



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS GRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**RELACIÓN DE LOS MINERALES AMORFOS CON
METALES PESADOS
EN ANTROSOLES IRRIGADOS CON AGUAS
RESIDUALES**

GIOVANNA RIVERA VARGAS

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO EDO. DE MÉXICO

Diciembre 2013

La presente tesis, titulada: **Relación de los minerales amorfos con metales pesados en antrosoles irrigados con aguas residuales**, realizada por la alumna: **Giovanna Rivera Vargas**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA:



DRA. Ma. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

ASESOR:



DR. CARLOS ALBERTO ORTIZ SOLORIO

ASESOR:



DR. ROGELIO CARRILLO GONZALEZ

ASESOR:



M.C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Diciembre 2013

RESUMEN

RELACIÓN DE LOS MINERALES AMORFOS CON METALES PESADOS EN ANTROSOLES IRRIGADOS CON AGUAS RESIDUALES

Rivera Vargas Giovanna

Colegio de Postgraduados

En la cuenca de México se asienta la ciudad de México que es la zona urbana más grande del país, con 18 millones de habitantes; concentra gran parte de la actividad industrial, comercial y política. Todas las características anteriores intervienen en la problemática del agua, con una creciente dificultad para satisfacer su demanda, así como un sistema de gran complejidad para desalojar a las aguas residuales. Esta investigación se efectuó con la finalidad de establecer la relación entre minerales amorfos con metales pesados en las tierras negras y lamas del distrito de riego Los Insurgentes, que poseen Antrosoles irrigados con dichas aguas residuales, que por su origen contienen minerales amorfos. Las muestras de suelo superficiales (0-20 cm; 22 muestras simples/cada 20 ha) se colectaron de parcelas cultivadas con maíz, alfalfa, avena y pasto forrajero, distribuidas en las 2 clases de tierra, y 5 muestras de canales de riego de riego. Se caracterizaron de manera física, química y, se identificó la presencia de minerales amorfos con extracciones selectivas de Fe, Si y Al. Los análisis mineralógicos se realizaron, además de extracciones de metales pesados totales y disponibles. Los resultados mostraron que la mayoría de los Antrosoles irrigados con aguas residuales en diferentes tipos de cultivos presentan contenidos bajos de metales pesados. Los metales pesados encontrados fueron: Zn, Cu, Fe y Mn. La mayor concentración se registró directamente en los canales de riego; mientras que, en la capa superficial de las tierras fue baja su concentración. Existen relaciones positivas entre el Pb con óxidos Fe y Mn, Cu y Zn con materia orgánica y relaciones negativas entre minerales amorfos-Pb, materia orgánica-Cu y arcillas-Ni. Los suelos tienen alta reactividad por la presencia de minerales amorfos (ópalo y ferrihidrita), alto contenido de materia orgánica, tamaño de partícula, formación de minerales (zeolitas y fosfatos) y condiciones óxido-reducción.

Palabras Clave: ópalo, ferrihidrita, fosfatos, materia orgánica

RELATIONSHIP OF AMORPHOUS MINERALS WITH HEAVY METALS IN ANTROSOLES IRRIGATED WITH WASTEWATER

Rivera Vargas Giovanna
Colegio de Postgraduados

Mexico, the largest city in the all world, is allocated in the Mexican Valley. It concentrated much of the industrial, commercial and political activity. As a result of this, there is a serious problem with water supply and with a large complex system to evict the sewage. This research was carried out with the purpose of establishing the relationship of amorphous minerals with heavy metals in the black lands and lamas lands de Los Insurgentes irrigation district, which possess Antrosoles irrigated with wastewater and by its origin contain amorphous minerals. Surface soil samples were collected (0-20 cm; 22 simple samples / each 20 ha) of plots planted with corn, alfalfa, oats and pasture forage, distributed in the 2 kinds of land, 5 samples of irrigation drains. They were marked physical and chemically identified the presence of amorphous minerals with selective extraction of Fe, Si, Al. Mineralogical analysis, as well as extraction of heavy metals (total and available) were conducted. The results showed that the majority of the Antrosoles irrigated with wastewater in different types of crops have low contents of heavy metals. Were found heavy metals: Zn, Cu, Fe and Mn. The highest concentration was recorded directly in irrigation canals; while in the surface layer of the land lowers its concentration. There are positive relationships between with oxides of Fe and Mn, with Pb, Cu and Zn with organic matter and negative relationship between mineral amorphous-Pb, Cu-organic matter and clays-Ni. The soils have high reactivity for the presence of amorphous minerals (Opal and ferrihydrite), high content of organic matter, particle size, formation of minerals (zeolites and phosphates) and redox conditions.

Dedicatoria

A Dios por la vida.

A mis maravillosas madres:

AGUEDA VARGAS MELENDEZ y AGAPITA MELENDEZ OCAMPO

Por haberme dado el mayor regalo y ser mi ejemplo constante de lucha.

A mi querido Esposo:

Cesar

A mis hermanos:

Ernesto, Yadira, Rosa , Arturo por su apoyo y confianza.

A mis Tías:

María, Luisa, Lupe, Carmen y Cecilia.

A mis primos (as):

Yeni, Carmen, Yaqui, Ángel Sánchez y Brenda. Por compartir momentos inolvidables de alegría y trabajo.

A mis sobrinos:

José María, Aldo, Jazmín, Miriam, Javier, Karen, Valeria e Ivonne.

A mi familia y amigos por la dicha de tenerlos.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Colegio de Postgraduados por el financiamiento y apoyo académico para la realización de mi posgrado.

A los integrantes de mi consejo particular, Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio, Dr. Rogelio Carrillo González y M.C Ramiro Ríos Gómez, por su enseñanza, apoyo y motivación durante mis estudios de postgrado, cada uno de ustedes aportó enseñanzas muy valiosas, gracias por participar en el proceso de esta importante etapa de mi formación profesional.

Al estimado maestro Patricio Sánchez Guzmán que con ayuda de la Dra. Ma del Carmen Gutiérrez Castorena, Carlos Alberto Ortiz Solorio, Carmen Bojórguez Bautista y a mi amado esposo Cesar San Martin Hernández me ayudaron hacer realidad uno de mis más grandes sueños, infinitamente gracias.

Al maestro Jaime Cruz Díaz por estar siempre a dispuesto ayudarme para la realización de este trabajo y a Carmen Bojórguez Bautista por su ayuda y apoyo en todo momento, mil gracias.

A mi tía María, mi padrino Ezequiel, Ángel, Yeni y Martin por su apoyo incondicional, por la paciencia y por darme un lugar en su familia.

A Tania, Liz, Lili, Lucia, Ariadna, Víctor, Pablo, a Enrique, Dulce por su apoyo y amistad y a Linda, Diana, Moisés, Mario y José por los muy buenos momentos y su amistad siempre.

A mi querido esposo Cesar por su amor, apoyo, paciencia y entrega para realización de esta meta en mi vida, mil gracias.

Al Sr. Pedro, Sra. Laura. Sr. Juan y a la profesora Aida por su ayuda.

CONTENIDO

	Pag
Índice de Cuadros.....	ix
Índice de Figuras.....	x
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
CAPÍTULO II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	3
2.1 Objetivo General.....	3
2.1.1 Objetivos Específicos.....	3
2.2 Hipótesis.....	3
CAPÍTULO III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1 Suelos de la cuenca de la Valle de México.....	4
3.2 Antrosoles y minerales amorfos.....	6
3.2.1 Alófano.....	7
3.2.2 Imogolita.....	7
3.2.3 Ópalo.....	8
3.2.4 Ferrihidrita.....	9
3.3 Aguas residuales.....	10
3.4 Metales pesados.....	11
3.4.1 Origen de los metales pesados en el suelo.....	12
3.4.2 Disponibilidad de metales pesados en el suelo.....	13
3.5 Metales pesados en el suelo.....	17
3.5.1 Hierro (Fe).....	17
3.5.2. Manganeso (Mn).....	17
3.5.3 Cobre (Cu).....	19
3.5.4 Plomo (Pb).....	19
3.5.5 Zinc (Zn).....	20
3.5.6 Níquel (Ni).....	21
3.5.7 Cadmio (Cd).....	21
3.5.8 Referencias.....	22
CAPITULO IV METALES PESADOS Y AMORFOS EN ANTROSOLES IRRIGADOS CON AGUAS RESIDUALES EN TEOLOYUCAN ESTADO DE MEXICO.....	29

4.1 Resumen.....	20
4.2 Introducción.....	30
4.3 Material y Métodos.....	31
4.4 Resultados y discusión.....	33
4.4.1. Metales extractables.....	33
4.4.2. Propiedades edáficas.....	34
4.4.3. Materiales amorfos.....	35
4.5 Consideraciones finales.....	36
4.6 Conclusiones.....	36
4.7 Referencias.....	37
Capitulo V.INTERACCIÓN ENTRE MINERALES AMORFOS, PROPIEDADES EDAFICAS Y METALES PESADOS EN ANTROSOLES IRRIGADOS CON AGUAS RESIDUALES	39
5.1 Resumen.....	39
5.2 Abstract.....	40
5.3 Introducción.....	41
5.4 Material y Métodos.....	42
5.4.1. Localización del área del estudio.....	42
5.4.2. Trabajo de campo.....	43
5.4.3. Análisis de laboratorio.....	43
5.4.4. Análisis estadístico.....	44
5.5 Resultados y discusión.....	44
5.5.1. Propiedades edáficas.....	44
5.5.2. Mineralogía.....	45
5.5.3. Disolución selectiva.....	46
5.5.4. Metales Pesados.....	46
5.5.5. Análisis de correlación y regresión.....	48
5.6 Conclusiones.....	48
5.7 Referencias.....	49
ANEXO	54

INDICE DE CUADROS

	Pagina
Cuadro 3.1	9
Cuadro3. 2	14
Cuadro 3.3	15
Cuadro 3.4	16
Cuadro 5.1	54
Cuadro 5.2	55
Cuadro 5.3	55
Cuadro 5.4	5.6
Cuadro a)	59
Cuadro b)	60
Cuadro c)	60
Cuadro d)	61
Cuadro e)	61
Cuadro f)	62
Cuadro g)	63

INDICE DE FIGURAS

		Pagina
Figura 3.1	Antigua cuenca del valle de México.	5
Figura 3.2	Micrografía electrónica en la que se muestra la morfología tubular de la imogolita y las estructuras esféricas del alófano.....	8
Figura 3.3	a) Sección transversal de los tubos y b) estructura plana de imogolita.....	8
Figura 3.4	Metales clasificados como clase A (duros), clase B (suaves) y frontera (metales intermedios). El cobre y el plomo pueden ser clase B o frontera, dependiendo si se encuentran en forma de Cu(I) o Cu(II) y Pb(II) o Pb(IV), respectivamente. El hierro puede ser clase A o frontera, si se encuentra como Fe(III) o Fe(II). Fuente: Volke <i>et al.</i> (2005).....	12
Figura 3.5	Campo de estabilidad en función del Eh- pH previsto para el Manganeseo; $Mn=10^{-6}$, $C=10^{-3}$, $S=10^{-3}$ (Tomado de Adriano, 2001).....	18
Figura 4.1	a) Canal secundario conduciendo aguas negras a las parcelas agrícolas, b) parcela de pasto forrajero (<i>Lilium multiflorum</i> Lam) en época de estiaje, c) cultivo de alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) en temporada de lluvias.....	32
Figura 4.2	Distribución de metales pesados por clase de tierra.....	34
Figura 5.1	Localización de la zona de estudio.....	57
Figura 5.2	Metales pesados disponibles por clase de tierra en Teoloyucan, Edo. de México.....	57
Figura 5.3	Relaciones de metales pesados en los suelos estudiados (* tierras negras, **tierras lamas y *** dren).....	58

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

Las formas del relieve mexicano son una expresión de estructuras geológicas jóvenes, particularmente en la provincia fisiográfica del eje neovolcánico transversal. En este eje existen huellas (sedimentos) de antiguos valles fluviales, glaciares y lagos actuales, formas correspondientes del pleistoceno tardío y holoceno entre las que se encuentra la cuenca del Valle de México. Toda esta área está condicionada por la actividad volcánica joven (Lugo, 1990) e íntimamente relacionada con el suelo; por esta razón, se encuentra gran cantidad de vidrio volcánico e hipersalinidad derivada de los antiguos lagos, generándose las condiciones para la acumulación de materiales amorfos silíceos.

Por otra parte, en el valle se asienta la ciudad de México, la zona urbana más grande del país, la cual genera problemáticas del agua, con una creciente dificultad para satisfacer su demanda, así como un sistema de gran complejidad para desalojar las aguas negras o residuales y pluviales. En la ciudad se generan en promedio anual $237 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de aguas residuales (CONAGUA, 2011), de cual un porcentaje es tratado para re-uso en su interior y las restantes se emplean para el riego del Valle de Tula (Mezquitlan), Chiconautla, Cuautitlán y en Teoloyucan al nororiente del estado de México (Jiménez *et al.*, 2005) o se almacenan en la laguna de Zumpango.

El riego con agua residual aporta al suelo una cantidad considerable de compuestos. En primer lugar, contribuye a aumentar el contenido de fósforo y nitrógeno disponible en la capa arable de los suelos, lo mismo que el contenido de materia orgánica (Siebe, 1998; Jiménez *et al.*, 2005); sin embargo, se ha reportado que contienen metales pesados (Solís *et al.*, 2009; Lucho-Constantino *et al.*, 2005). Cuando estos metales se encuentran en concentraciones muy reducidas (niveles traza) no implican peligro para los sistemas biológicos; no obstante, cuando se incrementan son tóxicos, pues pueden producir envenenamiento, debido a su acción sobre grupos funcionales que desplazan elementos esenciales (Vilchez, 2005).

En los ecosistemas acuáticos y terrestres existe una capacidad para asimilar un aporte natural de iones metálicos debido a que muchos de ellos son necesarios para el desarrollo de los seres vivos (Vilchez, 2005). No obstante, para que puedan

ser empleados por los microorganismos deben encontrarse en el medio a concentraciones muy reducidas (niveles de traza).

En la región de Teoloyucan, los suelos agrícolas son clasificados como Antrosoles (Resendiz *et al.*, 2012), contienen altas cantidades de vidrio volcánico, minerales amorfos (Rodríguez *et al.*, 2004) y metales pesados (Solís *et al.*, 2008; Lucho-Constantino *et al.*, 2005). No obstante, a pesar de la contaminación por metales pesados, no existen abundantes investigaciones en campo que traten las relaciones minerales amorfos-metales pesados, la influencia de las propiedades del suelo y menos en Antrosoles con una intensa actividad agrícola.

Un conocimiento básico de los minerales amorfos en suelos de Teoloyucan, Edo. de México contaminados con metales pesados podría ayudar a predecir su movilidad y por lo tanto desarrollar estrategias efectivas de descontaminación o de estabilización.

En el presente trabajo se analizó y se caracterizó la relación de minerales amorfos con el contenido de metales pesados en suelos agrícolas irrigados con aguas residuales.

CAPITULO II. OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1 Objetivo General

Evaluar la relación entre amorfos, propiedades edáficas y metales pesados irrigados con aguas residuales en el distrito de riego Los Insurgentes, Teoloyucan, estado de México.

2.1.1 Objetivos Específicos

- 1) Cuantificar los metales pesados disponibles en el suelo
- 2) Caracterizar de manera física y química a los suelos
- 3) Relacionar las propiedades edáficas y materiales amorfos con los metales pesados.

2.2 Hipótesis

En suelos de origen volcánico en su fracción fina contienen minerales amorfos que son mucho muy reactivos y por lo tanto disminuyen la disponibilidad de metales pesados para las plantas.

Los minerales amorfos adsorben los metales pesados presentes en los suelos irrigados con aguas residuales.

Las tierras negras presentan una menor concentración de metales pesados disponibles debido a su alta reactividad por su composición mineralógica y textura arcillosa que las tierras lamas; y el riego de aguas residuales en todas las tierras no marca diferencias en la distribución de metales pesados extractables en la capa superficial de los suelos.

CAPITULO III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Suelos de la cuenca del Valle de México

La Cuenca del Valle de México se localiza en la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano y tiene una extensión de 9 600 km² (Jiménez *et al.*, 2005). La cuenca es una depresión cerrada de manera natural en la cual se encontraba el lago del valle de México que hacia 1520 se extendía desde Zumpango por el norte hasta Mixquic por el sur (Figura 3.1). Este gran cuerpo lacustre ocasionaba desde épocas prehispánicas inundaciones periódicas por lo que se decidió que la mejor manera de resolver el problema era desecarlo artificialmente. El drenado inició a fines del siglo XVIII y se realizó en su totalidad a principios del siglo XX, creando así cuatro lagos más pequeños los cuales son: Lago de Xochimilco, Lago de Texcoco, Lago de Xaltocan y Lago de Zumpango (Figura 3.1).

Desde entonces, el proceso de desecación y los asentamientos humanos, han originado que actualmente sólo queden dos lagos en el del valle: el lago de Texcoco y el lago de Zumpango. A través de obras hidráulicas los lagos están conectados artificialmente y son parte de la Cuenca hidrológica del Alto Pánuco.

De acuerdo con Marín *et al.* (2002) la hidroestratigrafía de esos dos lagos está conformada por:

Depósitos lacustres cuaternarios con un espesor de 0 a 400 m. Estas unidades son impermeables y esporádicamente muestran fracturas. Los sedimentos superficiales con alternancias entre capas de arcillas (5-30 m de espesor) y depósitos volcánicos, localmente conocidos como capas duras, constituyen el acuitardo, que se consideraba que protegía al sistema de acuíferos. Material volcánico y piroclástico cuaternario (0-2000 m).

Por otra parte, en el valle se asienta la ciudad de México que es la zona urbana más grande del país con 18 millones de habitantes; además, concentra gran parte de la actividad industrial, comercial y política. Todas las características anteriores intervienen en la problemática del agua, con una creciente dificultad para satisfacer la demanda, así como un sistema de gran complejidad para desalojar las aguas negras y las pluviales. En la Ciudad de México, 80% del agua se emplea para fines municipales, 5% para la industria y 15% para riego. A partir de esta agua se

genera en promedio anual 237 m³/s de aguas residuales (CONAGUA, 2011), de las cuales un porcentaje es tratado para re-uso en el interior de la ciudad, las restantes salen del valle sin tratar, estas aguas se emplean para el riego del Valle de Tula (Mezquital), Chiconautla, Cuautitlán, Teoloyucan y en Zumpango al nororiente del estado de México, así como para alimentar la Presa Endhó (1.6 m³/s) cuya agua se usa posteriormente con fines para agrícolas (Jiménez *et al.*, 2005) .



Figura 3.1. Antigua cuenca del valle de México.

Fuente: <http://www.warem.unistuttgart.de/docs/module/download537ME/Basin%2520of%2520Mexico%2520City.pdf>

Los suelos de Teoloyucan son predominantemente hipersalinos debido a la antigua presencia de lago de Texcoco (Del Valle, 1983), son derivados de la actividad volcánica reciente, por lo que contienen altas cantidades de vidrio volcánico (Rodríguez *et al.*, 2004) el cual al imtemperizarse produce minerales amorfos siliceos (Gutiérrez-Castorena, 2007). Por otra parte, los suelos son regados con aguas residuales en las cuales se han registrado metales pesados en el Valle del Mezquital (Jiménez *et al.*, 2005; Cajuste *et al.*, 1991; Vázquez-Alarcón *et al.*, 1991).

3.2. Antrosoles y minerales amorfos

Los ecosistemas del planeta han sido alterados por la influencia humana, originando variantes edáficas como son los Antrosoles. Estos suelos son resultado de la actividad humana cuya influencia es marcada en los primeros 50 cm, ya sea a través de la adición prolongada de materiales terrosos y orgánicos o con riego por inundación produciendo así los horizontes térrico hortico y antracuico e hidrágrico (ISRIC ,2007).

Entre los suelos formados sin influencia humana marcada se encuentran aquellos originados por cenizas volcánicas, las que cubren aproximadamente 124 millones de hectáreas, 0.84% de la superficie terrestre del planeta (Leamy, 1984). La ocurrencia de suelos de cenizas volcánicas se asemeja mucho a la distribución global de volcanes activos y a los recientemente extintos (Takahashi y Shoji, 2003). Las condiciones ambientales específicas como resultado de la localización y manejo dan una combinación única de factores en los procesos de formación del suelo.

Los suelos de origen volcánico se forman a partir ceniza de volcánica compuesta principalmente de vidrio volcánico, el cual muestra muy poca resistencia al intemperismo químico (Mizota y Van Reeuwijk, 1989; Shoji *et al.*, 1993), por lo que libera sus iones a una velocidad mayor de la que se necesita para la formación de minerales cristalinos. Como resultado, la solución del suelo se sobresatura de aluminio y silicio que precipitan conjuntamente y forman compuestos metastables no cristalinos o amorfos como alófano e imogolita (Ugolini y Dahlgren, 1991; Shoji *et al.*, 1993), u ópalo, ferrihidrita y haloisita dependiendo del tipo de clima y vegetación (Theng *et al.*, 1982, Nanzyo *et al.*, 1993; Zapata, 2002).

En principio, el término amorfo literalmente significa “sin forma “y se refiere a una clase de minerales que son no cristalinos o pobremente cristalizados. Los minerales amorfos no tienen un orden regular debido a que no tienden a repetirse, por lo que la estructura atómica interna no es detectable por difracción de rayos X (Malucelli *et al.*, 1999; Ulery, 2006) y se les denomina arcillas de rango corto (Neall, 2006) .

El primero de estos minerales identificado fue el alófano. Con microscopía electrónica de alta resolución, puede ser identificado por su apariencia que se observa en forma de esférulas ahuecadas de 3.5 a 5.5 nm de diámetro. El espesor de la pared de las esférulas se estima en 0.7 nm. El segundo de estos minerales es la imogolita, de composición similar

al alofano; fue identificado como un material tubular, filiforme, con diámetros internos y externos de 1,0 y 2,0 nm, respectivamente. Ambos tienen áreas de superficie específica de aproximadamente $1.000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ (Shoji *et al.*, 1993; Johnson-Maynard, 2006; Neall, 2006). Posteriormente mediante la misma técnica se identificó protoimogolita y ferrihidrita.

3.2.1. Alófano

El alófano ha sido definido como un aluminio silicato hidratado y se le ha dado una fórmula de $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (Figura 3.2); aunque su composición varía ampliamente con la relación molar Al_2O_3 a SiO_2 desde 0.5 a 1.3 y aun hasta 2.0 (Adams, 1995).

El alófano rico en Al (Al:Si= 2:1) también es llamado protoimogolita o parecido a imogolita; estos son los alófanos más comúnmente encontradas en suelos y son similares en composición a la imogolita (Parfitt, 1990; Childs *et al.*, 1990; Childs *et al.*, 1999). El alófano rico en Si (Al: Si \approx 1:1) tiene silicatos polimerizados y algunos grupos ortosilicatos (Wada, 1989; Shoji *et al.*, 1993)

El alófano tiene una superficie específica, y CIC altas y depende del pH por tener carga variable. Además, al poseer una elevada capacidad de intercambio aniónico que puede provocar la retención de iones fosfato interfiriendo en la nutrición de este elemento en las plantas (Fieldes y Perrot, 1966). En términos generales, la formación de alófano e imogolita es favorecida en un rango de pH de 5 a 7 (Quantin *et al.*, 1985; Parfitt y Kimble, 1989; Supriyo *et al.*, 1992), bajas concentraciones de materia orgánica (Shoji *et al.*, 1993; Huang y Huang, 1995), ceniza volcánica con alto contenido de bases y ausencia de minerales 2:1 o de cloritas; en tanto que, en regímenes de humedad Ustic, Xeric y Aridic hay menos formación (Zapata, 2002)

3.2.2. Imogolita

La imogolita tiene una composición aproximada de $\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (Hernández *et al.*, 2006) y comúnmente está asociada con alófano (Figura 3.2, Cuadro 3.1). La superficie externa de los tubos contienen grupos de hidróxido de aluminio similares a la gibbsita (Figura 3.3) con grupos ortosilicatos (O_3SiOH) coordinados a través de tres

aluminios en el interior. La mejor fórmula empírica para la imogolita natural es 1:1 SiO_2 Al_2O_3 2.3-2.8 $\text{H}_2\text{O}^{(+)}$ (Saltos, 1998; Zapata, 2002)

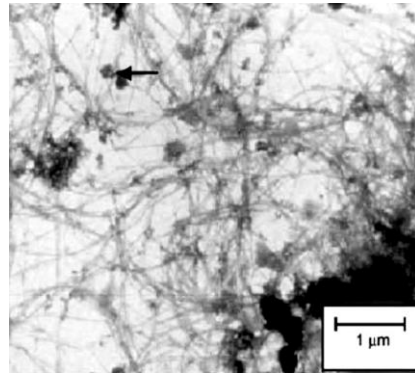


Figura 3.2. Micrografía electrónica en la que se muestra la morfología tubular de la imogolita y las estructuras esféricas del alófono.

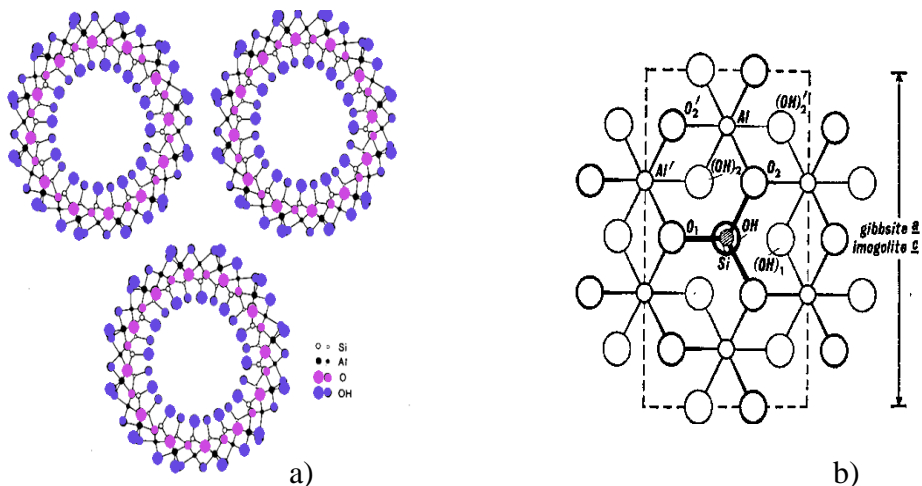


Figura 3.3 a) Sección transversal de los tubos y b) estructura plana de imogolita.

3.2.3. Ópalo

Este mineral ocurre comúnmente en el horizonte A de suelos jóvenes de miles de años (Shoji *et al.*, 1993). Su formación es favorecida por la rápida meteorización de materiales parentales ricos en vidrio, por un pronunciado período estacional seco o congelación para concentrar la solución del suelo y por una baja actividad de Al disminuida por la materia orgánica a través la formación de complejos Al-humus (Parfitt y Saigusa, 1985; Mizota y Chapelle, 1988; Shoji *et al.*, 1993). la sílice opalina

se forma por precipitación del silicio de la solución del suelo sobresaturado, por lo que la formación está muy relacionada con las condiciones climáticas (Zapata, 2002; Nanzzyo, 2004) (Cuadro 3.1).

3.2.4. Ferrihidrita

La forma oxihidróxido de Fe dominante es la ferrihidrita, mineral amorfo con la fórmula de composición $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Zapata, 2002). La ferrihidrita es frecuentemente la forma dominante del hierro secundario en suelos jóvenes derivados de cenizas volcánicas (Bigham *et al.*, 2002) y está presente como formas no cristalinas de oxihidróxidos y como complejos de Fe-humus. La formación de ferrihidrita es favorecida por la rápida liberación de Fe de los minerales primarios y por la sorción de silicatos, fosfatos o materia orgánica (Nanzzyo, 2004) que obstaculizan el proceso de cristalización a goethita o hematita (Dahlgren, 1994; Zapata, 2002).

La ferrihidrita es un compuesto muy reactivo por su alta superficie específica (Cuadro 3.1) y su superficie hidroxilada; típicamente está entre 220 y 560 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$. Un clima frío y húmedo favorece cinéticamente su formación (Zapata, 2002; Ulery, 2006).

Cuadro 3.1. Propiedades físicas y químicas de los minerales amorfos (Urley, 2006).

Mineral	Diámetro (nm)	Morfología	Área de superficie ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	CIC $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$
Alofano	3-5	Esférica	100–800	5–350
Ferrihidrita	3-7	Recubrimientos esféricos	200–600	10–160
Haloisita	20-200	Tubular/ Esférica	10–45	10–40
Imogolita	10-30	Filiformes	700–1100	19–37
Ópalo	10-50	Esférica	40–120	<10

Los minerales amorfos constituyen la base reactiva de los suelos debido a su alta micro-porosidad, tamaño de partícula y superficie específica (Iler, 1979; Ulery, 2006.). Además, tienen gran capacidad de retención de materia orgánica, fosfatos,

sulfatos y otros iones así como metales pesados (Wada, 1989) e intercambio de iones dependiente del pH (Nanzyo, 2004). De acuerdo con Abd-Elfattah y Wada (1981), los minerales amorfos tienen alta selectividad por los metales pesados. La selectividad de los metales en los sitios de intercambio son $Pb > Cu > Zn > Co$ y Cd .

3.3. Aguas residuales

Problemas relacionados con el agua son reconocidos cada vez más como una de las más inmediatas y graves amenazas ambientales para la humanidad. El uso del agua se ha triplicado desde 1950 a nivel mundial y uno de cada seis personas no tiene acceso regular al agua potable (UNEP, 2013). Por lo tanto, existe una tendencia creciente a exigir un uso más eficiente de los recursos hídricos, tanto en las zonas urbanas como en los entornos rurales. La reutilización de aguas residuales para riego agrícola es a menudo vista como un medio positivo de reciclaje de agua debido al gran potencial volúmenes de agua que se pueden utilizar (Shuvai, 1991). El agua reciclada puede tener la ventaja de ser una constante fuente de agua por lo que se puede reducir la cantidad de agua extraída de los mantos acuíferos (USEPA, 1992; Gregory, 2000).

El reciclaje del agua residual es un recurso potencial para utilizarse en la agricultura por los enormes volúmenes que se producen y de esta manera se evita que se descarguen al ambiente. Además, con frecuencia contienen concentraciones significativas de nutrientes orgánicos e inorgánicos (Ramírez-Fuentes *et al.*, 2002). El nutriente orgánico más común es el carbono orgánico disuelto lo que incrementa el contenido de materia orgánica en el suelo.

De acuerdo con Asano y Levine (1998), las aguas residuales se pueden utilizar en las actividades agrícolas puesto que son fuentes de nutrientes inorgánicos para las plantas como nitrógeno, fósforo, potasio, zinc, boro y azufre. Sin embargo, se han identificado factores de riesgo por la ocurrencia de metales pesados (Toze, 2006) que son capaces de acumularse en el entorno y entrar en la cadena alimenticia.

Los metales pesados presentes en el agua residual usada para la irrigación tienden a acumularse en los suelos donde pueden estar biodisponible para los

cultivos. Angelova *et al.* (2004) observaron que cultivos fibrosos tales como el lino y algodón toman metales pesados cuando se cultivan en suelos fuertemente contaminados. Sin embargo, las concentraciones detectadas en las hojas y las semillas eran sólo un pequeño porcentaje de la concentración presente en el suelo. Fazeli *et al.* (1998) examinaron la captación de metales pesados por arroz regado con aguas residuales no tratadas de una fábrica de papel y encontraron que la absorción de los metales en las semillas fue mucho menor llegando a la conclusión de que los niveles en las semillas podrían ser un riesgo para la salud de las personas cuya dieta fuera principalmente de arroz.

3.4. Metales pesados

El término metal pesado se usa comúnmente para denotar el efecto negativo de los elementos en materia de contaminación ambiental. Su uso en éste y otros contextos ha causado confusión. Una de las definiciones más comunes se aplica a metales con una densidad (gravedad específica) mayor a 5 g/cm^3 (Pierzynski *et al.*, 1994), aunque en esta clasificación también caen elementos (no metales) con propiedades químicas muy diferentes. Otra clasificación se enfoca en las propiedades químicas de los metales. En esta propuesta, los metales pesados se clasifican como elementos de clase A (duros), clase B (suaves) y de frontera y se basa en la forma en la que se unen los metales en sus complejos y determina las posibilidades para la formación de los mismos (Figura 3.4) (Duffus, 2001).

Los iones de clase A normalmente forman complejos con ligandos similares que no se polarizan y las uniones iónicas. Los metales clase B se unen preferencialmente a ligandos suaves polarizables para dar uniones más covalentes (Duffus, 2001; Csuros y Csuros, 2002; Volke *et al.*, 2005).

		<div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: white; border: 1px solid black;"></div> Clase A <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black;"></div> Clase B <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #666666; border: 1px solid black;"></div> Frontera </div>																			
Li	Be																				
Na	Mg											Al									
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe(III) Fe(II)	Co	Ni	Cu(II) Cu(I)	Zn										
Rb	Sr	Y	Zr					Rh	Pd	Ag	Cd		Sn								
Cs	Ba		Hf					Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb(IV) Pb(II)								
Fr	Ra																				

Figura 3.4. Metales clasificados como clase A (duros), clase B (suaves) y frontera (metales intermedios). El cobre y el plomo pueden ser clase B o frontera, dependiendo si se encuentran en forma de Cu(I) o Cu(II) y Pb(II) o Pb(IV), respectivamente. El hierro puede ser clase A o frontera, si se encuentra como Fe(III) o Fe(II). Fuente: Volke *et al.* (2005).

Los cationes de varios metales (Ca, Fe, Cu, Na, K, Mg, Zn, Mn y Cr) juegan un papel importante como elementos traza en reacciones bioquímicas y en el metabolismo humano. Otros elementos como: Al, Si, As y Ni también se encuentran en el cuerpo, pero su función exacta no se ha determinado. Ciertos metales funcionan como “venenos” metabólicos, ya que pueden reaccionar e inhibir una serie de sistemas enzimáticos. Algunos iones de estos elementos (Hg^{2+} , Cd^{2+} y Ag^+) forman complejos tóxicos inespecíficos en la célula, lo que produce efectos tóxicos para cualquier función biológica. Elementos como el Hg, As, Sn, Tl y Pb pueden formar iones órgano-metálicos liposolubles capaces de penetrar membranas y acumularse en las células. Otros elementos sin propiedades tóxicas en baja concentración como Zn^{2+} o Ni^{2+} y, especialmente Cu^{2+} , pueden ser tóxicos en concentraciones mayores (Csuros y Csuros, 2002).

3.4.1. Origen de los metales pesados en el suelo

Los metales pesados se encuentran presentes en suelos y sedimentos derivados del material geológico del cual fueron originados y su cantidad depende directamente de la composición del material parental (Sposito, 1989; Porta *et al.*, 1994). Así las rocas ígneas ultrabásicas (peridotitas y serpentitas) presentan los más

altos contenidos de metales traza seguidas de las ígneas básicas (grabos y basaltos). Las menores concentraciones se encuentran las rocas ígneas ácidas (granito) y las sedimentarias (areniscas y lutitas). Los porcentajes más altos son de Cr, Mn y Ni; mientras que, el Co, Cu, Zn y Pb se presentan en menores proporciones y los contenidos de As, Cd e Hg son mínimos (García y Dorronsoro, 2005; Balderas-Plata, 2005)

Sposito (1989) consideró que las rocas ígneas como basalto y andesita son los materiales que más proporcionan metales pesados a los suelos o sedimentos, debido principalmente a su composición mineralógica (plagioclasas cálcicas, augita, olivino, biotita y andesina) (Besoain, 1985). Estos minerales, además de contener Fe, Mg, Ca, Si y Al presentan en su composición Ni, Co, Mn, Pb, Zn, Cu y As. Otro material es el vidrio de origen volcánico, el cual es fácilmente alterable y su intemperismo produce materiales amorfos como alofano y opalo, además de elementos como Cu, As, Mn y Fe (Drees *et al.*, 1989; Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2005). De esta manera, pueden ocurrir concentraciones anómalas de metales pesados en el suelo por causas naturales sin rebasar el umbral de toxicidad (García-Dorronsoro, 2005; Balderas-Plata, 2005).

3.4.2. Disponibilidad de metales pesados en el suelo

Los suelos tienen una notable habilidad para remover iones y moléculas de agua por reacciones de sorción, la cual puede ser definida ampliamente, como la transferencia de iones y moléculas en solución (fase líquida) a iones y moléculas en la fase sólida (Mcbride, 1994; Clunes, 2009). Los componentes responsables de la sorción incluyen filosilicatos, óxidos cristalinos y no cristalinos (Fe, Al, Mn), sustancias húmicas, microorganismos, carbonatos, etc., pero difieren en su capacidad de sorción (Violante *et al.*, 2008).

Para cada caso, el comportamiento del metal es distinto; por tanto, el análisis total de los metales pesados de un suelo es una medida poco representativa de la peligrosidad de los posibles contaminantes. Indica en todo caso, la peligrosidad potencial o futura, pero no la que se presente en el momento del muestreo de los elementos determinados. Por ello, además de este análisis, se debe disponer de

datos de la forma en que se encuentran estos metales pesados, tanto en sus formas físicas como químicas, y las fracciones asimilables, que es una medida directa de la peligrosidad real.

En este sentido, Kabata-Pendias (2001) señala que según se encuentre el metal retenido en el suelo, así será su disponibilidad relativa por las plantas y por tanto la incorporación a los organismos (Galán *et al.*, 2008). Violante (2008) menciona que las reacciones de sorción/desorción en el suelo son controladas por las concentraciones en la solución del suelo, afectando así su biodisponibilidad, lixiviación y toxicidad. La movilidad de un metal depende no sólo de su especiación química, sino de una serie de parámetros del suelo (Adriano, 2001; Galán *et al.*, 2008; Violante, 2008).

Propiedades del suelo que afectan la disponibilidad de metales pesados

a) pH. En general, la capacidad de retención de los metales pesados incrementa al aumentar el pH; es decir, la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido excepto As, Mo, Se Cr y V que son más móviles a pH alcalino (Mc Lean *et al.*, 1992; Galán *et al.*, 2008,). Asimismo, en pH afecta la especiación de metales pesados como se muestra en el Cuadro 3.2.

Textura. Los suelos arcillosos retienen más metales por adsorción en el complejo de cambio. Por el contrario, los arenosos carecen de capacidad de fijación y puede contaminar el nivel freático (Adriano, 2001; Galán, 2008)

Cuadro 3.2. Estados de oxidación dominantes y especies químicas de algunos metales pesados en solución acuosa.

Elemento	Suelo/Sedimentos pH ácido	Suelo/Sedimentos pH alcalino
Cd(II)	Cd^{2+} , $CdSO_4$, $CdCl^-$	Cd^{2+} , $CdCl^-$, $CdSO_4$, $CdHCO_3^+$
Cu(II)	Cu^{2+} , $CuCl^-$	$CuCO_3$, $CuHCO_3^+$
Mn(II)	Mn^{2+} , $MnSO_4$	Mn^{2+} , $MnSO_4$, $MnCO_3$, $MnHCO_3^+$
Ni (II)	Ni^{2+} , $NiSO_4$, $NiHCO_3^+$	$NiCO_3$, $NiHCO_3^+$, Ni^{2+}
Pb(II)	Pb^{2+} , $PbSO_4$, $PbHCO_3^+$	$PbCO_3$, $PbHCO_3^+$, $(PbCO_3)$, $PbOH^+$
Zn (II)	Zn^{2+} , $ZnSO_4$	$ZnHCO_3^+$, $ZnCO_3$, $ZnSO_4$, Zn^{2+}

c) Mineralogía de arcillas. Cada mineral de la arcilla tiene unos determinados valores de superficie específica (Cuadro 3.3) y de descompensación eléctrica. Cuanto mayor es la superficie activa de un filosilicato, mayores son sus posibilidades de adsorber metales. Sin embargo, la importancia de los minerales de la arcilla como adsorbentes es secundaria cuando en un suelo existe abundante materia orgánica y/o oxihidróxidos de hierro, componentes más competitivos (Adriano, 2001; Galán, 2008).

Cuadro 3.3. Área superficial expuesta de algunos minerales del suelo.

Minerales del suelo	Área superficial (m ² g ⁻¹)
Caolinita	7-30
Ilita	65-100
Motmorillonita	700-800
Óxidos de manganeso	30-300
Goethita	40-80
Carbonatos /arenas	0.5-5

d) Materia orgánica. Reacciona con los metales formando complejos intercambiables o quelatos. La adsorción puede ser tan fuerte que quedan estabilizados, como el Cu, Pb, Zn, Co, Ni, y Hg. En muchos casos se forman complejos organometálicos lo que facilita la solubilidad y disponibilidad del metal porque pueden degradarse por los organismos del suelo. Esto conduce a una persistencia de la toxicidad (Adriano, 2001; Galán *et al.*, 2008).

e) Capacidad de cambio. El poder de intercambio catiónico depende del tipo de minerales arcillosos, de la materia orgánica, de la valencia y del radio iónico hidratado del metal. A mayor tamaño y menor valencia, menos frecuentemente quedan retenidos (Adriano, 2001; Galán, 2008).

f) Condiciones redox. La humedad del suelo influencia la retención de los metales traza a través del potencial de oxidación-reducción (Adriano, 2001) (Cuadro 3.4). En suelos oxidados, el potencial redox se encuentra entre + 400 a + 700 mV. En sedimentos y suelos inundados, el potencial redox está entre el intervalo -400 (fuertemente reducido) a +700 mV (oxidados) (Gambrell y Patrick, 1978).

Al evaluar la concentración de Cd, Cu y Zn de soluciones extractantes aplicadas a lodos residuales se, indica que disminuye la solubilidad de estos metales e incrementa la solubilidad de Fe y Mn bajo condiciones reductoras (Bingham *et al.*, 1976).

Cuadro 3.4. Reacciones oxido-reducción en suelos de humedales, suelos de arrozales y sedimentos.

Elemento	Especies Oxidadas	Especies Reducidas
Oxigeno	Oxigeno	H ₂ O
Manganeso	Mn ⁴⁺ (Mangánico: MnO ₂)	Mn ²⁺ (Manganoso: MnS)
Hierro	Fe ³⁺ (Férrico: Fe(OH) ₃)	Fe ²⁺ (Ferroso: FeS, Fe(OH) ₂)
Azufre	SO ₄ ²⁻ (Sulfato)	S ²⁻ (Sulfuro: H ₂ S, FeS)

g) Carbonatos. La presencia de carbonatos garantiza el mantenimiento de los pH alcalinos y en estas condiciones tienden a precipitar los metales pesados (Galán, 2008).

h) Óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. Tienen una función importante en la retención de metales pesados y en su inmovilización; se encuentran finamente diseminados en la masa de suelo por lo que son muy activos. Por su baja cristalinidad y pequeño tamaño de partícula, tienen una alta capacidad sorcitiva para metales divalentes, especialmente Cu, Pb, y en menor cantidad Zn, Co, Cr, Mo, Ni y As (McBride, 1994; Kabata-Pendias, 2001).

i) Salinidad. El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales y su retención por dos mecanismos. Primero, los cationes Na y K pueden reemplazar a metales pesados en lugares de intercambio catiónico; en segundo, los aniones cloruro y sulfato pueden formar compuestos más estables con metales tales como Pb, Zn, Cu, Cd y Hg. Por otra parte, las sales normalmente dan pH alcalino (Galán *et al.*, 2008).

j) Fosfatos. Varios de los fosfatos contienen una gran cantidad de elementos traza, como F y a veces Cd. En apatitas naturales se ha observado algunas sustituciones de Ca por metales pesados, como Ba, Bi, Cu, Li, Mn, Pb, Re, Sr, Th, U, y Zn) los que se incorporan, junto con Fe³⁺ y Al³⁺, en fosfatos hidratados (Kabata-Pendias, 2001).

3.5. Metales pesados en el suelo

3.5.1. Hierro (Fe)

El Fe es uno de los principales constituyentes de la litosfera y comprende aproximadamente 5%, concentrado principalmente en la serie de rocas magmáticas máficas.

La regla general de la movilización y la fijación de Fe son las condiciones oxidantes y alcalinas que promueven su precipitación; mientras que, las condiciones ácidas y reductoras incrementan su solubilidad.

Lindsay (1979) informó que la movilidad de Fe en suelos está controlada en gran medida por su solubilidad. Sin embargo, la formación de otros compuestos de Fe, tales como fosfatos, sulfuros, carbonatos, pueden modificar esta característica.

En los suelos, el Fe se encuentra principalmente en la forma de óxidos e hidróxidos, como pequeñas partículas o asociado con las superficies de otros minerales. Sin embargo, en los horizontes ricos en materia orgánica, el Fe parece encontrarse principalmente en forma de quelatos.

En suelos anegados, la reducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} se lleva a cabo y se refleja en un aumento en su solubilidad. Este proceso de reducción está fuertemente relacionada con el metabolismo de las bacterias y puede resultar en una alta concentración de Fe^{2+} en algunos suelos inundados. Los compuestos de Fe son en gran medida responsables del color de los suelos y se han utilizado para la descripción de los procesos del suelo y para la clasificación del suelo (Kabata-Pendias, 2001).

3.5.2. Manganeseo (Mn)

El manganeseo es uno de los elementos traza más abundantes en la litosfera y su gama común en rocas es de 350 a 2000 ppm; sus mayores concentraciones se asocian generalmente con rocas máficas.

El Mn forma una serie de minerales en los que se da comúnmente como iones Mn^{2+} , Mn^{3+} , Mn^{4+} ; aunque su estado de oxidación +2 es más frecuente en los minerales silicatados (Kabata-Pendias, 2001).

El complejo mineralógico y comportamiento químico del Mn resulta en la formación de un gran número de óxidos e hidróxidos, que por sus características físicas (pequeño tamaño de los cristales y gran área de superficie), tienen una importante implicación geoquímica (Mc Bride, 1994). La carga negativa de Mn(OH)_4 y MnO_2 son responsables del alto grado de asociación de las concreciones de Mn con algunos metales pesados, en particular con Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Ba, Tl, W y Mo. En adición, la oxidación de As, Cr, V, Se, Hg por óxidos de Mn está controlado por el pH y el potencial redox. En suelos inundados, la principal transformación del Mn implica la reducción de Mn (IV) a Mn (II), resultando en un incremento en la concentración de iones Mn^{2+} y precipitación de carbonato manganeso (Figura 3.5).

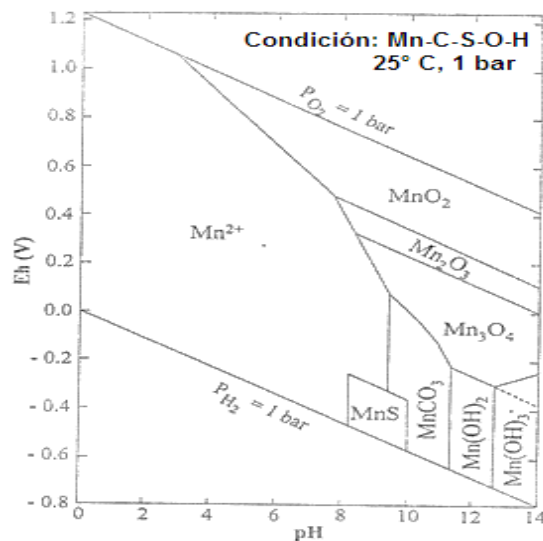


Figura 3.5. Campo de estabilidad en función del Eh-pH previsto para el Manganeseo; $\text{Mn}=10^{-6}$, $\text{C}=10^{-3}$, $\text{S}=10^{-3}$ (Tomado de Adriano, 2001).

En suelos bien drenados, la solubilidad del Mn siempre aumenta al incrementar la acidez del suelo; sin embargo, la capacidad de este elemento para formar complejos aniónicos o complejos con ligandos orgánicos pueden contribuir al aumento de su solubilidad en el intervalo de pH alcalino (Adriano, 2001; Kabata-Pendias, 2001).

3.5.3. Cobre (Cu)

El cobre es uno de los elementos más importantes para las plantas y los animales y su exceso puede producir deficiencia de Zn y viceversa. Las formas asimilables por las plantas son $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ en los suelos ácidos y como $\text{Cu}(\text{OH})$ en los neutros y alcalinos. El Cu es fuertemente fijado en los suelos y por tanto es un metal muy poco móvil (Baker y Senft, 1995); comúnmente está presente en minerales que contienen sulfuros, arsénidos, cloruros y carbonatos (Evanko y Dzombak, 1997). Aunque este elemento en cantidades traza es esencial para la vida debido a que juega un importante papel en diversas funciones enzimáticas, también puede ser tóxico en grandes cantidades (Csuros y Csuros, 2002).

Este elemento se mantiene en el suelo mediante intercambio de la solución y adsorción específica. Cavallaro y McBride (1978) sugieren que las arcillas pueden intercambiar Cu en suelos no calcáreos, funcionando así como un sumidero; mientras que, en suelos calcáreos, la adsorción específica de Cu en CaCO_3 es el mecanismo que controla la concentración en solución del suelo (McBride y Bouldin, 1984; Dudley *et al.*, 1991).

Son muy numerosos los minerales que contienen Cu, como los sulfuros, sulfatos, sulfosales y carbonatos; principalmente como: calcopirita CuFeS_2 , cuprita Cu_2O , malaquita $\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ y azurita $\text{Cu}_2(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$. En sistemas aerobios suficientemente alcalinos, el CuCO_3 es la forma soluble dominante, pero también se puede encontrar el ión Cu^{2+} y complejos hidroxilados (CuOH^+ y $\text{Cu}(\text{OH})_2$) (Evanko y Dzombak, 1997).

En general, el Cu se encuentra unido al complejo de cambio más que formando minerales. Los suelos con altos contenidos en materia orgánica toleran altas concentraciones de Cu (Adriano, 2001; Kabata-Pedias, 2001).

3.5.4. Plomo (Pb)

El Pb es un metal gris azulino que se presenta en forma natural y en pequeñas cantidades (0.002%) en la corteza terrestre. Es un elemento tóxico para el sistema nervioso y se asocia con la depresión de muchas funciones endócrinas,

aunque no hay evidencia de efectos teratogénicos o carcinogénicos (Lide, 1997; Evanko y Dzombak, 1997).

La mayor parte del Pb liberado en el ambiente es retenido por el suelo en donde los procesos incluyen: adsorción, intercambio iónico, precipitación y acomplejamiento con materia orgánica (Adriano, 2001). Aunque las especies de Pb varían considerablemente de un tipo de suelo a otro, puede asociarse principalmente con arcillas, óxidos de Mn, Fe y materia orgánica. Sin embargo, en algunos suelos, el Pb puede estar altamente concentrado en carbonato de Ca o en fosfato (Kabata-Pendias, 2001).

El tetra-metilo de plomo (compuesto relativamente volátil) puede formarse en sedimentos como resultado de su alquilación microbiana (Lide, 1997; Evanko y Dzombak, 1997). Como contaminante ambiental, normalmente se encuentra como Pb^{2+} , cuando forma complejos con ligandos orgánicos (ácidos húmicos y fúlvicos) o inorgánicos (Cl^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}); compuestos poco solubles (Lide, 1997; Evanko y Dzombak, 1997; Adriano, 2001).

3.5.5. Zinc (Zn)

El Zn es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre, parece estar distribuido uniformemente en suelos originados de rocas magmáticas, con un ligero incremento en rocas máficas (80 a 120 mg kg^{-1}) y una ligera disminución en las rocas ácidas (40 a 60 mg kg^{-1}) (Kabata-Pendias, 2001). No se encuentra en forma elemental y se extrae de la esfalerita ((ZnFe) S), que se asocia comúnmente con la galena (PbS). Es un elemento traza esencial en la nutrición humana y también un componente importante de enzimas; sin embargo, el consumo excesivo puede inhibir la absorción de Cu y producir una deficiencia de este elemento (Lide, 1997; Csuros y Csuros, 2002).

Las concentraciones naturales de Zn en aire, agua y suelo, están aumentando debido a actividades humanas como la minería, la producción de acero y la combustión de petróleo, entre otras. Una vez en el ambiente, el metal generalmente permanece en el suelo, ya que forma compuestos insolubles; aunque puede solubilizarse a pH neutro o ácido. A pH alcalino forma carbonatos e hidróxidos como

$Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$ (Adriano, 1986); mientras que, bajo condiciones reductoras y en sistemas muy contaminados puede precipitar fácilmente ZnS o $Zn(CN)_2$ (Evanko y Dzombak, 1997) y coprecipitar con óxidos de Fe o Mn (Hickey y Kiiitrick, 1984).

3.5.6. Níquel (Ni)

La concentración de Ni es más alta en suelos originados de rocas ultramáficas (1400-2000 mg kg⁻¹) y sus concentraciones disminuyen con el aumento de la acidez de las rocas de 5 a 15 mg kg⁻¹ en granitos, las rocas sedimentarias contienen un intervalo de 5 a 90 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias, 2001).

El níquel se presenta en los suelos en diversos estados de oxidación, pero sólo el Ni²⁺ es estable en un amplio margen de pH y de potencial redox. Además, en la fase sólida del suelo se encuentra en los sitios de intercambio, adsorbido específicamente, adsorbido u ocluidos en sesquióxidos, fijados al borde de las arcillas y en la materia orgánica. El Ni se moviliza fácilmente durante la intemperismo y se coprecipita principalmente con óxidos de Fe y Mn. A pH 8, el Ni(OH)⁺ y el Ni²⁺ son probablemente las formas dominantes en la solución del suelo, mientras que, a pH ácido se encuentra como Ni²⁺, NiSO₄ y NiPO₄ variando su proporción dependiendo de los niveles de SO₄²⁻ y PO₄²⁻ (Adriano, 2001; Kabata-Pedias, 2001).

3.5.7. Cadmio (Cd)

Se encuentra de forma natural como CdS o CdCO₃ y como impureza en minerales de Zn (~3 kg Cd/ton Zn), Cu y Pb, al igual que en el carbón y en el petróleo crudo. Los compuestos de Cd son los más tóxicos (Kabata-Pendias, 2001) pues pueden causar daño pulmonar, renal e incluso cáncer (ATSDR, 2004; Csuros y Csuros, 2002).

Como todos los metales de catiónicos, la química del Cd en el entorno del suelo es, en gran medida, controlada por el pH. Bajo condiciones ácidas su solubilidad aumenta y la adsorción por coloides es muy baja, dando lugar a la adsorción por óxidos hidratados y materia orgánica. A pH superiores a 6, el cadmio es adsorbido por la fase sólida del suelo o se precipita, reduciéndose

considerablemente de la solución del suelo (McLean *et al.*, 1992; Kabata-Pedias, 2001).

Este elemento tiende a depositarse y adherirse a la materia orgánica del suelo; sin embargo, parte de él se disuelve en agua, por lo que puede llegar a los cuerpos de agua (Lide 1997; Csuros y Csuros, 2002; ATSDR 2005). Las formas más comunes de Cd, incluyen Cd^{2+} la más tóxica, complejos de cadmio-cianuro y $Cd(OH)_2$. Las formas dominantes a pH alto son hidróxidos y carbonatos; mientras que a pH bajo (< 8) predominan el Cd^{2+} y especies acuosas de sulfato. Bajo condiciones reductoras en presencia de azufre, se forma el sulfato de cadmio (CdS) que por su estabilidad, controla su movilidad; además se precipita en presencia de fosfato, arseniato, cromato y otros aniones (ATSDR, 2004; Evanko y Dzombak, 1997).

De acuerdo con lo anterior, los ecosistemas acuáticos y terrestres (Vilchez, 2005) sobre todo en aquellos que contienen minerales amorfos (Abd-Elfattah y Wada, 1981) existe una capacidad de asimilar un aporte natural de iones metálicos (metales pesados) y de esta manera retenerlos en el suelo (Wada, 1989). Muchos de estos elementos son necesarios para el desarrollo de los seres vivos (Vilchez, 2005); sin embargo, si se sobrepasan las concentraciones requeridas se rompe el equilibrio ecosistémico el cual a la fecha se ha visto afectado por la actividad humana debido a las actividades industriales y agrícolas (Beiger y Jernelöv, 1986; Basiric *et al.*, 1992; Erlinch, 1997).

3.5.8. Referencias

Abd-Elfattah A. y K Wada. 1981. Adsorption of lead, copper, zinc cobalt and cadmium by soils that differ in cation-exchange materials. *J. Soil Sci.* 32, 271-283.

Adams M. 1995. Fundamentos de química de suelos. Universidad Central de Venezuela. 371 p.

Adriano D. C. 2001. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risk of metals. 2 Ed. Springer- Verlag-New York. 867 pp.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). 2004. Toxicological Profile Information Sheet. Disponible en: www.atsdr.cdc.gov/toxpro2.html.

Angelova, V., R. Ivanov, V. Delibaltova y K. Ivanov. 2004. Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Ind. Crops Prod.* 19: 197–205.

Asano T. and A. Levine. 1998. Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse: Introduction. *In: Asano T. (ed.), Wastewater Reclamation and Reuse*, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. pp. 1-55

Balderas P. M. A. 2005. Sorción de metales pesados por materiales amorfos en suelos arcillosos de origen volcánico. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. México. 124 pp.

Baker D.E. y J. Senft P. 1995. Copper. *In: Heavy Metals in soils*. Alloway BJ (ed). Blackie Academic and Profesional. Londres. pp 179-202

Basiric, D., S. Lucilic y P. Miletic 1992. Radium and uranium in Phosphate fertilizers and their impact on the radioactivity of waters. *Water Research.* 26:5.

Beiger K. y A. Jernelöv A. 1986. General aspect of specific data on ecological effects of metals, en *Handbook on the toxicology of metals*, Frieborg. L.; Nordberg G. F. y Voulk V. (Eds.). Elsevier Science Publishers, New York, USA.

Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. San José Costa Rica. IICA. 1216 p.

Bigham J. M., R. Fitz Patrick W. y D. Schulze G. 2002. Iron oxides En: Dixon J.B. y SchulzeG. D. (Eds.). *Soil Mineralogy with Environmental Applications*. SSSA, Madison, Wisconsin, pp.323-366.

Bingham F. T., G. Mitchell A., R. Mahler J. y A. Page L. 1976. *In: Proceedings of the international conference on Environmental Sensing and Assesment*, vol 2. Inst. Elec y Electron Engrs, New York.

Cajuste L., J., R. Carrillo G., E Cota G. y R. Laird J.1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air and Soil Pollution.* 57-58:763-77.

Cavallaro, N. and M. McBride B. 1978. Copper and cadmium adsorption characteristics of selected acid and calcareous soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:550-556.

Childs C.W., S. Hayashi y R. Newman H. 1999. Five coordinate aluminum in allophane. *Clays Clay Miner.* 47:64–69.

Childs C.W., R. Parfitt L. y R. Newman .H. 1990. Structural studies of silica springs allophane. *Clay Miner. Bull.* 25: 329–341.

Clunes M. J. C. 2009. Retención del aminoácido leucina por las arcillas del suelo. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Agronomía. Universidad Austral de Chile.

Csuros M y C. Csuros. 2002. Environmental sampling and analysis for metals. Lewis Publisher. 372 pp.

CONAGUA, 2011. Infraestructura hidráulica *In*: Estadísticas del agua en México. Capítulo 4. México, pp 57-77.

Dahlgren R.A. 1994. Weathering environments and the formation of noncrystalline materials in volcanic ash soils. 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, Mexico, 1994. Transact. Vol. 8a, pp. 106-115.

Del Valle C. H. 1983. Los procesos de acumulación de las sales e intemperismo en cubetas lacustres, en la transición del exlago de Texcoco. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. México.

Drees L.R., L. Wilding P., N. Smeck E. y A. Senkayi, L. 1989. Silica in soils: quartz and disordered silica polymorphs. *In* Dixon, J.B. & Buol, S.W. (Eds.), Minerals in soil environments, 2nd edition, SSSA Book Series No. 1, Madison, WI. pp. 913-974.

Dudley L. M., J. McLean E., T. Furst H. y J. Jurinak J. 1991. Sorption of Cd and Cu from an acid mine waste extract by two calcareous soils: column studies. Soil Sci. 151:121-135.

Duffus J. H. 2001. "Heavy Metals"- A Meaningless Term. Chemistry International. 23 (6).

Erlinch H. L. 1997. Microbes and metals. Applied Microbiology and Biotechnology. 48: 6

Evanko C.R. y D. Dzombak. A. 1997. Remediation of metals-contaminated soils and groundwater. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center (GWRTAC) "E" Series Report. 53 pp. Disponible en Internet en: http://www.gwrtac.org/html/tech_evalhtml#METALS.

Evanko F. J., Perrot K. W. 1966. The nature of allophane in soil. Part 3. Rapid field and laboratory test for allophanes. N. Z. J. Sci. 9: 623-629.

Fazeli M. S., F. Khosravan, M. Hossini, Sathyanarayan S. y P. Satish, N., 1998. Enrichment of heavy metals in paddy crops irrigated by paper mill effluents near Nanjangud, Mysore District, Karnataka, India. Environ. Geol. 34, 297–302.

García I. y C. Dorronsoro, 2005. Contaminación por Metales Pesados. En Tecnología de Suelos. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola.

Galán H., E. y A. Romero B. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla* 10: 48-60

Gambrell R. P. y W. Patrick H. 1978. In plant life in anaerobic environments. *Ann Arbor Sci Publ*, Ann Arbor, MI.

Gregory A., 2000. Strategic direction of water recycling in Sydney. *In: Proceeding of the First Symposium Water Recycling*, Australia, Adelaide, 19–20 October, 2000, pp. 35–41

Gutiérrez-Castorena., Ma. del C., G. Stoops; C. A. Ortiz Solorio y López-Avila. 2005. Amorphous silica materials in soils and sediments of the ExLago de Texcoco, México: An explanation for its subsidence. *Catena* 60: 205-226.

Gutiérrez-Castorena., Ma. C., C. A. Ortiz-Solorio y P. Sánchez-Guzmán 2007. Clay coatings formation in tepetates from Texcoco. México. *Catena*. 71: 411-424.

Hickey M. G. y J. Kittrick. 1984. *J. Environ Qual* 13:372-376. *In: Adriano D. C.* 2001. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risk of metals. 2 Ed. Springer- Verlag-New York. New York. 867 p

Huang H., J. Huang H. 1995. Properties of Al/Fe humus complexes in soils derived from volcanic soils. *J. Chin. Agric.Chem. Soc.* 33 (4), 424– 435

Iler R.K., 1979. The chemistry of silica – solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry. J.K Wiley and Sons, New York. pp 866.

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

Jimenez B. C., H. Mazari M., Domínguez M. R. y Cifuentes G. E., 2005. El Agua en el Valle de México. Academia Mexicana de Ciencias. Edición digital.

Johnson-Maynard J. L. 2006. Allophanes. *Encyclopedia of Soil Science* DOI: 10.1081/E-ESS-120042630.

Kabata-Pendias A y K. Pendias 2001. Trace elements in soils and plants. CRC Press LLC, 3rd. Ed. N.W. 331 p.

Leamy M.L., 1984. Andisols of the World. Congreso Internacional de Suelos Volcanicos, Comunicaciones, Universidad de La Laguna Secretariado de Publicaciones, serie informes, vol. 13, pp. 368–387.

Lide R. D. 1997. Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press. 78th edition. Boca Raton, FL, 2512 pp.

Lucho-Constantino C. A., F. Prieto-García, L. Del Razo M., R. Rodriguez-Vazquez y H. Poggi-Varaldo. 2005. Chemical Fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with waste water in central Mexico. *Agriculture Ecosystems y Environment*. Vol. 108: 57-71

Lugo J. H. 1990. El relieve de la república mexicana. Univ. Nal. Auton. México. *Inst. Geología* 9:82 111.

Malucelli F., F. Terrible y C. Colombo. 1999 Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of andosols on the Island of Sao Miguel (Azores). *Geoderma*. 88:73-98

Marín L.E. y A. Trinidad-Santos, 2002, Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin, *In: Fenn, M.E., L.I. de Bauer y T. Hernández-Tejeda, Ecological Studies Series, 156, Springer-Verlag. New York City, Nueva York, Estados Unidos, pp. 44-67.*

Mizota C. y Van Reeuwijk, L.P. 1989. Clay Mineralogy and Chemistry of Soils formed in Volcanic Material in Diverse Climatic Regions. Soil monograph 2, ISRIC, Wageningen, The Netherlands.

Mizota C. y J. Chapelle 1988. Characterization of some Andepts and andic soils in Rwanda, Central Africa. *Geoderma* 41: 193-209.

McBride, M. B. y D. R. Bouldin. 1984. Long-term reactions of copper (II) in a contaminated calcareous soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48:56-59.

McBride. 1994. *Environmental Chemistry of Soils*. Oxford University Press, USA. 416 p.

McLean E. J. y E. Bledsoe B. 1992. Behavior of metals in soils. *Ground Water Issue-EPA*. 540/S-92/018.

Nanzyo M., R. Dahlgren y S. Shoji, 1993. Chemical characteristics of volcanic ash soils. *In: Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science* 21: 145-187.

Nanzyo M. 2004. Unique Properties of Volcanic Ash Soils. *Global Environmental Research-English Edition*. 6(2): 99-112.

Neall V.E. 2006. Volcanic soils. *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Land use and land cover VII: 1-24. Disponible en: <http://www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C19/E1-05-07-13.pdf> (accesado agosto 2013).

Parfitt R. L., M. Saigusa y J. Cowie D. 1985. Allophane and halloysite formation in a volcanic ash under different moisture conditions. *Soil Sci.* 138: 360-364.

Parfitt R. L. y J. Kimble M. 1989. Conditions for formation of allophane in soils. *Soils Sci. Soc. Am. J.* 53: 971-977.

Parfitt R.L.1990. Allophane in New Zealand—a review. *Aust. J. Soil Res.* 28: 343–360.

Pierzynski G.M., J. Sims T. y G. Vance F. 1994. Organic chemicals in the environment. *In: Soils and environmental Quality*. Boca Ratón: Lewis Publishers – CRC Press Inc.

Porta C. J., R. Lopez-Acevedo M., de L. Roquero. C.1994. Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi Prensa. pp. 807

Quantin P. B., A. Dubin, L. Bouleau y L. Bidini. 1985. Characteristic and genesis of two Andosols In Central Italy. En: *Volcanic soils: weathering and landscape relationships of soils on tephra and basalt Cremlingen*. Fernandez Caldas E., Yaalon D.H. (Eds.). *Catena*, pp. 107-117.

Resendiz P Ma. De la L. 2012. Impacto de las practicas antrópicas en los suelos del distrito de riego “Los Insurgentes” México. Tesis de Doctorado en Ciencias, Posgrado en Edafología, Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. 109 p.

Rodríguez T., C.A. Ortiz-Solorio, Hidalgo-Moreno, C. y M.C., Gutiérrez-Castorena. 2004. Los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc: Saprolita sin endurecimiento pedológico. *Terra* 22, 11-22.

Siebe C. y E. Cifuentes. 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in central Mexico: An overview. *In: International Journal of Environmental Health Research* 5:161-173.

Saltos M. A. J. 1998. Caracterización de la acidez de suelos volcánicos del ecuador y su respuesta al encalado. Tesis de Magister Scientiarium en Ciencia del suelo. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela.

Shoji S., Nanzyo M. y R. Dahlgren A. 1993. *Volcanic Ash Soils: Genesis, properties and utilization*. Elsevier Science. Amsterdam.

Shuvai H. 1991. Effects of wastewater irrigation of pastures on the health of farm animals and humans. *Revue scientifique et technique* 10:847-66.

Solis C., K. Isaac-Olive, A. Mireles and M. Vidal-Hernández. 2009. Determination of the trace metals in cow's milk from waste water irrigated areas in central Mexico by chemical treatment coupled to PIXE. *Microchemical Journal* 91:9-12.

Sposito G. 1989. *The chemistry of soil*. Oxford University Press. New York, NY, USA 329 p..

Supriyo H., N. Yoshinaga y B. Mitchell D. 1992. Chemical and mineralogical properties of Volcanic ash soils from Java. *Soil Sci. Plant Nutr.* 38: 443-457.

Takahashi, T., S. Shoji, 2003. Distribution and classification of volcanic ash soils. *Glob. Environ. Res.* 6: 83-97.

Theng B. K. G., M. Russell, G. Churchman J., R. Parfitt L. 1982. Surface properties of Allophane halloysite, and imogolite. *Clays and Clay Minerals* 30:143-149.

Toze S. 2006. Reuse of effluent water—benefits and risks *Agricultural Water Management* 80:147-159

Urley A. L. 2005. Amorphous Minerals. *In: Encyclopedia of Soil Science*, 2a Edición. Rattan Lal (Ed.) 2005. 93-96.

Ugolini F. C., R. Dahlgren J. La Manna, W. Nuhn and J. Zachara. 1991. Mineralogy and weathering processes in Recent and Holocene tephra deposits of the Pacific Northwest, USA. *Geoderma* 51: 277-299.

UNEP/EG/DTIE/IETC. Water and wastewater reuse. An Environmentally Sound Approach for Sustainable Urban Water Management. 2013. Consultado en: http://www.unep.or.jp/Ietc/Publications/Water_Sanitation/wastewater_reuse/

USEPA 1992. U.S. EPA, Offices of Water and Wastewater and compliance (Ed.) Guidelines for water reuse. U.S. EPA, Washington.

Vázquez-Alarcón A., L. Justin-Cajuste, C. Siebe-Grabach, G. Alcántar-González y Ma. De L de la Isla de Bauer. 2001. Cadmio, Níquel y Plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35: 267-274.

Vilchez R. 2005. Eliminación de metales pesados en aguas mediante sistemas de lechos sumergidos. Estudio microbiológico en las películas. Tesis doctoral. Universidad de Granada, Granada, España.

Violante A. y Pigna 2008. Sorption-Desorption Process of metals and metalloids in soil environments. 5th interational Symposium ISMON. Pucón Chile.

Volke S. T., J A. Velasco T. y de la D. Rosa P. A. 2005. Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación. (INE-SEMARNAT).

Wada K. 1989. Allophane and imogolite. *In: Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). Minerals in soil environments. SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 1051-1087.*

Zapata H.R. D., 2002. Química de los procesos pedogenéticos del suelo. UNAL Medellín. 280 p.

CAPITULO IV. METALES PESADOS Y AMORFOS EN ANTROSOLES IRRIGADOS CON AGUAS RESIDUALES EN TEOLOYUCAN ESTADO DE MEXICO

4.1 RESUMEN

En el Valle de México se asienta la zona urbana más grande del país, la cual genera una gran cantidad de aguas negras que se emplean sin tratamiento para el riego en distintos lugares del centro de México, entre los que se encuentran el distrito de riego Los Insurgentes en Teoloyucan, estado de México. El uso prolongado de estas aguas, además de mejoradores orgánicos (estiércol), ha generado que los suelos se transformen en Antrosoles hidrargícos-térricos y algunos hórticos; sin embargo, se desconoce el aporte de metales pesados al suelo y su interacción con las propiedades edáficas y materiales amorfos comunes en la zona de estudio. 21 muestras superficiales se colectaron de las tierras denominadas negras y lamas, con diferente intensidad agrícola, y se muestrearon 5 canales secundarios de irrigación. Se realizaron análisis físicos y químicos de los suelos y se cuantificaron los metales pesados extractables (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd y Ni). Los metales pesados encontrados fueron: Zn, Cu, Fe y Mn. La mayor concentración se registró directamente en los canales de irrigación; mientras que en la capa superficial del suelo baja su concentración. El Zn se concentra en las tierras arcillosas cercanas a los canales secundarios y el Cu se concentra predominantemente en las tierras lama o en las tierras arcillosas con alto contenido de MO. Los suelos arcillosos están compuestos de una mezcla de arcillas silicatadas, de materiales amorfos de Fe y de Si y alto contenido de materia orgánica sobre todo en las paredes de los canales, por lo que están sirviendo como filtro de metales pesados por su alta reactividad.

Palabras clave: Actividad agrícola; ferhidrita; materia orgánica

Giovanna Rivera-Vargas, Ma. Del Carmen Gutiérrez-Castorena, Carlos Alberto Ortiz-Solorio, Patricio Sánchez-Guzmán, Rogelio Carrillo-González, Lizeth García-Luna. Metales pesados y amorfos en Antrosoles irrigados con aguas residuales en Teoloyucan estado de México. Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, que se llevó a cabo del 11 al 15 de agosto del 2012 en Zacatecas, Zacatecas.

4.2 INTRODUCCIÓN

En valle de México se asienta la zona urbana más grande del país, la cual genera problemas en cuanto a abastecimiento y desalojo de aguas residuales. La ciudad está generando un promedio anual de $237 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de aguas residuales, de las cuales un porcentaje es tratado para re-uso en el interior de la ciudad, y la restante sale del valle sin tratar y se emplea para el riego del Valle de Tula (Mezquital), Teoloyucan y Zumpango (Jiménez *et al.*, 2005).

El uso de estas aguas residuales permite la actividad agrícola durante todo el año en el distrito de riego Los Insurgentes, además de proveer a los suelos de materia orgánica y nutrimentos útiles para los cultivos (Lucho-Constantino *et al.*, 2005; Reséndiz, 2012). Sin embargo, se ha reportado que contienen metales pesados (Solis *et al.*, 2009; Lucho-Constantino *et al.*, 2005). Cuando estos metales se encuentran en concentraciones muy reducidas (niveles traza) no implican peligro para los sistemas biológicos; no obstante, cuando se incrementan son tóxicos, pues pueden producir envenenamiento, debido a su acción sobre grupos funcionales que desplazan elementos esenciales (Vílchez, 2005).

Los suelos actuales se formaron a partir del acarreo de sedimentos arcillosos salinos derivados del dragado de la laguna de Zumpango y del canal de Santo Tomas. De acuerdo con el tipo de relleno, se formaron dos clases de tierras; negras (a partir sedimentos lacustres) y tierras lama (a partir de sedimentos aluviales y lacustres) (Resendiz, 2012). Los habitantes han llevado a cabo varias prácticas de manejo para incorporar estos suelos a la agricultura, entre las que se encuentran la adición de estiércol bovino e irrigación con aguas residuales. Actualmente, los suelos se clasifican como Antrosoles Hidragricos Téricos, con algunos horticos, lo que significa que tienen un alto contenido de materia orgánica, actividad biológica y alta retención de fosfatos (WRB, 2007). Además, la zona tiene un alto contenido de vidrio volcánico, los cuales se intemperizan y producen amorfos, que posteriormente se arrastran y se depositan en los cuerpos lacustres (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2005).

El origen de los metales pesados puede ser geológico o antrópico lo que influencia su comportamiento, biodisponibilidad (Kabata-Pendias, 2004) y su

solubilidad depende de las propiedades edáficas entre las que se encuentran: textura, pH, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, no se tiene información de cómo se comportan los metales pesados en suelos con alta actividad antrópica, y materiales amorfos característicos de la zona de estudio (Reséndiz, 2012).

Con base en este análisis teórico, las hipótesis que se plantean son: las tierras negras presentan una menor concentración de metales pesados disponibles debido a su alta reactividad por su composición mineralógica y textura arcillosa que las tierras lamas; y el riego de aguas residuales en todas las tierras no marca diferencias en la distribución de metales pesados extractables en la capa superficial de los suelos.

Los objetivos de la presente investigación fueron: 1) Cuantificar los metales pesados disponibles en el suelo y establecer su relación con los canales de riego y tipos de tierras; y 2) Relacionar las propiedades edáficas y materiales amorfos con los metales pesados.

4.3 MATERIALES Y MÉTODOS

El Municipio de Teoloyucan se ubica en la porción nororiente del estado de México y se localiza geográficamente a 19°45´ de latitud norte y 99°11´de longitud oeste, a una altitud de 2,270 msnm (INEGI; Plan Municipal de Desarrollo Urbano, 2000). En la zona circundante a la laguna se identifican planicies con asociaciones lacustres y conforman la unidad geológica secundaria del área Q(la); es decir, asociaciones lacustres conformadas en el periodo Cuaternario (Plan Municipal de Desarrollo Urbano,2000).

El clima es templado con menos de 5 % de incidencia de lluvias durante el invierno C(Wo)(w), con una temperatura promedio de 15 °C, con temperaturas mínimas en el período de invierno de 5°C, y niveles máximos de 30 °C alcanzados en verano.

El municipio de Teoloyucan cuenta con una superficie de 5,261.36 hectáreas de las cuales 3,836.22 son utilizadas por la agricultura, es decir 72.9%, y son irrigadas

con aguas residuales sin tratamiento previo. En la zona se cultiva alfalfa, pasto forrajero, avena y maíz (Plan de desarrollo municipal, 2009-2012) (Figura 4.1).



Figura 4.1. a) Canal secundario conduciendo aguas negras a las parcelas agrícolas, b) parcela de pasto forrajero (*Lilium multiflorum* Lam) en época de estiaje, c) cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) en temporada de lluvias.

Las muestras simples superficiales se colectaron (0-20 cm de profundidad) de 21 parcelas cultivadas con maíz, alfalfa, avena y pasto forrajero, distribuidas en las cinco clases de tierras: negras (TN) (15), lamas (TL) (6), y sus variantes: negras salinas (TNs) (1), lamas salinas (TLs) (1) y lama arenosa (TLa) (1); asimismo, se tomaron muestras de 5 canales secundarios (D). Se realizaron las siguientes determinaciones de acuerdo con el manual de procedimientos para análisis de suelos de Van Reeuwijk (2002), como son: textura (Método de la pipeta), color en seco y húmedo carta de colores Munsell, retención de humedad del suelo, pH (relación suelo-agua de 2:1), materia orgánica (método Walkley-Black sin aporte de calor) y CIC. Además, se llevaron a cabo extracciones selectivas de Fe, Al y Si con

ditionito citrato bicarbonato y oxalato acido de amonio. La extracción de metales se realizó con DTPA-TEA (ácido dietilentriaminopentacético-Trietalonamina) con base en la NOM-021-SEMARNAT-2002.

4.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.4.1. Metales extractables

Los metales pesados que se encontraron en el área de estudio se reportan en la Figura 4.2. los más abundantes fueron Fe, Mn, Cu y Zn, los demás se encuentran en concentraciones traza. El Fe y Mn son comunes en suelos derivados de materiales volcánicos y en zonas de depresión (Flórez *et al.*, 2006; Zapata, 2002). La mayor concentración de metales es en el suelo de las paredes de los canales secundarios de irrigación. La distribución de Zn y Cu están relacionado con los canales principales o con tipos de tierras y contenido de materia orgánica; por ejemplo, el Zn se relaciona con las tierras negras y cercano al canal de riego; mientras que el Cu tiene una distribución más amplia y se asocia con los canales y con cualquier tipo de suelos, siempre y cuando haya un alto contenido de materia orgánica. Cajuste *et al.* (1991), indican que esto se debe a que se forman complejos organometálicos (Bruemer y Hemmer, 1986; Galán y Romero, 2008), lo que facilita la solubilidad, disponibilidad y dispersión del metal. Además, estos complejos son formados entre rangos de pH de 6-7 (Bruemer y Hemmer, 1986), intervalo que ocurre en los suelos estudiados.

Dado que los suelos están siendo irrigados con aguas negras (Figura 4.2) sin tratar se esperaba encontrar un alto contenido de metales pesados extractables ya que Teoloyucan se localiza a 20 km del emisor poniente. En el Valle del mezquital a 100 km del mismo emisor, se ha reportado en los suelos concentraciones de Cd, Ni y Pb que van desde 1, 5.5, 5.7 a 2.1, 7.5, 12.8 mg kg⁻¹ respectivamente (Vázquez-Alarcón *et al.*, 2001), valores muy altos en comparación con los del área de estudio (0.03, 3.3, 4.7, correspondientemente).

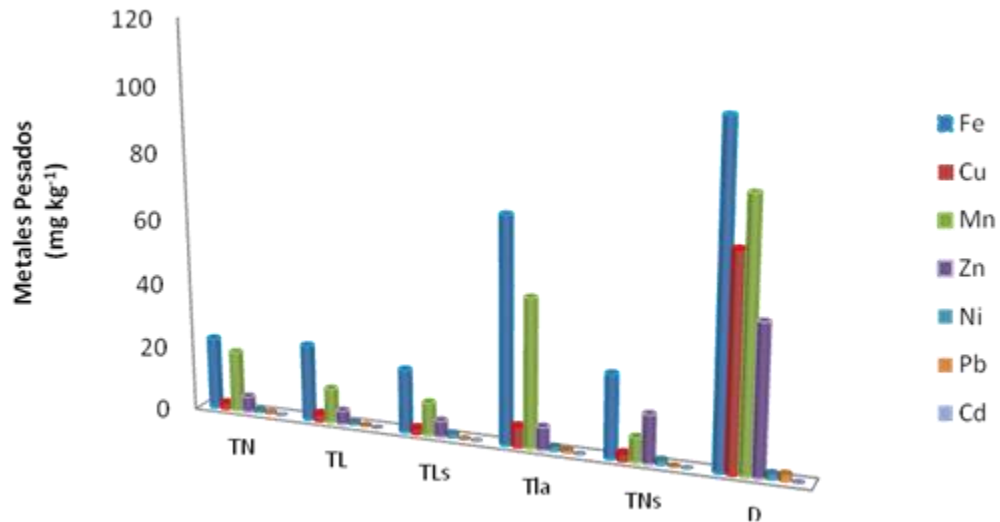


Figura 4.2. Distribución de metales pesados por clase de tierra negras (TN), lamas (TL), y sus variantes: negras salinas (TNs), lamas salinas (TLs) y lama arenosa (TLa).

4.4.2. Propiedades edáficas

Las propiedades de los suelos varían de manera importante de acuerdo con su origen. A continuación se describen las principales propiedades de estos suelos.

Tierras negras: Son suelos de textura arcillosa, a franca arcillosa, con alta capacidad de retención de humedad (hasta 46.7 %), alto contenido de MO (4.97 %) y de CIC (25-40 cmol kg⁻¹). Además, son suelos ligeramente alcalinos (7.9), mayor RAS (11.10), de colores grises y alto contenido de fosfatos (133.98 mg kg⁻¹).

El alto contenido de arcillas genera mayor almacenamiento de agua produciendo problemas de drenaje (da Silva y Kay, 1997), de ahí que se presenten los colores grises que las caracterizan debido a la reducción de Mn y de Fe (Zapata, 2002); además, su alto contenido de materia orgánica incrementa su capacidad de almacenar más agua (Bohn *et al.*, 1993). La CIC es alta como resultado de la presencia de micas hidratadas, principalmente biotitas (Grim, 1953), de arcillas silicatadas del tipo 2:1, aunque también hay 1:1, y de un alto contenido de materia orgánica. Estas propiedades mineralógicas y químicas hacen que estos suelos sean altamente reactivos. En algunas tierras negras se presentó una RAS alta (13.63),

debido al alto contenido de Na en los sedimentos lacustres arcillosos. La presencia del Na, no produce dispersión de las partículas de estos suelos debido a su alta CIC (Sole *et al.*, 2005). En las tierras negras salinas, el pH alcalino se debe a la ausencia de H⁺ y a una alta actividad de sodio intercambiable y en la solución del suelo, produciendo un pH entre 8.5-10 (Badia,1992).

Tierras lamas. Estas tierras varían en clase textural debido a que se formaron de diferentes materiales lacustres o aluviales. Pueden ser de textura franco, franco arcillosa, a franco arcillo limosa, en consecuencia varía su capacidad de retención de humedad (desde 22.5 hasta 32.9 %), CIC (32.48 cmolkg⁻¹), contenido de MO (3.68%) y composición mineralógica. Asimismo, presentan varios colores desde pardo oscuros a pardos grisáceos y la concentración de fosfatos se encuentra entre 93.6-272.6 ppm.

Suelos de los canales secundarios. Son los suelos que presentan los valores más altos en varias propiedades edáficas; son los más arcillosos (53.58 %), de mayor capacidad de retención de humedad (52 %), alto contenido de materia orgánica (6.2 %), y son los más ácidos (pH de 5.9). Además, ocurre la más alta CIC (40.2 cmol kg⁻¹) y porcentaje de saturación de bases (de 100 %).

En cuanto a la concentración de fósforo extractable con bicarbonato de sodio y con ácido cítrico, el contenido es alto en todas las clases de tierras pues es mayor a 11 mg kg⁻¹ (52 a 557 mg kg⁻¹) de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-(2002); sin embargo, el pH es superior a 7 con lo cual el fósforo presente en el suelo puede estar precipitado en forma de CaPO₄. Harrison (1987), mencionó que a medida que la textura del suelo se hace más arcillosa tiende a incrementarse el contenido de P; no obstante, es en las tierras negras salinas donde se registró la mayor concentración de este elemento. Estas tierras no son agrícolas, por lo que el alto contenido de fosfatos debe ser originado de los bio-sólidos (materia orgánica) presentes en las aguas residuales (Fuentes *et al.*, 2008) Además del aporte de

estiércol (Reséndiz *et al.*, 2012). En las tierras con un uso agrícola intensivo, la gran cantidad de fósforo en el suelo denota su origen antrópico (FAO, 2007).

4.4.3. Materiales amorfos

El porcentaje de $Al_{ox} + \frac{1}{2}$ porcentaje Fe_{ox} en los sedimentos lacustres arcillosos es alto (entre 2.5 y 3), lo que significa que hay propiedades ándicas; estas relaciones se reducen en las capas superficiales (de 1.6 hasta 2.5). Las relaciones Si/Al_{ox} y Fe_{ox}/Fe_{di} , indica la presencia de materiales amorfos de diferente composición, alofano, imogolita, ferrihidrita y sílice amorfa. De acuerdo con Abd-Elfattah y Wada (1981) los materiales amorfos tienen alta selectividad por los metales pesados, más que las esmectitas. La selectividad de los metales en los sitios de intercambio son $Pb > Cu > Zn > Co$ y Cd . Por su parte, Clark y McBride (1984) mostraron que el Cu y el Co son quimio-adsorbidos y que se unen a los grupos $Al-OH$.

4.5 Consideraciones finales

En la zona de estudio, el agua es tomada directamente de los canales que la conducen al valle del mezquital por lo que se esperaba una concentración alta de metales pesados disponibles, sin embargo, no es así puesto que su concentración es baja. Además, la baja disponibilidad de los metales en las tierras se debe al pH, las arcillas, contenido de materia orgánica, alta CIC (Sauve *et al.*, 2000) y materiales amorfos. El Zn y Cu son disponibles para las plantas, pero están restringidos en las paredes de los canales.

4.6. CONCLUSIONES

- La concentración de metales pesados, no es homogénea en las clases de tierras, y paredes de los canales secundarios los cuales almacenan más metales seguidas de las tierras negras.
- El mayor contenido de metales que se registró fue de Fe , Mn , Cu y Zn ; los últimos dos están asociados con un mayor contenido de materia orgánica en el suelo.
- La disponibilidad de los metales estudiados en las paredes de los canales secundarios se debe a su pH ligeramente ácido, condiciones bajo las cuales se encuentran menos fuertemente adsorbidos.

4.7 REFERENCIAS

- Abd-Elfattah A., y K. Wada 1981. Adsorption of lead, copper, zinc cobalt and cadmium by soils that differ in cation-exchange materials. *J.Soil Sci.* 32: 271-283.
- Badia, D. 1992. Suelos afectados por sales. *Butll. Soc.Cat.Ci n.* XIII: 609-629.
- Bohn, H. L., B McNeal .L. y G. O'Connor. A. 1993. Química del suelo. Ed. Limusa-Noriega. México. 56 p.
- Bruemmer G. W., J Gerth ., U Herms. 1986. Heavy metals species, mobility and availability in soils. *Z.Pflanzenernaehr. Bodenk.* 149:382-398.
- Cajuste L.J., R Carrillo G, .E Cota G., R Laird J. 1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air and Soil Pollution.* 57-58:763-77.
- Clark C.J. y McBride. 1984. Chemisorption of Cu (II) y Co(II) on allophane and imogolite. *Clays Clay Miner.* 32:300-310
- FAO.2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. ISSS-ISRIC-FAO- World Soil Information.
- Flórez M. M. T., R. Zapata, D. Malagón y R. Madri n. 2006. Alteración química de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos de los suelos y paleosuelos ándicos del norte de la cordillera central colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* 114, 47-66
- Fuentes B., M. de la L. Mora, S. Bolan N. y R. Naiudu 2008. Assement of phosphorus bioavailability from organic wastes in soil. *In: Chemical Bioavailability in Terrestrial Environments.* Hartemink A.E., A. McBratney B. and R. Naidu (Eds.) *Developments in Soil Science.* 32 ,363-411.
- Galán H., E. y A. Romero B. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla* 10, 48-60
- Grim R. E. 1953. *Clay Mineralogy:* McGraw-Hill, New York.
- Gutiérrez C., Ma. del C., G. Stoops, C. A. Ortiz S.y G. López A. 2005. Amorphous silica materials in soils and sediments of the ExLago de Texcoco, México, An explanation for its subsidence. *Catena* 60, 205-226.
- Harrison, A.F. 1997. Soil Organic Phosphorus- A Review of World Literature *In: Prasad R. y Power F. J. 1997. Soil fertility management for sustainable agriculture.* Ed. Crc Prees LLC. 346 p.
- INEGI; Anuario Estadístico del Estado de México.

Jiménez B., C., M. Mazari H., R. Domínguez M. y E. Cifuentes G. 2005. El Agua en el Valle de México. *In*: Jimenez B. y L. Marin (Eds.). El agua en México Vista desde la academia. México. Academia Mexicana de Ciencias. Edición digital pp 15-32.

Kabata-Pendias A. 2004. Soil-plant transfer of trace elements and environmental issue. *Geoderma*. 122: 143-149.

Lucho-Constantino C. A., F. Prieto-García., M., del Razo L. R. Rodriguez- Vazquez, H. Poggi-Varaldo. 2005. Chemical Fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with waste water in central Mexico Agriculture, Ecosystems y Environment. 108: 57-71.

Resendiz P Ma. de la L.2012. Impacto de las practicas antrópicas en los suelos del distrito de riego "Los Insurgentes" México. Tesis de Doctorado en Ciencias, Posgrado en Edafología, Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo. 109 p.

Sauve S, W. Henderson, H E Allen 2000. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environ. Sci. Technol.* 34: 1125-1131.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2002. NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Publicada en el Diario Oficial de la Federación, México D. F.

Solé-Benet, A., Y Cantón. 2005. Mejora de suelos salinos y control de la erosión en zonas áridas. Ponencias y comunicaciones del XXXII congreso nacional de parques y jardines públicos. PARJAP-2005. Almería. En línea: [http://www.eeza.csic.es/eeza/documentos/Sole%20y%20Canton\(PARJAP-2005\).pdf](http://www.eeza.csic.es/eeza/documentos/Sole%20y%20Canton(PARJAP-2005).pdf)

Solis C., K. Isaac-Olive, A. Mireles y M. Vidal-Hernández. 2009. Determination of the trace metals in cow's milk from waste water irrigated areas in central Mexico by chemical treatment coupled to PIXE. *Microchemical Journal*. 91:9-12.

Van Reeuwijk L.P (ed). 2002. Procedures for soil analysis. Technical Paper. 6ª Ed. ISRIC. Wageningen. 115 p.

Vázquez-Alarcón A., L. Justin-Cajuste, C. Siebe-Grabach., G. Alcántar-González, Ma. de L. de la Isla de B. 2001. Cadmio, Níquel y Plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35, 267-274.

Vilchez R. 2005. Eliminacion de metales pesados en aguas mediante sistemas de lechos sumergidos. Estudio microbiológico en las películas. Tesis doctoral. Universidad de Granada, Granada, España.

Zapata H., R. D., 2002. Química de los procesos pedogenéticos del suelo. UNAL Medellín. 280 pp

CAPITULO V. INTERACCIÓN ENTRE MINERALES AMORFOS, PROPIEDADES EDAFICAS Y METALES PESADOS EN ANTROSOLES IRRIGADOS CON AGUAS RESIDUALES

5.1 RESUMEN

Las interacciones entre minerales amorfos silíceos, propiedades edáficas y metales pesados en Antrosoles irrigados con aguas residuales han sido poco estudiadas debido a que existen pocas áreas que reúnan esas condiciones. Los procesos involucrados entre estas interacciones son analizados y discutidos en la presente investigación. El estudio se llevó a cabo en el Distrito de Riego Los Insurgentes en Teoloyucan, Estado de México, ubicado en el Eje Neo-volcánico a 20 km de la Ciudad de México. Dicha ciudad genera una gran cantidad de aguas residuales que se emplean sin tratamiento para uso agrícola. El muestreo realizado fue estratificado en 450 ha (22 muestras/cada 20 ha) en diferentes tipos de cultivos, además de cinco canales de riego. En cada muestra se realizaron análisis físicos, químicos y mineralógicos, además de extracciones de metales pesados (totales y disponibles). Los resultados mostraron que la mayoría de los Antrosoles irrigados con aguas residuales en diferentes tipos de cultivos presentan contenidos bajos de metales pesados; sin embargo, hay relaciones entre ellos y las propiedades analizadas que incrementan o disminuyen su disponibilidad. Relaciones directas se encontraron entre el Pb con óxidos Fe y Mn, Cu y Zn con materia orgánica y relaciones inversas entre minerales amorfos-Pb, materia orgánica-Cu y arcillas-Ni. El alto contenido de fósforo soluble y las condiciones alcalinas están formando minerales fosfatados que presentan Cu y Pb. Los suelos tienen alta reactividad por la presencia de minerales amorfos (ópalo y ferrihidrita), alto contenido de materia orgánica, tamaño de partícula, formación de minerales (zeolitas y fosfatos) y condiciones óxido-reducción.

Palabras clave: ópalo, ferrihidrita, materia orgánica, cristobalita, fosfatos.

5.2 ABSTRACT

Interactions between amorphous siliceous materials, soil properties and heavy metals in Anthrosols sewage- irrigated have been little studied because there are few areas that meet these conditions. The processes involved between these interactions are analyzed and discussed in this research. The study was conducted at the Irrigation District in Teoloyucan Insurgentes, State of Mexico, located in the Transmexican Volcanic Belt from 20 km of Mexico City. This city generates a large amount of wastewater which are used for agricultural use untreated. Stratified sampling was conducted in 450 ha (22 samples / each 20 ha) in different types of crops, and five drains. Each sample was performed in physical, chemical and mineralogical were conducted, and extraction of heavy metals (total and available). The results showed that most Anthrosols wastewater irrigated with different types of crops have low content of heavy metals, but no relationship between them and analyzed properties that increase or decrease its availability. Direct relationships were found between Pb with Fe and Mn oxides, and Cu and Zn with organic matter and inverse relationships between amorphous-Pb minerals, organic matter and clay-Cu -Ni. The high content of soluble phosphorus and alkaline conditions are forming phosphate minerals containing Cu and Pb. Soils have high reactivity by the presence of amorphous minerals (opal and ferrihydrite), organic matter content, particle size, formation of minerals (zeolites and phosphates) and redox conditions.

5.3 INTRODUCCIÓN

Los suelos del Distrito de Riego Los Insurgentes, Estado de México han sido clasificados como Terric Hydrargic Antrosoles debido a que la actividad humana ha intervenido directamente en su formación a través de rellenos con materiales aluviales, lacustres y mejoradores orgánicos como estiércol de bovino (Reséndiz *et al.*, 2013). Estos suelos son irrigados con aguas residuales no tratadas provenientes de la Ciudad de México desde hace más de dos décadas (Maldonado, 2005), para mantener la actividad agrícola todo el año en varios distritos de riego, además contienen materia orgánica, nitrógeno y fósforo que incrementan su fertilidad (Jiménez *et al.*, 2005). No obstante, también están aportando metales pesados como Cu, Ni, Cd, Zn y Pb (Siebe y Cifuentes 1995; Vázquez-Alarcón *et al.*, 2001; Herre *et al.*, 2004; Lucho-Constantino *et al.*, 2005), que deben tener diferente comportamiento de acuerdo con el tipo de suelos donde se utilicen. En suelos calcáreos, en el Valle del Mezquital, a 100 km de la Ciudad de México, el Cu y Pb ocurren en concentraciones tóxicas e incluso se han acumulado en tejidos vegetales de los cultivos (Cajuste *et al.*, 1991). Sin embargo, en suelos de origen volcánico los metales pesados deben tener una dinámica diferente al presentar en su fracción fina minerales amorfos que son mucho más reactivos y por lo tanto disminuir su disponibilidad para las plantas.

Los suelos de la zona de estudio se ubican en el Eje Neo-volcánico Transversal y se formaron por la meteorización de cenizas volcánicas (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2005) en cuya mineralogía, además de silicatos, domina el vidrio volcánico (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2005). Este mineral tiene una estructura pobremente ordenada, con resistencia muy baja al intemperismo (Tazaki *et al.*, 1992) y forman minerales amorfos (Shoji *et al.*, 1993).

Los amorfos en las zonas volcánicas más frecuentes son alofano e imogolita (Wada, 1986), aunque la sílice opalina se ha reportado como dominante en los suelos lacustres de la Cuenca de México (Gutiérrez *et al.*, 2005; Gutiérrez *et al.*, 2010). Estos minerales amorfos pobremente ordenados poseen numerosas unidades moleculares, gran superficie específica y alta micro-porosidad (Wells *et al.*, 1988) que interactúan con cationes, aniones y agua, debido a sus grupos funcionales

superficiales (Iler, 1979). Cuando estos grupos están cargados pueden afectar la retención de la materia orgánica, la fertilidad del suelo, la movilidad de los metales y los compuestos orgánicos (Ulery, 2006). Holochella *et al.* (2005), Abd-Elfattah A., y Wada (1981) reportaron que los minerales amorfos tienen alta selectividad de adsorción por metales pesados principalmente por Pb; no obstante, la mayoría de esas investigaciones han sido realizadas en laboratorio debido a que existen pocos ambientes que presenten amorfos silíceos (Drees *et al.*, 1989).

Los objetivos de la presente investigación fueron 1) Evaluar la interacción entre minerales amorfos, propiedades edáficas y metales pesados, 2) Establecer la disponibilidad de los metales pesados en diferentes cultivos en Antrosoles irrigados con aguas residuales.

5.4 MATERIALES Y MÉTODOS

5.4.1. Localización del área del estudio

El distrito de riego Los Insurgentes se ubica en el municipio de Teoloyucan en el nororiente del Estado de México (Figura 5.1) con una altitud de 2 300 m (Plan Municipal de Desarrollo Urbano, 1989). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, con una precipitación de 600 – 800 mm distribuidas entre mayo y octubre.

Teoloyucan cuenta con una superficie de 5,261.36 hectáreas, de las cuales 72.9 % de la superficie son utilizadas para la agricultura e irrigadas durante la temporada de estiaje con aguas residuales para mantener la actividad agrícola durante todo el año. En la zona se cultiva alfalfa (*Medicago sativa*), pasto forrajero (*Lilium multiflorum*), avena (*Avena sativa*) y maíz (*Zea mays*) (Plan de Desarrollo Municipal, 2009-2012).

Los suelos originales se formaron a partir de depósitos lacustres durante el Periodo Cuaternario (Pablo-Galán *et al.*, 2000) y alterados en los años 70s. Actualmente, se clasifican como Terric Hydrargic Antrosoles debido a que se formaron por rellenos a partir de minerales que fueron dragados de la laguna de Zumpango (sedimentos lacustres) o del canal de Santo Tomas (sedimentos

aluviales) y fueron mejorados con estiércol de bovino. Algunos de ellos se designan como Hórticos por presentar alta actividad biológica.

5.4.2. Trabajo de campo

La colecta de muestras se basó en el levantamiento de suelos escala 1:9000 realizado por Reséndiz *et al.* (2013) en donde se excavaron 15 perfiles, nueve en tierras negras (TN) y seis en tierras lama (TL), además de barrenaciones cada 100 m en toda el área de estudio para evaluar la profundidad del relleno. Las tierras negras y tierras lamas, cubren una superficie de 450 ha, con 74.4 y 25.6 % respectivamente. Posteriormente, este mapa se traspuso a una imagen de Google Earth de la misma zona, para establecer la ubicación de los 22 puntos, por medio un muestreo estratificado aleatorio (16 en TN y 6 en TL, es decir, una muestra por cada 20 hectáreas). Con base en los cultivos en las TN se colectaron 5 en parcelas con alfalfa, 4 en pasto forrajero, 5 en maíz, 1 en avena, y 1 en planta ruderal) y en las TL una en alfalfa, 2 en pasto forrajero, 3 con cultivo de maíz. En todas las muestras se colectaron 2 kg de suelo en el centro de cada parcela de a 0-20 cm de espesor. También se tomaron suelos de cinco taludes canales secundarios de riego de 0-20 cm de profundidad.

5.4.3. Análisis de laboratorio

Las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente a la sombra; posteriormente, se molieron y tamizaron con un tamiz de malla 2 mm para separar la fracción fina del suelo. Los análisis físicos y químicos realizados fueron: color en seco y húmedo con la carta de colores Munsell, textura (método de la pipeta), densidad aparente (método de la parafina), humedad del suelo por gravimetría, pH (relación suelo-agua 2:1), materia orgánica (Walkley-Black sin aporte de calor), conductividad eléctrica (en el extracto de saturación con un conductímetro), capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (método de NH_4OAc 1M). El fósforo soluble por NaH_2CO_3 0.5 M (método Olsen) y en ácido cítrico 1% (aprovechable), que se cuantificó para definir la presencia de un horizonte Hortic o Antric, respectivamente. Extracciones selectivas de Fe, Al y Si con oxalato ácido de amonio (Blakemore *et al.*, 1987) se hicieron para determinar el tipo de material

amorfo a través de relaciones molares según Wada (1989). La ferrihidrita se cuantificó usando el porcentaje de Fe_2O_{3ox} y multiplicado por el factor 1.7 (Parfitt *et al.*, 1980). Todos los procedimientos de basaron en el Manual de Van Reeuwijk (2002). Los metales pesados extractables (Fe, Ni, Zn, Cu, Pb y Cd) fueron extraídos con DTPA-TEA- $CaCl_2$ (Lindsay y Norvell, 1978) y para los metales pesados totales se utilizó 0.5 g de suelo que se sometieron a digestión con $HNO_3/HClO_4$ en proporción 2:1, ambos se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica.

La fracción arcillosa en muestras orientadas fue estudiada por difracción de rayos X, después de diferentes tratamientos (Van Reeuwijk, 2002). Las reflexiones de los minerales se identificaron con las fichas de la base de datos ICDD (2002).

5.4.4. Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las distintas variables edáficas evaluadas se analizaron con el programa de cómputo SAS 9; a través los análisis de correlación y regresión entre las diferentes variables.

5.5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.5.1. Propiedades edáficas

En este trabajo se encontró que las propiedades edáficas no presenten comportamientos regulares en el horizonte superficial aunque correspondan a la misma clase de tierra. Reséndiz *et al.* (2013) indican que esta irregularidad se debe a que los suelos son originados a partir de rellenos con distinto manejo e intensidad en las aplicaciones de mejoradores orgánicos e inorgánicos. En el Cuadro 5.1 se muestra los intervalos de variación de las propiedades físicas y químicas de los tipos de tierras y de cultivos.

Todos los suelos del área de estudio mostraron colores reductimórficos de pardos a grises debido al mal drenaje, alto contenido de arcillas (IUSS Grupo de Trabajo, 2007) e irrigación con aguas residuales por inundación (Reséndiz *et al.*, 2013). Además, hay condiciones reductoras expresadas por la reacción alfa-alfa dipiridil que determinan las formas químicas de Mn y Fe (IUSS Grupo de Trabajo, 2007). En los canales de riego se observan colores negros no solo heredados por la gran cantidad

de materia orgánica que existe en los mismos (Aguilera, 1989), sino por la presencia de sulfuros de hierro coloidales (IUSS Grupo de Trabajo, 2007), que emite un olor característico a pudrición.

Los suelos varían de pobres a muy ricos en materia orgánica, como resultado del manejo antrópico (Reséndiz *et al.*, 2013) y a la baja tasa de mineralización (Yáñez, 1989) por las condiciones de reducción (Adriano, 2001). La alta capacidad de intercambio catiónico (hasta 70 cmol kg⁻¹) es resultado del alto contenido de arcillas (72%) y materia orgánica (Brady y Weil, 2008), además de la presencia de minerales amorfos (Ulery, 2006). Los suelos son de ligeramente ácidos a ligeramente alcalinos y la mayoría no salinos de acuerdo con la clasificación de Richards (1954).

En el suelo se encontraron valores hasta de 557 mg kg⁻¹ de fósforo soluble con NaHCO₃ 0.5M o hasta 1.813 g kg⁻¹ con ácido cítrico. Estos altos contenidos de fósforo soluble son requisitos para horizontes hórticos o ántricos, respectivamente y son el resultado de una alta actividad antrópica (IUSS Grupo de Trabajo, 2007), debido principalmente a la gran cantidad de materia orgánica en forma de estiércol que se ha estado aplicando (Reséndiz *et al.*, 2013) y a los bio-sólidos incorporados por medio de las aguas residuales (Pierzynski *et al.*, 1994; Fuentes *et al.*, 2008). El Mg²⁺ y Ca²⁺ dominan en el complejo de intercambio.

5.5.2. Mineralogía

Todos los suelos estudiados presentan en la fracción arcillosa minerales de rango corto, ópalo cuando la banda ancha se centra alrededor de 4.1nm según Jones y Segnit (1971) o ferrihidrita cuando se centra en 1.51nm de acuerdo con Brigham *et al.* (2002), además de cristobalita (4.01nm).

Los otros minerales como plagioclasas, cuarzo, zeolitas (faujasita y analicime), tridimita, esmectitas, vermiculitas y kaolinitas varían en ocurrencia entre tipos de tierras (Cuadro 5.2).

Wada (1989) indica que los minerales amorfos se forman en zonas volcánicas como resultado de la alteración del vidrio volcánico y pueden ser arrastrados hacia las partes bajas en donde se precipita (Gutiérrez-Castorena *et al.* 2005). El ópalo tipo A se polimeriza a cristobalita (Williams y Crerar, 1985; Lynne y Campell, 2004), incluso a tridimita (Drees *et al.*, 1989), por la presencia de iones metálicos. En

cuencas cerradas, alto contenido de cationes, amorfos silíceos y pH alcalinos se forman zeolitas (Ming y Mumpton, 1989), características que ocurren en el área de estudio.

Los fosfatos posiblemente se están precipitando para formar diferentes especies minerales (rockbridgeita y vivianita), por las condiciones alcalinas y drenaje deficiente (Prasad y Power, 1997). Además, las fluctuaciones de manto freático y riego están generando condiciones de óxido reducción y formación de óxidos de Fe (goethita) y de Mn (brucita) tal como ha sido mencionado por Schwertmann *et al.* (1989).

5.5.3. Disolución selectiva

Las relaciones molares ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$) de los suelos estudiados indican la presencia de minerales amorfos donde domina el ópalo A (superior a 4) y en menor ocurrencia imogolita (1:1) y alofano (2:1) según Wada (1989); estos dos últimos están relacionados directamente con los suelos ubicados cerca de los canales de irrigación. También se encontró ferrihidrita ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 1.7$) cuyos valores oscilaron entre 3-5. Los suelos presentan propiedades ándicas (% Al + $\frac{1}{2}$ % Fe superior a 0.4) de acuerdo con la IUSS Grupo de trabajo (2007) (Cuadro 5.3). Estos materiales amorfos son de alta reactividad que se incrementa aún más con altos contenido de materia orgánica, humedad y alcalinidad que propician la disolución de la sílice (Drees *et al.*, 1989). Con base en los calificadores primarios y secundarios reportados en Antrosoles (IUSS Grupo de Trabajo, 2007), no se han reportado propiedades ándicas en este tipo de suelos.

5.5.4. Metales Pesados

Los metales disponibles más abundantes son el Fe con 22.8 a 102 mg kg⁻¹ (43%) y Mn de 18 a 181 mg kg⁻¹ (35%), elementos muy comunes en suelos derivados de minerales volcánicos (Nanzyo, 2004; Flórez *et al.*, 2006) y en zonas de depresión; mientras que, Cu, Zn, Ni, Pb y Cd se registraron en menores concentraciones como se puede observar en la Figura 5.2.

En el Cuadro 5.4 se reportan los contenidos de metales disponibles y totales de los suelos estudiados. En general, estos metales se presentan en bajas concentraciones sólo en algunas parcelas en tierras negras y con el cultivo de alfalfa se encontraron concentraciones de Cu y Zn >2.5 y >8 mg kg⁻¹, respectivamente, que pueden ser fitotóxicos (Ankerman y Large, 1978). Siebe (1994) reportó que en suelos regados con aguas residuales en el Valle del Mezquital, la alfalfa absorbe Zn. En cuanto a los metales pesados totales, de nuevo son Fe y Mn los de mayor concentración; mientras que el Zn, Cu, Ni, Cd y Pb ocurren en concentraciones bajas. La concentración de este segundo grupo no coincide con lo publicado por otros autores (Cajuste *et al.*, 1991; Vázquez-Alarcón *et al.*, 2002; Lucho-Constantino *et al.*, 2005; Siebe y Cifuentes 1995; Herre *et al.*, 2004), en suelos irrigados con las mismas aguas residuales pero en el Valle del Mezquital, Hidalgo. La alta reactividad de estos suelos por su composición mineralógica, arcillosa, alta capacidad de intercambio catiónico y altos contenido de materia orgánica pueden ser una explicación de los bajos contenidos de metales

La ocurrencia de otros minerales secundario identificados en la fracción arcillosa como la cornetita (Cu₃PO₄OH₃), azurita (Cu₃(CO₃)₂(OH)₂), surita [(Pb,Cu)₂₋₃(CO₃)_{1.5-2}(OH,F)_{0.51}[(Al,Fe³⁺)₂(Si,Al)₄⁰10(OH)₂] •n(H₂O)] y luddenita (Pb₂CO₂SiO_{14.4}.H₂O), pueden ser un indicador de que los metales pesados se están precipitando, no sólo por la alta concentración de fosfatos (hasta 557 mg kg⁻¹), sino por la alta actividad biológica en producción de CO₂ presentes en horizontes hórticos (IUSS Grupo de Trabajo, 2007).

En la Figura 5.2 se muestra que los metales pesados disponibles son más abundantes en los canales de riego que en los suelos agrícolas, lo que posiblemente se puede asociar al mayor contenido de materia orgánica (hasta 11%), pH más ácido (5) y condiciones de inundación permanente que producen reducción, tal como lo indica Adriano (2001). En el caso de las tierras de cultivo no siempre están inundadas y se dan procesos óxido reducción por sus colores redoximórficos (Reséndiz *et al.*, 2013), donde los metales pueden ser quimio-adsorbidos o precipitados, de ahí que su disponibilidad disminuya.

5.5.5. Análisis de correlación y regresión

Los minerales amorfos silíceos tienen correlaciones negativas con el Pb; mientras que la ferrihidrita tiene relaciones directas con el Cd y Cu (Figura 5.3a). La sílice amorfa tiene alta afinidad por el Pb (Wang y Stumm, 1987) y se sugiere que esto ocurre a través de procesos de quimio-adsorción (Drees *et al.*, 1989); mientras la ferrihidrita al formarse cuando ocurren complejos órgano metálicos (Schwertmann y Taylor, 1989) permiten las condiciones para que el Cd y Cu se solubilicen. No obstante, son las formas cristalinas de Fe y Mn durante su cristalización que adsorben a los metales, específicamente a la goethita (Gerth y Brümmer, 1983) y baja su disponibilidad.

El carbono orgánico tiene relaciones directas con el Zn y Cu (Figura 5.3b). El Zn al formar complejos órgano-metálicos (Amrhein *et al.*, 1992) incrementa su disponibilidad (Cajuste *et al.*, 1991; Galán y Romero, 2008). No obstante, el CO también puede tener relaciones negativas y cuadráticas con el Cu cuando se forman los complejos arcilla-humus (Stevenson y Fitch, 1981).

El Pb soluble tiene relaciones positivas con el Mn y Fe disponibles (Figura 5.3c).

Los patrones de color gleycos y las condiciones reductoras sobre todo en los canales de riego favorecen su disponibilidad del Mn y Fe y liberan el Pb de los nódulos (Schwertmann y Taylor, 1989; Mc Kenzie, 1989); sin embargo, la presencia de materiales amorfos, surita y ludenita muestran que este elemento puede estar quimio-adsorbido o precipitado (Drees *et al.*, 1989).

Finalmente, el Ni tiene una relación inversa con la CIC y el porcentaje de arcillas, lo que significa que su disponibilidad está relacionada con los sitios de intercambio (hasta 70 cmoles kg⁻¹) y el tamaño de partícula (hasta 70 % de arcillas). De acuerdo Adriano (2001), estas condiciones generan la adsorción del Ni; sin embargo, también se puede solubilizar cuando el ambiente de reducción predomina ya que se encontró relacionado directamente con la presencia de Mn (Figura 5.3d).

5.6. CONCLUSIONES

Los Antrosoles irrigados con aguas residuales en diferentes tipos de cultivos no presentan problemas de contaminación por metales pesados en la mayoría de las parcelas. Es decir no ha habido acumulación de metales originada por el uso de aguas residuales.

Existen interacciones directas e indirectas entre los materiales amorfos, propiedades edáficas y metales pesados que influyen en su disponibilidad. Las relaciones directas ocurren entre el Pb con óxidos Fe y Mn, y el Cu y el Zn con materia orgánica e inversas entre minerales amorfos-Pb materia orgánica-Cu y arcillas-Ni.

Minerales con metales pesados como fosfatos, carbonatos y arcillas indican que estos elementos secundarios se están formando en el suelo.

La contaminación por Cu y Zn disponibles (>2.5 y >8 mg kg⁻¹ respectivamente) se presentaron sólo en algunas parcelas y asociada con alfalfa y en los canales de riego por donde se transporta el agua.

5.7. REFERENCIAS

Abd- Elfattah A. y K. Wada 1981. Adsorption of lead, copper, zinc cobalt and cadmium by soils that differ in cation-exchange materials. *J. Soil Sci.* 32, 271–283. doi: 10.1111/j.1365-2389.1981.tb01706.x.

Adriano D. C. 2001. Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risk of metals. 2 Ed. Springer- Verlag-New York. 867 pp.

Aguilera H. N. 1989. Tratado de edafología de México. Facultad de Ciencias UNAM, México. 222 pp.

Amrhein C. J., E Strong. y Mosher A P. 1992. Effect of deicing salts on metal and organic matter mobility in roadside soils. *Environ. Sci. Technol.* 26: 703-709.

Brady C., N. y R Weil. R. 2008 The Nature and properties of soils. 14th edition Pearson Prentice Hall. N.J. 965p.

Cajuste L., J., R. Carrillo G., E Cota G., R. Laird J. 1991. The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital. *Water, Air and Soil Pollution*. 57-58:763-77.

Drees, L., R., L. Wilding, P, E. Smeck N. A. and Senkayi, L. 1989. Silica in soils: quartz and disordered silica polymorphs. *In: Minerals in soil environments*. Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 913-974.

Flórez M. M. T., R. Zapata, D. Malagón y R. Madriñán. 2006. Alteración química de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos de los suelos y paleosuelos ándicos del norte de la cordillera central colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 114: 47-66

Fuentes B., M. de la L. Mora, S. Bolan N. y R. Naidu 2008. Assessment of phosphorus bioavailability from organic wastes in soil. *In: Chemical Bioavailability in Terrestrial Environments*. Hartemink A.E., A. McBratney B. and R. Naidu (Eds.) *Developments in Soil Science*. 32: 363-411.

Galán, H., E. y A. Romero B. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Macla* 10: 48-60

Gerth J. y G. Brümmer. 1983. Adsorption und Festlegung von Nickel, Zink und Cadmium durch Goethit (α -FeOOH). *In: Minerals in soil environments*. Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 913-974.

Gutiérrez C., Ma. del C., G. Stoops, C. A. Ortiz S. y G. López A. 2005. Amorphous silica materials in soils and sediments of the ExLago de Texcoco, México, An explanation for its subsidence. *Catena* 60: 205-226.

Gutiérrez C. Ma del C, y R. Effland. W. 2010. Pedogenic and Biogenic Siliceous Features. *In: Micromorphological features of soils and regoliths*. Stoops, G., V. Marcelino. y F. Mess (Eds.). In press. Elsevier. The Netherlands. 400 p.

Herre A., C. Siebe., M. Kaupenjohann. 2004. Effect of irrigation water quality on organic matter, Cd and Cu mobility in soils of central Mexico. *Water Science and Technology*. 50: 277-284.

Iler R., K. 1979. The chemistry of silica solubility, polymerization, colloid and surface properties, and biochemistry. J.K Wiley and Sons, New York. 866.p.

Hochella F. M., J. Moore N., C. Putnis V., A. Putnis, T. Kasama y D. Erberl D.2005. Direct observation of heavy metal-mineral association from the Clark Fork River Superfund Complex: implications for metal transport and bioavailability. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69: 1651-1663

IUSS Grupo de Trabajo WRB. 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.

Jimenez B., C., M. Mazari H., R. Domínguez M. y E.Cifuentes G. 2005. El Agua en el Valle de México. *In: Jimenez B. y L. Marin (Eds.) El agua en México Vista desde la academia.* México. Academia Mexicana de Ciencias. Edición digital pp 15-32.

Jones J., B. y R. Segnit, E. 1971. The nature of opal: I. Nomenclature and constituent phases. *Geological Society of Australia.* 18: 57– 68.

Lucho-Constantino C. A., F. Prieto-García., M., del Razo L. R. Rodriguez- Vazquez, H. Poggi-Varaldo. 2005. Chemical Fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with waste water in central Mexico *Agriculture, Ecosystems y Environment.* 108: 57-71.

Lynne Y. B. and K. Cambell A. 2004. Morphologic and mineralogic transitions from opal-a to opal-ct in Low-temperature siliceous sinter diagenesis, taupo volcanic zone, New Zealand. *Journal of sedimentary research,* 74: 561–579

Maldonado A., S. 2005. Efectos perversos de las políticas hidráulicas en México: Desagüe Residual del Valle de México y la creación de un distrito de Riego. *Nueva Antropología.* 64: 75–97.

Ming W., D., F. Mumpton A. 1989. Zeolite in soils. *In: Minerals in soil environments.* Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 1051-1087.

McKenzie R. M. 1989. Manganese Oxides and Hydroxides. *In: Minerals in soil environments.* Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 913-974.

Nanzyo M. 2004. Unique Properties of Volcanic Ash Soils. *Global Environmental Research-English Edition*. 6(2): 99-112

Pablo-Galán, L., J. de Pablo, J. L. Chávez-García, M. 2002. Clay mineralogy and diagenesis of the Recent–Pleistocene volcanogenic sedimentary sequence of the Mexican Basin. *Revista Mexicana Ciencias Geológicas* 19: 38–49.

Parfitt R., L., J. Furkert, R. y T. Hemi. 1980. The structure of some allophanes from New Zealand. *Clays and Clay Minerals*. 28. 328– 334.

Pierzynski G., M., J. Sims T., F. Vance G. 2005. *Soils and Environment Quality*. 3rd. Boca Raton, Florida. Taylor y Francis 569 p.

Prasad R., J. y F. Power 1997. *Soil fertility management for sustainable agriculture*. Lewis Publishers. Boca Raton Florida. 347 p.

Reséndiz P., Ma. de la L., Ma del C. Gutiérrez-Castorena., E. V. Gutiérrez-Castorena., L. Cajuste B., P. Sánchez G., C. A. Ortiz-Solorio. 2013. Local soil knowledge and management of Anthrosols: A case study in Teoloyucan, Mexico. *Geoderma* 193–194: 41–51.

Richards L., A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. Department of Agriculture Handbook, Vol. 60, Washington D. C., USA. 160 p.

Schwertmann U., M. y R. Taylor. 1989. Iron oxides. *In: Minerals in soil environments*. Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 379-438.

Siebe C. 1994. Acumulación y disponibilidad de metals pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 10 (1): 15-21.

Siebe C. y Cifuentes E. 1995. Environmental impact of wastewater irrigation in central México: An overview. *In: International Journal of Environmental Health Research* 5:161-173.

Shoji S., M. Nanzyo and A. Dahlgren R. 1993. *Volcanic Ash Soils: Genesis, properties and utilization*. Elsevier Science. Amsterdam. 287 p.

Stevenson F., J. and A Fitch 1981. Copper in soils and plants. *In: Adriano D. C.* 2001. *Trace elements in terrestrial environments: biogeochemistry, bioavailability and risk of metals*. 2 Ed. Springer- Verlag-New York. New York. 867 p.

Takahashi T., A. Dahlgren R. y P. van Susteren P. 1993. Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic materials in the xeric moisture regime of northern California. *Geoderma*, 59,131-150.

Ulery A., L. 2005. Amorphous Minerals. *In: Encyclopedia of Soil Science*. Second Edition Rattan Lal (Ed.) pp. 93-96.

Van Reeuwijk, L .P. (Ed.). 2002. Procedimientos para análisis de suelos. Trad. al español por M.C Gutierrez C., C., C.A. Tavarez E y C. A. Ortiz S. Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México.120 p.

Vázquez-Alarcón A., L. Justin-Cajuste, C. Siebe-Grabach., G. Alcántar-González, Ma. de L. de la Isla de B. 2001. Cadmio, Níquel y Plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia* 35, 267-274.

Yáñez J., J. 1989. Análisis de suelos y su interpretación Horticultura: Revista de industria, distribución y socioeconomía hortícola: frutas, hortalizas, flores, plantas, árboles ornamentales y viveros. 49, 75-89.

Wada K. (Ed.).1986. Ando Soils in Japan. Kyushu University Press, Fukuoka, Japan. 276 p.

Wada K. 1989. Allophane and imogolite. *In: Minerals in soil environments*. Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 1051-1087.

Wang Z. J. y W. Stumm. 1987. Heavy metals complexation by surfaces and humic acids: a brief discourse on assessment by acidimetric titration, *Netherlands J. of Agricult. Sci.* 35:231-240.

Wells N., W. Childs C. and J. Downes C. 1977. Silica springs, Tongariro National Park, New Zealand. *In: Minerals in soil environments*. Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 913-974.

Williams L., A. y A. Crear D. 1985. Silica diagénesis, II. General mechanism. *In: Minerals in soil environments*. Dixon, J.B. and W. Buol, S. (Eds.). SSSA Book Series 1. Madison, WI. pp. 913-974.

Cuadro. 5.1. Intervalos de propiedades físicas y químicas de Antrosoles, Teoloyucan, edo. de México.

Cultivo	Color (10YR)*		Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Humeda d (%)	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural				
	Seco	Húmedo										
<i>Tierras Negras</i>												
Alfalfa	4/2-6/2	3/2-4/3	1.5-1.7	25.4-61.7	4.6-19.6	34.7-39.4	32.5-60.7	Franco arcillo limoso- Arcillosa				
Pasto forrajero	5/2	4/1	1.7	42.4	5.5	22.7	71.8	Arcillosa				
Maíz	5/3	3/2- 4/2	1.7	25.2-43.9	30- 41.6	29.3	39.3-62.2	Franco arcilloso				
Avena	4/2	3/1	1.6	30.5	35.6	26.0	38.4	Franco arcilloso				
Ruderal	6/3	4/2	1.7	46.7	2.04	29.3	68.6	Arcillosa				
<i>Tierras Lamas</i>												
Maíz	4/2-5/2	3/1- 4/3	1.3-1.7	25.6-57.6	14.6-28	20.2-52	33.3-35	Franco arcilloso- Franco arcillo limoso				
Pasto forrajero	5/1-6/3	3/1-4/3	1.6-1.8	33	17.6-19.3	35.4-47.4	34.95-45.3	Franco arcillo limoso- Arcillosa				
Alfalfa	5/4	4/3	1.6	23.8	38.3	28.1	33.6	Franco arcilloso				
<i>Canales de riego</i>												
	3/2-5/2	2/1-3/2	1.5-1.6	37.3-53	9.4-38.6		8.2-41	36.6	Arcillo limoso- Arcillosa			
	pH (2:1)	MO %	CIC (cmol kg ⁻¹)	Bases intercambiables (Cmol kg ⁻¹)				PSB	P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹)		CE dS m ⁻¹	RAS meq L ⁻¹
				Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺		Olsen	Ácido cítrico		
<i>Tierras Negras</i>												
Alfalfa	7-8	1-7	27-69	0.1-6	0.6-9	16.9-25	2.1-128	100	93.6	524-1204	0.6-2	5-11
Pasto forrajero	7-8	2-4	20-35	0.3-2	0.8-2	17-8	8-131	100	52-115	147-755	1-2	6-11
Maíz	7	1- 5	17-22	1-4	0.2- 5	25-27	0.4-20	100	68-557	379- 1813	0.6- 21	4- 176
Avena	7.8	4.00	29.6	2.3	4.6	16.8	132.6	100	198.9	958.1	1.9	7.3
Ruderal	7.5	2.91	39.7	0.5	1.3	21.6	144.8	100	91.5	262.8	1.4	7.7
<i>Tierras Lamas</i>												
Maíz	6.8	2-5	22-39	0.3-2	0.7-3	27-29	13-33	100	167-388	509-1450	0.6-2	2-9
Pasto forrajero	7	2	17-28	2	1-2	23-28	2-21	100	93-157	799	0.8-0.9	4.7-5
Alfalfa	6.2	2.5	30	2	0.5	16.9	138.9	100	62	408	1	5
<i>Canales de riego</i>												
	5-7	1-11	32--44	2-4	2-5	27-20	95-152	100	73-209	364—1001	1-6	4-4.5

MO: Materia Orgánica, CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico CE: Conductividad Eléctrica PSB: Porcentaje de Saturación de Bases, RAS: Relación de Absorción de Sodio, *: Todos los suelos presentan color 10YR

Cuadro. 5.2. Análisis mineralógico de la fracción arcillosa (> 2 μ) en Antrosoles, Teoloyucan, estado de México.

Mineral	Tierras Negras										Tierras Lamas						
	Maíz					Alfalfa					Pasto Forrajero		Ruderal	Avena	Maíz		Pasto Forrajero
Minerales de rango corto	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxx	xxx	xxx
Cristobalita	xxx	xxx	-	xxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxx	xxx	xxx
Plagioclasas	xx	-	xx	-	xxx	-	-	-	-	xxxx	xx	xx	xx	xx	-	-	-
Esmec/Vermiculitas	-	xxx	-	xx	xx	xx	-	xxx	xxx	-	xx	xx	xx	xx	-	-	xx
Zeolitas	xx	-	-	-	-	-	xx	xx	xx	xx	-	xx	-	xxx	-	-	-
Cuarzo	-	xx	-	-	-	-	x	-	x	xxx	-	-	-	-	-	-	-
Kaolinita	-	-	xx	-	-	-	-	xx	-	-	-	xx	xx	-	-	-	-
Fosfatos	-	xx	-	xx	-	xxx	xxx	xx	-	-	xx	-	-	xx	-	-	-
Carbonatos	-	-	-	xxx	xxx	-	xx	-	xx	xxx	x	-	-	xxx	-	-	-
Sulfatos	-	-	-	xx	xx	xx	-	x	x	-	-	-	-	xx	-	-	-
Alofanos	xxx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
/Tridimita																	

Tamaño relativo del pico (Reflexión): XXXX: grande (100-90); XXX: medio (89-70); XX: pequeño (69-40); X: muy pequeño (39-0), -: no hay picos

Cuadro. 5.3. Intervalos de relaciones molares de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ y clasificación de amorfos en Antrosoles de Teoloyucan, estado de México.

Cultivo	pH 2:1	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Minerales amorfos	Fe ₂ O ₃ (1.7)	%Al+ ½ %Fe
<i>Tierras Negras</i>					
Alfalfa	7-8	1-9	Alofano - Opalo	2-4	0.7-2
Pasto Forrajero	7	1-6	Alofano - Opalo	2-5	0.8-1
Maíz	7-8	0.3-20	Imogolita - Opalo		
Avena	7.8	2	Alófano	2	0.9
Ruderal	7.5	1	Alófano	3	0.8
<i>Tierras Lamas</i>					
Maíz	7	3-8	Opalo	2-4	0.5-0.8
Pasto Forrajero	6-8	0.3-8	Imogolita - Opalo	2-4	0.7-0.8
Alfalfa	7	4.63	Opalo	4	0.82
<i>Canales de riego</i>					
	5-7	2-9	Opalo	2-4	0.7-1

Cuadro. 5.4. Rangos de metales totales y disponibles en Antrosoles con diferentes cultivos, Teoloyucan, estado de México.

Cultivo	Fe		Cu		Mn		Zn mgKg ⁻¹		Ni		Pb		Cd	
	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T	D	T
<i>Tierras Negras</i>														
Alfalfa	7-36	741-3123	1-5	5-11	0.3-32	84-327	3-17	28-137	1-2	12-40	0.7-2	13-40	0.1-0.6	2.8
Pasto forrajero	19-38	4908-16645	2-3	5-10	28-47	204-387	2-6	17-700	2-3	8-20	1-3	6-44	0.1-0.2	1-4
Maíz	3-39	3115-6931	1-5	3-14	4-27	251-129	2-15	56-178	2.1-4	10-19	0.2-3	16-33	0.1-0.4	0.8-32.7
Avena	28.1	3463.2	2.9	8.6	29.6	270.7	7.3	157.8	2.1	13.3	2.3	23.5	0.4	ND
Ruderal	33.8	8526.9	1.1	9.2	15.4	326.8	1.4	1.6	1.3	16.5	1.4	11.27	0.1	ND
<i>Tierras Lama</i>														
Maíz	15-22	6417- 12519	2-4	6-14	6-10	236-307	1-5	13-82	3-3.2	14-16	0.3-0.5	43.4-28	0.1	3
Pasto Forrajero	10-69	7096-7363	1-6	6-17	4-46	297-346	5-7	35-60	1-3	14-17	2.2	22-36	0.2	0.6
Alfalfa	47.0	3199.9	6.7	10.0	25.1	211.9	7.4	143.1	1.6	15.3	3.0	20.0	0.2	1.0
<i>Canales de riego</i>														
	44-131	357-11038	4-12	8-35	18-269	51-360	14-53	102-335	3-6.8	6-18	3-10	10-27	0.2-1	ND

- D:Disponible, T: total, ND: No determinado

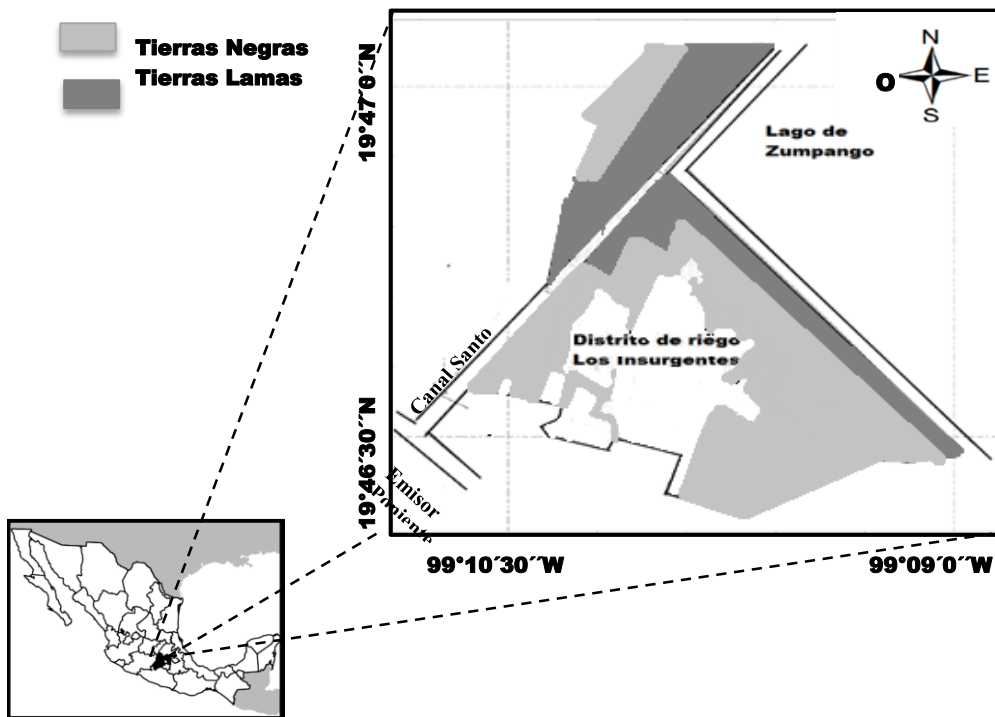


Figura 5.1. Localización de la zona de estudio.

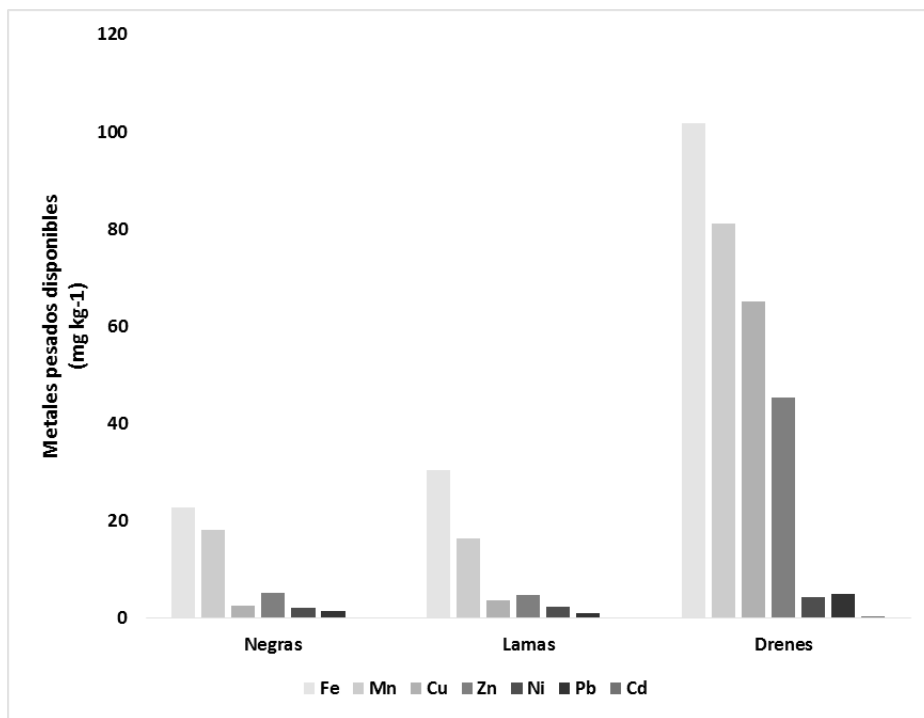
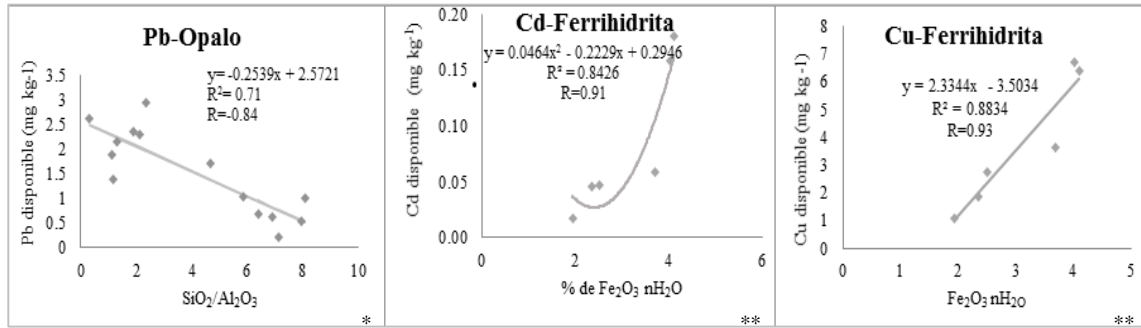
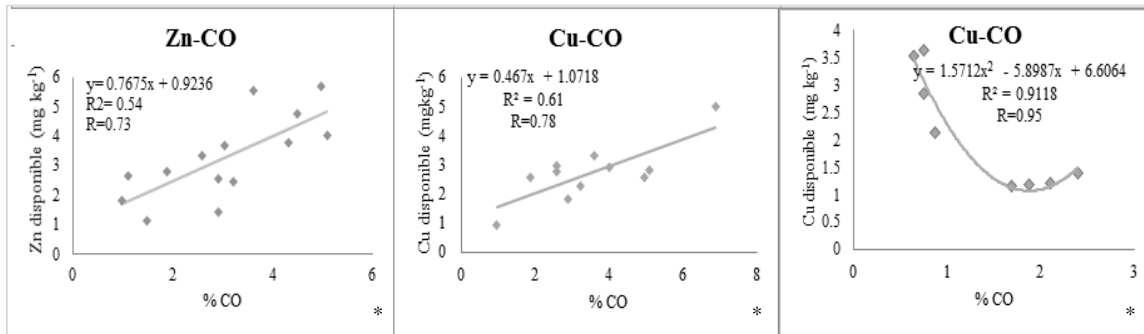


Figura 5.2. Metales pesados disponibles por clase de tierra en Teoloyucan, edo. de México.

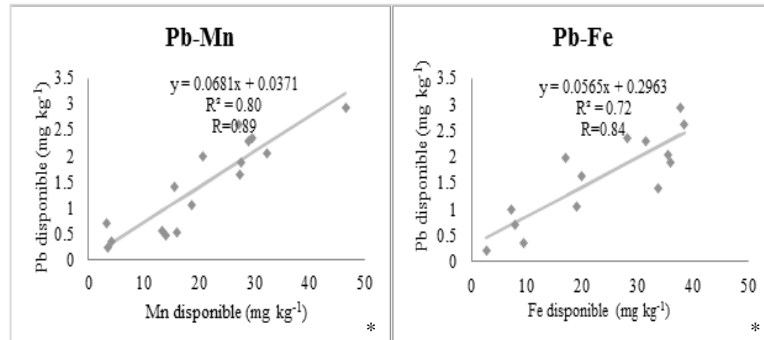
b) Minerales amorfos-Metales pesados.



c) Metales pesados-Carbono orgánico



d) Óxidos de Fe y Mn-Metales pesados



d) Propiedades edáficas-Metales pesados

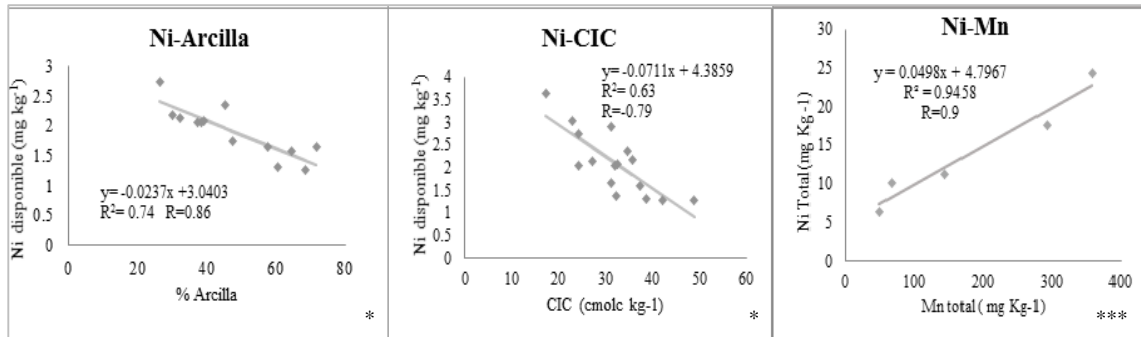


Figura 5.3. Relaciones de metales pesados en los suelos estudiados (* tierras negras, **tierras lamas y *** dren).

ANEXO

Cuadro a). Propiedades físicas y químicas de las TN del distrito de riego Los Insurgentes, Teoloyucan, estado de México.

Cultivo	Color (10YR)		Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Humedad (%)	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
	Seco	Húmedo						
Alfalfa	4/2	3/2	1.7	41.4	12.2	50.5	37.3	Franco arcillo limoso
	6/1	3/1	1.5	61.7	15.5	52.0	32.5	Franco arcillo limoso
	6/2	4/3	1.6	32.2	4.6	34.7	60.7	Arcillosa
	6/2	3/1	1.5	25.4	19.6	39.4	40.9	Arcillosa
	5/3	3/2	1.6	32.3	17.5	35.0	47.5	Arcillosa
Pasto forrajero	5/2	4/1	1.7	42.4	5.5	22.7	71.8	Arcillosa
	5/2	3/2	1.6	39.5	5.6	29.6	64.8	Arcillosa
	5/3	3/3	1.7	26.4	13.3	29.1	57.6	Arcillosa
	5/2	3/2	1.6	34.9	23.8	31.1	45.1	Arcillosa
Maíz	5/3	3/2	1.7	25.2	31.0	29.3	39.3	Franco arcilloso
	5/3	4/2	1.6	23.3	37.0	25.4	37.6	Franco arcilloso
	5/3	4/2	1.6	39.9	40.3	20.2	39.5	Franco arcilloso
	5/2	3/1	1.6	43.9	41.6	32.0	26.4	Franco
	5/3	3/2	1.5	43.9	30	16.9	62.2	Arcillosa
Avena	4/2	3/1	1.6	30.5	35.6	26.0	38.4	Franco arcilloso
Ruderal	6/3	4/2	1.7	46.7	2.04	29.3	68.6	Arcillosa

Cultivo	pH (2:1)	MO %	CIC (Cmol Kg ⁻¹)	Bases intercambiables Cmol Kg ⁻¹				PSB	Olsen	P ₂ O ₅ (mgKg ⁻¹) Acido cítrico	CE ds m ⁻¹	RAS meq L ⁻¹
				Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺					
Alfalfa	6.6	4.3	29.8	1.7	0.6	27.4	2.1	100	198.9	914.7	0.6	4.5
	7.9	6.9	27.2	0.1	9.6	19.6	128	100	283.1	1204.4	2.0	9.8
	8.2	2.6	36.2	6.2	0.2	16.9	129	100	146.2	668.4	1.5	11.1
	7.1	3.0	46.5	1.4	2.2	24.9	2.9	100	93.62	523.5	0.8	4.6
	6.8	1.3	69.2	1.7	1.9	27.5	2.2	100	167.3	929.1	0.8	4.6
Pasto forrajero	7.2	1.9	60.0	0.3	0.8	28.3	8.4	100	114.7	248.3	1.8	8.4
	7.7	3.2	34.8	1.8	2.0	18.7	139.5	100	51.5	393.2	0.9	9.7
	7.6	2.9	28.6	2.3	0.3	21.2	130.8	100	75.7	146.9	1.4	10.8
	6.6	3.6	20.4	1.2	1.4	16.5	123.3	100	93.6	755.3	1.9	6.4
Maíz	7	1.0	26.0	1.7	1.7	24.9	1.6	100	68.3	378.7	0.6	3.7
	7.6	2.6	21.8	1.2	0.2	24.0	19.6	100	98.3	320.7	2.3	13.6
	8.2	3.8	17.3	4.3	10	24.4	10.3	100	556.7	1812.8	21.1	175.7
	7.6	2.4	21.8	2.3	2.0	26.8	0.4	100	93.6	740.8	1.0	7.2
	6.8	4.9	28.8	1.4	5.3	25.8	Nd	100	293.6	784.3	3.7	9.4
Avena	7.8	4.0	29.6	2.3	4.6	16.8	132.6	100	198.9	958.1	1.9	7.3
Ruderal	7.5	2.9	39.7	0.5	1.3	21.6	144.8	100	91.5	262.8	1.4	7.7

Cuadro b). Propiedades físicas y químicas de las TL del distrito de riego Los Insurgentes, Teoloyucan, estado de México.

Cultivo	Color (10YR)		Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Retención de Humedad (%)	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
	Seco	Húmedo						
Maíz	5/2	4/3	1.7	25.6	27.0	20.2	33.7	Franco arcilloso
	5/2	3/2	1.3	59.3	27.9	48.5	23.6	Franco
	4/2	3/1	1.6	57.6	14.6	52.0	33.4	Franco arcillo limoso
Pasto forrajero	5/1	3/1	1.6	33.4	17.7	47.4	35	Franco arcillo limoso
	6/3	4/3	1.8	32.9	19.4	35.4	45.3	Arcillosa
Alfalfa	5/4	4/3	1.6	23.8	38.3	28.1	33.6	Franco arcilloso

Cultivo	pH (2:1)	MO %	CIC (cmol Kg ⁻¹)	Bases intercambiables (Cmol Kg ⁻¹)				PSB	P ₂ O ₅ (mgKg ⁻¹) Olsen	P ₂ O ₅ (mgKg ⁻¹) ácido cítrico	CE dS m ⁻¹	RAS meq L ⁻¹
				Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺					
Maíz	6.7	1.9	22.4	0.9	0.8	0.7	1.4	200.6	167.3	509.0	0.6	1.8
	6.8	4.6	38.5	0.3	0.7	0.9	1.0	163.1	388.3	1450.6	1.4	8.7
	6.8	3.7	22.4	1.7	3.2	1.1	1.4	207.4	272.6	567.0	1.5	7.1
Pasto forrajero	7.5	2.3	28.6	2.2	1.8	0.8	0.6	119.1	93.6	465.6	0.8	4.7
	7	2.3	30.0	2.0	0.5	0.9	1.0	526.6	156.8	798.8	0.9	5.1
Alfalfa	6.2	2.5	17.0	1.5	1.3	0.7	0.8	274.4	62.0	407.6	1.0	4.8

Cuadro c). Propiedades físicas y químicas de los Canales de riego del distrito de riego Los Insurgentes, Teoloyucan, estado de México.

Sitio	Color (10YR)		Densidad aparente (Mg m ⁻³)	Retención de Humedad (%)	Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase textural
	Seco	Húmedo						
Dren	5/2	4/1	1.7	37.3	9.4	41.0	49.6	Arcillo limoso
Dren	5/2	3/2	1.6	48.6	8.8	8.2	83.0	Arcillosa
Dren	3/2	2/1	1.5	54.3	38.6	24.8	36.6	Franco arcilloso
Dren	4/1	2/1	1.5	53.0	30.3	28.9	40.8	Arcillosa
Dren	4/2	2/2	1.6	65.2	14.1	28.1	57.8	Arcillosa

Sitio	pH (2:1)	MO%	CIC (Cmol Kg ⁻¹)	Bases intercambiables (Cmol Kg ⁻¹)				PSB	P ₂ O ₅ (mgKg ⁻¹) Olsen	P ₂ O ₅ (mgKg ⁻¹) ácido cítrico	CE dS m ⁻¹	RAS meq L ⁻¹
				Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺					
Dren	6.3	1.4	34.8	2.4	2.1	25.7	95.4	100	209.4	1001.6	1.5	4.5
Dren	5.2	3.9	32.9	3.6	2.8	17.3	141.5	100	114.7	624.9	4.4	3.8
Dren	6.5	10.9	43.9	1.7	3.4	19.0	152.4	100	114.7	856.7	1.4	3.7
Dren	6.6	7.0	31.5	1.6	4.7	20.0	145.9	100	72.6	364.2	5.8	3.7
Dren	5	7.9	45.1	3.1	6.0	17.6	138.3	100	114.7	1030.5	1.3	6.8

Cuadro d). Análisis mineralógico de la fracción arenas medias (200-630 µm) en Antrosoles del distrito de riego Los Insurgentes, Teoloyucan, estado de México.

Mineral	Tierras Negras											Tierras Lamas			
	Maíz		Alfalfa			Pasto Forrajero			Ruderal	Avena	Maíz		Pasto Forrajero		
Minerales de rango corto	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxx	xxx	xxx
Cristobalita	xxx	xxx	-	xxx	xxx	xx	xxx	xxx	xxx	xxx	xxxx	xxxx	xxx	xxx	xxx
Plagioclasas	xx	xx	-	-	-	xx	-	-	-	xx	x	-	-	-	-
Esmec/Vermiculitas	-	xx	x	xx	xx	-	xx	-	xxx	xx	x	xx	-	-	xxx
Zeolitas	x	xx	-	-	xx	-	-	-	xxx	-	x	-	-	-	-
Cuarzo	-	-	-	x	-	-	xxx	-	xx	-	-	xxx	-	xx	-
Fosfatos	-	-	xxxx	-	x	xx	xxxx	xxx	-	-	x	xx	-	xxx	-
Carbonatos	-	xx	-	xx	x	x	-	x	x	x	-	xx	-	xx	-
Sulfatos	-	x	-	-	-	x	-	-	x	x	x	-	-	-	-
Tridimita	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	xxx	xx	xx	-	-

Tamaño relativo del pico (Reflexión): XXXX: grande (100-90); XXX: medio (89-70); XX: pequeño (69-40); X: muy pequeño (39-0) - : no hay picos

Cuadro e). Análisis mineralógico de la fracción arcillosa (> 2 µ) en los suelos estudiados Antrosoles del distrito de riego Los Insurgentes, Teoloyucan, estado de México.

Mineral	Tierras Negras											Tierras Lamas			
	Maíz		Alfalfa			Pasto Forrajero			Ruderal	Avena	Maíz		Pasto Forrajero		
Minerales de rango corto	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxx	xxx	xxx
Cristobalita	xxx	xxx	-	xxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxx	xxx	xxx
Plagioclasas	xx	-	xx	-	xxx	-	-	-	-	xxxx	xx	xx	xx	-	-
Esmec/Vermiculitas	-	xxx	-	xx	xx	xx	-	xxx	xxx	-	xx	xx	-	-	xx
Zeolitas	xx	-	-	-	-	-	xx	xx	xx	xx	-	xx	-	xxx	-
Cuarzo	-	xx	-	-	-	-	x	-	x	xxx	-	-	-	-	-
Kaolinita	-	-	xx	-	-	-	-	xx	-	-	-	xx	xx	-	-
Fosfatos	-	xx	-	xx	-	xxx	xxx	xx	-	-	xx	-	-	xx	-
Carbonatos	-	-	-	xxx	xxx	-	xx	-	xx	xxx	x	-	-	xxx	-
Sulfatos	-	-	-	xx	xx	xx	-	x	x	-	-	-	xx	-	-
Alofanos/Tridimita	xxx	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tamaño relativo del pico (Reflexión): XXXX: grande (100-90); XXX: medio (89-70); XX: pequeño (69-40); X: muy pequeño (39-0), -: no hay picos

Cuadro f). Relaciones molares de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ y clasificación de amorfos en Antrosoles, Teoloyucan, estado de México.

Cultivo	pH 2:1	SiO ₂ Ox/ Al ₂ O ₃ Ox	Minerales amorfos	Fe ₂ O ₃ Ox (1.7)	%Al+ ½ %Fe	Cultivo	pH 2:1	SiO ₂ Ox/ Al ₂ O ₃ Ox	Minerales amorfos	Fe ₂ O ₃ Ox (1.7)	%Al+ ½ %Fe
<i>Tierras Negras</i>						<i>Tierras Lamas</i>					
Alfalfa	6.6	8.07	Ópalo	2.35	0.77	Maíz	6.7	7.67	Ópalo	7.67	0.79
	7.9	7.9	Ópalo	2.11	1.84		6.8	5.95	Ópalo	5.95	0.49
	8.2	1.30	Alófano	3.89	0.69		6.8	3.27	Ópalo	3.27	0.49
	7.1	9.14	Ópalo	1.75	1.12	Pasto Forrajero	7.5	8.01	Ópalo	8.01	0.77
	6.8	8.18	Ópalo	2.49	0.87		6.2	0.29	Imogolita	0.29	0.82
Pasto Forrajero	7.2	5.83	Ópalo	1.57	1.19	Alfalfa	7	4.63	Ópalo	4.63	0.82
	7.6	2.10	Arcillas	5.24	1.27	<i>Canales de riego</i>					
Maíz	7.6	1.13	Alófano	5.02	0.65	6.3	9.08	Ópalo	9.08	0.80	
	6.6	2.36	Ópalo	2.47	0.83	5.2	4.20	Ópalo	4.20	0.71	
	7	19.58	Ópalo	1.72	0.85	6.5	5.59	Ópalo	5.59	0.68	
	7.6	0.30	Imogolita	4.60	0.74	6.6	2.18	Alófano	2.18	1.12	
	8.2	6.89	Ópalo	2.27	0.76	5	1.64	Ópalo	1.64	1.24	
Avena	7.6	7.14	Ópalo	0.95	0.73						
	6.8	7.95	Ópalo	2.00	0.84						
	7.8	1.88	Alófano	2.42	0.85						
Ruderal	7.5	1.16	Alófano	3.07	0.75						

Cuadro g). Metales totales y solubles en los suelos estudiados, Teoloyucan estado de México

Cultivo	Fe		Cu		Mn		Zn			Ni		Pb		Cd	
	mgKg ⁻¹														
	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	
Tierras Negras															
Alfalfa	7.3	7408.6	1.2	8.1	0.3	232.8	3.8	54.6	1.4	14.6	1.0	40.4	0.0	2.8	
	8.0	6782.1	5.0	11.3	3.4	294.5	16.6	137.4	2.1	19.2	0.7	31.6	0.1	3.5	
	14.7	3532.0	2.7	7.6	10.2	326.7	3.3	85.4	1.3	13.7	2.2	25.7	0.6	2.0	
	20.0	3755.0	1.3	5.1	27.4	311.4	3.7	28.3	1.3	40.5	1.6	40.5	0.1	3.2	
	35.5	3123.7	3.6	8.4	32.3	84.4	4.7	137.4	1.8	12.1	2.0	13.0	0.1	1.1	
Pasto forrajero	19.0	10655.8	2.6	7.3	18.7	318.9	2.8	104.1	1.6	19.8	1.0	43.8	0.1	3.9	
	31.5	4908.0	2.3	5.1	28.9	203.7	2.4	16.7	1.6	7.9	2.3	6.3	0.1	3.9	
	35.9	9518.8	1.8	9.5	27.6	387.4	2.6	271.6	1.7	20.8	1.9	16.5	0.1	0.9	
	37.7	16644.6	3.3	9.8	46.5	342.4	5.5	700.8	3.0	16.1	2.9	33.0	0.2	-	
Maiz	17.1	5326.3	0.9	3.4	20.7	223.4	1.8	83.6	2.1	18.7	2.0	16.2	0.1	1.1	
	38.4	6861.5	3.0	6.7	27.2	235.9	8.1	143.9	2.1	13.2	2.6	22.1	0.1	0.8	
	25.6	3115.3	4.6	10.4	7.5	129.2	14.9	56.4	3.6	9.9	0.6	31.0	0.1	3.4	
	2.7	3900.0	1.4	5.3	3.6	181.1	8.0	177.8	2.7	15.0	0.2	32.3	0.0	3.4	
	19.5	6931.0	2.5	13.5	13.3	250.9	5.7	121.0	2.9	15.3	0.5	32.6	0.4	32.7	
Avena	28.1	3463.2	2.9	8.6	29.6	270.7	7.3	157.8	2.1	13.3	2.3	23.5	0.4	-	
Ruderal	33.8	8526.9	1.1	9.2	15.4	326.8	1.4	1.6	1.3	16.5	1.4	11.27	0.1	-	
Tierras Lama															
Maiz	21.5	12518.9	1.9	5.9	6.3	307.1	1.4	12.6	2.7	16.2	0.3	28.2	0.0	2.9	
	19.5	10331.5	3.6	13.8	10.1	236.0	5.0	82.3	3.2	15.0	0.5	43.4	0.1	2.9	
	15.0	6416.5	2.8	6.4	6.9	294.5	2.8	14.3	2.7	13.7	0.3	38.0	0.0	2.6	
Pasto forrajero	10.2	7096.0	1.1	6.1	4.1	297.0	4.9	35.3	1.1	13.9	0.0	35.9	0.0	3.2	
	69.2	7362.7	6.4	16.5	45.5	345.9	7.1	59.5	3.3	16.8	2.2	21.9	0.2	0.6	
Alfalfa	47.0	3199.9	6.7	10.0	25.1	211.9	7.4	143.1	1.6	15.3	3.0	20.0	0.2	1.0	
Canales de riego															
Canales de riego	97.7	11038.4	4.4	13.0	41.4	359.6	14.0	102.4	3.0	24.3	3.0	10.2	0.2	0.9	
2	113.5	10462.5	4.7	13.0	268.9	66.4	116.2	193.1	3.3	10.0	1.8	23.0	0.5	-	
3	131.1	1584.8	9.6	7.6	43.9	51.0	22.6	134.5	4.4	6.4	7.1	14.0	1.0	-	
4	123.0	356.7	12	35.0	17.9	145.2	52.9	145.9	6.8	11.3	9.5	27.3	0.4	-	
5	43.7	1308.3	5.8	14.2	33.5	292.7	21.6	335.0	4.4	17.6	3.9	27.5	0.2	-	

S: Soluble, T: total; -: No determinado.