por emisión de una mayor cantidad de metales a los suelos, particularmente Pb, Ni y V, los cuales son aportados en las cenizas derivadas de la combustión de hidrocarburos (Doménech, 2000; Baird, 2002; Múgica *et al.*, 2003). La quema de gas en la Batería Cárdenas fue constante en los primeros años de explotación petrolera, y en los últimos años se hace

intermitentemente. Los autores citados sugieren que el manejo de fertilizantes también puede ser otra fuente de metales en los suelos cañeros.

Cuadro 29. Correlación entre propiedades del suelo y metales totales en Vertisoles del IPBJ.

	MO	pH	Arc.	CIC	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>
MO	1.00	0.02	-0.85*	0.61	0.24	0.49	0.63	0.62	0.74	0.71	0.64
pH		1.00	0.04	-0.03	0.12	-0.07	0.09	0.06	0.19	0.21	0.11
Arc.			1.00	-0.05	-0.23	-0.59	-0.63	-0.49	-0.75*	-0.75*	-0.70*
CIC				1.00	0.79**	-0.10	0.90**	0.56	0.81**	0.83**	0.90**
Fe <sub>t</sub>					1.00	-0.62	0.82	0.62	0.68	0.74*	0.81**
Cu <sub>t</sub>						1.00	-0.11	-0.06	0.15	0.03	-0.07
Zn <sub>t</sub>							1.00	0.76*	0.94**	0.96**	0.96**
Mn <sub>t</sub>								1.00	0.79**	0.81**	0.81**
Pb <sub>t</sub>									1.00	0.97**	0.94**
Ni <sub>t</sub>										1.00	0.98**
V <sub>t</sub>											1.00

\* Correlación significativa al 0.05

\*\* Correlación significativa al 0.01

Cuadro 30. Correlación entre propiedades del suelo y metales totales en Fluvisoles del IPBJ.

	MO	pH	Arc.	CIC	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>
MO	1.00	0.78**	0.39	0.65	0.31	0.70*	0.48	-0.04	0.21	0.51	0.44
pH		1.00	0.49	0.66*	0.38	0.75*	0.55	0.24	0.25	0.64	0.45
Arc.			1.00	-0.29	-0.43	-0.08	-0.42	-0.23	-0.43	-0.17	-0.04
CIC				1.00	0.74	0.89	0.95	0.33	0.57	0.82**	0.49
Fe <sub>t</sub>					1.00	0.81**	0.90**	0.79**	0.82**	0.95**	0.81**
Cu <sub>t</sub>						1.00	0.91**	0.52	0.53	0.92**	0.75*
Zn <sub>t</sub>							1.00	0.56	0.67*	0.91**	0.63
Mn <sub>t</sub>								1.00	0.76*	0.76*	0.82**
Pb <sub>t</sub>									1.00	0.75*	0.72*
Ni <sub>t</sub>										1.00	0.85**
V <sub>t</sub>											1.00

\* Correlación significativa al 0.05

\*\* Correlación significativa al 0.01

Cuadro 31. Correlación entre propiedades del suelo y metales totales en Vertisoles de la BC.

	MO	pH	Arc.	CIC	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>
MO	1.00	0.42	-0.80**	0.63	0.52	0.77*	0.70*	-0.73	0.46	0.57	0.66*
pH		1.00	-0.80**	0.79**	0.73*	0.84**	0.86**	-0.22	0.82**	0.82**	0.72*
Arc.			1.00	-0.94**	-0.88**	-0.91**	-0.93**	0.48	-0.88**	-0.93**	-0.90**
CIC				1.00	0.94**	0.76**	0.82**	-0.25	0.94**	0.95**	0.83**
Fe <sub>t</sub>					1.00	0.75*	0.84**	-0.03	0.97**	0.97**	0.91**
Cu <sub>t</sub>						1.00	0.98**	-0.50	0.77*	0.82**	0.89**
Zn <sub>t</sub>							1.00	-0.40	0.84	0.90**	0.92**
Mn <sub>t</sub>								1.00	-0.06	-0.17	-0.21
Pb <sub>t</sub>									1.00	0.95**	0.88**
Ni <sub>t</sub>										1.00	0.92**
V <sub>t</sub>											1.00

\* Correlación significativa al 0.05

\*\* Correlación significativa al 0.01

Cuadro 32. Correlación entre propiedades del suelo y metales totales en Fluvisoles de la BC.

	MO	pH	Arc.	CIC	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>
MO	1.00	-0.28	-0.51	0.24	0.51	0.83**	0.65	0.18	0.71*	0.64	0.75*
pH		1.00	-0.283	0.74*	0.28	0.02	0.165	-0.54	0.11	0.35	-0.27
Arc.			1.00	-0.54	-0.82**	-0.87**	-0.85**	-0.32	-0.83**	-0.85**	0.64
CIC				1.00	0.68*	0.404	0.67*	-0.33	0.59	0.76*	0.22
Fe <sub>t</sub>					1.00	0.76	0.97**	0.19	0.95**	0.93**	0.79*
Cu <sub>t</sub>						1.00	0.84*	0.27	0.86*	0.82**	0.83**
Zn <sub>t</sub>							1.00	0.25	0.98**	0.95**	0.84**
Mn <sub>t</sub>								1.00	0.25	0.15	0.42
Pb <sub>t</sub>									1.00	0.95**	0.86**
Ni <sub>t</sub>										1.00	0.73*
V <sub>t</sub>											1.00

\* Correlación significativa al 0.05

\*\* Correlación significativa al 0.01

## **5.2.2. Metales pesados extractables**

### **5.2.2.1. Cadmio extractable ( $Cd_e$ ) y Vanadio extractable ( $V_e$ )**

El contenido de cadmio ( $Cd_e$ ) y vanadio ( $V_e$ ) no fue detectado en los suelos cañeros de la Chontalpa. Esto indica que ambos metales no están en formas químicas asimilables en la solución del suelo, por lo que no representan un problema de contaminación para el cultivo de caña de azúcar.

### **5.2.2.2. Plomo extractable ( $Pb_e$ )**

Los contenidos de  $Pb_e$  indican que son similares entre transectos y entre distancias, pero hay diferencia significativa entre suelos (Cuadro 33). El contenido promedio de  $Pb_e$  fue de  $0.46 \text{ mg kg}^{-1}$  con un coeficiente de variación de 16.60%. Los Vertisoles registraron 14% más  $Pb_e$  con respecto a los Fluvisoles, esto posiblemente se debe al mayor contenido de MO en los Vertisoles que permite una mayor retención de este elemento. Los valores encontrados son menores a los reportados por Zavala *et al.* (2003) en áreas de pozos petroleros. Estos contenidos no son considerados tóxicos (SEMARNAT, 2001), lo que es favorable desde el punto de vista agronómico debido a que este metal no está disponible para la caña de azúcar y otros cultivos de la zona.

### **5.2.2.3. Niquel extractable ( $Ni_e$ )**

El contenido de  $Ni_e$  mostró diferencias significativa entre transectos y altamente significativa entre distancias, no así entre suelos (Cuadro 34). El coeficiente de variación fue 17.33%. Por transecto, el contenido de  $Ni_e$  es ligeramente superior en BC, con respecto al encontrado en el IPBJ. Y entre distancias, el mayor contenido de  $Ni_e$  se presentó a los 6 km y el menor en la distancia 0.6 km, esto posiblemente se debe a las partículas suspendidas en el aire y arrastradas por el viento (Petaloti *et al.*, 2006) a zonas alejadas de la fuente de emisión (Porta *et al.*, 1999).

El contenido promedio en suelos indica que el  $Ni_e$  es similar al reportado por Zavala *et al.* (2003) para suelos con industria petrolera, y está muy por debajo de lo considerado como tóxico para cultivos (SEMARNAT, 2001).

#### **5.2.2.4. Hierro extractable ( $Fe_e$ )**

Los contenidos de  $Fe_e$  mostraron diferencia significativa entre suelos y entre distancias, pero no entre transectos. El contenido medio de  $Fe_e$  fue  $63.04 \text{ mg kg}^{-1}$  cuyo nivel es alto en suelos de acuerdo a los criterios de SEMARNAT (2001), con un coeficiente de variación de 13.69% (Cuadro 35). Los Fluvisoles presentaron 21% mayor contenido de este elemento con respecto a los Vertisoles. Entre distancias, el mayor contenido de  $Fe_e$  se presentó a los 0.6 km y el menor en la distancia 6 km. Esto posiblemente se debe a aportes de la maquinaria y equipo agrícola que circula constantemente en los Fluvisoles y en el área de 0.6 km. Otra fuente puede ser partículas de óxido de hierro arrastradas por erosión hídrica de suelos ricos en Fe como los Acrisoles de las terrazas de Huimanguillo (Marín, 2006), las cuales son depositadas como aluviones en el área de estudio.

#### **5.2.2.5. Cobre extractable ( $Cu_e$ )**

Los valores de  $Cu_e$  presentaron diferencia estadística significativa entre suelos y entre distancias, y no entre transectos. El valor promedio fue  $1.70 \text{ mg kg}^{-1}$  con un coeficiente de variación de 22.38% (Cuadro 36). Estos contenidos son inferiores a los reportados por Zavala *et al.* (2003) para suelos con industria petrolera y son adecuados para los suelos en general (SEMARNAT, 2001).

Entre suelos, el valor de  $Cu_e$  fue ligeramente superior en Vertisoles en comparación con los Fluvisoles. Entre distancias, el sitio ubicado a 6 km mostró 34% más  $Cu_e$  con respecto al sitio ubicado a 0.6 km. Posiblemente, esto se debe a la adición de

fertilizantes inorgánicos favoreciendo el incremento de Cu y otros elementos en los suelos agrícolas (He *et al.*, 2005). La cercanía de zonas cultivadas con cacao y la aplicación de sulfato de cobre, también puede contribuir al arrastre de este metal hacia los suelos cañeros a través de las corrientes de agua superficiales.

Cuadro 33. Contenido de plomo extractable ( $Pb_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	0.48	0.47 a	0.50 a	0.45 a
		3.0	0.45			0.44 a
		6.0	0.52			0.50 a
	Fluvisol	0.6	0.55		0.43 b	
		3.0	0.35			
		6.0	0.48			
BC	Vertisol	0.6	0.44	0.46 a		
		3.0	0.63			
		6.0	0.50			
	Fluvisol	0.6	0.33			
		3.0	0.34			
		6.0	0.51			

C.V.	16.60	Prueba de F para:	Interacción:
Media	0.46	Transecto (W)	W x S
		Suelo (S)	W x D
		Distancia (D)	S x D
			W x S x D

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

Cuadro 34. Contenido de níquel extractable (Ni<sub>e</sub>) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias			
				Transectos	Suelos	Distancia	
IPBJ	Vertisol	0.6	3.09	3.12 b	3.44 a	2.66 b	
		3.0	3.13			3.23 b	
		6.0	3.48			4.08 a	
	Fluvisol	0.6	2.28		3.1 a		
		3.0	3.54				
		6.0	3.22				
BC	Vertisol	0.6	2.52	3.53 a			
		3.0	3.38				
		6.0	5.03				
	Fluvisol	0.6	2.76				
		3.0	2.87				
		6.0	4.61				
C.V.	17.33	Prueba de F para:		Interacción:			
Media	3.33	Transecto (W)	0.01*	W x S	0.97 ns		
		Suelo (S)	0.25 ns	W x D	0.01*		
		Distancia (D)	0.01**	S x D	0.81 ns		
				W x S x D	0.13 ns		

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

Cuadro 35. Contenido de hierro extractable (Fe<sub>e</sub>) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias			
				Transectos	Suelos	Distancia	
IPBJ	Vertisol	0.6	52.75	61.12 a	57.10 b	72.11 a	
		3.0	46.65			54.81 b	
		6.0	48.35			62.18 b	
	Fluvisol	0.6	112.29		68.97 a		
		3.0	45.43				
		6.0	61.25				
BC	Vertisol	0.6	62.27	64.95 a			
		3.0	67.56				
		6.0	65.04				
	Fluvisol	0.6	61.14				
		3.0	59.61				
		6.0	74.10				
C.V.	13.69	Prueba de F para:		Interacción:			
Media	63.04	Transecto (W)	0.19 ns	W x S	0.01*		
		Suelo (S)	0.01*	W x D	0.01**		
		Distancia (D)	0.01*	S x D	0.01*		
				W x S x D	0.01*		

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

Cuadro 36. Contenido de cobre extractable ( $Cu_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	2.18	1.70 a	1.85 a	1.39 b
		3.0	1.75			1.84 a
		6.0	2.05			1.87 a
	Fluvisol	0.6	1.20		1.55 b	
		3.0	1.26			
		6.0	1.78			
BC	Vertisol	0.6	0.99	1.69 a		
		3.0	2.45			
		6.0	1.71			
	Fluvisol	0.6	1.19			
		3.0	1.91			
		6.0	1.95			

C.V.	22.38	Prueba de F para:	Interacción:
Media	1.70	Transecto (W)	W x S
		Suelo (S)	W x D
		Distancia (D)	S x D
			W x S x D

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas  
 \* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo  
 Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

### 5.2.2.6. Zinc extractable ( $Zn_e$ )

Los contenidos de  $Zn_e$  indican que estadísticamente existe diferencia significativa entre transectos, y no significativa entre distancias y entre suelos (Cuadro 37). El contenido promedio de  $Zn_e$  fue de 0.81 mg kg<sup>-1</sup> con un coeficiente de variación de 16.35%. Los niveles de  $Zn_e$  encontrados en los suelos cañeros son similares a los reportados para suelos con industria petrolera (Zavala *et al.*, 2003; Siebe *et al.*, 2005) e indican que son concentraciones marginales para los suelos (SEMARNAT, 2001), siendo insuficiente para los cultivos.

Cuadro 37. Contenido de zinc extractable ( $Zn_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	0.73	0.74 b	0.78 a	0.75 a
		3.0	0.66			0.83 a
		6.0	0.87			0.83 a
	Fluvisol	0.6	0.77		0.84 a	
		3.0	0.68			
		6.0	0.71			
BC	Vertisol	0.6	0.85	0.88 a		
		3.0	0.71			
		6.0	0.85			
	Fluvisol	0.6	0.67			
		3.0	1.28			
		6.0	0.90			
C.V.	16.35	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	0.81	Transecto (W)	0.01*	W x S	0.04 ns	
		Suelo (S)	0.19 ns	W x D	0.02 ns	
		Distancia (D)	0.25 ns	S x D	0.01*	
				W x S x D	0.01*	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

### 5.2.2.7. Manganeso extractable ( $Mn_e$ )

Los contenidos de  $Mn_e$  mostraron diferencia estadística significativa entre transectos y no significativa entre distancias y entre suelos. El contenido medio de  $Mn_e$  fue 18.71 mg kg<sup>-1</sup> con un bajo coeficiente de variación (Cuadro 38). Estos valores son adecuados para suelos (SEMARNAT, 2001) y desde el punto de vista nutrimento no representan riesgo alguno para las plantas. Por transectos, la BC registró 30% más  $Mn_e$  en comparación con IPBJ. Esto se debe posiblemente a la mayor utilización de fertilizantes inorgánicos en el cultivo de la caña de azúcar en BC, aportando este nutrimento al suelo (He *et al*, 2005) lo cual es favorable para las plantas.

Cuadro 38. Contenido de manganeso extractable ( $Mn_e$ ) en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	14.53	16.27 b	16.90 a	16.38 a
		3.0	15.11			19.74 a
		6.0	16.69			20.01 a
	Fluvisol	0.6	9.09		20.52 a	
		3.0	27.89			
		6.0	14.33			
BC	Vertisol	0.6	21.88	21.15 a		
		3.0	10.61			
		6.0	22.61			
	Fluvisol	0.6	20.02			
		3.0	25.36			
		6.0	26.42			
C.V.	35.68	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	18.71	Transecto (W)	0.01 *	W x S	0.38 ns	
		Suelo (S)	0.11 ns	W x D	0.04 ns	
		Distancia (D)	0.35 ns	S x D	0.01*	
				W x S x D	0.92 ns	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

### 5.2.2.9. Tendencias de los metales extractables por transectos y distancia

El comportamiento de los contenidos medios de los metales pesados extractables por transectos y distancias se presenta en el Cuadro 39. En los transectos del IPBJ, se confirma la tendencia de mayor acumulación de  $Zn_e$  en la distancia de 6 km de los Vertisoles, y mayor  $Fe_e$  en el sitio cercano a la agroindustria en los Fluvisoles. Los metales restantes no mostraron ninguna tendencia.

En transectos de la BC se observa una tendencia de mayor acumulación de  $Pb_e$ ,  $Ni_e$ , y  $Cu_e$ , en las distancias entre 3 y 6 km, tanto en Vertisoles como en Fluvisoles. Esto posiblemente se debe a la deposición atmosférica por quema de gases y arrastre del viento, así como a la aplicación de fertilizantes inorgánicos en la actividad agrícola (Vázquez, 1999; Doménech, 2000; Volke *et al.*, 2005 y Petaloti *et al.*, 2006).

Cuadro 39. Comparación de medias de contenidos de metales extractables por transecto y grupo de suelo.

Industria	Suelos	Distancias (km)	Metales (mg kg <sup>-1</sup> )							
			Pb <sub>e</sub>	Ni <sub>e</sub>	V <sub>e</sub>	Cd <sub>e</sub>	Fe <sub>e</sub>	Cu <sub>e</sub>	Zn <sub>e</sub>	Mn <sub>e</sub>
IPBJ	Vertisol	0.6	0.48 a	3.09 a	nd	nd	52.75 a	2.18 a	0.73 b	14.53 a
		3.0	0.45 a	3.13 a	nd	nd	46.65 a	1.75 a	0.66 b	15.11 a
		6.0	0.52 a	3.48 a	nd	nd	48.35 a	2.05 a	0.87 a	16.69 a
	Fluvisol	0.6	0.55 a	2.28 a	nd	nd	112.29 a	1.20 a	0.77 a	9.09 a
		3.0	0.35 b	3.54 a	nd	nd	45.43 b	1.26 a	0.68 a	27.88 a
		6.0	0.48 ab	3.22 a	nd	nd	61.25 b	1.78 a	0.71 a	14.33 a
BC	Vertisol	0.6	0.44 b	2.52 b	nd	nd	62.27 a	0.99 b	0.85 a	21.88 a
		3.0	0.63 a	3.38 b	nd	nd	67.60 a	2.45 a	0.71 a	10.61 a
		6.0	0.50 b	5.03 a	nd	nd	65.07 a	1.75 ab	0.85 a	22.61 a
	Fluvisol	0.6	0.44 b	2.52 b	nd	nd	62.27 a	0.98 b	0.85 a	21.88 a
		3.0	0.63 a	3.37 b	nd	nd	67.56 a	2.45 a	0.71 a	10.60 a
		6.0	0.42 b	5.03 a	nd	nd	65.04 a	1.71 ab	0.85 a	22.60 a

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas, nd=No detectado

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

### 5.2.2.10. Correlación de metales totales y metales extractables

Los metales extractables Fe<sub>e</sub>, Zn<sub>e</sub>, Pb<sub>e</sub> y V<sub>e</sub> no se correlacionaron con los metales totales (Cuadros 40, 41, 42 y 43), indicando que estos no están en formas solubles y no pasan a la solución del suelo en cantidades significativas. Lo que significa que los cultivos de la zona incluyendo caña de azúcar no están expuestos a estos contaminantes.

Los metales extractables que mostraron correlación positiva con los metales totales fueron Mn<sub>e</sub> en ambas industrias y en los dos suelos, seguido de Cu<sub>e</sub> en Fluvisoles de las dos industrias y Vertisoles de la BC, pero esto no representa problemas de toxicidad para el cultivo (SEMARNAT, 2001). Sin embargo el Ni<sub>e</sub> se correlacionó con Ni<sub>t</sub> en los Fluvisoles de ambas industrias (Cuadros 41 y 43) y en los Vertisoles de la BC (Cuadro 42) y aunque los contenidos están muy por debajo de lo considerado como tóxico para cultivos (SEMARNAT, 2001), pequeñas cantidades están pasando a la solución del suelo y pudieran ser absorbidos por la caña de azúcar u otros cultivos y ser potencialmente tóxico si aumenta su concentración (He *et al.*, 2005). El Ni es un

metal considerado micronutriente esencial para el crecimiento de las plantas (Küpper y Kroneck, 2007) y la disponibilidad encontrada no es tóxica para el cultivo de caña de azúcar.

Cuadro 40. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Vertisoles del IPBJ.

	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>	Fe <sub>e</sub>	Cu <sub>e</sub>	Zn <sub>e</sub>	Mn <sub>e</sub>	Pb <sub>e</sub>	Ni <sub>e</sub>
Fe <sub>t</sub>	1.00	-0.62	0.82	0.62	0.68	0.74*	0.81**	-0.47	0.21	0.22	0.44	0.56	0.48
Cu <sub>t</sub>		1.00	-0.11	-0.06	0.15	0.03	-0.07	0.50	0.53	-0.21	-0.17	-0.03	-0.19
Zn <sub>t</sub>			1.00	0.76*	0.94**	0.96**	0.96**	-0.19	0.67*	0.32	0.55	0.68*	0.54
Mn <sub>t</sub>				1.00	0.79**	0.81**	0.81**	-0.32	0.45	0.14	0.69*	0.34	0.46
Pb <sub>t</sub>					1.00	0.97**	0.94**	-0.25	0.68*	0.11	0.41	0.56	0.37
Ni <sub>t</sub>						1.00	0.98**	-0.25	0.71*	0.10	0.46	0.58**	0.41
V <sub>t</sub>							1.00	-0.24	0.66*	0.19	0.52	0.63	0.48
Fe <sub>e</sub>								1.00	0.41	0.07	0.28	0.40	0.46
Cu <sub>e</sub>									1.00	0.15	0.40	0.64	0.45
Zn <sub>e</sub>										1.00	0.35	0.07	0.22
Mn <sub>e</sub>											1.00	0.56	0.89**
Pb <sub>e</sub>												1.00	0.84**
Ni <sub>e</sub>													1.00

\*Correlación significativa al 0.05

\*\*Correlación significativa al 0.01

Cuadro 41. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Fluvisoles del IPBJ.

	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>	Fe <sub>e</sub>	Cu <sub>e</sub>	Zn <sub>e</sub>	Mn <sub>e</sub>	Pb <sub>e</sub>	Ni <sub>e</sub>
Fe <sub>t</sub>	1.00	0.81**	0.90**	0.79**	0.82**	0.95**	0.81**	-0.53	0.45	0.05	0.70*	-0.111	0.80**
Cu <sub>t</sub>		1.00	0.91**	0.52	0.53	0.92**	0.75*	-0.56	0.76*	0.07	0.48	0.01	0.80**
Zn <sub>t</sub>			1.00	0.56	0.67*	0.91**	0.63	-0.41	0.74*	0.17	0.54	0.15	0.80**
Mn <sub>t</sub>				1.00	0.76*	.76*	0.82**	-0.71*	0.13	0.02	0.90**	-0.494	0.74*
Pb <sub>t</sub>					1.00	0.75*	0.72*	-0.54	0.38	0.16	0.76*	-0.192	0.78**
Ni <sub>t</sub>						1.00	0.85**	-0.70	0.57	-0.01	0.70*	-0.188	0.87**
V <sub>t</sub>							1.00	-0.71	0.37	0.08	0.74	-0.375	0.82**
Fe <sub>e</sub>								1.00	-0.18	0.29	-0.71*	0.71*	-0.67*
Cu <sub>e</sub>									1.00	0.53	0.29	0.44	0.70*
Zn <sub>e</sub>										1.00	0.30	0.50	0.40
Mn <sub>e</sub>											1.00	-0.39	0.85**
Pb <sub>e</sub>												1.00	-0.16
Ni <sub>e</sub>													1.00

\*Correlación significativa al 0.05

\*\*Correlación significativa al 0.01

Cuadro 42. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Vertisoles de la BC.

	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>	Fe <sub>e</sub>	Cu <sub>e</sub>	Zn <sub>e</sub>	Mn <sub>e</sub>	Pb <sub>e</sub>	Ni <sub>e</sub>
Fe <sub>t</sub>	1.00	0.75*	0.84**	-0.03	0.97**	0.97**	0.91**	0.37	0.70*	-0.17	-0.13	0.48	0.81**
Cu <sub>t</sub>		1.00	0.98**	-0.50	0.77*	0.82**	0.89**	0.16	0.95**	-0.37	-0.53	0.88**	0.36
Zn <sub>t</sub>			1.00	-0.40	0.84	0.90**	0.92**	0.17	0.92**	-0.32	-0.47	0.85**	0.49
Mn <sub>t</sub>				1.00	-0.06	-0.17	-0.21	-0.05	-0.59	0.56	0.93**	-0.65	0.35
Pb <sub>t</sub>					1.00	0.95**	0.88**	0.31	0.70*	-0.15	-0.16	0.50	0.72*
Ni <sub>t</sub>						1.00	0.92**	0.26	0.78**	-0.15	-0.30	0.58	0.77**
V <sub>t</sub>							1.00	0.15	0.82**	-0.33	-0.29	0.61	0.65
Fe <sub>e</sub>								1.00	0.39	0.13	0.17	0.15	0.36
Cu <sub>e</sub>									1.00	-0.33	-0.55	0.86**	0.37
Zn <sub>e</sub>										1.00	0.58	-0.45	0.29
Mn <sub>e</sub>											1.00	-0.64	0.23
Pb <sub>e</sub>												1.00	0.01
Ni <sub>e</sub>													1.00

\*Correlación significativa al 0.05

\*\*Correlación significativa al 0.01

Cuadro 43. Correlación entre metales totales y extractables en suelos Fluvisoles de la BC.

	Fe <sub>t</sub>	Cu <sub>t</sub>	Zn <sub>t</sub>	Mn <sub>t</sub>	Pb <sub>t</sub>	Ni <sub>t</sub>	V <sub>t</sub>	Fe <sub>e</sub>	Cu <sub>e</sub>	Zn <sub>e</sub>	Mn <sub>e</sub>	Pb <sub>e</sub>	Ni <sub>e</sub>
Fe <sub>t</sub>	1.00	0.76	0.97**	0.19	0.95**	0.93**	0.79*	0.48	0.79**	0.10	-0.04	0.82**	0.74*
Cu <sub>t</sub>		1.00	0.84*	0.27	0.86*	0.82**	0.83**	0.327	0.92**	0.62	0.09	0.57	0.42
Zn <sub>t</sub>			1.00	0.25	0.98**	0.95**	0.84**	0.56	0.82**	0.24	0.04	0.87**	0.76*
Mn <sub>t</sub>				1.00	0.25	0.15	0.42	0.13	0.15	0.57	0.81**	-0.04	0.44
Pb <sub>t</sub>					1.00	0.95**	0.86**	0.39	0.84*	0.27	0.03	0.83	0.71*
Ni <sub>t</sub>						1.00	0.73*	0.47	0.89**	0.17	0.10	0.85**	0.73*
V <sub>t</sub>							1.00	0.39	0.65	0.57	0.06	0.63	0.44
Fe <sub>e</sub>								1.00	0.23	0.11	0.11	0.65	0.55
Cu <sub>e</sub>									1.00	0.37	0.12	0.56	0.50
Zn <sub>e</sub>										1.00	0.41	-0.02	-0.06
Mn <sub>e</sub>											1.00	-0.09	0.37
Pb <sub>e</sub>												1.00	0.73*
Ni <sub>e</sub>													1.00

\* Correlación significativa al 0.05

\*\* Correlación significativa al 0.01

### 5.3. Metales pesados totales en planta

#### 5.3.1. Cadmio (Cd<sub>p</sub>), Plomo (Pb<sub>p</sub>), Niquel (Ni<sub>p</sub>) y Vanadio (V<sub>p</sub>) en planta.

Los metales pesados Cd<sub>p</sub>, Pb<sub>p</sub>, Ni<sub>p</sub> y V<sub>p</sub> no se detectaron en hojas del cultivo de caña de azúcar. Estos resultados indican que estos metales en su forma extractables no están siendo absorbidos por lo que el cultivo está libre de los contaminantes.

#### 5.3.2. Hierro en planta (Fe<sub>p</sub>)

Los contenidos de Fe<sub>p</sub> no mostraron diferencia significativa entre suelos, distancias y transectos. El contenido medio de Fe<sub>p</sub> fue de 13.02 mg kg<sup>-1</sup> con un alto coeficiente de variación (Cuadro 44). Este nivel de Fe<sub>p</sub> está muy por debajo de lo considerados como tóxicos para hojas de caña de azúcar (Li *et al.*, 2007) e incluso se encuentra en concentraciones bajas para el cultivo (Salgado *et al.*, 2006).

Cuadro 44. Contenido de hierro en planta de caña de azúcar (Fe<sub>p</sub>) en suelos de la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	17.03	18.26 a	14.77 a	11.47 a
		3.0	25.08			12.45 a
		6.0	23.74			15.15 a
	Fluvisol	0.6	13.68		11.27 a	
		3.0	8.52			
		6.0	21.54			
BC	Vertisol	0.6	6.46	7.78 a		
		3.0	8.92			
		6.0	7.42			
	Fluvisol	0.6	8.70			
		3.0	7.27			
		6.0	7.92			
C.V.	125.5	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	13.02	Transecto (W)	0.07 ns	W x S	0.48 ns	
		Suelo (S)	0.52 ns	W x D	0.84 ns	
		Distancia (D)	0.85 ns	S x D	0.76 ns	
				W x S x D	0.89 ns	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P≤ 0.05)

### 5.3.6. Cobre en planta (Cu<sub>p</sub>)

Los valores de cobre en planta (Cu<sub>p</sub>) no presentaron diferencias estadísticas significativas entre suelos, distancias y transectos. El valor promedio fue 0.12 mg kg<sup>-1</sup> con un coeficiente de variación de 58% (Cuadro 45). Este nivel indica que está por debajo del intervalo de concentraciones consideradas como tóxicas para las plantas (Alloway, 1990; Ross, 1994), y es menor a los reportados por Muchuweti *et al.* (2006) y Li *et al.* (2007) para hojas de caña de azúcar. Por lo que este nutriente se encuentra en estado deficiente para el cultivo de acuerdo con los niveles críticos reportados por Salgado *et al.* (2006).

Cuadro 45. Contenido de cobre en planta de caña de azúcar (Cu<sub>p</sub>) en suelos de la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	0.22	0.12 a	0.12 a	0.15 a
		3.0	0.11			0.10 a
		6.0	0.11			0.11 a
	Fluvisol	0.6	0.08		0.12 a	
		3.0	0.10			
		6.0	0.09			
BC	Vertisol	0.6	0.11	0.12 a		
		3.0	0.08			
		6.0	0.11			
	Fluvisol	0.6	0.20			
		3.0	0.12			
		6.0	0.11			

C.V.	58.26	Prueba de F para:	Interacción:
Media	0.12	Transecto (W)	W x S
		Suelo (S)	W x D
		Distancia (D)	S x D
			W x S x D

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P ≤ 0.05)

### 5.3.7. Zinc en planta (Zn<sub>p</sub>)

El análisis de varianza para el contenido de zinc en planta (Zn<sub>p</sub>) mostró diferencias estadísticas altamente significativas para transectos y no significativa entre distancias y

entre suelos (Cuadro 46). El contenido medio fue de 0.52 mg kg<sup>-1</sup> con un coeficiente de variación de 52%. Wie *et al* (2005) reportan que el contenido de Zn varía de una especie a otra sin importar el lugar de muestreo en áreas cercanas a minas. Pero los valores de Zn<sub>p</sub> en caña de azúcar del área de estudio no sobrepasan los límites considerados tóxicos en plantas (Ross, 1994). Y de acuerdo con Salgado *et al.* (2006) y Muchuweti *et al.* (2006) se encuentran en niveles bajos para la planta de caña de azúcar.

Cuadro 46. Contenido de zinc en planta de caña de azúcar (Zn<sub>p</sub>) en suelos de la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	0.61	0.42 b	0.43 a	0.61 a
		3.0	0.40			0.42 a
		6.0	0.61			0.51 a
	Fluvisol	0.6	0.34		0.61 a	
		3.0	0.23			
		6.0	0.31			
BC	Vertisol	0.6	0.29	0.62 a		
		3.0	0.23			
		6.0	0.42			
	Fluvisol	0.6	1.21			
		3.0	0.84			
		6.0	0.71			
C.V.	51.59	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	0.52	Transecto (W)	0.03 ns	W x S	0.01**	
		Suelo (S)	0.05 ns	W x D	0.72 ns	
		Distancia (D)	0.24 ns	S x D	0.31 ns	
				W x S x D	0.36 ns	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey (P ≤ 0.05)

### 5.3.8. Manganeso en planta (Mn<sub>p</sub>)

El análisis de varianza del contenido de manganeso en planta (Mn<sub>p</sub>), no mostró diferencias estadísticamente significativas entre transectos, suelos y distancias. El contenido medio de Mn<sub>p</sub> fue de 2 mg kg<sup>-1</sup> (Cuadro 47), el cual está muy por debajo de concentraciones tóxicas (Li *et al.*, 2007) por lo que se considera deficiente para el cultivo de caña de azúcar (Salgado *et al.*, 2004; Salgado *et al.*, 2006).

La ausencia de los nutrimentos Fe, Cu, Mn en programas de fertilización limita el balance nutricional del cultivo de caña, que regulan el potencial productivo del cultivo y la calidad del azúcar, por lo que debe considerarse un programa de fertilización sustentable para satisfacer la demanda de la planta.

Cuadro 47. Contenido de manganeso en planta de caña de azúcar ( $Mn_p$ ) en suelos de la Chontalpa, Tabasco.

Industria	Suelo	Distancia (km)	mg kg <sup>-1</sup>	Prueba de Medias		
				Transectos	Suelos	Distancia
IPBJ	Vertisol	0.6	2.37	1.75 a	1.97 a	1.89 a
		3.0	2.70			1.77 a
		6.0	2.27			2.37 a
	Fluvisol	0.6	0.77		2.05 a	
		3.0	1.17			
		6.0	1.22			
BC	Vertisol	0.6	0.92	2.26 a		
		3.0	0.70			
		6.0	2.84			
	Fluvisol	0.6	3.48			
		3.0	2.50			
		6.0	3.13			
C.V.	60.86	Prueba de F para:		Interacción:		
Media	2.00	Transecto (W)	0.22 ns	W x S	0.01*	
		Suelo (S)	0.84 ns	W x D	0.30 ns	
		Distancia (D)	0.45 ns	S x D	0.69 ns	
				W x S x D	0.36 ns	

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juarez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, NS No significativo

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

### 5.3.9. Tendencias de metales pesados en planta, por transecto y por distancia

En los transectos del IPBJ y de la BC se observó que no hay tendencias de acumulación de los metales totales Pb, Ni, V, Cd, Fe, Cu y Zn en el follaje de caña de azúcar, en ninguna de las dos industrias. Solo el  $Mn_p$  en transectos de la BC mostraron tendencias de acumulación del metal en el follaje de la planta en los puntos más cercanos a la fuente industrial (0.6 y 3 km), en ambos suelos (Cuadro 48). No está claro cuál es la fuente de este metal, aunque Ross (1994) y Doménech (2000)

mencionan que la industria petrolera, particularmente la petroquímica, aporta Mn al ambiente a través de las cenizas y llega al suelo por precipitación atmosférica. Estas partículas deben ser arrastradas por los vientos dominantes con dirección noreste-suroeste hasta los 3 km de la BC.

Cuadro 48. Comparación de medias de contenidos de metales totales en planta por transecto y grupo de suelo.

Industria	Suelos	Distancias (km)	Metales (mg kg <sup>-1</sup> )							
			Pbp	Nip	Vp	Cdp	Fep	Cup	Znp	Mnp
IPBJ	Vertisol	0.6	0.01	0.08 a	0.03 a	nd	17.03 a	0.22 a	0.61 a	2.37 a
		3.0	nd	0.04 a	0.03 a	nd	25.08 a	0.11 a	0.61 a	2.70 a
		6.0	nd	0.05 a	0.04 a	nd	23.73 a	0.11 a	0.40 a	2.27 a
	Fluvisol	0.6	nd	nd	nd	nd	13.68 a	0.08 a	0.34 a	0.77 a
		3.0	nd	nd	0.01 a	nd	8.52 a	0.09 a	0.23 a	1.17 a
		6.0	nd	0.07	0.03 a	nd	21.54 a	0.09 a	0.31 a	1.22 a
BC	Vertisol	0.6	nd	nd	0.02 a	nd	6.47 a	0.11 a	0.29 a	0.92 b
		3.0	0.03	0.04	0.05 a	nd	8.92 a	0.08 a	0.23 a	0.70 b
		6.0	nd	nd	0.004 a	nd	7.42 a	0.11 a	0.42 a	2.84 a
	Fluvisol	0.6	nd	nd	0.02 a	nd	6.45 a	0.11 a	0.29 a	0.92 b
		3.0	0.03	0.03	0.05 a	nd	8.91 a	0.08 a	0.23 a	0.70 b
		6.0	nd	nd	0.004 a	nd	7.42 a	0.11 a	0.42 a	2.84 a

IPBJ = Ingenio Presidente Benito Juárez, BC = Bateria Cardenas

\* Significativo, \*\* Altamente significativo, nd = No detectado

Medias con la misma literal dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tuckey ( $P \leq 0.05$ )

### 5.2.3.10. Correlación de metales extractables y totales en planta

No se observó correlación entre los metales totales Fe<sub>p</sub>, Cu<sub>p</sub>, Mn<sub>p</sub>, Ni<sub>p</sub>, Pb<sub>p</sub> y V<sub>p</sub> en plantas y los metales extractables en la solución del suelo, tanto en Vertisoles como en Fluvisoles de las dos industrias (Cuadro 49, 50, 51, 52). Esto sugiere que los contenidos de metales en planta no son variables dependientes de las concentraciones observadas en la solución del suelo.

En los Fluvisoles del IPBJ solamente el Zn<sub>p</sub> presentó relación positiva con su contenido extractable en la solución del suelo (Cuadro 50), lo que indica que está siendo absorbido por la planta de caña de azúcar. Esto es favorable ya que el Zn es un micronutriente esencial para el desarrollo de la planta, además que los contenidos detectados no son considerados tóxicos (Cervantes y Moreno, 1999; Ross, 1994). Y de

acuerdo con Salgado *et al.* (2006) y Muchuweti *et al.* (2006) se encuentran en niveles bajos para la caña de azúcar.

Cuadro 49. Correlación entre metales extractables y totales en plantas en Vertisoles del IPBJ.

	Fe <sub>e</sub>	Cu <sub>e</sub>	Zn <sub>e</sub>	Mn <sub>e</sub>	Pb <sub>e</sub>	Ni <sub>e</sub>	Fe <sub>p</sub>	Cu <sub>p</sub>	Zn <sub>p</sub>	Mn <sub>p</sub>	Pb <sub>p</sub>	Ni <sub>p</sub>
Fe <sub>e</sub>	1.00	0.41	0.07	0.28	0.40	0.46	-0.45	-0.37	-0.25	-0.73*	-0.35	-0.35
Cu <sub>e</sub>		1.00	0.15	0.40	0.64	0.45	0.33	0.27	0.40	-0.02	0.33	0.37
Zn <sub>e</sub>			1.00	0.35	0.07	0.22	-0.36	-0.24	0.43	0.01	-0.47	-0.17
Mn <sub>e</sub>				1.00	0.56	0.89**	-0.19	0.08	0.13	0.09	-0.33	-0.01
Pb <sub>e</sub>					1.00	0.84**	0.10	0.05	0.22	-0.14	-0.06	-0.04
Ni <sub>e</sub>						1.00	-0.18	-0.08	0.08	-0.11	-0.37	-0.20
Fe <sub>p</sub>							1.00	0.39	0.14	0.28	0.73*	0.73*
Cu <sub>p</sub>								1.00	0.55	0.54	0.80**	0.52
Zn <sub>p</sub>									1.00	0.63	0.42	-0.02
Mn <sub>p</sub>										1.00	0.41	0.09
Pb <sub>p</sub>											1.00	0.59
Ni <sub>p</sub>												1.00

\*Correlación significativa al 0.05

\*\*Correlación significativa al 0.01

Cuadro 50. Correlación entre metales extractables y totales en plantas en Fluvisoles del IPBJ.

	Fe <sub>e</sub>	Cu <sub>e</sub>	Zn <sub>e</sub>	Mn <sub>e</sub>	Pb <sub>e</sub>	Ni <sub>e</sub>	Fe <sub>p</sub>	Cu <sub>p</sub>	Zn <sub>p</sub>	Mn <sub>p</sub>	Pb <sub>p</sub>	Ni <sub>p</sub>
Fe <sub>e</sub>	1.00	-0.18	0.29	-0.71*	0.71*	-0.67*	0.08	-0.08	0.33	-0.44	-0.48	-0.22
Cu <sub>e</sub>		1.00	0.53	0.29	0.44	0.70*	-0.08	0.25	0.61	0.65	0.20	0.28
Zn <sub>e</sub>			1.00	0.30	0.50	0.40	-0.12	0.32	0.76*	0.42	-0.48	-0.18
Mn <sub>e</sub>				1.00	-0.39	0.85**	-0.44	0.22	0.12	0.65	0.21	-0.21
Pb <sub>e</sub>					1.00	-0.16	-0.30	0.20	0.58	-0.01	-0.21	-0.28
Ni <sub>e</sub>						1.00	-0.27	0.36	0.35	0.77	0.23	0.06
Fe <sub>p</sub>							1.00	0.53	0.03	-0.07	-0.22	0.79**
Cu <sub>p</sub>								1.00	0.55	0.63	-0.19	0.41
Zn <sub>p</sub>									1.00	0.62	-0.39	-0.06
Mn <sub>p</sub>										1.00	0.24	0.20
Pb <sub>p</sub>											1.00	0.36
Ni <sub>p</sub>												1.00

\*Correlación significativa al 0.05

\*\*Correlación significativa al 0.01

Cuadro 51. Correlación entre metales extractables y totales en plantas en Vertisoles de la BC.

	Fe <sub>e</sub>	Cu <sub>e</sub>	Zn <sub>e</sub>	Mn <sub>e</sub>	Pb <sub>e</sub>	Ni <sub>e</sub>	Fe <sub>p</sub>	Cu <sub>p</sub>	Zn <sub>p</sub>	Mn <sub>p</sub>	Pb <sub>p</sub>	Ni <sub>p</sub>
Fe <sub>e</sub>	1.00	0.39	0.13	0.17	0.15	0.36	-0.56	-0.74*	-0.50	-0.15	-0.39	-0.52
Cu <sub>e</sub>		1.00	-0.33	-0.55	0.86**	0.37	0.35	-0.17	-0.21	-0.16	0.63	0.47
Zn <sub>e</sub>			1.00	0.58	-0.45	0.29	-0.12	-0.32	-0.32	0.03	-0.48	-0.46
Mn <sub>e</sub>				1.00	-0.64	0.23	-0.45	-0.28	-0.22	0.41	-0.68	-0.64
Pb <sub>e</sub>					1.00	0.01	0.34	-0.14	-0.22	-0.30	0.71	0.49
Ni <sub>e</sub>						1.00	-0.01	-0.07	0.259	0.67*	-0.16	-0.09
Fe <sub>p</sub>							1.00	0.70*	0.22	-0.05	0.83**	0.89**
Cu <sub>p</sub>								1.00	0.76*	0.30	0.45	0.70*
Zn <sub>p</sub>									1.00	0.59	0.05	0.33
Mn <sub>p</sub>										1.00	-0.27	-0.12
Pb <sub>p</sub>											1.00	0.94**
Ni <sub>p</sub>												1.00

\* Correlación significativa al 0.05

\*\* Correlación significativa al 0.01

Cuadro 52. Correlación entre metales extractables y totales en plantas en Fluvisoles de la BC.

	Fe <sub>d</sub>	Cu <sub>d</sub>	Zn <sub>d</sub>	Mn <sub>d</sub>	Pb <sub>d</sub>	Ni <sub>d</sub>	Fe <sub>p</sub>	Cu <sub>p</sub>	Zn <sub>p</sub>	Mn <sub>p</sub>	Pb <sub>p</sub>	Ni <sub>p</sub>
Fe <sub>d</sub>	1.00	0.23	0.11	0.11	0.65	0.55	-0.03	-0.26	-0.32	-0.27	-0.18	-0.24
Cu <sub>d</sub>		1.00	0.37	0.12	0.56	0.50	0.20	-0.26	0.17	0.00	-0.29	-0.17
Zn <sub>d</sub>			1.00	0.41	-0.02	-0.06	-0.33	-0.53	-0.53	-0.32	-0.46	-0.52
Mn <sub>d</sub>				1.00	-0.09	0.37	-0.82**	-0.88**	-0.70*	0.14	-0.67*	-0.79**
Pb <sub>d</sub>					1.00	0.73*	0.48	0.08	0.05	0.26	-0.13	-0.02
Ni <sub>d</sub>						1.00	0.08	-0.30	-0.28	0.16	-0.28	-0.27
Fe <sub>p</sub>							1.00	0.83**	0.64	0.07	0.63	0.77*
Cu <sub>p</sub>								1.00	0.73*	0.20	0.72*	0.88**
Zn <sub>p</sub>									1.00	0.22	0.60	0.79**
Mn <sub>p</sub>										1.00	-0.27	-0.05
Pb <sub>p</sub>											1.00	0.93**
Ni <sub>p</sub>												1.00

\* Correlación significativa al 0.05

\*\* Correlación significativa al 0.01

## 6. CONCLUSIONES

Las concentraciones de los metales totales Cd, Pb, Ni, V, Fe, Cu, Zn, Mn en suelos cultivados con caña de azúcar (*Saccharum spp.*) en el transecto entre 0.3 y 6 km al suroeste de la batería de separación de hidrocarburos Cárdenas y del Ingenio Presidente Benito Juárez en la Chontalpa, Tabasco, son inferiores a las consideradas como críticas y no representan contaminación en el suelo.

La ausencia de V y Cd extractable y los contenidos bajos de Pb, Ni, Fe, Cu, Zn y Mn en su forma extractable en los suelos cultivados con caña de azúcar (*Saccharum spp.*) cercanos a la industria petrolera y el Ingenio Presidente Benito Juárez, no indican contaminación.

Existe una tendencia de mayor concentración de los metales Pb, Ni, Fe, Cu, Zn y Mn en sus formas totales y extractables, así como los totales de V, en las distancias entre 3 y 6 km, tanto en Vertisoles como en Fluvisoles, para ambas industrias.

Las variables del suelo materia orgánica, pH y capacidad de intercambio catiónico se correlacionaron positivamente sobre todo con los metales totales Zn, Pb, seguido del Fe, Cu, Ni y V, indicando que al aumentar estas variables se incrementa la retención de los metales. Inversamente, la arcilla se correlacionó negativamente con el Pb y Ni totales.

El Ni es el único elemento que se correlacionó en sus formas totales y extractables en los Fluvisoles de las dos industrias, sin llegar a ser tóxico para los cultivos, siendo este un elemento esencial para el desarrollo de la planta.

No se detectó Pb, Ni, V y Cd en las hojas de la caña de azúcar y, de los metales presentes en los suelos, sólo son absorbidos Fe, Cu, Zn y Mn por la planta en cantidades pequeñas que no representan peligro de toxicidad, de los cuales los últimos cuatro son elementos esenciales para el cultivo. Las concentraciones en el follaje de la caña de azúcar indican deficiencia nutricional.

## 7. LITERATURA CITADA

ASERCA, 2006. Información de la FAO. [www.infoaserca.gob.mx](http://www.infoaserca.gob.mx).

Allan J. E. 1971. The preparation of agricultural samples for analysis by atomic absorption spectroscopy. Varian techtron, Walnut Creek, California. Pp. 24-32.

Alloway B.J. 1990. Heavy metals in soils. 1a edition. Halsted press John Wiley & Sons, inc. New York, E.U.A.

Atanassova I. and M. Okazaki. 1996. Adsorción-desorción characteristics of high levels of copper in soil clay fractions. Tokyo University of Agriculture and Technology. Fuchu, Tokyo Japan. Pp. 214-228.

Baird C. 2002. Química ambiental. 1ª edición. Editorial Reverté S.A. México, D. F. pp 391- 429

Brady C. N. 1990. Nature and properties of soils. Chapter 18: Soils and chemical pollution. Tenth edition. Macmillan Publishing Company. New York. USA. Pp. 528 – 534.

Cervantes C. y S. R. Moreno. 1999. Contaminación ambiental por metales pesados: Impacto en seres vivos. 1ª edición. Editorial AGT editor S.A. México, D.F. pp. 99-112.

Darren, G. and P. Mallery. 2000. SPSS for windows step by step: a simple guide and reference, 10.0 update. 3rd. ed. Statistical package for Social Sciences. Chicago, Illinois, USA.

De Matos A. T., Fontes M. P. T., Da Costa L. M., and Martinez M. A. 2000. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. Environmental pollution. No. 111. Pp. 429-435.

Del Águila-Juárez P., De la Fuente L. J. y Vaca P. R. 2005. Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos de la cuenca alta del Río Lerma. Universidad Autónoma del Estado de México. Revista Ciencia Ergo Sum. Vol. 12 No. 002 Pp. 155-161.

Doménech X. 2000. Química del suelo: el impacto de los contaminantes. 3ª edición. Ediciones Miraguano. Departamento de química. Universidad Autónoma de Barcelona. Madrid, España. 190 p.

Fergusson J. F. 1990. The heavy elements. chemistry, environmental Impact and health effects. Pergamon Press. U.S.A. 98 p.

- FitzPatrick E.A. 1996. Introducción a las ciencias del suelo. 1ª edición. Editorial Trillas. México, D.F. 130 p.
- Flores C. S. 2001. Las variedades de caña de azúcar en México. 1ª edición. Editorial Trillas. México. 322 p.
- Fuentes Y. J. L. 2001. Iniciación a la botánica. 1ª edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. 230 p.
- Jenne, E. A. 1998. Adsorption of metals by goemedia: data analysis, modeling, controlling factors, and related issues. In: adsorption of metals by geomedia. Jenne E. A. (ed). Academic Press. San Diego, Usa. Pp. 1-73
- García E. 2003. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. Revista Investigaciones Geográficas. Abril. No. 050. Universidad Autónoma de México. Distrito Federal, México. Pp. 67-76.
- García L. E., Zavala C. J. y Palma L. D. J. 2006. Caracterización de comunidades vegetales en un área afectada por derrames de hidrocarburos. Terra Latinoamericana. Vol. 24. No. 1. pp. 17-26
- Greulach A. V. y Adams J. E. 1980. Las plantas: introducción a la botanica moderna. 1ª edición. 2ª reimpresión. Editorial LIMUSA. México, D.F. Pp. 369-392.
- Harte J. C., H. R. Scheneider and C. Shirey. 1991. Toxics A to Z. A guide to everyday pollution hazards. University of California Press. California, U.S.A. 76 p.
- He L. Z., Yang. E. X. and Stoffella J. P. 2005. Trace elements en agroecosystem and impacts on the environment. Journal of trace elements en medicine and biology. No. 19. Pp. 125-140.
- INEGI. 2005. Cuaderno estadístico municipal. Cárdenas, Tabasco. Editorial INEGI. Gobierno del Estado. H. Ayuntamiento Constitucional de Cárdenas. Aguascalientes, Ags., México. 32 p.
- Karnitz Jr. O., Alves G. L. V., Perin de M. J. C., Roberto B. V., Sacramento M. T. M., Pereira de F. G. R. and Frederic G. L. 2007. Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse. Bioresource Technology. Vol. 98. Pp. 1291-1297.
- Küpper H. and Kroneck M.H.P. 2007. Nickel in the environment and its role in the metabolism of plants and cyanobacteria. In: Metals ion in life sciences. Edited by Sigel A., Sigel H., and K.O. Sigel R. Vol. 2. Jhon Wiley & Sons, Ltd. Pp. 32-62

- Lagunes-Espinoza L. del C., G. J. del C. Méndez, J. Zavala-Cruz y D. J. Palma-López 1995. Cuantificación de metales pesados en suelos y cultivos del ejido Cumuapa, Tabasco. En: La investigación edafológica en México 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria, Tamaulipas, México. P. 44.
- Li M. S., Luo Y. P. and Su Z. Y. 2007. Heavy metal concentrations in soils and plants accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. *Environmental pollution*. No. 147. Pp. 168-175.
- López de LLergo R. 2003. Principales rasgos geográficos de la República Mexicana. *Revista Investigaciones geográficas*. Abril. No. 050. Universidad Autónoma de México. Distrito Federal, México. Pp. 26-41.
- LGEEPA. 2006. Ley general de equilibrio ecológico y protección al ambiente. DOF 23-05-2006. México D.F. 95 p.
- Marín A. A. 2006. Caracterización, clasificación y cartografía de los suelos cítricos de Tabasco. Tesis de maestría en ciencias. Producción agroalimentaria en el trópico. Campus Tabasco Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco. 156 p.
- Micó C., Peris M., Recatalá L. and Sánchez J. 2007. Baseline values for heavy metals in agricultural soils in a European Mediterranean region. *Science of the total environment magazine*. No. 378. Pp. 13-17.
- Muchuweti M., Birkett W. J., Chinyanga E., Zvauya R., Scrimshaw D. M. and Lester J. N. 2006. Heavy metals content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health. *Agriculture ecosystems & environment*. Vol. 112. Pp. 41-48.
- Música V., A. Amador Ma., M. Torres y J. de J. Figueroa 2003. Mercurio y metales pesados en cenizas provenientes de procesos de combustión e incineración. *Revista internacional de contaminación ambiental*. Vol. 19, número 002. Universidad Nacional Autónoma de México. D. F., México. P. 93-100.
- Ng Kee-Kwong K. F., A. Soobadar., V. Toory and M. A. Bholah. 2005. Leaching of heavy metals, nitrate and organic micropollutants after application of sewage sludge to sugarcane in Mauritius. In proceedings of the XXV congress. Volumen 2. 30 January – 4 February 2005. Edited by D. M. Hogarth. Publisher by the XXV ISSCT Congreso Organising Committee. Aragua, Guatemala City, Guatemala. Pp. 41-45.
- Ortiz V.B. y Ortiz S.C.A.. 1993. Edafología. Suelos. UACH. Chapingo, México. 331 p.

- Páez-Osuna, F., 2005. Efecto de los metales. In: Botello A.V., J. Rendon Von Osten., G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernández (Eds). Golfo de México, contaminación ambiental: Diagnostico y tendencias. 2ª edición. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Palma-López D. J. y D. J. Cisneros. 2000. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. I. 2ª edición. Editado por ISPROTAB-Fundación Produce Tabasco-Colegio de Postgraduados. Villahermosa, Tabasco, México. 118 p.
- Palma-López D. J. y A. Triano S. (Comps). 2002. Plan de uso sustentable de los suelos de Tabasco. Vol. II. Editado por Colegio de Postgraduados-ISPROTAB. Villahermosa Tabasco, México. 122 p.
- Palma-López D. J., J. Cisneros D., E. Moreno C. y Rincón-Ramírez J. A. 2007. Suelos de Tabasco su uso y manejo sustentable. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-Fundación Produce Tabasco A.C. Villahermosa, Tabasco, México. 195 p.
- Petaloti C., Triantafyllou a., Kouimtzis T. and Samara C. 2006. Trace elements in atmospheric particulate matter over a coal burning power production area of western Macedonia, Greece. Chemosphere magazine No. 65 Pp. 2233-2243.
- Petrovich M., Kastelan-Macan and M. Horvat J.1998. Interactive sorption of metal ions and humic acids onto mineral particles. Faculty of Chemical Engineering and Technology, University of Zagreb, Marulicev. Zagreb, Croatia. Pp. 41-56.
- Porta C. J., R. M. López-Acevedo y C. Roquero L. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª edición. Editorial GRAFO S.A. España. Pp 749-772.
- Ramachandran V. and D'Souza. 1998. Adsorción of cadmium by indian soils. In: water, air and soil pollution 111. Netherlands, India. Pp 225-234.
- Rayment G. E., Jeffrey A. J. and Barry G. A. 2008. Heavy metals in Australian sugarcane. Communications en soil science and plant analysis. 33:15. Pp. 3203-3212.
- Rebolledo R. H. H. 1999. SAS en microcomputadora. Análisis estadístico de datos experimentales. 8ª Edición. Departamento de suelos Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo. Edo. De México. 175 p.
- Ribon-Carrillo M. A., Salgado-García. S., Palma-López D. J. y Lagunes-Espinoza L. del C. 2003. Propiedades químicas y físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar. En: Revista Interciencia. Vol. 28 No. 3. Caracas Venezuela. Pp. 154-159.

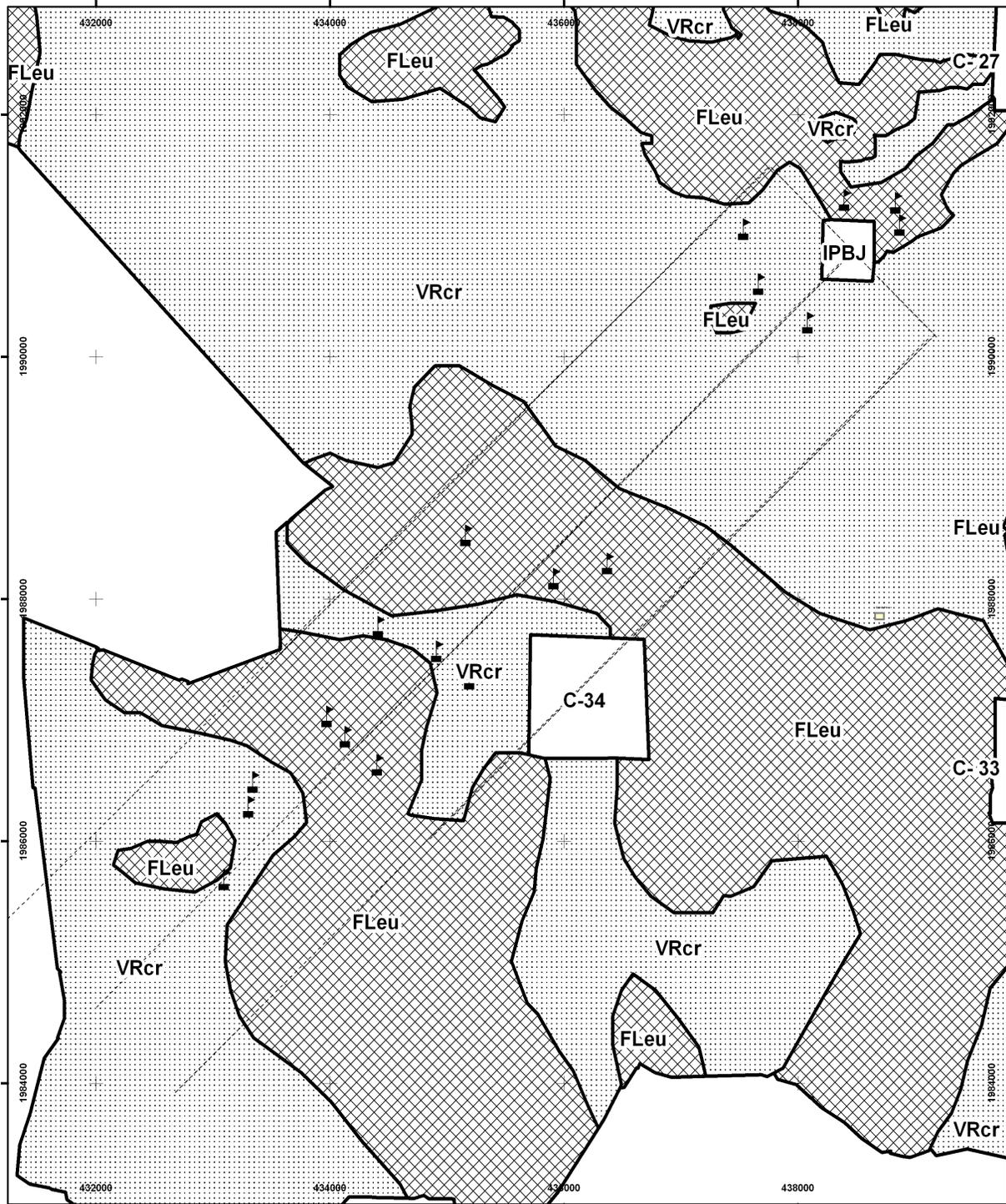
- Ross S. M. 1994. Sources and forms of potentially toxic metals in soil-plant systems. In: Toxic metals in soil-plant systems. 1<sup>a</sup> edición. ed. Ross S. M. Ed. John Wiley and Sons. Toronto, Canada. Pp. 3-26.
- Salgado G. S., Bucio A. L., Riestra D. D. y Lagunes E. L. del C. 2003. Caña de azúcar hacia un manejo sustentable. 1<sup>a</sup> edición, 1<sup>a</sup> Reimpresión. Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados-Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco. Villahermosa, Tabasco, México. 394 p.
- Salgado G. S., Palma-López D. J., Lagunes E. L. del C., Ortiz-García C. F. y Ascencio-Rivera J. M. 2004. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilización en caña de azúcar (SIRDF): Ingenio Santa Rosalía. 1<sup>a</sup> edición, Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 69 p.
- Salgado G. S., Palma-López D. J., Lagunes E. L. del C., y Castelán-Estrada M. 2006. Manual para el muestreo de suelos plantas y aguas e interpretación de análisis. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, ISPROTAB, H. Cárdenas, Tabasco, México. 90 p.
- Salgado G. S., Palma-López D. J., Zavala C. J., Lagunes E. L. del C., Ortiz-García C. F., Castelan E. M., Guerrero P. A., Moreno C. E. y Rincón R. J.A., 2008. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes (SIRCF): Ingenio AZSUREMEX. SAGARPA-Colegio de Postgraduados-Fundación Produce Tabasco-SEDAFOP-Gobierno del Estado de Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco 250 p.
- Salgado-García S., D. J. Palma-López, J. Zavala-Cruz, L.C. Lagunas-Espinoza, M. Castelan-Estrada, C. F. Ortiz-García, J.F. Juarez-López, O. Ruiz R., L. Armida A. y J.A. Rincón-Ramirez. 2009. Sistema integrado para recomendar dosis de fertilizantes en caña de azúcar (SIRCF): Ingenio Presidente Benito Juarez. Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 81 p.
- Sauve S., M. McBride B., W. Norvell A. and W. Hendershot H. 1996. Copper solubility and speciation of in situ contaminated soils: effects of copper level, pH and arganic matter. Water, air and soil pollution. Netherlands. No. 100. pp. 133-149.
- SEMARNAT. 2001. Norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. Diario Oficial de la Nación. México, D.F.73 p.
- Segura M. S. I., A. da Silva O., M. Nikaido, M.B. Trevilato T., A. Bocio, M. M. Takayanagui A., and L. Domingo J. 2005. Metals levels in sugar cane (*Saccharum* spp.) simples from an area under the influence of a municipal landfill and a medical waste treatment system in Brasil. Revist enviroment international. No. 32. Pp. 52-57.

- Sereno M. L., S. Almeida R., Nishimura S. and Figueira A. 2007. Response of sugarcane to increasing concentrations of copper and cadmium and expression of metallothionein genes. *Journal of Plant Physiology* No. 164. Pp. 1499-1515.
- Siebe C., Cram S., Herre A. y Fernández-Buces N. 2005. Distribución de metales pesados en suelos de la llanura aluvial baja del activo Cinco Presidentes, Tabasco. In: Botello A.V., J. Rendon Von Osten., G. Gold-Bouchot y C. Agraz-Hernandez (Eds). *Golfo de México, contaminación ambiental: Diagnostico y tendencias*. 2ª edición. Univ. Autón. de Campeche, Univ. Autón. de México, Instituto Nacional de Ecología. 696 p.
- Tembo D. B., Sichilongo K. and Cernak J. 2006. Distribution of copper, lead, cadmium and zinc concentrations in soils around Kabwe town in Zambia. *Chemosphere magazine* No. 63 Pp. 497-501.
- Trujillo-Narcia A. y Lagunes-Espinosa L. del C. 1995. Afectaciones petroleras en suelos y cultivos en el Estado de Tabasco. En: *La investigación edafológica en México 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Cd. Victoria, Tamaulipas, México. P. 40.
- Unión Nacional de cañeros. 2006. Informe técnico anual. México D.F. 25 p.
- Vázquez A. A. 1999. Evaluación del riesgo a la contaminación con metales pesados, en la región del Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, Edo. De México. 133 p.
- Volke S. T., J. A. Velasco T. y D. de la Rosa P. 2005. Suelos contaminados por metales pesados y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. 1ª edición. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México, D.F. 120 p
- West R. C., N. P. Psuty y B. G. Thom. 1987. *Las tierras bajas de Tabasco en el Sureste de México*. 3ª edición. Gobierno del estado de Tabasco. Instituto de cultura de Tabasco. Villahermosa, Tabasco. 409 p.
- Wei S., Zhou Q. and Wang X. 2005. Identification de weed plants excluding the uptake of heavy metals. *Environment International*. Vol. 31. Pp. 829-834.
- Zavala C. J., S. Salgado G., L. del C. Lagunes E., L. A. Aceves N. y A. Ruiz B. 1995. Metales pesados e hidrocarburos en suelos del Plan Chontalpa, Tabasco. En: *La investigación edafológica en México 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Cd Victoria, Tamaulipas, México. Pp. 43.

Zavala C. J., D. J. Palma L. y A. Ruiz B. 2003. Metales pesados en tierras y granos de maíz. En: Impacto ambiental en las tierras del campo petrolero samaria, Tabasco. Editores: Zavala C. J., L. del C. Lagunes-Espinoza y D. J. Palma-López. Villahermosa, Tabasco, México. Pp.73-93.

# **ANEXOS**

**ANEXO 1. Mapa de localización de los sitios de muestreo a partir del IPBJ.**



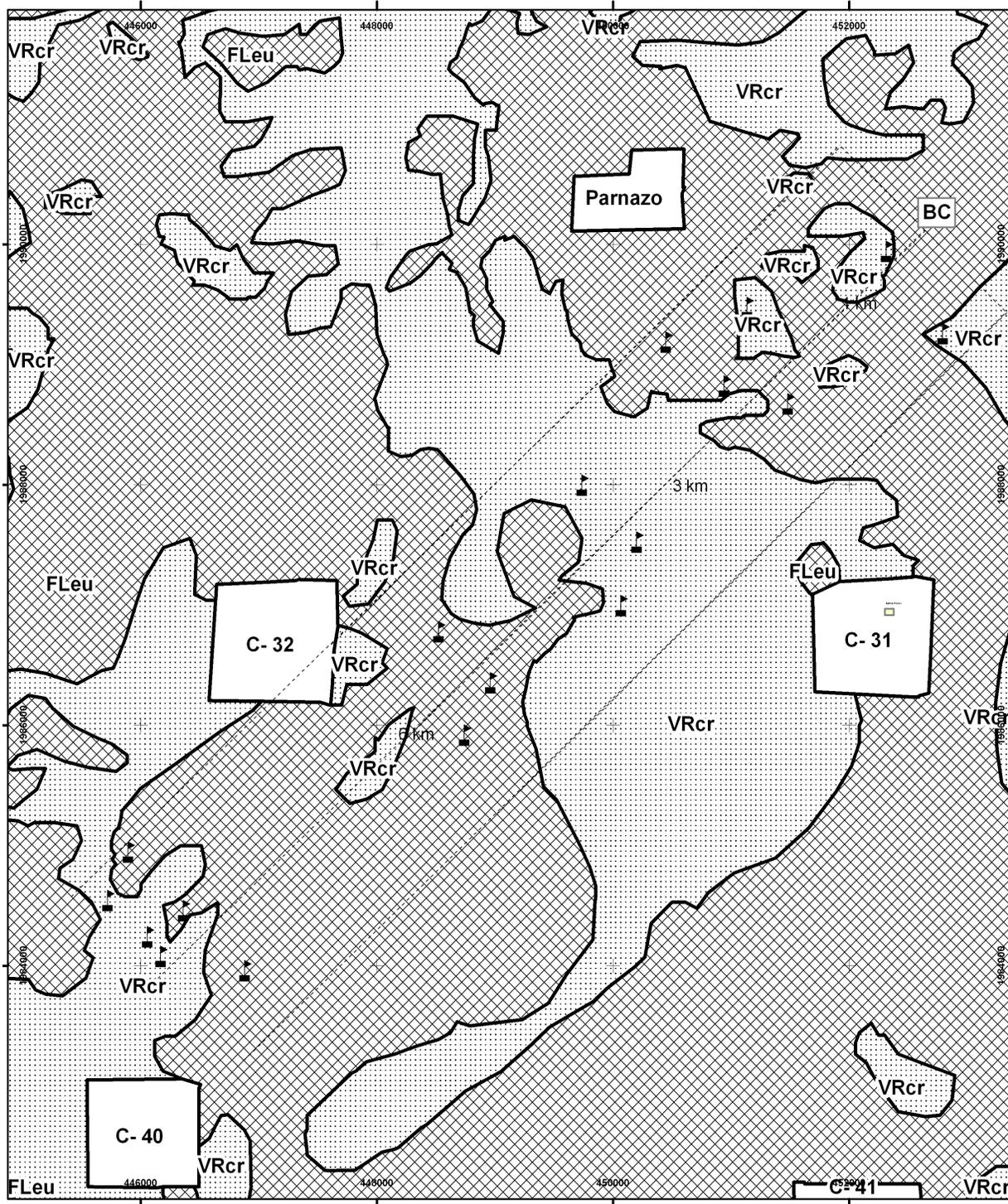
0 250 500 1,000 1,500  
Metros



Labsig-CP-Campus Tabasco  
Proyección UTM Cuadrícula a cada 1000 m  
Datum WGS84  
Diseño Ing. Antonio Lopez C.

-  Puntos de muestreo
-  Fluvisoles
-  Vertisoles

**ANEXO 2. Mapa de localización de los sitios de muestreo a partir de la BC.**



Labsig-CP-Campus Tabasco  
 Proyección UTM Cuadrícula a cada 1000 m  
 Datum WGS84  
 Diseñó Ing. Antonio Lopez C.

-  Puntos de muestreo
-  Fluvisoles
-  Vertisoles

### **ANEXO 3. Fotografías de fuentes de contaminación, muestreo de suelos y plantas y actividades de laboratorio**

Emisión de gases a la atmosfera de la insdustria petroquimica.



Emisión de gases a la atmosfera de Ingenios azucareros.



Muestreo de suelos y planta en campo.



Procesamiento de muestras de suelo en laboratorio.



Procesamiento de muestras de planta en laboratorio.



Determinación de propiedades del suelo.



Determinación de metales pesados en suelos y planta con un IPC-MS.

