



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Boca del Río

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

SERETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RIO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS
PLOMO Y CADMIO EN SUELOS DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN EL
MUNICIPIO DE COTAXTLA, VERACRUZ”**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

Ing. Miguel Ángel Islas Arellano

DIRECTOR:

Dr. Arturo García Saldaña

CO-DIRECTOR:

M.I Isabel Araceli Amaro Espejo

ASESORAS:

Dra. Fabiola Lango Reynoso

Dra. Gabycarmen Navarrete Rodríguez

DICIEMBRE, 2020

BOCA DEL RÍO, VERACRUZ



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba C.P.94290
Boca del Río, Veracruz. Tel. (229) 690-5010 e-mail: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

Número Registro: **A-08016-150119**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 10:00 horas del día 20 del mes de noviembre de 2020 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

"Evaluación de la concentración de metales pesados plomo y cadmio en suelos de cultivos agrícolas en el municipio de Cotaxtla, Veracruz"

Que presenta el (la) alumno(a):

MIGUEL ANGEL ISLAS ARELLANO
Aspirante al Grado de:

Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron SU APROBACIÓN, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

LA COMISIÓN REVISORA:

DR. ARTURO GARCÍA SALDAÑA
Director

M.I. ISABEL ARACELI AMARO ESPEJO
Co-Director

DRA. GABYCARMEN NAVARRETE RODRIGUEZ
Asesor

DRA. FABIOLA LANGO REYNOSO
Asesor





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Boca del Río, Ver., **21/NOVIEMBRE/2020**
Asunto: **CONSTANCIA DE
NO INCONVENIENCIA**

LIC. MAGALI DE LOURDES MARTÍNEZ CANALES
JEFA DEL DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
Presente.

AT N. LIC. SONIA CONCEPCIÓN SOLÍS SOLÍS
GESTOR DE TITULACIÓN
Presente.

Por medio del presente, me permito hacer constar que el(a) candidato(a) a Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental al **C. MIGUEL ANGEL ISLAS ARELLANO**, de la generación 2018 - 2020 con número de control **18990042**, cumplió con todos los requisitos para su liberación como tesista, mismos que incluyen la presentación del manuscrito final de tesis autorizado por su director de tesis **DR. ARTURO GARCIA SALDAÑA**, y el envío del artículo derivado de su tesis de grado a una revista indexada.

Por lo anterior no tengo inconveniente en que realice los trámites correspondientes para el acto recepcional para la obtención del grado de Maestro en Ciencias, en la fecha y hora que defina el candidato con su Director de tesis.

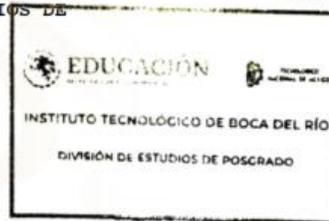
Sin otro particular y para los fines legales que corresponda, quedo de usted.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros males responderemos

Vo.Bo.

M.C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFA DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DR. ARTURO GARCIA SALDAÑA
DIRECTOR DE TESIS



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.F. 94290
Tel. (229) 690 5010 correo: dir01.bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río
Subdirección Académica
División de Estudios de Posgrado e Investigación

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Boca del Río, Ver **21/NOVIEMBRE/2020**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**MIGUEL ANGEL ISLAS ARELLANO
PASANTE DEL PROGRAMA MAestrÍA EN
CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL
PRESENTE**

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO, desarrollada por usted cuyo título es:

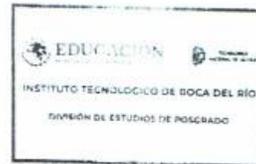
"EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS PLOMO Y CADMIO EN SUELOS DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN EL MUNICIPIO DE COTAXTLA, VERACRUZ"

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede AUTORIZACIÓN para que proceda a su impresión.

ATENTAMENTE
*Excelencia en Educación Tecnológica®
Por nuestros mares responderemos*

M.C. ANA LETICIA PLATAS PINOS
JEFA DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

c.c.p. Coordinación del Programa MCIA
c.c.p. Expediente



Km. 12 Carr. Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 24290
Tel. (229) 690 5010 correo: dir01_bdelrio@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.bdelrio.tecnm.mx





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

LICENCIA DE USO OTORGADA POR (Ing. Miguel Ángel Islas Arellano), de nacionalidad Mexicana mayor de edad, con domicilio ubicado en calle Hidalgo S/N Colonia centro, Zacualpan, Veracruz, en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **"EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS PLOMO Y CADMIO EN SUELOS DE CULTIVOS AGRÍCOLAS EN EL MUNICIPIO DE COTAXTLA, VERACRUZ"** en adelante **"LA OBRA"** quien para todos los fines del presente documento se denominará **"EL AUTOR Y/O EL TITULAR"**, a favor del **Instituto Tecnológico de Boca del Río** del Tecnológico Nacional de México, la cual se registrá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA –OBJETO: "EL AUTOR Y/O TITULAR", mediante el presente documento otorga al Instituto Tecnológico de **Boca del Río** del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **"LA OBRA"**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

SEGUNDA - TERRITORIO: La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

TERCERA -ALCANCE: La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **"LA OBRA"** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse.

en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar, conocido o por conocerse.

CUARTA – EXCLUSIVIDAD: La presente licencia de so aquí establecida no implica exclusividad en favor del Instituto Tecnológico de **Boca del Río**; por lo tanto, **"EL AUTOR Y/O TITULAR"** conserva los derechos patrimoniales y morales de **"LA OBRA"**, objeto del presente documento.

QUINTA – CRÉDITOS: El Instituto Tecnológico de **Boca del Río** y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **"AUTOR Y/O TITULAR"** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **"LA OBRA"**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

SEXTA – AUTORÍA: "EL AUTOR Y/O TITULAR" manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **"LA OBRA"** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable.

Dado en la Ciudad de Veracruz, a los 11 días del mes de Diciembre de 2020.

"EL AUTOR Y/O TITULAR" "EL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO"

Ing. Miguel Ángel Islas Arellano



RESUMEN

La contaminación en México por metales pesados es un problema que está en aumento y se ve influenciado principalmente por las actividades antropogénicas. El plomo y el cadmio son metales pesados que no pueden ser metabolizados por los seres vivos y tienden a bioacumularse e introducirse en la cadena trófica. El presente trabajo tuvo por objetivo determinar la concentración de plomo y cadmio en suelo de cinco cultivos agrícolas del municipio de Cotaxtla, Veracruz. Se midieron pH, contenido de materia orgánica (MO), carbono orgánico (CO), conductividad eléctrica (CE), salinidad (S), clase textural, concentraciones de plomo (Pb) y cadmio (Cd) y se calculó el índice de geoacumulación (I_{geo}). Los resultados encontrados de pH oscilaron entre 5.55 a 7.63, con una media de 6.63 ± 0.51 , observando que el 13 % de las UP tiene suelos ligeramente ácidos. La MO y CO variaron de 0.09 a 4.99 y de 0.07 a 3.85 % respectivamente, con una media de 1.83 ± 1.06 y 1.41 ± 0.81 %. Por otro lado, CE y S tuvieron medias de $137.52 \pm 98.34 \mu\text{s CM}^{-1}$ y 0.1 ± 0.02 UP respectivamente. Los resultados de la textura de los suelos mostraron que el 37 % de las UP son franco arenoso, 37 % franco arenoso arcilloso y el 26 % franco arenoso. Los resultados de metales pesados indicaron que el plomo osciló entre 0.041 y 0.164 mg kg^{-1} , con una media de $0.09 \pm 0.03 \text{ mg kg}^{-1}$, el valor más alto se encontró en la localidad de Mecayucan con cultivo de limón. Además, la concentración de cadmio no fue detectada en todas la UP ($<0.01 \text{ mg kg}^{-1}$). Los resultados de I_{geo} indican que los suelos de cultivo no se encuentran contaminados, sin embargo, la presencia de plomo refleja una fuente de contaminación difusa, debido a la aplicación de fertilizantes inorgánicos o agua de riego. Aunque los resultados se encuentran dentro de la normatividad mexicana, será necesario continuar vigilando los niveles de contaminación por impacto de los metales pesados, ya que pueden acumularse a lo largo del tiempo.

Palabras clave: Unidad de Producción (UP), Contaminación, metales pesados, plomo, cadmio, suelo agrícola, contaminación

ABSTRACT

Contamination in Mexico by heavy metals is a problem that is increasing and is mainly influenced by anthropogenic activities. Lead and cadmium are heavy metals that cannot be metabolized by living beings and can bioaccumulate and enter the food chain. The objective of this work had to determine the concentration of lead and cadmium in soil of five agricultural crops in the municipality of Cotaxtla, Veracruz. They were measures pH, organic matter content (OM), organic carbon (CO), electrical conductivity (EC), salinity (S), textural class, lead (Pb) and cadmium (Cd) concentrations were measured and the geoaccumulation index was calculated. (Igeo). The pH results found ranged from 5.55 and 7.63 with a mean of 6.63 ± 0.51 , observing that 13 % of the PU have slightly acid soils; OM and CO ranged from 0.09 and 4.99 and 0.07 and 3.85 % respectively, with a mean of 1.83 ± 1.06 and 1.41 ± 0.81 % respectively. On the other hand, EC and salinity have a mean of $137.52 \pm 98.34 \mu\text{s CM}^{-1}$ and 0.1 ± 0.02 UPS respectively; the textural results showed that 37 % of the PUs are sandy loam, 37 % are clay loam and 26 % are sandy loam. The heavy metal results indicated that lead ranged between 0.041 and 0.164 mg kg⁻¹, with a mean of 0.09 ± 0.03 mg kg⁻¹, the highest value was found in the town of Mecayucan with lemon cultivation; while the cadmium result was not detected in all PU (<0.01 mg kg⁻¹). The Igeo results indicate that the cultivated soils are not contaminated, however, the presence of lead reflects a source of diffuse contamination, which can be through the application of inorganic fertilizers and / or irrigation water. Although the results are within the Mexican regulations, it will be necessary to continue monitoring the levels of contamination due to the impact of heavy metals, since they can accumulate over time.

Keywords: Production Unit (PU), Pollution, heavy metals, impact, agricultural land.

DEDICATORIAS

A Dios, en quien siempre a mi manera encuentro conexión y consuelo.

A mi familia, mi esposa Angélica y mi hijo Isaac, por ser parte fundamental de mi vida y contar con su apoyo en todo momento, SON LO MEJOR QUE TENGO EN LA VIDA.

A mis padres Ángel+ y Maribel, a mis hermanas, por permanecer juntos a pesar de las malas jugadas que nos ha dado la vida.

Y a la familia Bazán Pérez por tanto apoyo y respaldo.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, por el financiamiento de la beca No 2018-000068-02NACF-08116 para mi formación a nivel del Posgrado

Al ITBOCA por la oportunidad de formación

Al Comité de Tesis, en especial a la M.I Araceli por sus enseñanzas y comentarios sobre este trabajo

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Metales pesados.....	4
2.2. Origen de los metales pesados	4
2.3. Plomo.....	5
2.4. Cadmio	5
2.5. Fuentes de metales pesados.....	6
2.5.1 Fuentes agrícolas.....	7
2.5.2. Plantas de tratamientos de aguas residuales	9
2.5.3. Industria.....	9
2.5.4. Incendios forestales	10
2.6. Impacto de los metales pesados en el suelo	10
2.7. Movilidad de los metales pesados en el suelo	12
2.8. Propiedades del suelo que influyen en la disponibilidad de los metales pesados en el suelo.....	13
2.8.1. pH	13
2.8.2. Materia Orgánica	14
2.8.3. Conductividad Eléctrica	15
2.8.4. Salinidad	16
2.8.5. Textura	17
2.9. Absorción y bioacumulación de metales pesados en plantas.....	17
2.10. Índice de geoacumulación (I_{geo})	19
2.11. Efecto de los metales pesados en las plantas	20
2.12. Efecto en la salud.....	21
2.13. Legislación Ambiental Nacional e internacional	21
3. MARCO REFERENCIAL	24
3.1. Lugar de Estudio	24
3.2. Antecedentes.....	24
4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	29
4.1. Situación Problemática.....	29
4.2. Delimitación del problema	29
4.3. Pregunta de Investigación	30
5. HIPÓTESIS	31

6. OBJETIVOS.....	31
6.1 General	31
6.2 Específicos.....	31
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
7.1.Fases del trabajo	32
7.1.1. Fase 1:.....	32
7.1.2. Fase de 2:.....	33
7.1.3. Fase 3:.....	33
7.2. Selección de los sitios de muestreo	33
7.3. Muestreo de Suelos	34
7.3.1. Preparación de las muestras	35
7.4.Determinación de pH.....	35
7.5.Determinación de la conductividad eléctrica y salinidad.....	36
7.6.Determinación de materia orgánica y carbono orgánico	36
7.7.Determinación de textura del suelo.....	38
7.8.Determinación de metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica.....	39
7.9.Determinación del Índice de geoacumulación I_{geo}	40
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
8.1. Variables fisicoquímicas del suelo.....	41
8.1.1.pH	41
8.1.2.Materia Orgánica y Carbono Orgánico.....	43
8.1.3. Conductividad Eléctrica y Salinidad	44
8.1.4. Textura del suelo.....	46
8.2. Concentración de plomo (Pb) y cadmio (Cd).....	48
8.3. Análisis de correlación.....	52
8.4. Índice de geo acumulación I_{geo}	53
9. CONCLUSIONES	55
10. RECOMENDACIONES	56
11. REFERENCIAS.....	57
ANEXO DE TABLAS	71
ANEXO FOTOGRÁFICO	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicacion geografica de Cotaxtla,Veracruz.	24
Figura 2. Representación de las medias de pH por Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.	42
Figura 3. Distribución espacial de las medias de pH por Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.	42
Figura 4 Representación de las medias de materia orgánica y carbón orgánico por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.	43
Figura 5 .Distribución espacial de las medias de materia orgánica por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.....	44
Figura 6. Representación de las medias de conductividad eléctrica por Unisidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.....	45
Figura 7. Representación de las medias de salinidad de las Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.	46
Figura 8. Distribución espacial de las medias de conductividad eléctrica por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.....	46
Figura 9. Características texturales de los suelos agrícolas de las Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.....	47
Figura 10. Se aprecian las medias porcentuales de la concentración de arenas, limos y arcillas en las muestras de suelo de las Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.....	48
Figura 11. Distribución espacial del contenido de Arcillas por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.	48
Figura 12. Comparación de los resultados obtenidos de la concentracion de plomo de las Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.	50
Figura 13. Distribución espacial de plomo por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.....	50
Figura 14 Índice de geoacumulación por Unidad de Producción de la region de Cotaxtla, Veracruz.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de suelos de acuerdo al pH.....	14
Tabla 2. Clasificación de suelos de acuerdo al contenido de materia orgánica.	15
Tabla 3. Clasificación de suelos de acuerdo a la conductividad eléctrica.	16
Tabla 4. Grado de contaminación de acuerdo al Igeo.	20
Tabla 5. Límites de Referencia Nacionales de metales pesados en suelo.	21
Tabla 6. Límites Máximos Permisibles de Metales pesados en Cultivos Agrícolas.....	22
Tabla 7. Límites de Referencia Internacionales.....	23
Tabla 8. Unidades de Produccion Agricola con sus respectivas coordenadas.	33
Tabla 9. Matriz de correlaciones entre textura del suelo, contenido de materia orgánica, carbono orgánico, conductividad eléctrica, pH y contenido de plomo en el suelo.	53

Tabla 10. Resultados de las medias por variables fisicoquímicas (pH, M.O.:materia orgánica, C.O.: carbón orgánico, C.E.: conductividad eléctrica, SAL: salinidad) por Unidad de Produccion Agricola (\pm SD).....	71
Tabla 11. Resultados de las medias de textural (F: Franco, FA: Franco-arenoso, FAA: Franco-arenoso-arcilloso) y metales pesados (mg L-1) por localidad y por cultivo (\pm SD).72	

NOMENCLATURA

Pb:	plomo
PROFEPA:	Procuraduría Federal de Protección al Ambiente
SEMARNAT:	Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
RECENAT:	Recursos Naturales
USEPA:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América por sus siglas en inglés (Unites States Environmental Protection Agency)
Cd:	cadmio
UTM:	(Universal Transverse Mercator)
ETs:	Elementos traza
µm:	Micrómetro
°C:	Grado centígrado
pH:	Potencial Hidrogeno
%:	Porciento
H:	Hidrogeno
MP:	Metales pesados
CE:	Conductividad Eléctrica
MO:	Materia Orgánica
CO:	Carbono Orgánico
I _{geo} :	Índice de geo acumulación
α:	Alfa
r:	Coeficiente de correlación

r^2 :	Coeficiente de determinación
Nm:	Nanómetro
UPS:	Unidades Prácticas de Salinidad
$\mu\text{s/cm}$:	Mico siemens por centímetro
USDA:	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
HNO_3 :	Ácido nítrico
H_3PO_4 :	Ácido fosfórico
nan:	No aplica nivel
NOM:	Norma Oficial Mexicana
Nd:	Sin detección
mg kg^{-1} :	Miligramo por kilogramo
U:	Masa atómica
UP:	Unidad de Producción Agrícola

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un medio heterogéneo muy complejo constituido por minerales y materia orgánica que interaccionan entre ellas y con los elementos que ingresan al suelo. Así mismo, el suelo desempeña diversas funciones de tipo la productivo, ecológicas, biológicas, genéticas y socioeconómicas. Además, el suelo es un sistema abierto ya que intercambia materia y energía con la atmosfera, litosfera, hidrosfera y biosfera, dicho lo anterior el suelo a la vez es fuente y sumidero de diferentes sustancias dentro de las cuales se encuentran los contaminantes como los metales pesados (Larios-Bayona, 2014), es necesario para la vida, aunque no goza de un reconocimiento de su valor ecológico y la relación que guarda con la salud humana (Guzmán *et al.*, 2019).

El plomo y cadmio están dentro de los elementos potencialmente tóxicos de mayor importancia ambiental. Se encuentran dentro de la regulación ambiental Mexicana y generalmente están presentes en sitios contaminados. Pueden estar biodisponibles y movilizarse a la población, a los alimentos y al agua y causar graves problemas de salud.

Por lo antes mencionado, la contaminación por metales pesados y metaloides en el agua, suelo y aire, es una de las problemáticas que amenazan la seguridad agroalimentaria y la salud a nivel global (Reyes *et al.*, 2016). Ahora bien, la necesidad de producir alimentos para una población en crecimiento exponencial, requiere producir más alimentos, en menor superficie y en menor tiempo. Para ello, nos hemos auxiliado de plaguicidas y fertilizantes que garanticen la producción y sanidad de los cultivos.

En la contaminación del suelo por metales pesados están relacionadas diferentes actividades antropogénicas como la agricultura (Pagnanelli *et al.*, 2004). Más aún, los sistemas agrícolas son una de las principales fuentes difusas de contaminación al suelo por metales pesados, esta actividad favorece la acumulación en el suelo y

la introducción a la cadena alimenticia ya se ha por consumo directo de vegetales o por consumo de agua de mantos freáticos. (Kabata y Pendias, 2004).

El uso de plaguicidas y fertilizantes en la agricultura intensiva en México es una práctica habitual. Considerando ahora que los plaguicidas se han utilizado intensivamente aplicándose a los suelos, causando serios efectos negativos al medio ambiente.

Al utilizar plaguicidas de amplio espectro y la falta de conocimiento en cuanto a las dosis de aplicación adecuadas de agroquímicos, en ciertas regiones del planeta, han originado diversos daños a los suelos agrícolas, además de los efectos ecológicos en la zona de aplicación (Carvalho, 1998).

Expertos han estimado que solamente una pequeña fracción del plaguicida aplicado alcanza el sustrato de interés. El exceso de plaguicidas se mueve a través del ambiente contaminando los suelos, el aire, el agua y la biota. Trazas de plaguicidas han sido medidas en la atmósfera, en aguas de lluvias, en aguas superficiales y subterráneas, en suelos y alimentos.

La contaminación de un suelo hace referencia a la presencia de un elemento o de un compuesto químico en una concentración tal, que pueden producir efectos negativos, que se traducen en la pérdida de las aptitudes que solía poseer el suelo para realizar una determinada función o incluso puede llegar a hacer inutilizable el suelo (Peña, 2014).

Es conveniente subrayar que, existe una contaminación por metales pesados cuando el contenido de estos en el suelo excede considerablemente los límites permisibles.

En la actualidad la contaminación ambiental por metales pesados es un tema importante por la presencia de estos metales en el suelo, agua, aire y en los

alimentos. En México, existen diversos reportes de la presencia de metales pesados en ríos, lagos, cultivos, suelo y aire de zonas urbanas, así como en ambientes costeros (Dávila *et al.*, 2012).

El municipio de Cotaxtla en Veracruz, se caracteriza por ser una entidad importante en la producción agrícola, en el año 2007 la producción de limón fue de 1608 has, de papaya 743 has, maíz 1830 has, sandía 85 has y de plátano 22 has, esto nos indica la relevancia en el sector agrícola de este municipio (SEDARPA, 2017).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Metales pesados

Un metal pesado es un elemento químico metálico que tiene una densidad alta y que es tóxico o venenoso en bajas concentraciones (Nedelkoska y Doran, 2000). y está dentro de grupo de elementos químicos que presentan propiedades metálicas en el que se incluyen metales de transición, metaloides, lantánidos y actínidos.

De manera general su clasificación se basa en el criterio de la densidad específica, de acuerdo con el cual se incluyen en este grupo los elementos con una densidad igual o mayor a 5 g cm^{-3} . No obstante, algunos autores consideran esta definición inapropiada, ya que la densidad específica no es referencia en cuanto a la toxicidad y radioactividad de un metal (Sepulveda, 2005), de acuerdo con Alloway (2012) el término “metal pesado” se utiliza para referirse a aquellos metales o metaloides con la capacidad de generar problemas de toxicidad. Pero la definición más práctica sería que son aquellos elementos que por su alta toxicidad y persistencia en el medio generan contaminación ambiental en el suelo y agua.

2.2. Origen de los metales pesados

Los metales pesados tienen un origen geogénico o natural ya que se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de sales, minerales u otros compuestos.

Por otra parte, no pueden ser degradados fácilmente de manera natural o biológica ya que no tienen funciones específicas en los seres vivos (Abollino *et al.*, 2002).

El plomo y el cadmio son elementos traza y están presentes en la corteza terrestre en concentraciones relativamente bajas y son expresadas en mg kg^{-1} . Por otro lado, también se tienen un origen antropogénico cuando proceden de las actividades realizadas por el hombre a través de la generación de residuos peligrosos producto de las actividades industriales y agrícolas (Aikpokpodion *et al.*, 2012).

2.3. Plomo

El plomo es un elemento de símbolo químico Pb, su número atómico es 82, su peso atómico es 207.20 u. y se encuentra en las rocas magnéticas y en sedimentos de tipo arcilloso. Además, el plomo se considera dentro del 10 % de los materiales más peligrosos en el mundo para la salud humana (Valdés, 1999). Además, es uno de los metales más usados y conocidos por los seres humanos, es detectable en todas las fases del medio ambiente y en los sistemas biológicos.

El plomo afecta a todos los sistemas del cuerpo humano, los niños son especialmente susceptibles a la exposición del plomo, este reduce el crecimiento y la capacidad auditiva, causa anemia y provoca problemas de déficit de atención, y en valores altos de exposición puede causar daño cerebral y finalmente la muerte (Jauregui *et al.*, 2006).

En las plantas las altas concentraciones de plomo pueden ser tóxicas y pueden provocar un crecimiento lento o un desarrollo anormal en las plantas. El plomo se considera como un contaminante de tipo ecotoxicológico, ya que provoca contaminación ambiental y toxicidad en los seres humanos.

El suelo corre riesgo de estar contaminado por partículas de plomo debido a la carencia o uso inadecuado de los sistemas de eliminación de basura urbana o por el uso de técnicas agrícolas nocivas (Delgado *et al.*, 2014).

2.4. Cadmio

Elemento químico con símbolo Cd, número atómico 48, peso atómico 112.40 u, es un metal dúctil de color blanco con un ligero matiz azulado, en la naturaleza lo encontraremos asociado con el zinc y su estado de oxidación es "+2". En la naturaleza el cadmio lo podemos encontrar en las rocas sedimentarias y magnéticas en forma de sulfuro y óxido de cadmio que son insolubles, el cloruro y el sulfato son solubles y tienden a acumularse en las partículas de arcilla.

El cadmio llega a los terrenos agrícolas por deposición aérea (41 %), con la aplicación de fertilizantes fosfatados (54 %) y por la fertilización con base de estiércol (5 %) (Rodríguez-Serrano *et al.*, 2008).

El cadmio es un elemento no esencial y poco abundante en la corteza terrestre y a bajas concentraciones puede ser tóxico para todos los organismos vivos (Pinto *et al.*, 2004). La principal fuente de contaminación por cadmio en el ser humano es a través del consumo de vegetales contaminados con este metal (Welch *et al.*, 1999).

Se considera que el cadmio es dañino en pequeñas concentraciones y el envenenamiento por cadmio puede producir osteoporosis, cáncer de pulmón, cáncer de próstata, hipertensión, diversas cardiopatías, retraso en la habilidad verbal de los niños, nefrotoxicidad, infertilidad, alteraciones neurológicas y enfermedades vasculares (Contreras *et al.*, 2003).

El cadmio provoca importantes desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte de agua en las plantas (Singh y Tewari, 2003). Las plantas de manera natural han desarrollado defensas contra la contaminación por metales pesados, entre menos flujo de absorción tengan menor es el daño a la misma, específicamente las raíces constituyen una de las principales barreras de defensa mediante la inmovilización del Cadmio por pectinas de la pared celular (Rodríguez-Serrano *et al.*, 2008).

2.5. Fuentes de metales pesados

Los metales pesados se encuentran de forma natural en los suelos, rocas, sedimentos y agua. Sin embargo, con la revolución industrial se han incrementado las concentraciones debido a las actividades antropogénicas (Caso *et al.*, 2004).

Las principales actividades antropogénicas que generan este incremento del plomo en el suelo son: la industria minera, la industria petrolera, las emisiones vehiculares, la disposición final de residuos y la agricultura.

Los depósitos de cadmio en el suelo son producto de las actividades humanas y de la naturaleza ya que este se presenta por la meteorización de la roca madre o por el uso de fertilizantes fosfatados y biosólidos (Ramírez, 2002).

Todavía cabe señalar que la concentración del cadmio en el suelo aumenta por las actividades antropogénicas y la mala disposición final de las baterías recargables de níquel/cadmio, el uso de fertilizantes fosfatados, detergentes y productos de refinados del petróleo, pigmentos en pinturas, galvanización, catalizadores y conservadores en la industria del plástico, elaboración de pinturas, aleaciones, refinación del zinc (Ramírez, 2002).

Además de fuentes naturales como minerales, actividades volcánicas e incendios forestales, además de la combustión del carbón, la madera y el petróleo incrementan la concentración de cadmio en los suelos (Rodríguez, 2017).

Existen 3 tipos de fuentes de emisión de metales pesados al ambiente. Extracción y purificación; los procesos de la minería, fundición y refinación, el segundo, es la emisión de metales por la quema de combustibles fósiles como el plomo, cadmio, mercurio, níquel, vanadio, cromo y cobre. Finalmente, la tercera fuente es por la producción y utilización de productos industriales que contienen metales (Mendoza, 2010).

2.5.1 Fuentes agrícolas

La revolución verde es un proceso de modernización de la actividad agrícola, a través de la transferencia de tecnología como fue la maquinaria, las semillas mejoradas y sobre todo la implementación de insumos agrícolas como el uso de fertilizantes inorgánicos para elevar la productividad de los cultivos y el uso de plaguicidas sintéticos para la protección de los mismos (Ceccon, 2008).

La utilización de estos insumos ha favorecido la acumulación de metales pesados en el suelo (Kabata y Pendias, 2004), y al mismo tiempo, estos metales pesados han generado problemas en la salud de los consumidores y amenazan la soberanía alimentaria de las naciones, sobre todo aquellas en vías de desarrollo (Nava y Méndez, 2011).

La agricultura se encuentra dentro de aquellas actividades que infieren directamente en el deterioro de la calidad del suelo y el agua. Las condiciones en que se ha desarrollado la actividad agrícola en México en los últimos años, han provocado una alteración en el suelo y en la producción de los cultivos agrícolas (Balderas *et al.*, 2006).

En los suelos agrícolas, la concentración de los elementos traza de los metales pesados incrementa significativamente a través de los años con la continua aplicación de diversas sustancias que contienen mayor o menor proporción, y son producto de las actividades antropogénicas como son: minería, refinería, uso de agroquímicos y depósitos de desecho, todo esto ha provocado que los metales pesados se encuentren en cantidades y formas que la naturaleza no ha originado (Cajuste y Laird, 2000).

Los sistemas agrícolas constituyen una fuente no puntual importante de contaminación por metales pesados, y favorecen la acumulación de estos en el suelo y de ahí la transferencia a los cultivos agrícolas y al consumidor primario, así respectivamente. Este problema se intensifica en lugares de producción agrícola intensiva con altas aplicaciones de fertilizantes y sin periodos de descanso para el suelo (Kabata y Pendias, 2004).

Por su parte Laegreid *et al.*, (1999), plantea que los fertilizantes fosforados son una fuente de Cd, debido a los contenidos de apatita, que además de fósforo, contiene Cd en concentraciones entre 8 y 500 mg kg⁻¹. Los fertilizantes fosfatados son los

más contaminantes y el contenido de metales pesados en estos, está en función de su origen.

Los fertilizantes minerales como el N-P-K pueden llegar a tener una concentración de plomo de 444 mg kg^{-1} (Gimeno-García, 1993). Los plaguicidas con contenido de plomo como el arseniato de plomo, utilizados en la agricultura para el control de plagas y enfermedades contaminan los suelos (Nolasco-Macollunco, 2001).

En consonancia con Micó *et al.* (2006), indican que la evaluación de la concentración de metales pesados en los suelos agrícolas es importante para la determinación de áreas con problemas de contaminación.

2.5.2. Plantas de tratamientos de aguas residuales

Las aguas residuales tienen diferente origen pueden ser: domésticas, agrícolas e industriales, por lo tanto, pueden contener muchas sustancias. Las aguas residuales domésticas contienen contaminantes orgánicos, microorganismos patógenos, productos de limpieza, pinturas y aceites. Las aguas residuales agrícolas contienen residuos de plaguicidas y fertilizantes (Larios-Bayona, 2014) y las aguas residuales industriales contienen productos como plásticos, latas metálicas y sustancias tóxicas. Algunos de los tóxicos presentes en estas aguas son: plomo, cadmio y cromo (Navarro y Carbonell, 2007).

2.5.3. Industria

La industria es la fuente principal de emisión de metales pesados a través de actividades como la generación de combustibles fósiles, las plantas de tratamientos de baterías, la minería, la industria de los fertilizantes, la siderurgia, la industria química, la galvanotecnia, la industria del curtido de pieles, la industria textil y del papel. Actividades como la fabricación de pinturas, baterías, plásticos y el sector automotriz son una importante fuente de plomo, cadmio, cobalto, cromo y zinc (Rodríguez, 2017).

El Plomo proviene de la fundición primaria y secundaria de metales, producción de pintura, industria electrónica y de cómputo, uso de combustibles con plomo, baterías e incineración de residuos (Rodríguez, 2017).

2.5.4. Incendios forestales

A través de la combustión y mineralización con el fuego de la materia orgánica, se da una liberación considerable de metales pesados al ambiente (Pereira y Úbeda, 2010). De igual manera las cenizas producto de un incendio forestal contienen diferentes concentraciones de metales pesados, que pueden inducir a una toxicidad del suelo y el agua (Pitman, 2006).

La cantidad de metales pesados liberados en las cenizas depende de la especie quemada, del tipo de suelo y la temperatura alcanzada durante el incendio (Pereira *et al.*, 2009).

2.6. Impacto de los metales pesados en el suelo

El impacto de los metales pesados en el suelo depende de la concentración misma del metal, además de las condiciones del suelo como son: pH, contenido de carbonatos, materia orgánica. En función de dichas condiciones se podrán presentar procesos de adsorción o desorción, los cuales influirán directamente sobre la biodisponibilidad de dicho metal, dicha biodisponibilidad es la que marca la peligrosidad de la contaminación metálica en los suelos (García *et al.*, 2002).

De acuerdo con Schmitt y Sticher, (1991) indicaron que las características físicas y químicas del suelo, son factores que están relacionados con la concentración y disposición de estos en los seres vivos, por lo que es imposible establecer un patrón de captación y bioacumulación de metales pesados.

Dicho lo anterior, las propiedades químicas del suelo, son importantes para el aumento o reducción de la toxicidad de los metales, la distribución de los perfiles de

suelo y su disponibilidad son reguladas por las características del metal y sus propiedades. (Chojnacka *et al.*, 2005).

El problema con el plomo, níquel, manganeso y cadmio, cuando están presentes en el agua de riego, radica en que estos pueden acumularse en los suelos agrícolas (Mancilla-Villa *et al.*, 2012). Además, en el suelo se tienen consecuencias negativas en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo como son: disminución del contenido de la materia orgánica, variación en el pH, alteración en la actividad de la microfauna de la rizosfera, lo que genera dificultad de crecimiento y desarrollo de la cubierta vegetal del suelo y como consecuencia aumenta la vulnerabilidad de los cultivos a las plagas y enfermedades (Martin, 2000).

Los metales pesados a diferencia de los a diferencia de los contaminantes orgánicos no pueden ser metabolizados o desintegrados. La contaminación del suelo por metales pesados puede durar por cientos y miles años, aun después de que su incorporación por cualquier actividad antropogénica se haya detenido. El cadmio, tiene una vida promedio de 15 a 1100 años y el plomo de 740 a 5900 años y sus concentraciones están determinadas por el tipo y propiedades fisicoquímicas del suelo, el clima y la topografía (Dantu, 2009).

La concentración de metales pesados en suelos agrícolas no solo está asociada a la intensidad al tipo y tasa de aplicación de productos agroquímicos, también puede estar asociada con las condiciones físico-químicas que poseen los suelos (Mahecha *et al.*, 2015).

Por otra parte, el análisis de la concentración de metales pesados nos indica exclusivamente la cantidad del elemento contenido en el suelo, pero no indica ni su disponibilidad ni su movilidad, que son parámetros esenciales para determinar el grado de contaminación (Huecas *et al.*, 2003).

2.7. Movilidad de los metales pesados en el suelo

Hay que mencionar, además que las trazas de metales pesados que contienen los fertilizantes en las dosis ideales aportan beneficios directos para las plantas y su desarrollo, pero el problema se suscita cuando estos se encuentran en cantidades que pasan esos niveles óptimos y sobre todo estos elementos son degradados en iones que no son asimilables a la planta quedando capturados en el suelo y posteriormente avanzar por lixiviación a cuerpos de agua, generando una contaminación del tipo difusa. (Peralta-Videa *et al.*, 2009). Además, causan contaminación en el suelo y afectan la micro fauna benéfica del mismo (Chibuike y Obiora, 2014).

Desde otro punto de vista, el desconocimiento por parte de la población sobre las condiciones en que se producen sus alimentos, la calidad de suelo y agua con que son irrigados esos cultivos, representa a futuro graves problemas de salud (Lokeshappa *et al.*, 2012).

La biodisponibilidad del plomo es mayor en suelos arenosos ácidos y con bajo contenido en materia orgánica: por encima de un pH de 5 se forman complejos organometálicos de plomo (Huertos y Baena, 2008). Por otro lado, la disponibilidad y movilidad del cadmio en el suelo está determinada por el pH, la humedad, el contenido de materia orgánica y la cantidad de arcilla, así mismo por la cantidad y años de aplicación de fertilizantes fosfatados (Krishnamurti *et al.*, 1999).

la adsorción del Cadmio en el suelo se incrementa con la alcalinidad, por tanto, su biodisponibilidad aumenta con el pH ácido y se sabe que cuando las concentraciones son superiores a 0.5 mg kg^{-1} , se ha producido un impacto antrópico (Andreu, 1991). García *et al.* (2012) indicaron una concentración de 4.1 mg kg^{-1} de cadmio es una concentración peligrosa y puede estar asociada con la continua aplicación de fertilizantes fosfatados.

Por lo general, la movilidad de los metales pesados es baja, quedando acumulados en los primeros centímetros de los horizontes del suelo, siendo lixiviados a los horizontes inferiores, como el plomo que se deposita a una profundidad de 2-5 cm de la superficie del suelo, por lo tanto, la concentración de los metales disminuye en cuanto aumenta la profundidad del horizonte, todo esto cuando el origen de la contaminación es del tipo antropogénico (Anxiang *et al.*, 2009), además al estar en la superficie, quedan disponibles para la mayoría de los cultivos.

2.8. Propiedades del suelo que influyen en la disponibilidad de los metales pesados en el suelo

La distribución del plomo en el suelo está en función de los siguientes parámetros: pH, textura del suelo, contenido de materia orgánica, así como la naturaleza del contaminante (Alloway, 2012). Es muy persistente e inmóvil en el suelo si se encuentra como haluro, hidróxido, óxido, carbonato, sulfato (Silviera *et al.*, 2003). A sí mismo, la biodisponibilidad del cadmio aumenta con los pH del tipo ácido y la adsorción incrementa con la alcalinidad (Kabata y Pendias, 1984).

Teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente la concentración y toxicidad de los metales pesados en el suelo no solo va a depender de la naturaleza del metal sino también de las características edáficas.

2.8.1. pH

La disponibilidad de los metales en los suelos está estrechamente relacionada con el pH, el tipo de materia orgánica (sustancias húmicas en forma soluble o insoluble) e incluso la temperatura del suelo (Varanini y Pinton, 2000).

La adsorción y la solubilidad de los metales pesados están fuertemente condicionados por el pH, generalmente los metales pesados son móviles a pH bajo (ácido), en forma de especies iónicas libres o como compuestos organometálicos solubles. En cambio, a pH alcalino los metales pesados pueden quedar retenidos en forma de carbonatos o fosfatos minerales insolubles (Mc Bride *et al.*, 1997).

El pH afecta la movilidad de metales y la reactividad de minerales. Generalmente, los metales son móviles a pH bajo, en forma de especies iónicas libres o como órgano-metales solubles (Volk *et al.*, 2005).

La NOM-021-SEMARNAT-2000, clasifica como suelos fuertemente ácidos a los que presentan un pH menor a 5, Moderadamente ácido a los que presentan valores entre 5.1 y 6.5, Neutros a los que tienen un valor de 6.6 a 7.3, Medianamente alcalino de 7.4 a 8.5 y Fuertemente alcalino a los que presentan un valor mayor a 8.5 (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de suelos de acuerdo al pH.

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	≤ 5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	> 8.5

Fuente: NOM-021-SEMARNAT-2000. QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS, ESTUDIO, MUESTREO Y ANÁLISIS.

2.8.2. Materia Orgánica

El suelo está formado por material inorgánico, materia orgánica, agua, gases y organismos vivos, entre los que se produce un intercambio continuo de moléculas mediante procesos químicos, físicos y biológicos. La presencia de metales pesados es mayor en rocas ígneas que en las sedimentarias (García *et al.*, 2002).

La materia orgánica se concentra en los primeros 5 cm del suelo, se trata de restos vegetales, fragmentos de ramas, hojas, semillas e insectos, por lo que el contenido de carbono orgánico total es muy elevado en la superficie, disminuyendo drásticamente al profundizar más allá de los 50 cm de profundidad del suelo (Huecas *et al.*, 2003).

Los metales pesados están presentes en la solución del suelo son iones inorgánicos con carga positiva que pueden quedar adheridos a la superficie de la materia orgánica que tiene carga negativa por fuerzas electrostáticas, dando paso a la formación de que quelatos. Algunos metales una vez que forman los quelatos pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil de suelo (Gustafsson *et al.*, 2003).

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, los suelos se clasifican (Tabla 2) con base a su contenido de materia orgánica de la siguiente manera:

Tabla 2. Clasificación de suelos de acuerdo al contenido de materia orgánica.

Clase	Materia Orgánica (%)	
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	≤ 4.0	≤ 0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
Muy Alto	> 16.1	> 6.0

Fuente: NOM-021-SEMARNAT-2000. QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS, ESTUDIO, MUESTREO Y ANÁLISIS.

2.8.3. Conductividad Eléctrica

La medición y monitoreo de la conductividad eléctrica (CE) del suelo permiten establecer la viabilidad y el desarrollo de los cultivos en el suelo. La CE esta influenciada por el contenido de agua y arcilla, además de la presencia de iones intercambiables en el suelo (Corwin *et al.*, 1999), estas propiedades influyen directamente en la conducción de la corriente eléctrica y por lo tanto influye en las características nutritivas del suelo y con la demanda de macro y micronutrientes.

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, los suelos se clasifican (Tabla 3) con base a su índice de conductividad eléctrica siguiente manera:

Tabla 3. Clasificación de suelos de acuerdo a la conductividad eléctrica.

CE dS m⁻¹ a 25°C	Efectos
≤ 1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 – 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 – 4.0	Moderadamente salino
4.1 – 8.0	Suelo salino
8.1 – 16.0	Fuertemente salino
≥ 16.0	Muy fuertemente salino

Fuente: NOM-021-SEMARNAT-2000. QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS, ESTUDIO, MUESTREO Y ANÁLISIS.

2.8.4. Salinidad

La salinidad en los suelos agrícolas guarda una relación directa con el agua de riego y su concentración iónica la cual conduce a la salinización progresiva de los suelos. El problema de la salinidad en los suelos está restringido a zonas áridas y semiáridas (Castellanos *et al.*, 2000).

Por otra parte, la salinidad en los suelos afecta de manera significativa el rendimiento de los cultivos en relación que entre más alto sea el índice de salinidad del suelo más bajo será el rendimiento de los cultivos agrícolas (Argentel *et al.*, 2006).

Al aumentar la salinidad puede incrementar la movilidad de los metales por dos mecanismos.

- 1) Los cationes de sodio y potasio pueden reemplazar a los metales pesados que se encuentran en posiciones de intercambio catiónico.
- 2) Los aniones de cloruro y sulfato, pueden formar compuestos estables con metales como plomo, zinc, cobre, cadmio y mercurio (Huerto y Baena, 2008).

2.8.5. Textura

Los suelos arenosos son ligeros de difícil compactación y con facilidad de penetración radicular, son muy permeables y con un alto valor de aireación. Son fáciles de labrar y tienen poca capacidad de retención de agua y nutrientes.

Así mismo presentan baja capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales pasan rápidamente a los horizontes subyacentes y pueden contaminar los cuerpos de mantos freáticos (Juárez *et al.*, 2004).

Los metales pesados cuando son depositados en el suelo, inicialmente tienden a permanecer en los horizontes principales (Romero *et al.*, 2003). Que es donde abunda el sistema radicular de la mayoría de los cultivos agrícolas.

Por otro lado, los suelos arcillosos, son suelos pesados con gran inercia térmica, difíciles de labrar y con una fertilidad muy elevada, presentan compactación y dificultad de penetración radicular.

De manera similar, su permeabilidad es baja por lo tanto presentan problemas de encharcamiento, tienen baja valor de aireación y una alta capacidad de retención de agua (Juárez *et al.*, 2004).

La arcilla tiende a adsorber a los metales pesados que queda retenidos en sus posiciones de cambio (Alloway, 2012).

2.9. Absorción y bioacumulación de metales pesados en plantas

Las especies vegetales, incluidos los cultivos agrícolas, han desarrollado la capacidad de acumular metales pesados en sus tejidos, a esta capacidad se le conoce como bioacumulación lo que significa un aumento en la concentración de un compuesto químico en un organismo vivo en un cierto plazo de tiempo, comparada con la concentración de dicho compuesto químico en el ambiente y esta capacidad varía entre especies (Angelova *et al.*, 2004).

De manera natural las plantas absorben los metales, algunos son elementos esenciales tales como cobre y cobalto. Sin embargo, el cadmio y plomo, no tienen ninguna actividad fisiológica conocida (Lasat, 2002). Jarvis y Leung (2002), indicaron que el plomo se bioacumula mayormente en las raíces de las plantas en comparación con otros órganos. (Espinoza *et al.*, 2013) afirman que las plantas en general pueden absorber hasta 500 ppm de plomo.

Las actividades agrícolas, como el riego, el uso de fertilizantes inorgánicos, plaguicidas, estiércol, enmiendas calizas y, la aplicación de lodos residuales, incorporan al suelo diferentes cantidades de metales pesados (Larios-Bayona, 2014).

En efecto otro mecanismo de ingreso de sustancias potencialmente tóxicas a las plantas, como son los metales pesados, es mediante la absorción foliar. Dicho lo anterior la absorción de metales pesados producto de la aplicación de fertilizantes y plaguicidas en la planta aumenta la concentración total de metales en suelos (Cabezas *et al.*, 2004).

La toxicidad de los metales no depende solamente de su concentración total, sino de su disponibilidad y reactividad con otros componentes del sistema. Colombo (1998), indica que las características del suelo juegan un papel importante en reducir o aumentar la toxicidad de los metales en el suelo.

La biodisponibilidad de los metales en el suelo está en función de las propiedades fisicoquímicas del suelo como son: pH, contenido de materia orgánica, sulfatos, carbonatos, la textura del suelo y el contenido de arcillas (Mwegoha y Kihampa, 2010).

Las altas concentraciones de plomo pueden estar presentes en sitios contaminados por la agricultura (Kopittke *et al.*, 2010). Los metales pesados pueden acumularse en los suelos, donde son absorbidos por las plantas, aunque hayan transcurrido

largos periodos de tiempo después de la aplicación como fertilizante (Ekosse *et al.*, 2006).

La bioacumulación ha sido utilizada para monitorear el índice de contaminación de algunos ecosistemas, sin embargo, los patrones de bioacumulación son muy variables, tanto entre especies vegetales como entre los diferentes elementos minerales y no siempre existe una relación extrapolable (Gadd, 2000).

El cadmio es uno de los metales pesados con mayor tendencia a acumularse en las plantas (Reyes *et al.*, 2016). En la planta el cadmio se acumula en la raíz y solo una pequeña parte es transportada a la parte aérea de la planta como son el tallo, hojas, frutos y semillas (Chan y Hale, 2004).

2.10. Índice de geoacumulación (I_{geo})

El índice de geoacumulación es un valor numérico que representa el grado de contaminación del suelo a través de intervalos donde el suelo puede considerarse contaminado por sustancias orgánicas e inorgánicas (Müller, 1981). Es aplicable a metales pesados, siempre y cuando se disponga de sus concentraciones en muestras de la zona que no hayan tenido impacto de actividades antropogénicas, de lo contrario se usan los datos de referencia del metal en la corteza terrestre.

Se estima que la concentración promedio de plomo en la corteza terrestre es de 15 mg kg⁻¹, aunque en algunos suelos puede tener hasta 100 mg kg⁻¹ (Alloway, 1995). Cabe señalar que en la mayoría de los suelos el contenido de plomo se incrementa en la capa superficial debido a las actividades antropogénicas (Kabata-Pendias y Mukherjee, 2007).

Para la interpretación de los resultados se utiliza una clasificación realizada por Loska *et al.* (1997), donde nos indicaron el grado de contaminación de acuerdo al valor obtenido por el índice de geoacumulación (Tabla 4).

Tabla 4. Grado de contaminación de acuerdo al I_{geo} .

Valor de I_{geo}	Clases de I_{geo}	Grado de contaminación
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado

FUENTE: (Loska *et al.*, 1997)

2.11. Efecto de los metales pesados en las plantas

Se conoce poco sobre los mecanismos específicos de absorción de metales pesados por las membranas vegetales. Sin embargo, se sabe que, por difusión, flujo en masa e intercambio catiónico, los metales alcanzan fácilmente órganos como la raíz, para seguir la ruta por vía apoplasto y simplasto (García, 2007) la raíz constituye la principal vía de entrada de los metales pesados en las plantas.

Los metales pesados son tóxicos para las plantas, en concentraciones elevadas generan fitotoxicidad que se ve reflejada en la planta con una serie de síntomas como son la clorosis, crecimiento débil, reducción de absorción de nutrientes, trastornos en el metabolismo de la planta y en las plantas leguminosas una disminución en la capacidad de fijar nitrógeno (Dan *et al.*, 2008).

Las plantas absorben los metales pesados del suelo y se acumulan en el sistema radicular, de ahí son llevados a diferentes órganos de la planta como es el tallo y las hojas, donde la cantidad de metal acumulado es incluso mayor al de la raíz (Cheng, 2003).

2.12. Efecto en la salud

La Agencia de Protección Ambiental por sus siglas (EPA) enlista dentro de su clasificación como contaminantes prioritarios a los siguientes elementos: antimonio, arsénico, berilio, cromo, cadmio, cobre, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y zinc (Huertos y Baena, 2008).

Las concentraciones de metales pesados presentes en muchos cultivos pueden ser tóxicas para el organismo, por ejemplo, el cadmio, que al presentarse en valores superiores a 0.71; 8.1 o 40 mg kg⁻¹ en plantas de soya, afecta los riñones de mamíferos terrestres y personas adultas (Cole y Volpe, 1983).

Además, el plomo, cromo, vanadio, arsénico, cadmio y mercurio, están relacionados con problemas de salud como retrasos en el desarrollo, varios tipos de cáncer, daños en el riñón, e, incluso, con casos de muerte (Muchuweti *et al.*, 2006).

2.13. Legislación Ambiental Nacional e internacional

Los efectos negativos de los metales pesados que han impactado a los recursos naturales como los agroecosistemas, el aire, el suelo, el agua, y a la propia salud humano, han despertaron el interés de científicos, investigadores, políticos y sociedad en general a nivel internación, que se han crearon leyes y normas de regulación de actividades antropogénicas y protección al medio ambiente.

Dicho lo anterior, en México existen normas que regulan la concentración de metales pesados en los suelos las cuales se describen a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Límites de Referencia Nacionales de metales pesados en suelo.

NORMA OFICIAL MEXICANA	Clasificación	Límites Máximos Permisibles (mg kg ⁻¹)	
		Pb	Cd
NOM-021-SEMARNAT-2000	Peligroso	100-300	3-5
	Normal	100-35	0.35

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	Uso agrícola/ residencial/ comercial	400	37
		800	450
Uso industrial			
NOM-001-SEMARNAT-1996	Promedio diario	10	0.1
	Promedio mensual	5	0.05

Debido a la correlación que se ha encontrado en la concentración de metales pesados solubles en el suelo y la concentración de metales pesados en las plantas, a nivel mundial se han aprobado normas de calidad basadas en las concentraciones de metales pesados solubles en el suelo. (Schimidt, 2003).

Ahora bien, en México se carece de una legislación específica sobre los límites máximos permisibles de metales pesados en suelos y en cultivos agrícolas, es por tal razón, que tenemos que recurrir a legislación internacional. Dicho lo anterior cuando se trata de diagnosticar el grado de concentración y acumulación de los metales pesados en los suelos de México, se usan los índices establecidos para otros países como criterios de comparación.

Para la contaminación por metales pesados en alimentos la FAO ha establecido límites máximos permisibles en diferentes tipos de cultivos agrícolas, los cuales se muestran a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Límites Máximos Permisibles de Metales pesados en Cultivos Agrícolas.

Tipo de cultivo	Límites Máximos Permisibles (mg kg ⁻¹)	
	Pb	Cd
Hortalizas de bulbo	0.1	0.05
Hortalizas de fruto (Cucurbitáceas)	0.1	0.05
Hortalizas de hoja	0.3	0.1
Legumbres	0.2	nan
Raíces y tubérculos	0.1	0.1
Cereales de grano (Excepto trigo)	0.2	nan

Fuente: Codex, 1995.
nan: no aplica nivel

No obstante, algunos países han realizado la normatividad para establecer límites de los metales pesados para uso en suelos agrícolas. La Tabla muestra los límites establecidos para metales pesados en diferentes países.

Tabla 7. Límites de Referencia Internacionales.

Límites de Referencia	Metales Pesados en Suelos Agrícolas (mg kg⁻¹)				
	Pb	Cd	Cu	Cr	Zn
México *	400	37	-	280	300
México **	35	0.35			
Canadá	70	1.4	63	64	250
China	36	0.056	17	50.5	47.3
Unión Europea	100-600	2-6	-	-	-
Estados Unidos	100	3	100	100	-

*NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, ** NOM-021-SEMARNAT-2000

FUENTE: Amaro-Espejo *et al.*, 2020.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1. Lugar de Estudio

El presente estudio se llevó en el municipio de Cotaxtla, ubicado en los paralelos $18^{\circ} 44'$ y $18^{\circ} 59'$ de latitud norte; los meridianos $96^{\circ} 11'$ y $96^{\circ} 32'$ de longitud oeste; altitud entre 10 y 200 m (Figura 1). Se encuentra al límite norte con los municipios de Paso del Macho, Soledad de Doblado, Manlio Fabio Altamirano y Jamapa; al este con los municipios de Jamapa, Medellín y Tlaxicoyan; al sur con los municipios de Tlaxicoyan, Tierra Blanca, Cuitláhuac y Carrillo Puerto; al oeste con los municipios de Carrillo Puerto y Paso del Macho. Cuenta con un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, el cual genera un rango de temperatura que oscila entre los 24 a 26 °C con un rango de precipitación que oscila entre los 1100 a 1300 mm anuales. Existen dos ríos que cruzan el municipio y estos son el río Cotaxtla y el río Soyolipa y estos cuerpos de agua son fuente de abastecimiento para las actividades primarias como es el caso de la agricultura. (INEGI, 2020).

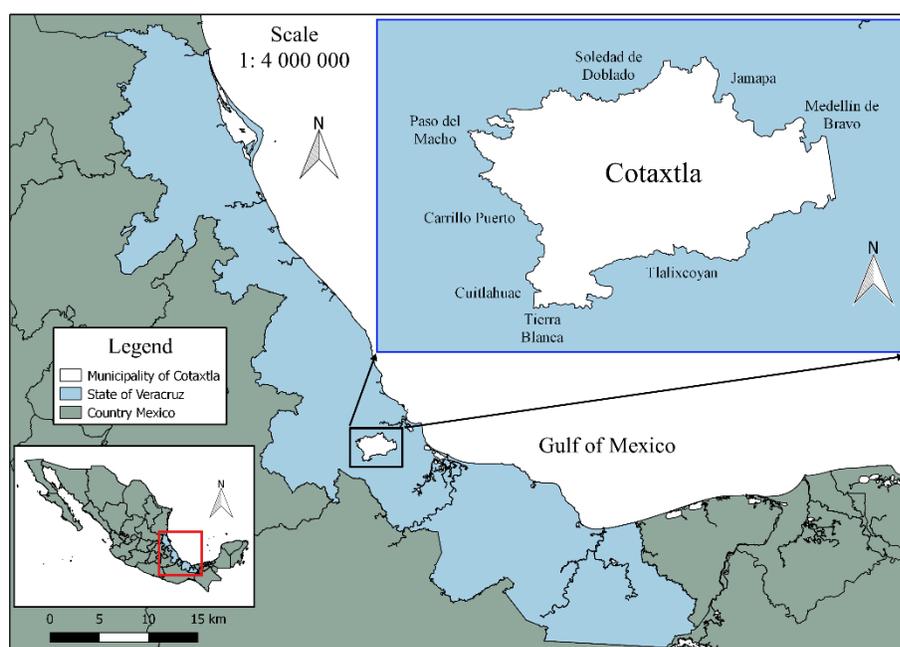


Figura 1. Ubicación geográfica de Cotaxtla, Veracruz.

3.2. Antecedentes

Aydinalp y Marinova (2003) identificaron los principales metales pesados utilizados en los fertilizantes agrícolas, destacando el plomo, zinc, magnesio, cobre, cadmio,

níquel y zinc. Por otro lado, Alloway (2013), identificó que algunos metales pesados están directamente relacionales con fuentes específicas como los fertilizantes (cadmio, cromo, molibdeno, plomo, zinc), plaguicidas (cobre, arsénico, mercurio, plomo, molibdeno, zinc), composta derivados de residuos sólidos convencionales (cadmio, cobre, níquel, plomo, zinc) y del estiércol (cobre, arsénico, zinc).

De igual manera Micó *et al.*, (2006) indicaron que el tiempo es fundamental para relacionar la aplicación de fertilizantes en cultivos agrícolas con la acumulación de metales pesados como el cadmio, cobalto, cromo, cobre, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc en los suelos agrícolas. Además, Huang y Jin (2008) mencionaron que la concentración de metales pesados, está determinado por el uso de suelo, siendo los suelos agrícolas los mayores acumuladores de metales pesados en comparación con suelos destinados a otras actividades, en efecto se es importante considerar los rangos de la concentración principalmente en zonas agrícolas donde el uso de los fertilizantes es intensivo.

Dotor-López *et al.*, (2017) encontraron trazas de plomo en frutos de fresa *Fragaria ananassa* Duch. Var. festival, en sistemas de producción intensiva en micro túneles y campo abierto de la ciudad de Tenancingo y villa guerrero en el estado de México, México. esto indica la alta capacidad de bioacumulación que tiene el plomo, la presencia de este elemento está asociada con las prácticas agrícolas como es el uso intensivo de fertilizantes y plaguicidas antes y durante el ciclo de producción.

Así mismo Pulido *et al.* (2015) indicaron que la implementación de tecnologías enfocadas en el aumento en los rendimientos en los sistemas agrícolas ha generado diversos problemas ambientales, con el uso de fertilizantes y plaguicidas, ya que son fuentes potenciales de metales pesados. Además, señalan que los parámetros fisicoquímicos del suelo, influyen directamente en la movilidad de los metales pesados en la matriz suelo-planta.

Martí *et al.*, (2002) encontraron una concentración de 21.5 mg kg⁻¹ de plomo en el fertilizante Urea y una concentración de 30.30 mg kg⁻¹ en el fertilizante superfosfato triple, ambos fertilizantes son los más utilizados en los sistemas agrícolas intensivos como fuente de nitrógeno y fósforo respectivamente.

De ahí que, el uso excesivo de fertilizantes en trigo, provocó la acumulación de metales pesados como cadmio en el suelo, lo que genera problemas de salud en las personas, y contaminación edáfica (Atafar *et al.*, 2010).

A su vez, De la Cruz-Pons *et al.*, (2012), determinaron que la industria azucarera en la región de la Chontalpa, Tabasco, México, afecta el desarrollo y rendimiento del cultivo de caña de azúcar *Saccharum* spp. Mediante transectos de 0.6 km y 6 km de distancia lineal respecto al Ingenio Azucarero Presidente Benito Juárez, muestrearon suelo agrícola de una profundidad de 0 a 20 centímetros y encontraron concentraciones totales de plomo de ≤ 0.6 mg kg⁻¹ y no detectaron la presencia de cadmio.

Por otro lado, el plomo al caer al suelo puede adherirse a las partículas del mismo y permanece en la capa superior. En campos cercanos a una refinera en transectos de 100 a 500 metros se han detectado altas concentraciones de plomo en hojas de *Brachiaria humidicola* y *Brachiaria decumbens* (Peláez *et al.*, 2016).

A su vez, Arévalo-Gardini *et al.* (2016) indicaron que las variables edafológicas que tienen mayor correlación con la concentración de plomo y cadmio en suelos agrícolas de cultivo de cacao *Theobroma cacao* L. en Perú son el pH y el porcentaje de arcilla.

Ahora bien, Olivares-Rieumont *et al.*, (2013), encontraron que en suelos agrícolas del cultivo de hortalizas en fincas cercanas a zonas urbanas en la ciudad de la Habana, Cuba, los niveles de los metales pesados en el suelo variaron en los siguientes rangos: plomo de 18.1 a 138.5 mg kg⁻¹ y en cadmio de 0.24 a 2.1 mg

kg⁻¹ , estos resultados indican la influencia de las actividades urbanas sobre la concentración de los metales pesados en el suelo y sobre todo la importancia de tener una estricta vigilancia de los cultivos hortícolas de zonas agrícolas cercanas a zonas urbanas.

Dicho lo anterior, Micó *et al.*, (2005), en la región agrícola de la comarca del Bajo Vinalopó en Alicante, España. Encuentran el contenido total de plomo de suelo de cultivos vegetales de 27.8 mg kg⁻¹ y para cadmio una concentración de 0.30 mg kg⁻¹, de igual manera, indican que la retención de estos metales pesados está relacionada con el contenido de materia orgánica y la fracción de arcilla en el suelo, a través de procesos como la precipitación estos fluyen a cuerpos de agua subterráneos.

Además, Huang y Jing, 2008, realizaron un estudio en suelos de cultivo en áreas rurales de Beijing, China, para determinar la concentración de metales pesados en suelo agrícolas, el trabajo lo realizaron por 20 años, hicieron dos mediciones de la concentración de plomo y cadmio, la primera a los diez años donde encontraron una concentración media de plomo de 29 mg kg⁻¹ y de cadmio de 0.61 mg kg⁻¹, diez años después en los mismos sitios tuvieron una concentración de 31.6 mg kg⁻¹ para plomo y 0.64 mg kg⁻¹ en cadmio, lo cual reafirma la capacidad de los metales pesados para bioacumularse y su alta persistencia en el suelo por largos periodos de tiempo.

De igual manera, la acumulación de metales pesados en tejidos vegetales por absorción u otras formas de asociación natural, da la posibilidad de estar biodisponibles a los seres humanos y animales a través del consumo directo de los productos y así pasar a la cadena alimenticia. Esto es particularmente importante en el caso del maíz *Zea mays* L., ya que el maíz es un alimento básico en la dieta de los mexicanos, y además es el principal cultivo del sector agrícola en México, el

cual es una actividad importante para la economía de las familias campesinas por lo que el impacto generado por los metales pesados representa un problema de salud, ambiental y social (Ruiz y Armienta, 2012).

En general todos los metales pesados son tóxicos si se ingieren o inhalan en cantidades suficientemente altas y por largos periodos de tiempo (Seoanez, 2003). En Japón en la década de los cincuenta, los pobladores de las riberas del río Jintsu, sufrieron la enfermedad conocida como itai-itai u osteoartritis, causada por la ingesta de arroz contaminado por cadmio (Reyes *et al.*, 2016).

De igual modo, en México en la ciudad de Torreón, se han reportado casos de envenenamiento por plomo (Pb) producto de la gran actividad industrial de la zona, el metal se ha integrado a cadena alimenticia y al agua de consumo humano (Perezgasga, 1999).

4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

4.1. Situación Problemática

Con base en evidencia científica, se sabe que la contaminación del suelo puede degradar los servicios a los ecosistemas provistos por el suelo, se amenaza la seguridad alimentaria al reducirse los rendimientos de los cultivos agrícolas debido a las concentraciones de los contaminantes y al ocasionar que las cosechas producidas en suelos contaminados sean una amenaza para el consumo de animales y humanos. Muchos contaminantes como los metales pesados plomo y cadmio son lixiviados del suelo a los cuerpos de agua superficial y subterránea, ocasionando un daño ambiental y a la salud humana por el consumo directo de esa agua. Los contaminantes también dañan a la biodiversidad del suelo y causan desequilibrio en el rol que juegan estos organismos en diferentes procesos en la dinámica del suelo. De igual manera está demostrado que la concentración de metales pesados en el suelo afecta directamente a la salud humana.

En efecto, se estima que Los niveles de plomo en el medio ambiente se han incrementado al menos más de 1,000 veces en los últimos tres siglos como resultado de la actividad humana, siendo entre años 1950 y 2000 el mayor incremento (Nava y Méndez, 2011). De la misma, se estima que 300,000 toneladas de cadmio se liberan al ambiente cada año de las cuales de 4,000 a 13,000 toneladas son producto de las actividades humanas.

En definitiva, el suelo es uno de los principales recursos naturales y uno de sus mayores enemigos en los últimos tiempos que amenazan su sostenibilidad, es la contaminación y en concreto la contaminación por metales pesados (García *et al.*, 2002).

4.2. Delimitación del problema

En términos generales en el afán de incrementar los rendimientos de los cultivos y mantener la sanidad de los mismos, para cubrir la gran demanda de productos agrícolas en el mundo, se utilizan fertilizantes y plaguicidas, con lo que también se integran a la matriz suelo-planta trazas de contaminantes como los metales pesados

plomo y cadmio principalmente. Los fertilizantes fosfatados y nitrogenados son dos de las fuentes de nutrientes más utilizadas en los sistemas agrícolas intensivos y estos fertilizantes por su origen contienen trazas de metales pesados.

Es importante instrumentar acciones que regulen la contaminación del suelo y limitar la acumulación de contaminantes más allá de los niveles establecidos en las Normas con el fin de garantizar la salud humana, ya que un suelo saludable es sinónimo de alimentos seguros. Es esencial limitar la contaminación de fuentes agrícolas mediante la instrumentación de buenas prácticas de manejo de los suelos agrícolas.

4.3. Pregunta de Investigación

¿Cuál es la concentración de plomo y cadmio en los suelos agrícolas de Cotaxtla, Veracruz?

4.4. Justificación

El ingreso de los metales pesados a los suelos agrícolas, puede ser a través de diversas fuentes antropogénicas. Se ha reportado que los fertilizantes y plaguicidas aportan trazas de metales pesados al suelo y se incrementan en los sistemas de cultivos intensivos o por aplicaciones excesivas. La determinación de las concentraciones de metales pesados en suelos agrícolas, permite conocer el grado de contaminación del suelo y sobre todo el riesgo a la salud si son absorbidos por los cultivos. El municipio de Cotaxtla, Veracruz se encuentra altamente influenciado por las actividades agrícolas y ganaderas. Por lo anterior, se requiere de un estudio para caracterizar los suelos de diferentes cultivos del municipio de Cotaxtla, y los niveles de concentración de Plomo y Cadmio, para conocer el impacto ocasionado por la influencia de las actividades de la zona. Existen pocos estudios sobre este tema en la zona, esto aportará datos a futuros estudios sobre el comportamiento y la bioacumulación de los metales pesados en la zona y así los tomadores de decisiones podrán optar por mejores soluciones ante la contaminación por metales pesados en el suelo.

5. HIPÓTESIS

La presencia de concentración de Plomo y Cadmio en los suelos agrícolas en Cotaxtla, Veracruz está en función de la cantidad de fertilizantes inorgánicos y plaguicidas que se le aplican y de las características fisicoquímicas del suelo.

6. OBJETIVOS

6.1 General

- Evaluar la concentración de Plomo y Cadmio en suelos de cinco cultivos agrícolas del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

6.2 Específicos

- Caracterizar los suelos en cultivo de papaya, limón, sandía, maíz y plátano bajo el aspecto fisicoquímico.
- Estimar los niveles de concentración de Plomo y Cadmio en suelos de cultivo
- Correlacionar la concentración de Plomo y Cadmio respecto a las características fisicoquímicas del suelo.
- Determinar el índice de geocumulación de metales pesados en los suelos agrícolas.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Fases del trabajo

La forma de trabajo se dividió en 3 fases cada una descrita a continuación.

1. Fase de Muestreo: En esta fase se realizó la colecta de muestras de suelo, en diferentes parcelas agrícolas del municipio de Cotaxtla, Veracruz.
2. Fase de Laboratorio: Esta fase se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Río. en esta fase se realizaron los análisis físicos y químicos de las muestras de suelo, además de la determinación del contenido de plomo y cadmio en las muestras.
3. Fase de Análisis estadístico: En esta fase se realizó los análisis de correlación entre las variables fisicoquímicas y las concentraciones de plomo y cadmio, de igual manera se calculó el índice de geoacumulación para los metales pesados.

Actividades realizadas durante cada fase del trabajo:

7.1.1. Fase 1:

A1. Recopilación de información de la zona de estudio para conocer el tipo de ambiente, el clima y actividades agrícolas.

A2. Viaje de colecta de muestras. en el cual se seleccionarán diferentes parcelas de cultivo de maíz, limón, papaya, sandía y plátano, se tomaron coordenadas en grados decimales.

En la fase de campo las muestras se etiquetaron con marcado permanente y se anotaron datos de: tipo de cultivo, fecha y una clave de secuencia, las muestras se guardaron en cajas de plástico y el mismo día se llevaron a las instalaciones del Laboratorio de Investigación de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Río, donde se conservaron a temperatura ambiente 25 ° C, para ser procesadas para los análisis correspondientes.

7.1.2. Fase de 2:

- A1. Homogenizar muestras.
- A2. Formación de muestras compuestas
- A3. Pruebas químicas de suelo
- A4. Pruebas Físicas
- A5. Determinación de concentración de metales pesados

7.1.3. Fase 3:

- A1: Análisis de Resultados
- A2: Índice de Geoacumulación (I_{geo})
- A3: Prueba de ANOVA.
- A4: Correlación de Pearson.

7.2. Selección de los sitios de muestreo

Atendiendo al OP1, se seleccionaron 15 sitios de muestreo de parcelas agrícolas de cinco cultivos: papaya, limón, maíz, sandía y plátano de nueve localidades del municipio de Cotaxtla, Veracruz. Los sitios de muestreo se agruparon por cultivo y por localidad, por lo que resultaron 15 Unidades de Producción Agrícola (UP). Cada UP está conformada por tres parcelas, La clasificación de las UP corresponde en un 40 % a suelo de cultivo de papaya, 33 % son de suelo de cultivo de limón, 13 % de suelo de cultivo Maíz, 7 % de suelo de cultivo de Sandía y 7 % de suelo de cultivo de plátano (Tabla 8).

Tabla 8. Unidades de Producción Agrícola con sus respectivas coordenadas.

NUM	UP	Localidad	Cultivo	Latitud	Longitud
1	S1L	Vista Clara	Limón	18.885365°	-96.357465°
2	S1P	Vista Clara	Papaya	18.838225°	-96.357768°
3	S2B	Los Bajos	Plátano	18.884263°	-96.430297°
4	S2P	Los Bajos	Papaya	18.893349°	-96.442380°
5	S3L	El Maguey	Limón	18.897421°	-96.359493°
6	S3P	El Maguey	Papaya	18.887023°	-96.346330°

7	S4M	Santa Rita	Maíz	18.910431°	-96.306589°
8	S5L	Mata Tambor	Limón	18.894661°	-96.374113°
9	S5M	Mata Tambor	Maíz	18.886742°	-96.376827°
10	S5P	Mata Tambor	Papaya	18.889442°	-96.378215°
11	S6P	La Mocarraca	Papaya	18.914854°	-96.361566°
12	S6L	La Mocarraca	Limón	18.910968°	-96.357371°
13	S7S	Loma Bonita	Sandía	18.910528°	-96.397539°
14	S8P	Mata Tejón	Papaya	18.897861°	-96.389837°
15	S9L	Mecayucan	Limón	18.877157°	-96.273605°

7.3. Muestreo de Suelos

El muestreo se realizó en los meses de abril y mayo del 2019, correspondiente a la temporada de estiaje. El análisis de muestreo se realizó de acuerdo a la NMX-132-SCFI-2006. Se recolectaron 5 submuestras por hectárea de cultivo, las cuales se tomaron en los primeros 30 centímetros, ya que generalmente, la movilidad de los metales pesados a través del perfil es muy baja y en el caso de las fuentes de contaminación de origen antropogénicas como la agricultura, los contaminantes quedan acumulados en los primeros centímetros del suelo (NMX-132-SCFI-2006).

Después, se seleccionó el material fino y se evitó tomar piedras, basura o restos de cultivo, para esto se utilizó una pala recta y un cava hoyos, primero se eliminó el material vegetal en la superficie del suelo y de ahí se tomó la columna de suelo, dentro de cada predio se tomaron cinco muestras, las muestras se tomaron en un arreglo topográfico de tresbolillo, se dividió al terreno en cinco puntos imaginarios equidistantes y se procedió a tomar las submuestras, para posteriormente en el laboratorio formar las muestras compuestas, las muestras se colocaron en bolsas tipo ziploc, las cuales estaban etiquetadas con una clave alfanumérica, fecha y tipo de cultivo, se tomaron coordenadas con grados decimales en Datum WG84 para su georreferenciación, las muestras se guardaron en cajas de plástico y el mismo día se llevaron a las instalaciones del Laboratorio de Investigación en Recursos Acuáticos (LIRA), donde se conservaron a temperatura ambiente 25 °C, para ser procesadas y posteriormente realizar los análisis correspondientes.

Se agruparon los sitios de muestreo bajo el principio de la localidad y el cultivo, resultando 15 UP, compuestas de tres parcelas cada una, de ahí se conformaron las 15 muestras compuestas, a las cuales se les realizaron la medición de pH, Conductividad Eléctrica, Salinidad, Contenido de Materia y Carbón orgánico, así como la determinación de la concentración de plomo y cadmio.

7.3.1. Preparación de las muestras

Atendiendo al OP2, se prepararon las muestras para obtener resultados confiables. Las muestras de suelo se secaron en la estufa a 60 °C por 24 horas, de cada una de las muestras colectadas se tomó una alícuota y se prepararon muestras compuestas. Estas se homogeneizaron, se eliminaron piedras y restos del cultivo, se maceraron las muestras y se hicieron pasar por un tamiz de malla de 63 µm. Este tamaño de partículas se utilizó para los análisis de pH, Salinidad, Conductividad Eléctrica, Materia y Carbono Orgánico y finalmente el contenido total de Plomo y Cadmio. Este tamaño es el más fino y es el necesario para realizar los análisis químicos antes mencionados.

7.4. Determinación de pH

La determinación del pH del suelo se realizó con las especificaciones dentro de la NOM-021-RECNAT-2000 con el método AS-02. La evaluación del pH se basa en la determinación de la actividad del ion H mediante el uso de un electrodo cuya membrana es sensitiva al H. En el caso de los suelos el pH se mide potenciométricamente en la suspensión sobrenadante de una mezcla de relación agua-suelo 2:1. se colocaron 10 gramos de suelo en un vaso de precipitados de 50 ml, se le agregaron 20 ml de agua destilada, la solución se agito a intervalos de 5 minutos, durante 30 minutos y se dejó reposar por 15 minutos y posteriormente se introdujo el electrodo, para la lectura se utilizó la sonda multiparamétrica Consort C6010, previamente calibrada con las soluciones buffer de pH 4.0, 7.0 y 10.0 (NOM-021-RECNAT-2000).

La medición del pH es uno de los procedimientos más comunes e importantes en los análisis químicos del suelo, ya que controla reacciones químicas y biológicas en el suelo. La determinación del pH es afectada por varios factores tales como: el tipo y cantidad de constituyentes orgánicos e inorgánico que contribuyen a la acidez del suelo, la concentración de sales en la solución, la relación suelo: solución, la presión parcial de bióxido de carbono y el efecto de la suspensión asociado con el potencial de unión.

7.5.Determinación de la conductividad eléctrica y salinidad

La conductividad eléctrica (CE) y la Salinidad se determinaron usando la sonda multiparamétrica de mesa Consort Modelo C6010. El procedimiento consistió en pesar 10 gramos de suelo y se coloca en un vaso de precipitados de 250 ml, se adicionaron 20 ml de agua destilada al frasco que contiene la muestra de suelo, con un agitador de vidrio, se mezcló el suelo a intervalos de 5 minutos durante 30 minutos y se dejó reposar por 15 minutos (NOM-021-RECNAT-2000). Y posteriormente se introdujo el cátodo del multiparamétrico y se tomó una lectura estable, tanto para Conductividad Eléctrica la cual se midió en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Micro Siemens por centímetro) y la Salinidad media en UPS (Unidades Practicas de Salinidad).

7.6.Determinación de materia orgánica y carbono orgánico

Este análisis se realizó de acuerdo con el procedimiento de la NOM-021-SEMARNAT-2000 y se realizó a través del método AS-07, de Walkey y Black. Este método se basa en la oxidación de del carbono orgánico del suelo por medio de una dilución con dicromato de potasio y el calor que se genera por la reacción al mezclarlo con ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), después de 5 minutos de espera la mezcla se diluye, se adiciona ácido fosfórico (H_3PO_4) para evitar interferencias de Fe^{3+} y el dicromato de potasio residual es valorado con el sulfato ferroso.

Se pesaron 0.5 g de suelo seco tamizado y se colocaron en un matraz Erlenmeyer de 500 ml, se Adicionaron 10 ml de dicromato de potasio 1 N, girando el matraz

cuidadosamente para que entre en contacto con la muestra de suelo, a continuación, se con ayuda de una pipeta se agregaron 20 ml de Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) y se agitaron suavemente por un minuto, tras 30 minutos de reposo, se añadieron 200 ml de agua destilada y 5 ml de ácido fosfórico concentrado (H_3PO_4). Después de un periodo de enfriamiento de 30 minutos aproximadamente a temperatura ambiente, se añadió 5 gotas del indicador de difenilamina $(C_6H_5)_2NH$ (NOM-021-RECNAT-2000). A continuación, se tituló con la disolución de sulfato ferroso gota a gota hasta el cambio de coloración la solución de un café a un verde azulado claro. Se preparo un matraz como blanco con los mismos reactivos, pero sin la muestra de suelo. con este procedimiento se detecta entre el 70 y 84 % del carbono total por lo que es necesario introducir un factor de correlación, el cual se puede variar entresuelo y suelo. En los suelos de México se recomienda utilizar el factor 1.298 (1/0.77) (SEMARNAT, 2002). Posteriormente la estimación del contenido total de Carbono Orgánico se estimó con la siguiente ecuación.

$$\% \text{ C Orgánico} = \left(\frac{B-T}{g} \right) (N) (0.39) \text{ mcf}$$

Donde:

B = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar el blanco de reactivos (ml).

T = Volumen de sulfato ferroso gastado para valorar la muestra (ml).

N = Normalidad exacta del sulfato ferroso.

G = Peso de la muestra (g).

mcf = Factor de correlación de humedad.

El porcentaje de materia orgánica se calculó, a partir del porcentaje de Carbono Orgánico., el cual se multiplicó por el factor de Van Benmelen de 1.724, a continuación, se muestra la fórmula para el cálculo de Materia Orgánica en porcentaje:

$$\% \text{ Materia Orgánica} = \% \text{ C Orgánico} \times 1.724$$

7.7.Determinación de textura del suelo

El análisis granulométrico permite conocer la proporción de distintas partículas minerales con un diámetro menor a 2 mm presentes en el suelo, teniendo en cuenta la clasificación hecha por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos por sus siglas USDA. Las partículas consideradas como arena son de diámetro de (2 mm a 50 μm), limo (50 μm a 2 μm) de diámetro y arcilla (inferior a 2 μm) de diámetro. Este análisis se realizó de acuerdo con el procedimiento de la NOM-021-SEMARNAT-2000 y se determinó la textura por el procedimiento de Bouyoucos a través del método AS-09.

El presente método consistió en eliminar la materia orgánica. No se eliminan otros cementantes como los carbonatados. Se inicia pesando 100 gramos de la muestra de suelo seco y se le adiciono 50 ml hexametáfosfato de sodio (Na_3PO_3)₆, y se dejó reposar por 30 minutos, posteriormente se agregaron 20 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2), se agito y se dejó reposar por 24 horas, una vez transcurrido ese tiempo se eliminó el sobrenadante y se transfirió la muestra a una probeta de 1000 ml y se aforo con agua destilada, se dejó reposar por un periodo de 24 horas y posteriormente con ayuda de un termómetro se tomó la temperatura de la muestra, se agito durante 1 minuto para dispersar las partículas y se introdujo el densímetro de Bouyoucos, las lecturas se tomaron a los 20 segundos, 1 minuto y 41 segundos, 6 minutos y 45 segundos, 54 minutos y 2 segundos y finalmente a las 2 horas con 2 minutos, las distintas partículas se separaron por sedimentación continua, la muestra tomada a diferentes tiempos se tomó y diferentes profundidades se colocó en crisoles, los cuales se colocaron en la estufa de secado a 60 °C. por 24 horas, para la eliminación del agua, se pesaron por triplicado y se registraron los datos de los pesos, para realizar los cálculos, el material que se encontraba en la solución en la probeta, se lavó y se hizo pasar en un tamiz de 63 micras, para finalmente ponerlo en un crisol y dejarlo secando por 24 horas en la estufa a 60 °C, el material seco se colocó en un juego de tamiz en el rotap por 20 minutos para la separación de partículas de acuerdo al diámetro, Se pesó el material por separado de cada tamiz y se realizaron los cálculos.

Finalmente, los resultados fueron expresados en porcentajes para cada una de las fracciones y de acuerdo al triángulo de texturas de la USDA, se determina la clase textural para cada una de las muestras.

7.8.Determinación de metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica

Las muestras de suelo se analizaron para los metales pesados Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) y se llevó a cabo bajo las especificaciones de la NOM-117-SEMARNAT/SSA1-2004 por espectrometría de absorción atómica, el suelo fue secado en las charolas metálicas a 35 °C y posteriormente fueron tamizadas por un tamiz de 63 µm. De estas partículas se pesaron 0.5 gramos, la cual se coloca en un vaso de precipitados de 50 ml a la cual se le adicionan 10 mL de ácido nítrico (HNO₃) de grado reactivo de 65 % MERCK y se deja reaccionando por un periodo de 24 horas, posteriormente se hacen constantes adicciones de 10 mL Peróxido de Hidrogeno (H₂O₂) y se ponen a reaccionar sobre la parrilla a 120 °C la adicción de Peróxido de Hidrogeno se repite hasta que la muestra deje de reaccionar y libere los iones metálicos de interés. Una vez concluida la digestión se procedió al filtrado de las muestras la cual se llevó a cabo con vasos tipo NALGENE con filtro Millipore modelo HAWP04700 de 0.45 µm, y una bomba de vacío, el producto filtrado fue transferido a un matraz de 25 mL, los cuales se aforaron con agua destilada y finalmente las muestras se transfirieron a frascos ámbar previamente rotulados con un código de identificación para su almacenamiento y refrigeración a 4 °C hasta su análisis, el cual se realizó con el equipo de absorción atómica Thermo Cientific Modelo Ice 3500 AA System (Thermo Scientific®) (Imagen 6), mediante espectrofotometría de flama. Los parámetros utilizados para el análisis de muestra se hicieron por triplicado.

Para la lectura en el espectrofotómetro, se revisaron las gráficas de detección para cada uno de los metales (plomo y cadmio), de esta forma, se prepararon curvas de calibración para el plomo y cadmio. Para el análisis de las muestras de los MP

(plomo y cadmio) se utilizó el horno de grafito con gas argón (5.0 pureza ultra alta) marca Praxair (Praxair® Technology, Inc.) a una longitud de onda de 217 nm para Pb y 228.8 nm para Cd.

7.9. Determinación del Índice de geoacumulación I_{geo}

El índice de geoacumulación propuesto por Müller se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_n}{k B_n}$$

Donde:

C_n : es la concentración del elemento examinado

B_n : concentración geoquímica del metal (Encontrado en la corteza terrestre)

k: Factor de correlación de efectos litogénicos (k=1.5)

El factor 1.5 se utiliza para minimizar las variaciones en los niveles base, los cuales pueden deberse a variaciones litológicas en el suelo (Stoffers *et al.*, 1986).

7.10. Análisis estadístico

Atendiendo al OP3, se procedió con el análisis estadístico en la fase tres.

Se utilizó el programa ArcMap versión 10.3 para representar en un mapa la distribución espacial y las concentraciones de los metales pesados y de las propiedades fisicoquímicas del suelo en la zona de estudio del municipio de Cotaxtla, Veracruz. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa Statistic 7.0. Se realizó una correlación con programa MINITAB 18 entre las variables fisicoquímicas del suelo y la concentración de plomo.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Variables fisicoquímicas del suelo

Los resultados de los análisis fisicoquímicos se presentan en la tabla 9.

8.1.1.pH

El pH obtenido en las muestras compuestas oscila entre los 5.81 y 7.25, con una media de 6.56 ± 0.38 . El 53.3 % de los suelos presente un pH moderadamente ácido y 46.6 % restante de los suelos un pH neutro.

El pH más alto se presentó en la muestra de suelo del cultivo de plátano de la Unidad de Producción S2B de la localidad de Loma Bonita con un pH de 7.25 ± 0.00 , lo que corresponde a suelos neutros, mientras que el pH más bajo lo presentó la muestra de suelo de cultivo de sandía de la Unidad de Producción S7S de la localidad de Los bajos con un pH de 5.81 ± 0.00 y se considera un suelo moderadamente ácido (Figura 2 y 3). Por otro lado, el cultivo de papaya el promedio de pH fue de 6.55 ± 0.15 lo que corresponde a un suelo moderadamente ácido, para el cultivo de limón 6.73 ± 0.35 lo que indica que es un suelo neutro y finalmente para el cultivo de maíz tenemos un pH de 6.25 ± 0.10 lo que nos indica que son suelos moderadamente ácidos (Figura 3).

De acuerdo a lo indicado por McBride *et al.* (1997), el pH del suelo es el factor más importante que afecta la biodisponibilidad de los metales. Al aumentar el valor del pH, los metales pesados son removidos de la solución del suelo y son absorbidos por los coloides que se encuentran en el suelo, disminuyendo su biodisponibilidad (Lasat, 2000). Acevedo *et al.* (2005), indicaron que el pH típico para suelos ácidos no contaminados por metales pesados fluctúa entre 6 y 7, una ligera contaminación se presenta entre un pH de 5 y 6. Además, conforme el pH disminuye la contaminación incrementa. En suelos alcalinos no contaminados por metales pesados el pH se encuentra entre 7 y 8, una ligera contaminación se da entre pH 8 y 9 y la contaminación en este tipo de suelos incrementa a medida que incrementa el pH. Hernández *et al.* (1994) mencionan que el pH está condicionado por la

presencia de carbonatos de calcio y a la acumulación de sales provenientes del agua de riego.

Como se aprecia en la Figura 2, existen diferencias significativas entre las muestras de las Unidades de Producción S5L, S2B y S7S.

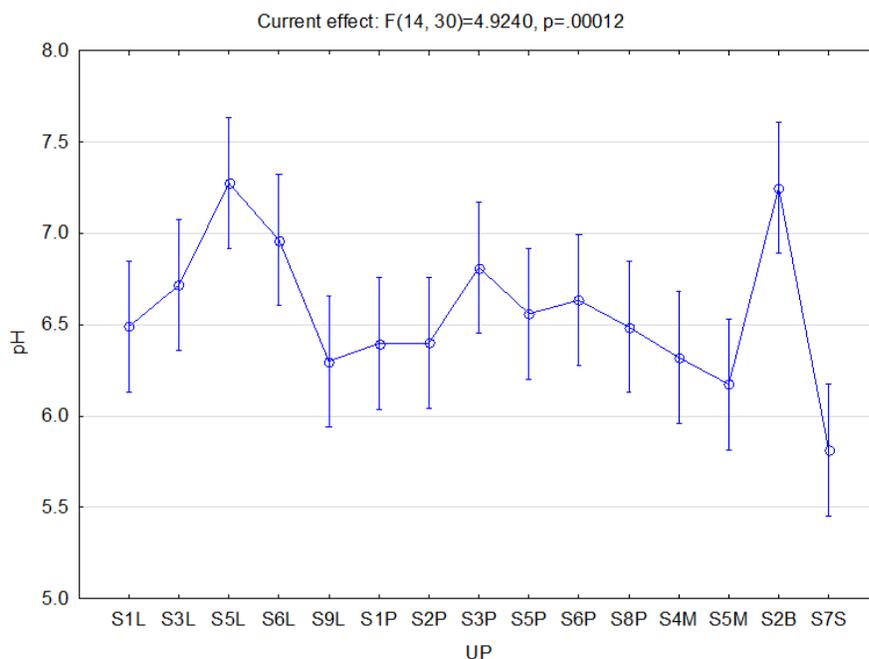


Figura 2. Representación de las medias de pH por Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

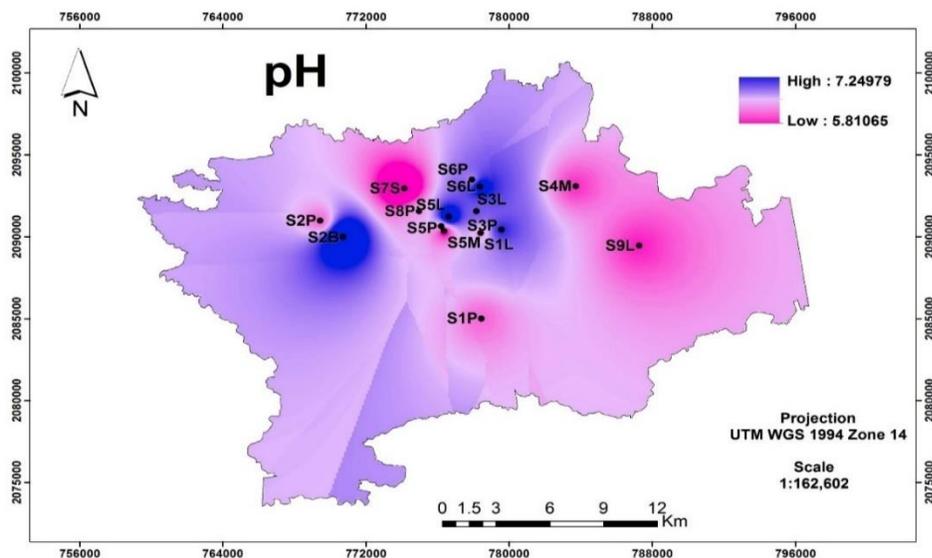


Figura 3. Distribución espacial de las medias de pH por Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

8.1.2. Materia Orgánica y Carbono Orgánico

Los resultados de MO se observan en la figura 4 y 5; se observó que el mayor porcentaje se encontraba en la Unidad de Producción SL9, correspondiente al cultivo de limón de la localidad de Mecayucan con 3.26 % de M.O y 2.54 % de CO, mientras que la Unidad de Producción de menor concentración fue la S3P, correspondiente a la muestra de suelo de cultivo de Papaya de la localidad del Maguey con 0.29 % de MO y 0.23 % de CO. Sin embargo, la totalidad de las muestras son consideradas con un muy bajo contenido de materia orgánica, esto indica que los suelos son pobres en cuanto a la fertilidad. De acuerdo Reyes y Avendaño (2012), los factores que tiene influencia en la concentración de metales pesados en el suelo son: el pH del suelo y, en menor grado, el contenido de materia orgánica.

Como se aprecia en la figura 4, existen diferencias significativas en el contenido porcentual de Materia orgánica y Carbono orgánico en las Unidades de Producción S9L y S3P.

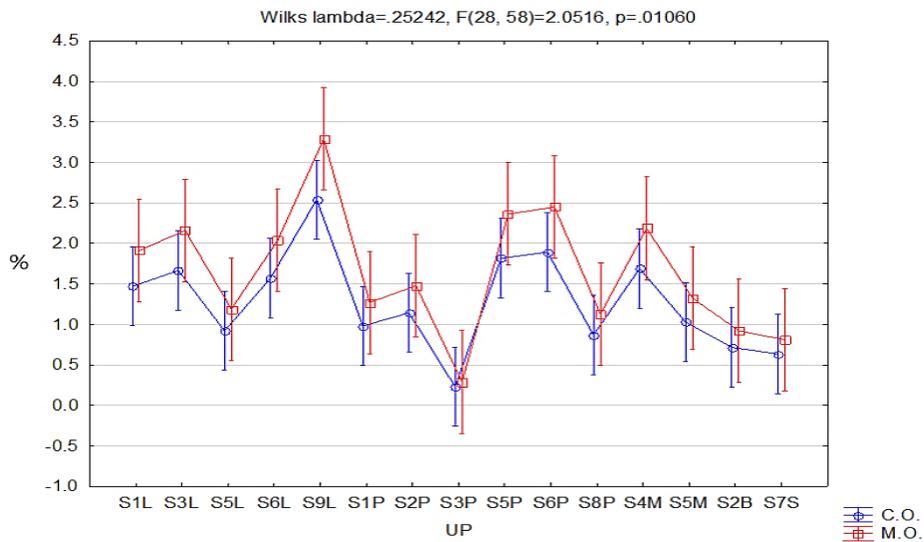


Figura 4. Representación de las medias de materia orgánica y carbón orgánico por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

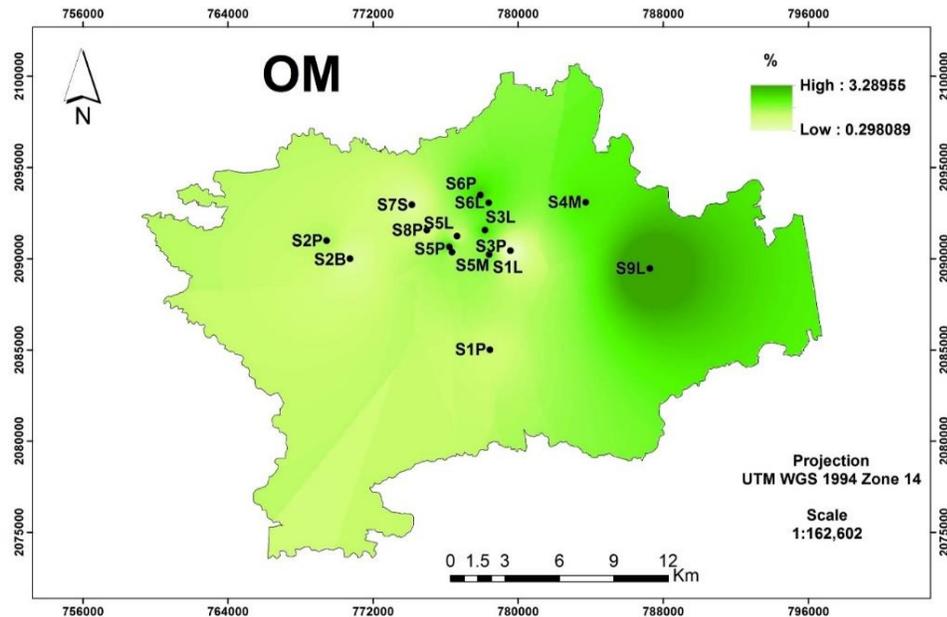


Figura 5. Distribución espacial de las medias de materia orgánica por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

8.1.3. Conductividad Eléctrica y Salinidad

Los resultados de C.E. se presentan en la figura 6, donde se observó que el valor más alto se encontró en la Unidad de Producción S9L, correspondiente al cultivo de limón de la comunidad de la Mecayucan con $194.20 \mu\text{s cm}^{-1}$ y la más baja fue en el cultivo de papaya fue en la Unidad de Producción S5M de la localidad de Mata Tambor con un valor de $98.30 \mu\text{s cm}^{-1}$. Por otro lado, los valores de salinidad oscilaron entre 0.1 y 0.2 UPS, considerados como suelos con efectos despreciables de la salinidad, debido a los valores encontrados. La fertilidad del suelo está relacionada con la pequeña presencia de sales solubles en el suelo y nos permite saber la cantidad de sales que contienen el mismo y así establecer si las sales solubles se encuentran en cantidades suficientes como para afectar el desarrollo de las plantas y la movilidad de los nutrientes en el suelo. De acuerdo con (Corwin *et al.* 1999) la CE se ve influenciada por el contenido de agua, el de arcilla y la presencia de iones intercambiables en el suelo.

La conductividad eléctrica y la salinidad están relacionadas y son directamente proporcionales, la salinidad en los suelos es un grave problema que afecta al

desarrollo de los cultivos y muchas veces esto se interpreta como deficiencia nutrimental, lo que genera mayores aplicaciones de fertilizantes para corregir esos problemas, sin embargo, también se están añadiendo trazas de metales pesados al suelo. De acuerdo con Wei *et al.* (2009) la variación y comportamiento de los valores de la CE en el suelo se atribuyen a las aplicaciones de fertilizantes y las malas prácticas de manejo sobre el terreno.

En la figura 6, se observa que existen diferencias significativas en las medias del contenido de conductividad eléctrica de la Unidad de Producción S9L, con respecto al resto de Unidades de Producción.

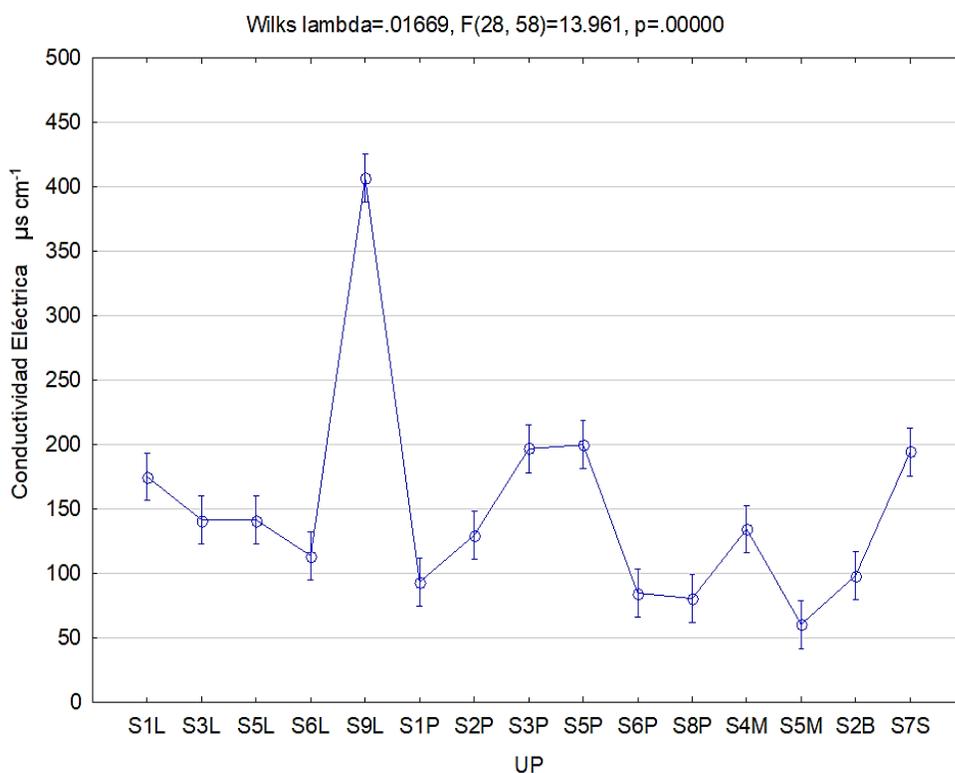


Figura 6. Representación de las medias de conductividad eléctrica por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz

Como se aprecia en la figura 7, no existen diferencias significativas en las medias de salinidad de las Unidades de Producción.

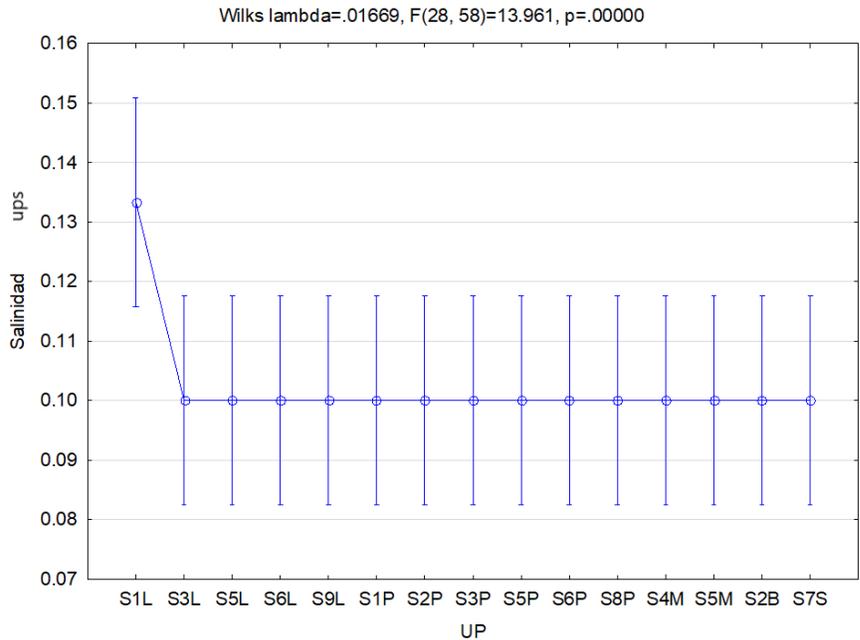


Figura 7. Representación de las medias de salinidad de las Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

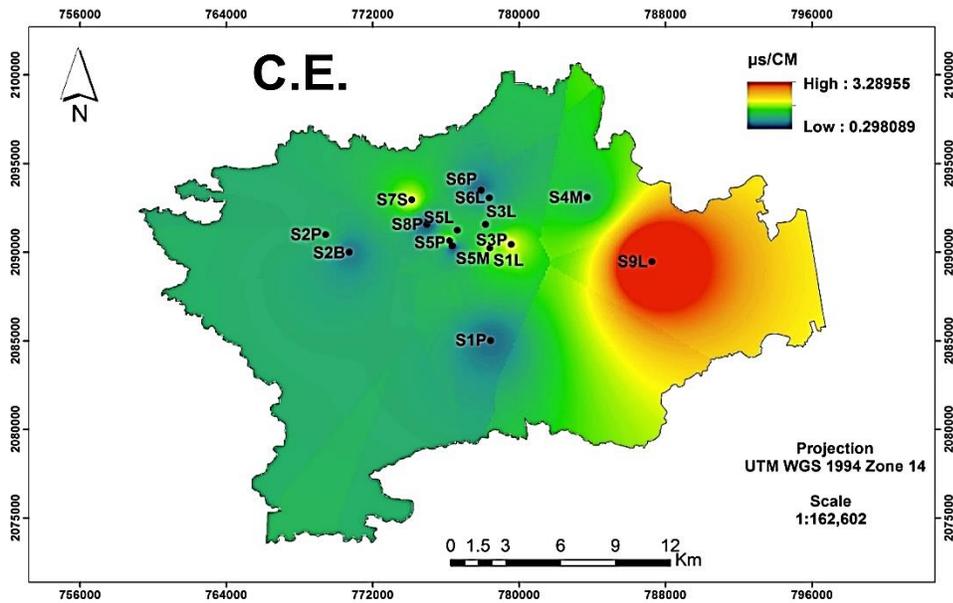


Figura 8. Distribución espacial de las medias de conductividad eléctrica por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

8.1.4. Textura del suelo

Los resultados de la clasificación textural se presentan en la tabla 10. En los suelos agrícolas de cultivo de limón tenemos que en un 60 % corresponden a suelos con una textura de tipo Franco, 20 % a la Franco Arenoso y 20 % a Franco Arenoso

Arcilloso. En el suelo de cultivo de papaya tenemos que el 83.3 % de los suelos corresponden a una textura de Franco Arenoso y el 16.7% a suelos de tipo Franco., en los suelos agrícolas de cultivo de plátano el 100 % de los son suelos de textura Franco, algo similar son los suelos de cultivo de sandía donde el 100 % de los suelos tienen una textura de tipo Franco y para el suelo agrícola de cultivo de maíz el 50 % de los suelos son de textura Franco Arenosa y el 50 % son suelos de textura de tipo Franco.

La figura 9 muestra los grupos texturales de las localidades, donde se observó que el 47 % de las muestras representan suelos del tipo Franco Arenoso, el 46 % suelos de textura Franco y 7 % a los suelos de tipo Franco-Arcilloso-Arenoso. Así mismo. Hueros y Baena (2008), observaron que la disponibilidad de plomo es mayor en suelos arenosos ácidos y con bajo contenido en materia orgánica; por encima de un pH de 5 se forman complejos organometálicos de plomo. Así mismo Laegreid *et al.* (1999), señalan que la disponibilidad y movilidad del cadmio (Cd) en el suelo depende del tipo y cantidad de arcilla.

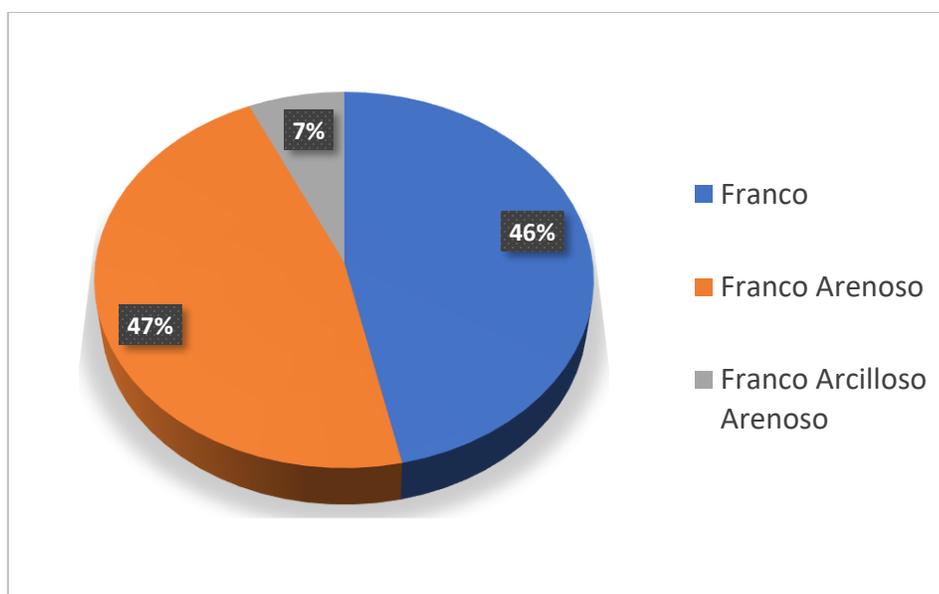


Figura 9. Características texturales de los suelos agrícolas de las Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

En la figura 10, se aprecia, la variación de medias porcentuales del contenido de arenas, limos y arcillas en los suelos de las Unidades de Producción.

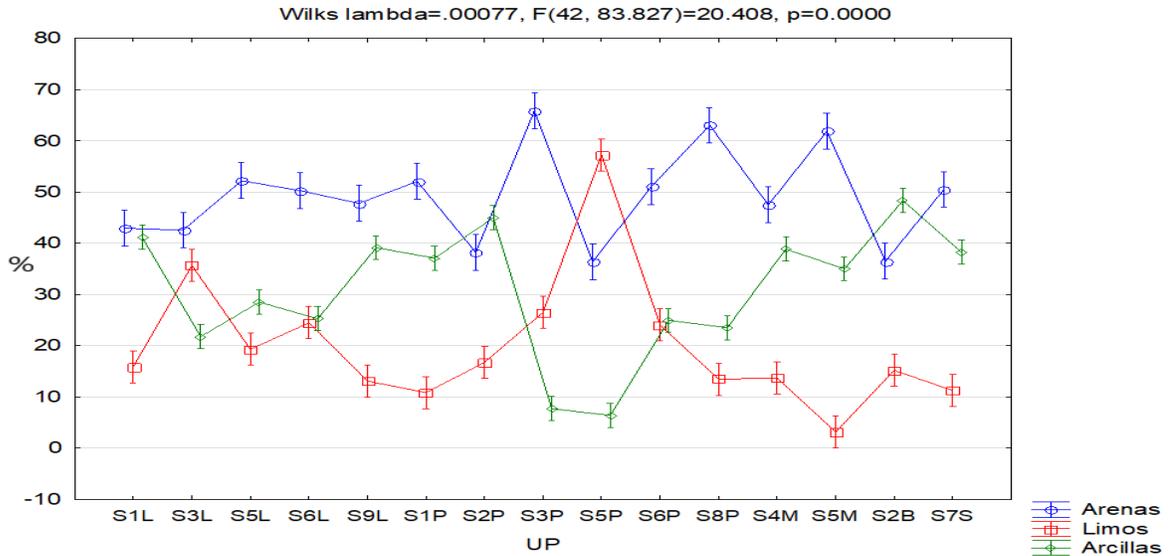


Figura 10. Se aprecian las medias porcentuales de la concentración de arenas, limos y arcillas en las muestras de suelo de las Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

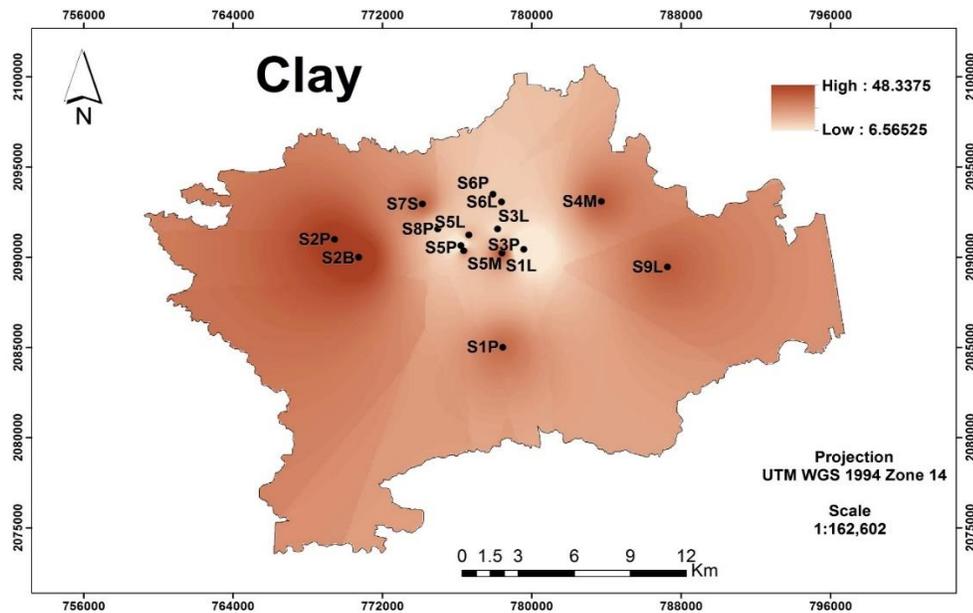


Figura 11. Distribución espacial del contenido de Arcillas por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

8.2. Concentración de plomo (Pb) y cadmio (Cd)

La tabla 12 muestran los valores de metales pesados, donde los resultados de plomo oscilaron de 0.048-0.159 mg kg⁻¹ con una media de 0.92± 0.27 mg kg⁻¹; el valor más alto de plomo fue en la Unidad de Producción S9L correspondiente a la localidad Mecayucan de suelo de cultivo de limón, mientras que el valor más bajo fue en la Unidad de Producción S3P, correspondiente a la localidad de El Maguey

de cultivo de papaya (Figura 12). Para el caso de cadmio, no fue detectado en ninguno de los puntos de muestreo, por lo que se considera $<0.01 \text{ mg kg}^{-1}$. No obstante, los valores de los metales fueron comparados con los límites máximos permisibles de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, donde los valores de plomo no superan las regulaciones, sin embargo, la presencia del metal se puede relacionar al uso de los fertilizantes inorgánicos en cada cultivo, y será necesario la vigilancia de estos porque puede ser que los cultivos estén absorbiendo los metales. Maldonado *et al.* (2001) mencionaron que, por cada tonelada de fruta de limón mexicano, se requieren 1.86 kg de nitrógeno, 0.17 kg de fósforo, 2.25 kg de potasio, 1.05 kg de calcio, 0.13 kg de magnesio, 1.34 g de azufre, 1.34 g de manganeso, 4.47 g de hierro, 2.82 g de zinc, 3.44 g de cobre y 3.3 g de boro.

El plátano es un cultivo que demanda mucho Potasio para su desarrollo, Morales y Flores (1998) indicaron que la dosis óptima de fertilización para cubrir las necesidades de Potasio son 568.1 gr de Potasio por planta en 2 aplicaciones por año.

De manera similar de acuerdo con Barrales (2009), la demanda de nitrógeno por hectárea para la producción de maíz de temporal es de 90 kg, 40 kg de calcio y 20 kg de potasio. Reche (1988) indicó que por cada tonelada de fruta de sandía se requieren 3.75 kg de nitrógeno, 2.5 kg de fósforo y 7.5 kg de potasio. Bajo condiciones naturales pocos son los suelos que puede satisfacer las necesidades nutrimentales del papayo. Cuhna y Haag (1980) mencionaron que por cada tonelada de fruta producida de papaya se requieren 1.77 kg de nitrógeno, 2.12 kg de potasio, 0.35 kg de calcio, 0.20 kg de fósforo, 0.20 kg de azufre y 0.18 de kg de magnesio.

Todo lo anterior nos indica la alta demanda de fertilizantes inorgánicos y orgánicos que demandan los cultivos de estudio: limón, papaya, plátano, maíz y sandía.

En la figura 12, se aprecia que las Unidades de Producción S1L, S2B, S3P, S5L, S6L y S9L muestran diferencias significativas.

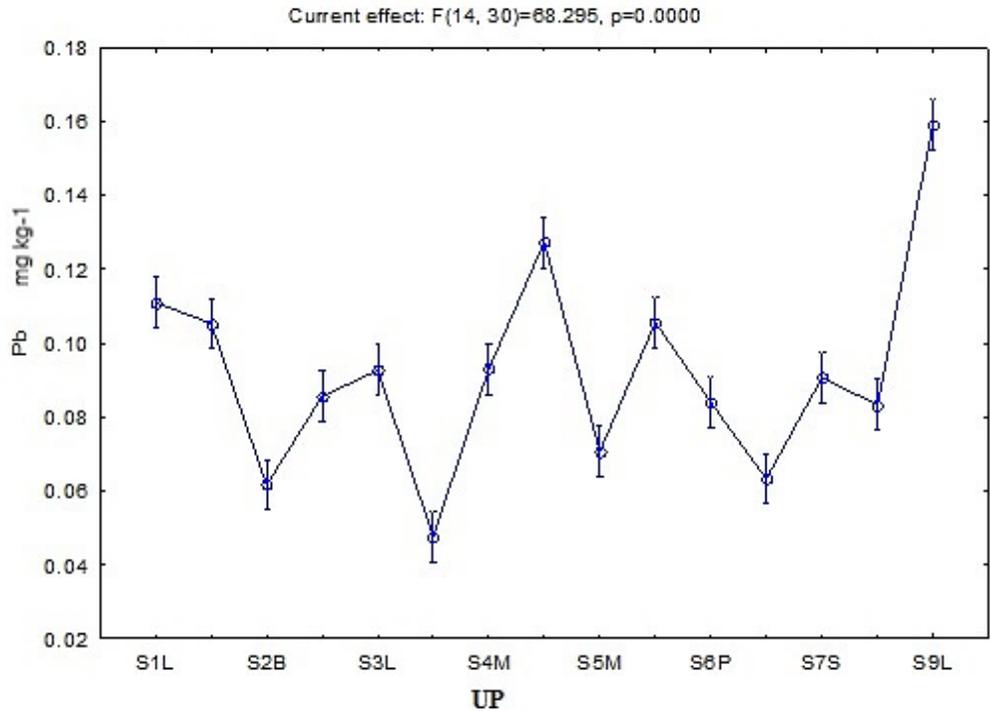


Figura 12. Comparación de los resultados obtenidos de la concentración de plomo de las Unidades de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

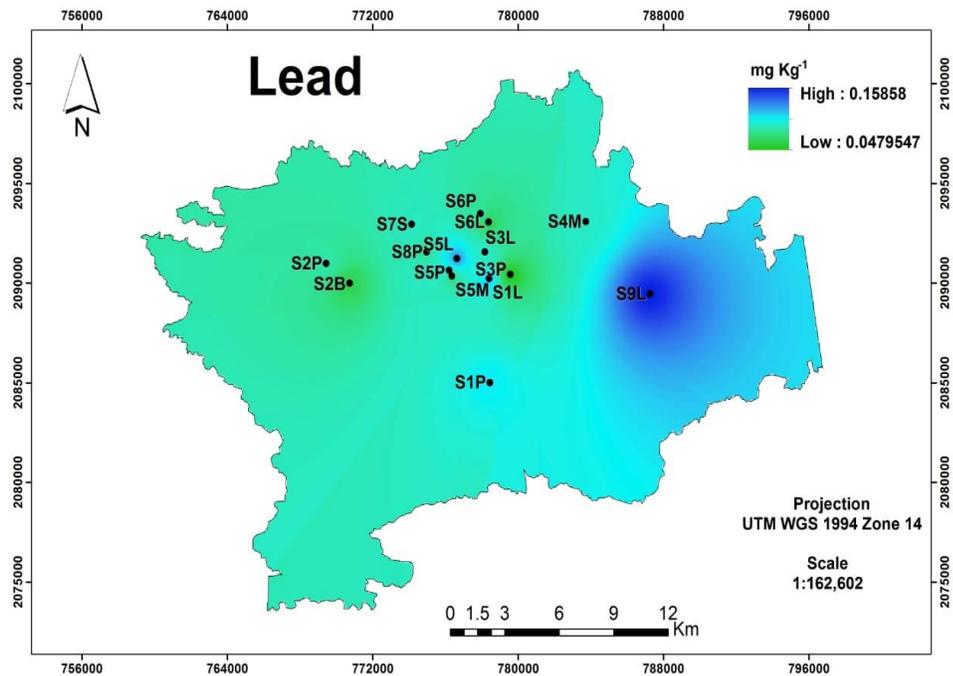


Figura 13. Distribución espacial de plomo por Unidad de Producción del municipio de Cotaxtla, Veracruz.

La Unidad de Producción S2B de suelo de cultivo de plátano con una concentración de 0.062 mg kg⁻¹ de la comunidad de Los Bajos , la Unidad de Producción S2P de

suelo de cultivo papaya con una concentración de $0.0862 \text{ mg kg}^{-1}$ de la comunidad de los Bajos, la Unidad de Producción S5M de suelo de cultivo de maíz con una concentración de $0.0711 \text{ mg kg}^{-1}$ de la comunidad de Mata Tambor , la Unidad de Producción S6P de suelo de cultivo de papaya con una concentración de $0.0839 \text{ mg kg}^{-1}$ de la comunidad de La Mocarraca y la Unidad de Producción S8P de suelo de papaya con una concentración de $0.0862 \text{ mg kg}^{-1}$ de la comunidad de Mata Tejón, presentan valores de concentración de plomo similares a los reportados por (Vázquez *et al.*, 2019), quienes en la región de Azuay, Ecuador en suelo de cultivo de lechuga *Lactuca sativa* encontraron concentraciones de plomo entre los rangos de 0.066 y 0.087 mg kg^{-1} . De manera similar la Unidad de Producción S2B de suelo de cultivo de plátano con un valor de $0.0623 \text{ mg kg}^{-1}$ de la comunidad de Los Bajos, La Unidad de Producción S3L de suelo de cultivo de limón con un valor de $0.0926 \text{ mg kg}^{-1}$ de la comunidad de El Maguey, La Unidad de Producción S4M de suelo de cultivo de maíz con un valor de $0.0928 \text{ mg kg}^{-1}$ de la comunidad de Santa Rita y la Unidad de Producción S7S de suelo de cultivo de sandía con un valor de $0.0911 \text{ mg kg}^{-1}$ de la comunidad de Loma Bonita, presentan valores similares a los reportados por (Félix *et al.*, 2002) quienes en la Provincia Esmeraldas, Ecuador en suelo de cultivo de Plátano *Musa paradisiaca* encontraron concentraciones de plomo en un rango que oscila de los 0.080 a los 0.96 mg kg^{-1} . La Unidad de Producción S9L de suelo de cultivo de limón de la localidad de Mecayucan con un valor de $0.1586 \text{ mg kg}^{-1}$ es un valor similar al reportado por Amaro-Espejo *et al.*, 2020, quienes, en el mismo municipio de Cotaxtla, Veracruz en suelo de cultivo de papaya encontraron concentraciones de plomo que van desde los 0.18 a los 0.32 mg kg^{-1} . Por otro lado, no se encontró concentración de cadmio, esto concuerda con lo reportado por (Acosta, 2007), en la zona agrícola del Valle del Mezquital, Hidalgo, donde en suelo agrícola de cultivo de Maíz *Zea maíz* L. no detecto concentraciones de cadmio y plomo. De igual manera las 15 muestras del presente estudio para la concentración de plomo y cadmio, concuerdan con lo reportado por (De la Cruz *et al.*, 2012) en La Chontalpa, Tabasco, en suelo de cultivo de Caña de Azúcar *Saccharum officinarum* encontró concentraciones $< 0.6 \text{ mg kg}^{-1}$ para plomo y no detecto concentraciones de cadmio.

8.3. Análisis de correlación.

En la Tabla 9 se aprecian los resultados de los análisis de correlación que han sido obtenidos de las correlaciones existentes entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y las concentraciones de plomo en el suelo agrícola. En este estudio se observó que el plomo se correlaciona de forma positiva moderada y altamente significativa con el contenido de materia orgánica y el contenido de carbono orgánico y la conductividad eléctrica, indicando que al aumentar el contenido de materia orgánica y conductividad eléctrica aumenta la concentración de plomo en el suelo. De igual manera el porcentaje de arenas se correlaciona de forma negativamente moderada y altamente significativa con el contenido de materia orgánica, y el contenido de carbono orgánico, lo que nos indica que, al aumentar el contenido de arenas en la textura del suelo, disminuye el contenido de materia orgánica y carbono orgánico en el suelo. Las arenas tienen nula participación en los procesos de retención y adsorción de los metales pesados, pero pueden contribuir a la movilización de estos a lo largo del perfil del suelo (Huerta y Banea, 2008). Así mismo el contenido de limos se correlaciona de forma positiva baja y altamente significativa con el pH, lo que indica que al disminuir el pH del suelo aumenta la concentración de limo en el suelo. Algo similar ocurre con el contenido de arcillas se correlaciona de forma negativa baja y altamente significativa con el pH. La correlación entre los limos y arcillas es negativa y alta. El contenido de materia orgánica y carbono orgánico se correlacionan de forma positiva moderada y altamente significativa con la conductividad eléctrica. Lo que nos indica que al aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo aumenta la concentración de sales en el mismo. Finalmente, el pH se correlaciona de forma negativa baja y altamente significativa con la conductividad eléctrica, indicando que un aumento del valor del pH estaría relacionado con una disminución de la conductividad eléctrica.

Tabla 9.Matriz de correlaciones entre textura del suelo, contenido de materia orgánica, carbono orgánico, conductividad eléctrica, pH y contenido de plomo en el suelo.

	Pb	Arenas	Limos	Arcillas	M.O	C.O	pH	CE
Arenas	*-0.278 **0.099	1						
Limos	*-0.003 **0.000009	*-0.396 **0.156	1					
Arcillas	*0.206 **0.042	*-0.325 **0.105	*-0.739 **0.546	1				
M. O	*0.605 **0.366	*-0.418 **0.174	*0.277 **0.076	*0.021 **0.0004	1			
C. O	*0.606 **0.367	*-0.415 **0.172	*0.273 **0.074	*0.023 **0.0005	*1.00 **1	1		
pH	*-0.215 **0.046	*-0.155 **0.024	*0.313 **0.097	*-0.209 **0.043	*-0.129 **0.016	*-0.13 **0.016	1	
CE	*0.643 **0.413	*-0.167 **0.027	*0.148 **0.021	*-0.030 **0.0009	*0.456 **0.207	*0.457 **0.208	*-0.214 **0.045	1

La correlación es significativa cuando el valor se aproxima a -1 o 1.

* correlacion de Pearson

** valor de r^2

8.4. Índice de geo acumulación I_{geo}

Los resultados de índice de geoacumulación, fueron utilizados para evaluar el grado de contaminación de los suelos en las áreas de cultivo del municipio de Cotaxtla, Ver. Para el caso específico de plomo, se pudo observar que el total de las Unidades de Producción evaluadas, presentaron valores negativos, es decir, valores menores a 0; lo cual indica que el grado de contaminación corresponde a la categoría de suelo “No Contaminado” (Figura 14). Los resultados hallados fueron similares a lo reportado por Amaro-Espejo *et al.*, 2020 donde encontraron un índice de geo acumulación de -6 para plomo en suelos agrícolas de cultivo de papaya en Cotaxtla, Veracruz, lo cual corresponde a suelos “No Contaminados”.

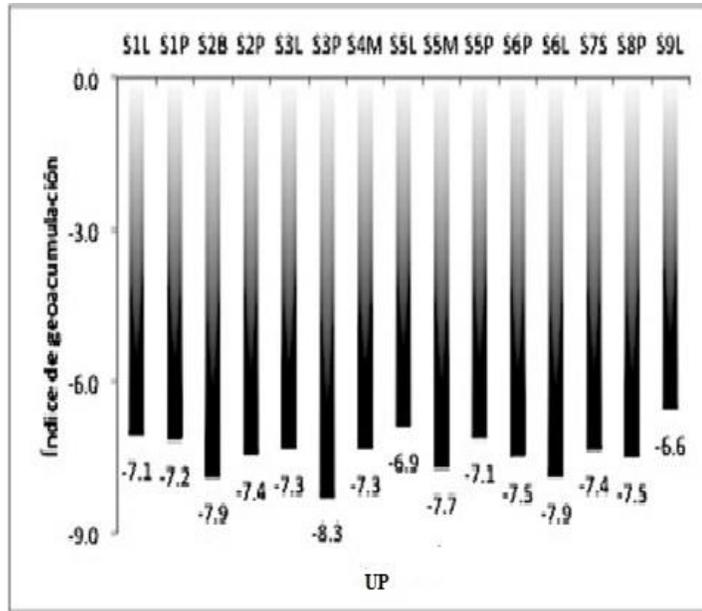


Figura 14. Índice de geoacumulación por Unidad de Producción de la region de Cotaxtla, Veracruz.

9. CONCLUSIONES

- No se rechaza la hipótesis, ya que si existe una influencia de los fertilizantes sobre la concentración de plomo en los suelos agrícolas.
- Los resultados de índice de geoacumulación indican que el suelo no se encuentra contaminado, no obstante, el área agrícola del municipio de Cotaxtla está expuesta al aumento de la concentración de los metales por el uso intensivo de fertilizantes y no se descarta que en un futuro las concentraciones de los metales aumenten hasta niveles peligrosos.
- La disminución del pH y el contenido de materia orgánica aumenta las disponibilidad de absorción del metal hacia las plantas de cultivo.
- Los resultados alcanzados en este trabajo evidencian un riesgo potencial sobre la acumulación progresiva de los metales analizados en los suelos agrícolas del municipio de Cotaxtla, Veracruz y no se descarta que en un futuro las concentraciones de los metales pesados aumenten hasta niveles peligrosos.
- Con respecto al conocimiento generado durante la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental en el Instituto Tecnológico de Boca del Río, se concluye es necesario desarrollar conocimientos y tecnologías que ayuden a disminuir el impacto de las actividades antropogénicas en el medio ambiente, se deben proponer y ejecutar acciones socialmente aceptables, económicamente viables y ecológicamente responsables.

10. RECOMENDACIONES

- Identificar las fuentes de fertilizantes que contienen metales pesados y disminuir su uso en los sistemas de producción agrícola.
- Utilizar fertilizantes orgánicos en los sistemas de producción agrícola.
- Asesorar a los productores, sobre el manejo agrícola de los cultivos de la región de Cotaxtla, Veracruz.
- Ampliar el área de estudio a mas zonas de cultivos del mismo municipio y otros puntos agrícolas de Veracruz.
- Incluir dentro del análisis de suelos, la capacidad de intercambio catiónico (CIC).
- Monitorear los suelos agrícolas, específicamente aquellos bajo sistemas de producción intensiva.
- Tener una adecuada disposición final de envases y contenedores de fertilizantes y plaguicidas.

11. REFERENCIAS

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentasti, E., Sarzanini, C., & Barberis, R. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric investigation of pollutant profiles. *Environmental pollution*, 119(2), 177-193.
- Acevedo, E., Carrasco, M., León, O., Silva, P., Castillo, G., Ahumada, I., ... & González, S. (2005). Informe de criterios de calidad de suelo agrícola. *Servicio Agrícola y Ganadero, Chile*.
- Aikpokpodion, P. E., Lajide, L., & Aiyesanmi, A. F. (2012). Assessment of heavy metals mobility in selected contaminated cocoa soils in Ondo state, Nigeria. *Global Journal of Environmental Research*, 6(1), 30-35.
- Alloway, B. J. (2013). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy metals in soils* (pp. 11-50). Springer, Dordrecht.
- Alloway, B. J. (2013). Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy metals in soils* (pp. 11-50). Springer, Dordrecht.
- Alloway, B. J. (Ed.). (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Alloway, B. J. (Ed.). (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (Vol. 22). Springer Science & Business Media.
- Amaro-Espejo, I. A., Castañeda-Chávez, M. D. R., Murguía-González, J., Lango-Reynoso, F., Bañuelos-Hernández, K. P., & Galindo-Tovar, M. E. (2020). Geoaccumulation and Ecological Risk Indexes in Papaya Cultivation Due to the Presence of Trace Metals. *Agronomy*, 10(2), 301.
- Andreu, V. (1991). Contenido y evolución de Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn en suelos de la comarca de l'Horta y la Ribera Baixa (Valencia). *Universitat de València (Facultat de Farmàcia)*.
- Angelova, V., Ivanov, K., and Ivanova, R. (2004). Effect of chemical forms of lead, cadmium, and zinc in polluted soils on their uptake by tobacco. *Journal of Plant nutrition*, 27(5), 757-773.

- Anxiang, L. U., Zhang, S., Xiangyang, Q., Wenyong, W. U., & Honglu, L. I. U. (2009). Aging effect on the mobility and bioavailability of copper in soil. *Journal of Environmental Sciences*, 21(2), 173-178.
- Arévalo-Gardini, E., Obando-Cerpa, M. E., Zúñiga-Cernades, L. B., Arévalo-Hernández, C. O., Baligar, V., & He, Z. (2016). Metales pesados en suelos de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao* L.) en tres regiones del Perú. *Ecología aplicada*, 15(2), 81-89.
- Argentel, L., González, L. M., y Plana, R. (2006). Efecto de altas concentraciones salinas sobre la germinación y el crecimiento del trigo (*Triticum aestivum*) variedad Cuba-C-204. *Cultivos tropicales*, 27(3), 45-48.
- Atafar, Z., Mesdaghinia, A., Nouri, J., Homae, M., Yunesian, M., Ahmadimoghaddam, M., & Mahvi, A. H. (2010). Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration. *Environmental monitoring and assessment*, 160(1-4), 83.
- Aydinalp, C., and Marinova, S. (2003). Distribution and Forms of Heavy Metals in Some Agricultural Soils. *Polish Journal of Environmental Studies*, 12(5).629-633.
- Balderas-Plata, M. A., del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., Carrillo-González, R., Ortiz-Solorio, C. A., y Lugo-de la Fuente, J. A. (2006). Distribución de elementos traza en los suelos de las microcuencas en Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 451-461.
- Balderas-Plata, M. A., del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., Carrillo-González, R., Ortiz-Solorio, C. A., & Lugo-de la Fuente, J. A. (2006). Distribución de elementos traza en los suelos de las microcuencas en Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 451-461.
- Barrales, D. J. S. (2009). Plan Estratégico para la producción de Granos en México. *Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria*.
- Bautista-Cruz, A., Arnaud-Viñas, M. D. R., & Carrillo-González, R. (2011). Elementos traza en dos áreas agrícolas. *Terra Latinoamericana*, 29(2), 123-131.

- Bowie, S.H.U. and Thornton (1985): Environmental Geochemistry and Health. Kluwer Academic Publ., Hingham. MA.
- Cabezas, J. G., Alonso, J., Pastor Piñeiro, J., Sastre Conde, I., & Lobo, M. C. (2004). Absorción y acumulación de metales pesados en tres especies vegetales en suelos enmendados con lodos de depuradora.
- Cajuste, L. J., and Laird, R. J. (2000). The relationship between phytoavailability and the extractability of heavy metals in contaminated soils. *Environmental restoration of metals contaminated soils*, 189-198.
- Carvalho, F. P., D. D. Nhan, C. Zhong, T. Tarares, S. Klaine. (1998). Tracking Pesticides in the Tropics, Bulletin IAEA 40 (3), 24-30.
- Castellanos, J. Z., Bueno, J. U., & Santelisis, A. A. (2000). La calidad del Agua para uso agrícola. *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Ed. INCAPA, 158-166.
- Caso M. Pisanty I. y Ezcurra E. 2004. Aprovechamiento y conservación del recurso. En: Diagnostico ambiental del Golfo de México II. Ed. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Instituto de ecología A.C y Harte Research Institute for Gulf of México Studies. México. Pp.711-725.
- Chambi, L. J., Orsag, V., & Niura, A. (2012). Evaluación de la Presencia de metales pesados y arsénico en suelos agrícolas y cultivos en tres microcuencas del Municipio de Poopo. *Revista Boliviana de Química*, 29(1), 111-119.
- Chan, D. Y., & Hale, B. A. (2004). Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: uptake and retranslocation as sources of variation. *Journal of Experimental Botany*, 55(408), 2571-2579.
- Cheng, S. (2003). Heavy metals in plants and phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(5), 335-340.
- Chibuike, G. U., and Obiora, S. C. (2014). Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods. *Applied and Environmental Soil Science*, (2014).1-12.

- Chojnacka, K., Chojnacki, A., Gorecka, H., and Górecki, H. (2005). Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants. *Science of the Total Environment*, 337(1-3), 175-182.
- Codex stand. 1995. Norma general del codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los elementos. Recuperado de: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/livestockgov/documents/CXS_193s.pdf
- Cole, J. F., and Volpe, R. (1983). The effect of cadmium on the environment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 7(1), 151-159.
- Colombo, L., Mangione, D., Bellicioni, S., and Figliolia, A. (1998). Soil profile distribution of heavy metals in a soil amended with sewage sludge for eight years. *Agricoltura mediterranea*, 128(4), 273-283.
- Contreras, G. L. P., Pérez, E. M., Pacheco, S. V., y Almazán, S. E. G. (2003). Resistencia a antibióticos y metales pesados en cepas clínicas de *Staphylococcus aureus*. *Revista Médica del Hospital General de México*, 66(1), 13-21.
- Corwin, D. L., Loague, K., and Ellsworth, T. R. (1999). Introduction: Assessing non-point source pollution in the vadose zone with advanced information technologies. *GMS*, 108, 1-20.
- Cunha, R. J. P., & Haag. H. P. (1980) Mineral nutrition of pawpaw. V. Nutrient uptake under field conditions. *Anais de Escola Superior de Agricultura "Luz de Queiroz"*. 37(2). 631-668.
- Dan, T., Hale, B., Johnson, D., Conard, B., Stiebel, B., and Veska, E. (2008). Toxicity thresholds for oat *Avena sativa* L. grown in Ni-impacted agricultural soils near Port Colborne, Ontario, Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 88(3), 389-398.
- Dantu, S. (2009). Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid. Serie Medio Ambiente. *Environ Monit Assess*, 149, 213-222.

- Dávila, O. G., Gómez-Bernal, J. M., and Ruíz-Huerta, E. A. (2012). Plants and soil contamination with heavy metals in agricultural areas of Guadalupe, Zacatecas, Mexico. *Environmental contamination. InTech, Rijeka*, 37-50.
- De la Cruz-Pons, A., Zavala-Cruz, J., Guerrero-Peña, A., Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L. C., & Gavi-Reyes, F. (2012). Metales pesados en suelos cultivados con caña de azúcar en la Chontalpa Tabasco. *Universidad y ciencia*, 28(2), 119-130.
- Delgado-Ríos, M., Torres-Pérez, Y., Corral-Avitia, J., Flores-Margez, A. Y., & J Santana-Contrera, J. E. (2014). Determinación de cadmio, cromo, plomo y arsénico en suelos superficiales urbanos de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.
- Diario Oficial. NMX-AA-132-SCFI-2016, Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra.
- Diario Oficial. NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- Diario Oficial. NOM-021-SEMARNAT-2000 Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudios, muestreo y análisis.
- Diario Oficial. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 Que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.
- Dotor-López, G. I., Zúñiga-Cruz, A., Cruz-Monterrosa, R. G., Díaz-Ramírez, M., & Rayas-Amor, A. A. (2017). Quantification of heavy metals in the cultivation of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch. var. festival) in Tenancingo and Villa Guerrero, Estado de México. *Agroproductividad*, 10(10), 29-33.
- Ekosse, G. I. E., Fouche, P. S., & Mashatola, B. (2006). Total organic carbon in soils and its relation with manganese concentrations in soils and vegetation close to an abandoned manganese mine. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 3(1), 15-24.

- Espinoza, F., Llinima, R., & Vargas, M. (2013). Contaminación por plomo un enemigo silencioso.
- Félix, I., Mite, F., Carrillo, M., & Pino, M. (2012). Avances de Investigación del Proyecto Determinación de metales contaminantes en cultivos de exportación y su repercusión sobre la calidad de los mismos. In *VII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo* (Vol. 8).
- Gadd, G. M. (2000). Bioremedial potential of microbial mechanisms of metal mobilization and immobilization. *Current opinion in biotechnology*, 11(3), 271-279.
- García Gallegos, E., García Nieto, E., Juárez Santillán, L. F., Juárez Santacruz, L., Montiel González, J. M. R., & Gómez Camarillo, M. A. (2012). La respuesta de haba *Vicia faba* L. cultivada en un suelo contaminado con diferentes concentraciones de cadmio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(2), 119-126.
- García, C., Moreno, J. L., Hernández Fernández, M. T., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo.
- Garrido, P. S. B. (2011). Evaluación de metales pesados en los suelos del coto minero manganesífero Cristo-Barrancas. *Minería y Geología*, 27(3), 43-57.
- Gimeno-García, E. (1993). Impacto de la actividad agrícola y especiación química de metales pesados en un suelo de arrozal del Parque Natural de la Albufera (Valencia). *Degree Thesis. University of Valencia, Valencia, Spain*.
- Gustafsson, J. P., Pechová, P., & Berggren, D. (2003). Modeling metal binding to soils: the role of natural organic matter. *Environmental science & technology*, 37(12), 2767-2774.
- Guzmán-Morales, A. R., Paz, O. C. L., & Valdés-Carmenate, R. (2019). Efectos de la contaminación por metales pesados en un suelo con uso agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 28(1).
- Hernández Picazo, F. J. (2014). Determinación de cadmio (Cd) en suelos agrícolas dedicados a la producción de alfalfa *Medicago sativa* irrigado con aguas residuales.

- Hernández-Silva, G., Flores-Delgadillo, L., Maples-Vermeersch, M., Solorio-Munguía, J. G., & Alcalá-Martínez, J. R. (1994). Riesgo de acumulación de Cd, Pb, Cr, y Co en tres series de suelos del DR03, Estado de Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1), 53-61.
- Huang, S. W., and Jin, J. Y. (2008). Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use. *Environmental monitoring and assessment*, 139(1-3), 317.
- Huecas, C. G., Lafuente, A. L., Merino, L. M., Gómez, M. D. C. M., & Fernández, G. L. (2003). Estudio de la influencia de los suelos contaminados por metales pesados en las aguas naturales. In *Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia* (Vol. 69, No. 3).
- Huertos, E. G., & Baena, A. J. R. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla: revista de la Sociedad Española de Mineralogía*, (10), 48-60.
- Jarvis, M. D., & Leung, D. W. M. (2002). Chelated lead transport in *Pinus radiata*: an ultrastructural study. *Environmental and experimental Botany*, 48(1), 21-32.
- Jáuregui, A. V., Perezgasga, F. V., Vargas, G. G., and Chamarro, J. A. (2006). Predicción del riesgo a la salud infantil en una zona contaminada por plomo. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*, 27(1), 8-15.
- Juárez Sanz, M., Sánchez Sánchez, A., Jordá Guijarro, J. D., y Sánchez Andreu, J. J. (2004). *Diagnóstico del potencial nutritivo del suelo*. Universidad de Alicante.
- Kabata – Pendias, A. y Pendias, H. (1984). Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, Florida, 315 p.
- Kabata-Pendias, A. (2004). Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*, 122(2-4), 143-149.
- Kabata-Pendias, A., & Mukherjee, A. B. (2007). Trace elements of group 12 (Previously group IIb). *Trace elements from soil to human*, 283-319.
- Kopittke, P. M., Asher, C. J., Blamey, F. P. C., & Menzies, N. W. (2007). Toxic effects of Pb 2+ on the growth and mineral nutrition of signal grass *Brachiaria*

- decumbens* and Rhodes grass *Chloris gayana*. *Plant and Soil*, 300(1-2), 127-136.
- Krishnamurti, G. S. R., Huang, P. M., & Kozak, L. M. (1999). Sorption and desorption kinetics of cadmium from soils: influence of phosphate. *Soil Science*, 164(12), 888-898.
- Kumar N., Soorianathasundaram K., Meenakshi N., Manivannan M., SURESH J., NOSOV V. (2010). Balanced fertilization in papaya *Carica papaya* L. for higher yield and quality. (Proc. 2nd IS on Papaya) *Acta Horticulturae* (851).357-362.
- Læg Reid, M., Bockman, O. C., & Kaarstad, O. (1999). *Agriculture, fertilizers and the environment*. CABI publishing.
- Larios Bayona, M. (2014). Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los suelos de ribera de la cuenca del Río Turia.
- Lasat, M. M. (2000). *The use of plants for the removal of toxic metals from contaminated soils*. US Environmental Protection Agency.
- Lokeshappa, B., Shivpuri, K., Tripathi, V., and Dikshit, A. K. (2012). Assessment of toxic metals in agricultural produce. *Food and public Health*, 2(1), 24-29.
- López-Pérez, M. E., Rincón-Castro, M. C. D., Muñoz-Torres, C., Ruiz-Aguilar, G. M., Solís-Valdez, S., & Zanor, G. A. (2017). Evaluación de la contaminación por elementos traza en suelos agrícolas del suroeste de Guanajuato, México. *Acta universitaria*, 27(6), 10-21.
- Loska, K., Cebula, J., Pelczar, J., Wiechuła, D., & Kwapuliński, J. (1997). Use of enrichment, and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. *Water, Air, and Soil Pollution*, 93(1-4), 347-365.
- Mahecha, J., Trujillo, J., & Torres, M. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari. *Universidad de Los Llanos. Departamento del Meta. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Orinoquia*, 19.

- Maldonado, R., Etchevers, J. D., Alcantar, G., Rodríguez, J., & Colinas, M. T. (2001). Estado nutrimental del limon mexicano en suelos calcimorficos. *Terra latinoamericana*, 19(2), 163-174.
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., y Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(1), 39-48.
- Martin, C. W. (2000). Heavy metal trends in floodplain sediments and valley fill, River Lahn, Germany. *Catena*, 39(1), 53-68.
- Martí, L., Burba, J. N., & Cavagnaro, M. (2002). Metales pesados en fertilizantes fosfatados, nitrogenados y mixtos. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 34(2).
- McBride, M., Sauve, S., and Hendershot, W. (1997). Solubility control of Cu, Zn, Cd and Pb in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 48(2), 337-346.
- Micó, C., Recatalá, L., Peris, M., & Sánchez, J. (2005). Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos con cultivos vegetales de la Comarca del Bajo Vinalopó (ALICANTE). *Edafología*, 12 (3), 185-197.
- Micó, C., Recatalá, L., Peris, M., & Sánchez, J. (2006). Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere*, 65(5), 863-872.
- Morales, S., & Flores, N. S. (1998). Aspectos generales del cultivo del plátano *Musa sapientum* Yion en México/Noe Salas Morales (N°.SB379. B2. S24 1998.).
- Muchuweti M., Birkett W, J., Chinyanga E., Zvauya R., Scrimshaw D, M., Lester JN. (2006) Heavy metals content of vegetables irrigated with mixtures of wastewater and sewage sludge in Zimbabwe: implications for human health. *Agriculture ecosystems and environment* 112: 41-48
- Muller, G. (1995). Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 2, 108-118.

- Mwegoha, W. J. S., & Kihampa, C. (2010). Heavy metal contamination in agricultural soils and water in Dar es Salaam city, Tanzania. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(11), 763-769.
- Navarro, A., & Carbonell, M. (2007). Evaluation of groundwater contamination beneath an urban environment: The Besòs river basin (Barcelona, Spain). *Journal of Environmental Management*, 85(2), 259-269.
- Nava-Ruíz, C., y Méndez-Armenta, M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién (Mex)*, 16(3), 140-147
- Nedelkoska, T. V., & Doran, P. M. (2000). Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining. *Minerals engineering*, 13(5), 549-561.
- Nolasco Mancollunco, G.J. (2001). Determinación de la concentración de plomo en suelos de Lima Metropolitana y su repercusión en la contaminación ambiental (Tesis para obtener el grado de Químico Farmacéutico). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Olivares Rieumont, S., García Céspedes, D., Lima Cazorla, L., Saborit Sánchez, I., Llizo Casals, A., & Pérez Alvares, P. (2013). Niveles de Cadmio, Plomo, Cobre y Zinc en Hortalizas cultivadas en una zona altamente urbanizada de la ciudad de la Habana, Cuba. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(4), 285-294.
- Oriundo, C., & Robles, J. (2009). Determinación de plomo en suelos debido a la contaminación por fábricas aledañas al Asentamiento Humano cultura y progreso del distrito de Ñaña-Chaclacayo. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos Facultad de Farmacia Y Bioquímica EAP de Farmacia Y Bioquímica*, 44.
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., and Toro, L. (2004). Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: pollution detection and affinity series. *Environmental Pollution*, 132(2), 189-201.

- Peláez-Peláez, M. J., Cano, J. J. B., & López, E. D. G. (2016). Presencia de cadmio y plomo en suelos y su bioacumulación en tejidos vegetales en especies de brachiaria en el Magdalena medio colombiano. *Revista Luna Azul*, (43), 82-101.
- Peña Cerda, V. R. D. L. (2014). *Evaluación de la concentración de plomo y cadmio en suelo superficial de parques y plazas públicas, en tres municipios del área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Peralta-Videa, J. R., López, M. L., Narayan, M., Saupe, G., and Gardea-Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain. *The international journal of biochemistry and cell biology*, 41(8-9), 1665-1677.
- Perezgasga, F. V., y Morales, V. M. C. (1999). *La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México*. Texas Center for Policy Studies.
- Pereira, P., & Úbeda, X. (2010). Spatial distribution of heavy metals released from ashes after a wildfire. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 18(1), 13-22.
- Pereira, P., Ubeda, X., Martin, D. A., Guerrero, C., & Mataix-Solera, J. (2009, February). Temperature effects on the release of some micronutrients from organic matter from Mediterranean forests. In *A comparison between laboratory experiment and prescribed fire. International Meetings of Fire Effects on Soil Properties* (pp. 11-15).
- Pitman, R. M. (2006). Wood ash use in forestry—a review of the environmental impacts. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 79(5), 563-588.
- Pinto, A. P., Mota, A. D., De Varennes, A., & Pinto, F. C. (2004). Influence of organic matter on the uptake of cadmium, zinc, copper and iron by sorghum plants. *Science of the total environment*, 326(1-3), 239-247.
- Porta Casanellas, J. (1990). *Edafología: para La agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa.

- Pulido, J. D. M., González, J. M. T., & Mora, M. A. T. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. *Orinoquia*, 19(1), 118-122.
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. In *Anales de la Facultad de Medicina* (Vol. 63, No. 1, pp. 51-64). Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Reche, J. (1988). La sandía. Tercera Edición Ed. *Mundi-prensa. Ministerios de Agricultura, Pesca y Alimentación*. Madrid. España.
- Reyes, M., & Avendaño, G. (2012). Estudio ambiental sobre el riesgo ecológico que representa el plomo presente en el suelo. *Revista EAN*, 72, 66-75.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jiménez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.
- Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la Casa, N., Romero-Puertas, M. C., Del Río, L. A., & Sandalio, L. M. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Revista Ecosistemas*, 17(3).
- Rodríguez Garrido, N. E., & Urbina Martínez, M. C. (2012). Contaminación por Metales Pesados en Suelos de la Comarca Lagunera.
- Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. *Medisan*, 21(12), 3372-3385.
- Rodríguez-Serrano, M., Martínez-de la Casa, N., Romero-Puertas, M. C., Del Río, L. A., and Sandalio, L. M. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Revista Ecosistemas*, 17(3).
- Romero, F. M., Blanquer, J. G., Díaz, J. G., & Mateu, Á. M. (2003). Relación estadística entre metales pesados y propiedades de suelos de cultivo regados con aguas residuales no depuradas. *Interciencia*, 28(5), 281-286.
- Ruiz Huerta, E. A., & Armienta Hernández, M. A. (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(2), 103-117.

- Schmidt, U. (2003). Enhancing phytoextraction: the effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals. *Journal of Environmental Quality*, 32(6), 1939-1954.
- Schmitt, H. W., & Sticher, H. (1991). Metals and their compounds in the environment. *Heavy metal compounds in soil*.
- Seoáñez, C. A. L. V. O. (2003). *Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Silveira, M. L. A., Alleoni, L. R. F., and Guilherme, L. R. G. (2003). Biosolids and heavy metals in soils. *Scientia Agricola*, 60(4), 793-806.
- Singh, P. K., & Tewari, R. K. (2003). Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of Brassica juncea L. plants. *Journal of Environmental Biology*, 24(1), 107-112.
- Stoffers P, Glasby GP, Wilson CJ, Davies KR y Walter P. 1986. Heavy metal pollution in Wellington Harbour. *New Zealand Journal of Marine Freshwater Research*, 20: 495- 512
- Valdés, F., & Cabrera, V. M. (1999). La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México. *Texas Center for Policy Studies, CILADHAC, Torreón, Coah.*
- Varanini, Z., and Pinton, R. (2000). Direct versus indirect effects of soil humic substances on plant growth and nutrition. *The Rhizosphere. Marcel Dekker, New York*, 141-157.
- Vázquez, J., Sangurima, C., & Álvarez-Vera, M. (2019). Concentraciones de plomo (Pb) en cultivos de lechuga (*Lactuca sativa*) en Azuay, Ecuador. *Scientia Agropecuaria*, 10(3), 423-427.
- Volke, S. T., Velasco, T. J. A., y de la Rosa, P. D. (2005). Suelos contaminados por metales pesados y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. *La edición. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAT. México, DF.*

- Wei, B., & Yang, L. (2010). A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical journal*, 94(2), 99-107.
- Welch, R. M., Hart, J. J., Norvell, W. A., Sullivan, L. A., and Kochian, L. V. (1999). Effects of nutrient solution zinc activity on net uptake, translocation, and root export of cadmium and zinc by separated sections of intact durum wheat *Triticum turgidum* L. var durum seedling roots. *Plant and Soil*, 208(2), 243-250.

ANEXO DE TABLAS

Tabla 10. Resultados de las medias por variables fisicoquímicas (pH, M.O.:materia orgánica, C.O.: carbón orgánico, C.E.: conductividad eléctrica, SAL: salinidad) por Unidad de Producción Agrícola (\pm SD).

UP	Cultivo	pH	M.O	C.O	C.E	SAL
S1L	Limón	6.49 \pm 0.62	1.91 \pm 0.99	1.47 \pm 0.76	1.75 \pm 153.50	0.13 \pm 0.05
S3L		6.72 \pm 0.45	2.16 \pm 0.03	1.66 \pm 0.02	1.41 \pm 106.20	0.1 \pm 0.00
S5L		7.20 \pm 0.25	1.19 \pm 0.50	0.92 \pm 0.38	141.4 \pm 94.20	0.1 \pm 0.00
S6L		6.96 \pm 0.58	2.03 \pm 0.70	1.56 \pm 0.54	113.6 \pm 59.20	0.1 \pm 0.00
S9L		6.3 \pm 0.00	3.29 \pm 0.00	2.54 \pm 0.00	407.0 \pm 0.00	0.1 \pm 0.00
S1P	Papaya	6.40 \pm 0.93	1.27 \pm 1.67	0.98 \pm 1.29	93.20 \pm 5.40	0.1 \pm 0.00
S2P		6.40 \pm 0.59	1.48 \pm 1.39	1.14 \pm 1.97	129.6 \pm 69.90	0.1 \pm 0.00
S3P		6.81 \pm 0.00	0.29 \pm 0.00	0.23 \pm 0.00	196.7 \pm 0.00	0.1 \pm 0.00
S5P		6.56 \pm 0.00	2.36 \pm 0.00	1.81 \pm 0.00	199.8 \pm 0.00	0.1 \pm 0.00
S6P		6.63 \pm 0.25	2.45 \pm 1.52	1.89 \pm 1.17	84.6 \pm 87.30	0.1 \pm 0.00
S8P		6.49 \pm 0.00	1.12 \pm 0.00	0.87 \pm 0.00	80.2 \pm 0.00	0.1 \pm 0.00
S4M	Maíz	6.32 \pm 0.54	2.18 \pm 1.34	1.69 \pm 1.03	134.4 \pm 29.30	0.1 \pm 0.00
S5M		6.17 \pm 0.00	1.32 \pm 0.00	1.02 \pm 0.00	60.2 \pm 0.00	0.1 \pm 0.00
S2B	Plátano	7.25 \pm 0.00	0.92 \pm 0.00	0.71 \pm 0.00	98.3 \pm 0.00	0.1 \pm 0.00
S7S	Sandia	5.81 \pm 0.00	0.81 \pm 0.00	0.63 \pm 0.00	194.2 \pm 0.00	0.1 \pm 0.00

Tabla 11. Resultados de las medias de textural (F: Franco, FA: Franco-arenoso, FAA: Franco-arenoso-arcilloso) y metales pesados (mg L-1) por localidad y por cultivo (\pm SD).

UP	Cultivo	Arenas	Limos	Arcillas	Tipo textural	Pb	Cd
S1L	Limón	42.90 \pm 7.30	15.90 \pm 7.90	41.20 \pm 9.33	F	0.111 \pm 0.010	< 0.01
S3L		42.50 \pm 9.60	35.70 \pm 19.40	21.80 \pm 22.67	F	0.093 \pm 0.005	< 0.01
S5L		52.20 \pm 19.40	19.30 \pm 8.70	28.50 \pm 24.91	FAA	0.127 \pm 0.002	< 0.01
S6L		50.30 \pm 12.00	24.50 \pm 13.10	25.30 \pm 22.15	FA	0.063 \pm 0.003	< 0.01
S9L		47.80 \pm 0.00	13.10 \pm 0.00	31.9 \pm 0.00	F	0.159 \pm 0.004	< 0.01
S1P	Papaya	52.00 \pm 19.0	10.80 \pm 7.30	37.10 \pm 11.66	FA	0.105 \pm 0.11	< 0.01
S2P		38.20 \pm 9.90	16.70 \pm 3.60	45.00 \pm 6.36	F	0.086 \pm 0.004	< 0.01
S3P		65.80 \pm 0.00	26.50 \pm 0.00	7.70 \pm 0.00	FA	0.048 \pm 0.006	< 0.01
S5P		36.50 \pm 0.00	57.20 \pm 0.00	6.40 \pm 0.00	FA	0.106 \pm 0.003	< 0.01
S6P		51.10 \pm 15.00	24.00 \pm 10.30	24.90 \pm 19.69	FA	0.084 \pm 0.004	< 0.01
S8P		63.00 \pm 0.00	13.50 \pm 0.00	23.50 \pm 0.00	FA	0.083 \pm 0.004	< 0.01
S4M	Maíz	47.50 \pm 8.00	13.70 \pm 9.30	38.90 \pm 5.16	F	0.093 \pm 0.006	< 0.01
S5M		61.90 \pm 0.00	3.10 \pm 0.00	35.00 \pm 0.00	FA	0.071 \pm 0.004	< 0.01
S2B	Plátano	36.50 \pm 0.00	15.20 \pm 0.00	48.30 \pm 0.00	F	0.062 \pm 0.005	< 0.01
S7S	Sandia	50.50 \pm 0.00	11.20 \pm 0.00	38.30 \pm 0.00	F	0.091 \pm 0.004	< 0.01

ANEXO FOTOGRÁFICO



Figura 19. Muestreo de suelos en parcelas agrícolas de Cotaxtla, Veracruz



Figura 20. Medición de pH con la Sonda multiparamétrica Consort C6010.

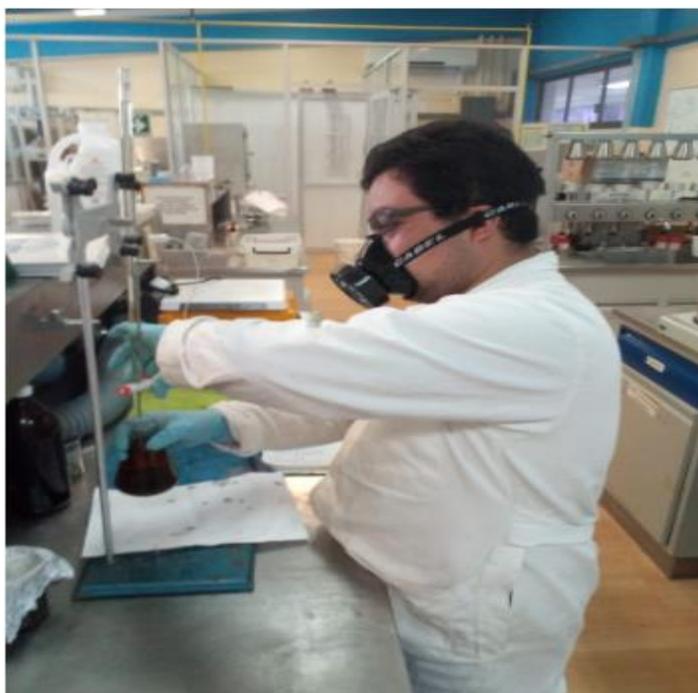


Figura 21. Titulación de muestras.



Figura 22. Se observa el aspecto final de la titulación para determinación de materia orgánica, con el cambio de coloración de café a color azul turquesa.



Figura 23. Se observa la diferencia en la suspensión de partículas del suelo, de las muestras colectadas.



Figura 24. Análisis de muestras en el equipo de de absorción atómica Thermo Cientific Modelo Ice 3500 AA System (Thermo Scientific®)