



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

**IMPACTO DE LAS PRÁCTICAS ANTRÓPICAS EN LOS
SUELOS DEL DISTRITO DE RIEGO "LOS INSURGENTES",
MÉXICO.**

MA. DE LA LUZ RESÉNDIZ PAZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2012

La presente tesis **"Impacto de las prácticas antrópicas en los suelos del distrito de riego "Los Insurgentes", México"**, realizada por la estudiante: **Ma. de la Luz Reséndiz Paz**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
EDAFOLOGIA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA



DRA. MA. DEL CARMEN GUTIÉRREZ CASTORENA

ASESOR



DR. ARTURO AGUIRRE GÓMEZ

ASESOR



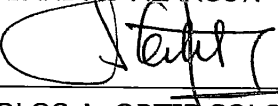
DR. G. SERGIO BENEDICTO VALDÉS

ASESOR



DR. ALEJANDRO ALARCÓN

ASESOR



DR. CARLOS A. ORTIZ SOLORIO

ASESOR



DR. ANTONIO TRINIDAD SANTOS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2012

IMPACTO DE LAS PRÁCTICAS ANTRÓPICAS EN LOS SUELOS DEL DISTRITO DE RIEGO “LOS INSURGENTES”, MÉXICO.

MA. DE LA LUZ RESÉNDIZ PAZ, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2012.

Los suelos del distrito de riego “Los Insurgentes”, Estado de México, fueron diagnosticados como salinos durante su establecimiento en 1976, además reciben las aguas residuales no tratadas de la ciudad de México. Sin embargo, el paisaje actual es predominantemente agrícola. Con la finalidad de conocer las estrategias que permitieron la rehabilitación de estos suelos y su impacto en las propiedades edáficas, clasificación y calidad agrícola, se llevó a cabo la presente investigación. Se realizó un levantamiento etnoedafológico con el que se obtuvieron: a) las estrategias que permitieron recuperar los suelos, y b) un mapa con las clases de tierras locales que se utilizó como base para identificar perfiles modales para la clasificación de los suelos y para seleccionar las parcelas en las que se evaluó la calidad agrícola. Se encontró que el uso de materiales francos, materiales calcáreos, yeso, estiércol y aguas residuales han rehabilitado el 84 % de los suelos. Estas prácticas han modificado las propiedades edáficas y, en consecuencia, la clasificación taxonómica de los suelos, que ahora se designan como Antrosoles hidrágicos térricos gléyicos. Además, el uso de materiales francos, la incorporación de mejoradores fuente de calcio y materia orgánica, así como los riegos controlados con aguas residuales que evitan inundaciones, también mejoraron la calidad agrícola edáfica. Los mejores indicadores de calidad resultaron ser: pH, sodio intercambiable, calcio soluble, capacidad de intercambio catiónico, carbono orgánico, nitrógeno total, actividad de la deshidrogenasa y estabilidad estructural. A pesar del impacto positivo de las prácticas de manejo en estos suelos, el uso de las aguas residuales no tratadas compromete su éxito. Adicionalmente, los suelos presentaron agregados arcillosos floculados en condiciones de sodicidad y saturación hídrica y agregados esferoidales superficiales con valores altos de densidad aparente. Estas características se relacionan con la presencia de arcillas alofánicas, kaolinita, haloisita, goethita y cristobalita.

Palabras clave: Antrosoles, levantamiento etnoedafológico, clasificación de suelos, aguas residuales, calidad agrícola edáfica, sodicidad, agregados, mineralogía del valle de México.

***IMPACT OF ANTHROPIC PRACTICES ON SOILS OF THE IRRIGATION DISTRICT
"LOS INSURGENTES", MEXICO.***

MA. DE LA LUZ RESÉNDIZ PAZ, Dra.
Colegio de Postgraduados, 2012.

The soils from the irrigation district "Los Insurgentes", State of Mexico, were diagnosed as saline soils during its establishment in 1976, besides receiving untreated wastewater from Mexico city. However, the current landscape is predominantly agricultural. This research was carried out with the purpose of knowing the strategies that enabled the rehabilitation of these soils and its impact on the edaphic properties, classification and agricultural soil quality. Through an etnopedological survey it was obtained: a) the strategies that allowed to recover these soils, and b) a map with the local land classes, which was used for identifying a modal soil profiles for the soil classification and to select plots to assess the agricultural quality of soils. It was found that the use of loam and calcareous materials, gypsum, manure and wastewater have rehabilitated 84% of the soils. These practices have modified the edaphic properties and, consequently, the soil classification, which are now designated as hidragic terric gleyic Anthrosols. In addition, the use of loam materials, the incorporation of high calcium amendments and organic matter, as well as the controlled irrigation with wastewater to prevent floods, also improved the agricultural soil quality. The best soil quality indicators turned out to be pH, exchangeable sodium, soluble calcium, cation exchange capacity, organic carbon, total nitrogen, dehydrogenase activity and structural stability. Despite the positive impact of these soils management practices, the use of untreated wastewater may diminish its success. Additionally, the soils under study presented flocculated clay aggregates under sodicity and water saturation conditions, and surface spheroidal aggregates with high values of bulk density. These characteristics are related to the presence of allophanic clays, kaolinite, halloysite, goethite and cristobalite.

Keywords: *Anthrosols, etnopedological survey, soil classification, untreated wastewater, agricultural soil quality, sodicity, aggregates, mineralogy of the valley of Mexico.*

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México, ya que a través de sus contribuciones a las instituciones educativas públicas hizo posible mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca para realizar mis estudios doctorales.

Al H. Ayuntamiento del Municipio de Teoloyucan, Estado de México, por todo el apoyo durante el trabajo de campo de la presente investigación.

Al Colegio de Postgraduados por aceptarme en su comunidad estudiantil para continuar con mis estudios de postgrado y por la valiosa formación académica recibida a través de la Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza, los Doctores Prometeo Sánchez García, Arturo Galvis Spinola, Roberto Núñez Escobar, José Luis Oropeza Mota, David Espinosa Victoria y Carlos Ramírez Ayala; así como el M. en C. José Donaldo Ríos Berber.

A los miembros de mi consejo particular: Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, Dr. Arturo Aguirre Gómez, Dr. G. Sergio Benedicto Valdés, Dr. Alejandro Alarcón, Dr. Carlos A. Ortiz Solorio, y Dr. Antonio Trinidad Santos, por la dedicación, tolerancia y paciencia para formarme como Doctora en Ciencias. Fue un placer trabajar con personas tan comprometidas con su labor profesional. Gracias por todo!

Al Dr. Lenom Cajuste Bontemps por su invaluable apoyo en variadas etapas de la presente disertación. En especial, gracias por las atinadas sugerencias para mejorar la calidad de los escritos, por la orientación en el análisis estadístico del artículo de calidad, así como por darme acceso a las revistas electrónicas de la biblioteca de la universidad de Arizona. Sin su ayuda no hubiera sido posible lograr la calidad de los trabajos presentada. Muchísimas gracias!

Al Dr. Edgar V. Gutiérrez Castorena por su apoyo en la cartografía de las clases locales de tierras y por su amistad.

Al Dr. Rogelio Carrillo González, por asesorarme en la colecta de las aguas residuales, así como por darme acceso al Laboratorio de Química para su análisis. Gracias por su apoyo ejemplar!

Al M. en C. Patricio Sánchez Guzmán por su colaboración en el trabajo de campo, el análisis de difracción de rayos X; así como por su disponibilidad en todos los momentos de mi estancia en la institución. Muchas gracias!

A Felipa Hernández Hernández, Laura Malpica Hernández, Luis Zamora Hernández, Candelario Ayala Vergara y Pedro Torres Flores, personal de apoyo del Área de Génesis, Morfología y Clasificación de suelos, por toda su ayuda en el procesamiento y análisis de laboratorio de las muestras. Muchas gracias!

A Carmen Bojorges por su apoyo y disponibilidad en todos los trámites que requerí llevar a cabo. Muchas gracias!

Al personal del Laboratorio de Física de Suelos: Sras. Ma. de Jesús Hernández Fragoso, Silvia Ayala Delgadillo y Ma. Bárbara Zamora Hernández; M. en C. Francisco Landeros y Sr. Oscar Ayala Sánchez por su disponibilidad y apoyo para el análisis de las muestras. Un agradecimiento especial para el Sr. Oscar Ayala Sánchez, quien además me ayudó durante el trabajo de campo para la cartografía de las clases de tierras locales. Gracias a todos por los buenos momentos.

Al personal del Laboratorio de Microbiología, por su disposición, facilidades otorgadas y amabilidad durante mi estancia. Muchas gracias!

DEDICATORIA

A mis padres Catalina y Juan†, por darme la vida, el carácter, la perseverancia y el coraje para lograr mis metas establecidas. Una mención especial para mi mamá, cuyo amor y apoyo no tiene fronteras y llegó hasta las parcelas del área de estudio. Queridos padres, les ofrezco esta obra como una ofrenda a su amor!

A mi hija Luz Amelia, que es la energía del motor que me impulsa para ser una mejor persona, una mejor madre y una mejor profesional. Eres la luz de mi vida Corazón!

A mis hermanos Teña y Jorge, por su cariño y apoyo durante toda mi vida.

A Omar, el padre de mi hija, por todo su apoyo y cariño incondicionales.

A todos los compañeros, profesores, administrativos, amigos y familiares, cuyas palabras de aliento y alegría me ayudaron a superar los momentos más difíciles de esta etapa de mi vida. Soy muy afortunada por compartir espacio y tiempo con ustedes!

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL -----	1
CAPÍTULO 1. LOCAL KNOWLEDGE AND MANAGEMENT OF ANTHROSOLS IN THE VALLEY OF MEXICO -----	3
CAPÍTULO 2. PRACTICAS DE MANEJO Y CALIDAD AGRÍCOLA EDÁFICA DEL DISTRITO DE RIEGO “LOS INSURGENTES”, MÉXICO. -----	42
CAPÍTULO 3. ESTRUCTURA EDÁFICA, ARCILLAS AMORFAS Y PLANTAS INDICADORAS DE SALINIDAD EN EL DISTRITO DE RIEGO “LOS INSURGENTES”, MÉXICO. -----	75
CONCLUSIONES GENERALES -----	108

INTRODUCCIÓN GENERAL

El distrito de Riego “Los Insurgentes” fue establecido en 1976 en las inmediaciones de la Laguna de Zumpango, Estado de México, con la finalidad de recibir el volumen excedente de aguas residuales, causado por la entrada del sistema Cutzamala para el abasto de agua potable de la ciudad de México. A través de esta obra, los suelos donde se estableció dejarían la agricultura de temporal para incorporarse a la agricultura de riego con producción continua durante todo el año. Sin embargo, el diagnóstico de los suelos reveló que no eran aptos para la agricultura a causa de la presencia de sales, por lo que el establecimiento del distrito de riego nunca se terminó, dejando inconclusas varias de las obras, incluyendo la planta de tratamiento de aguas residuales. En consecuencia, el área se transformó en un sitio receptor de aguas residuales no tratadas de la ciudad de México.

A pesar de estas condiciones, el panorama actual es predominantemente agrícola. Con la finalidad de conocer las estrategias que permitieron la rehabilitación de estos suelos y su impacto en las propiedades edáficas, clasificación y calidad agrícola, se llevó a cabo la presente investigación.

En el Capítulo 1 titulado “**Local Knowledge and Management of Anthrosols in the Valley of Mexico**”, a través de un levantamiento etnoedafológico se obtuvieron las prácticas de manejo que han permitido la recuperación de estos suelos. También se elaboró un mapa con las clases de tierra locales, el cual se empleó como base para abrir perfiles de suelos modales, cuya descripción y análisis dio a conocer el impacto de las prácticas de manejo en las propiedades edáficas y en la clasificación de los suelos.

En el Capítulo 2 titulado “**Prácticas de manejo y calidad agrícola edáfica del distrito de riego “Los Insurgentes”, México.**” se evaluó la eficiencia de las prácticas agrícolas para desalinizar los suelos a través de la valoración de la calidad agrícola actual. Para ello, se colectaron muestras de la capa arable de todos los suelos utilizando como base el mapa obtenido del levantamiento etnoedafológico. En cada muestra se evaluaron varias propiedades físicas, químicas y biológicas. También se colectó biomasa aérea fresca de los cultivos principales para estimar la productividad agrícola. Se utilizó el análisis de componentes principales para explicar la variabilidad de los datos, identificar las fuentes principales de variación y los factores

restrictivos de la función agrícola del suelo, así como para ayudar a establecer el gradiente de calidad de los suelos y para reconocer a los parámetros más sensibles a las prácticas de manejo.

Adicionalmente, en el Capítulo 3 titulado “**Estructura edáfica, arcillas amorfas y plantas halófitas del distrito de riego “Los Insurgentes”, México**”, se llevó a cabo un análisis para explicar la presencia de agregados granulares no biológicos superficiales y de agregados arcillosos floclados en el subsuelo bajo condiciones de saturación hídrica y sodicidad; los cuales exhiben densidades aparentes altas cuando se deshidratan. En este capítulo también se incluye la comparación entre los niveles de salinidad en la que se desarrollan las halófitas y los cultivos principales de la zona.

**CAPÍTULO 1. LOCAL KNOWLEDGE AND MANAGEMENT OF ANTHROSOLS IN
THE VALLEY OF MEXICO**

Local Knowledge and Management of Anthrosols in the Valley of Mexico

Ma de la Luz Reséndiz-Paz^a, Ma de Carmen Gutiérrez-Castorena^a, Edgar V. Gutiérrez Castorena^b, Carlos A. Ortiz Solorio^a, Lenom Cajuste Bontemps^a, Patricio Sánchez Guzmán^a

^a*Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco 56230. Edo. de México. México.*

^b*Universidad Autónoma Metropolitana- Xochimilco, Departamento de Producción Agrícola y Animal, Calzada del Hueso 1100. Col. Villa Quietud 04960, México. D. F.*

Abstract

The irrigation district “Los Insurgentes” was established within the region of Lake Zumpango as a means to control frequent flooding events in Mexico City during the 70’s. The efforts of this initiative however, resulted in salinizing soils that were originally saline and reclaimed by the farmers, because of the conditions of the added material. Nonetheless, the irrigation district nowadays, presents very few areas with degraded soils. In order to understand how management practices influenced the actual conditions of the land and its reclamation by farmers, an ethnopedologic (detailed soil) survey was carried out, from which a detailed (1:9000 scale) soil map was produced, with information provided by the same farmers of the area. This map shows two main land classes with several variants, which corresponded taxonomically to two Anthrosols within the WRB system and to Aquepts and Aquepts within Soil Taxonomy. In addition, anthropogenic processes were better expressed within the earlier classification system than within the later one. Other findings include the different way in which farmers use wastewater and amendments (manure, gypsum, and soil from loam textures and with relatively high CaCO₃ content) to reclaim their soils and maintain their agricultural productivity. With these findings we suggest improvements to be considered for Soil Taxonomy, and we present evidence of a multi-level local land classification system that can be used as a reference to mapping Anthrosols, and to learn about their management, within the Valley of Mexico.

Key words: Ethnopedology; wastewater; soil formation; land classes; soil classification

1. Introduction

The metropolitan area of Mexico City, which is one of the largest urban centers in the world, is home to more than 20 million inhabitants (GEM, 2009). The city requires consequently, large volumes of potable water to meet the population demands, where differential subsidence is one of the problems affecting the City because groundwater constitutes the main source of extraction (up to 69%, according to CNA, 2009). In addition, the city is geographically located in a basin without a natural exit to its drainage and suffers of high intensity rainfalls, causing historical flooding problems, especially when the runoff is mixed with sewage. In order to provide solutions to these problems, the City Government has built several drainage systems throughout its history (Perló, 2005), and proposed in 1976, the establishment of an irrigation district: "Los Insurgentes", with a 30,000 ha reception area for wastewater; taking advantage in addition, to recharge the subsoil moisture and the development of agricultural land (Maldonado, 2005; Perló, 2005; Barrera, 2007).

In the establishment of the irrigation district, provisions were made to build a wastewater treatment plant to modify the water quality, and to remove lacustrine material from the basin of the lake of Zumpango, increasing its water storage capacity. However, the treatment plant was never built (Maldonado, 2005; Perló 2005); therefore, this district stored sewage mainly, and all the dredged saline lacustrine material was placed in adjacent areas of the lake (García, 1995) burying the original soils. Since then, the farmers have influenced considerably on the soil formation of their land, through wastewater management; however, we do not know for sure, which practices they carried out to modify drastically their environment.

Currently, farmers use wastewater and amendments to produce different crops; however, we have observed that they manage the wastewater in different ways, regarding intensity and frequency; some of them flood their fields for several days, while others avoid such a practice. We do not know for sure again, if these practices are improving the quality of their soils, or all the contrary, are degrading their soils through salt accumulation; because it has been reported on one hand, that wastewater can be an important source of nutrients and organic matter (Friedel et al., 2000; Qadir et al., 2009), and on the other hand, that wastewater cause their degradation (Oster, 1994; Bahri, 1999). Besides, we propose another hypothesis, which is that wastewater

management is directly related either to their land classes as suggested by Segura et al. (2000), or to the type of crops to be produced.

The soils of the study area are classified by INEGI (1982) as Vertisols; however, many areas were subject to addition of lacustrine materials (García, 1995; Maldonado, 2005), and have been subjected to intensive soil management. Some of these soils therefore, may meet the requirements of buried soils (Soil Survey Staff, 2010); moreover, they may meet the requirements of Anthrosols (WRB, 2007). Unfortunately, there is not a soils map that represents the new soils and their distribution; therefore, it is necessary to conduct an intensive soil survey at level parcel to reclassify the soils.

The methodology proposed by Ortiz-Solorio et al. (1990) and Ortiz-Solorio and Gutiérrez-Castorena (2001) using land local knowledge (ethnopedology) for mapping different land classes, may prove to be a useful tool to determine soil units and modal soil profiles (Gutiérrez-Castorena et al., 1999; Ortiz-Solorio et al., 2005), and their subsequent taxonomic classification to soil series (Alcalá et al., 2000; Sánchez et al., 2002). Although local knowledge has also been used to evaluate management practices at both, national (Luna, 1982; Licon, 1991; Segura, 2000) and international (Krog and Paarup-Laursen, 1997; Zurayk et al., 2001; Khalkheili and Zamani, 2009) levels, there are few studies linking this kind of knowledge to soil classes and their respective management practices (Niemeijer y Mazzucato, 2003). In summary, local knowledge can be used to determine soil management with sewage, and to evaluate the impact of anthropogenic activities on edaphic properties and soil formation (Ortiz-Solorio and Gutiérrez-Castorena, 2001).

The information obtained through soil classification is essential for sustainable land use planning and land management (Gray et al., 2011), because it allow to understanding soil characteristics, to identifying soil patterns, and to predict different soil responses (Dazzi et al., 2009); in particular, as it is in this case, the influence human activities on soils in the northern region of the State of Mexico.

The objectives of this research were: 1) to determine the relationships between soil management (wastewater and amendments) and their local and taxonomic classification, and 2) to establish the influence of management practices on soil properties in the area.

2. Materials and Methods

2.1. Study area

This study was carried out in a 450 ha agricultural valley located within the irrigation district "Los Insurgentes", which was part of the original extension of the Laguna de Zumpango (or Zumpango Lake), in the municipality of Teoloyucan, State of Mexico. This area is between 19°43'11" N, 19°47'11" latitude N, and 99°43'15" W, 99°12'57" longitude W, at 2250 m of altitude (Fig. 1). In 1938, some sections of the lake were drained artificially, thus emerging saline clay sediments that produced the current soils. These lake deposits were formed during the Quaternary period, from volcanic fans produced during the Tertiary period (Pablo-Galan et al., 2002). The study area is divided by plots of varying size (from 0.5 ha to 4 ha) surrounded by irrigation channels, and "ahuejotes" (*Salix bonplandiana*), resembling "chinampas", a system of artificial islands constructed with organic-matter-rich lacustrine sediment, and were the most productive lands of Aztec empire (WRB, 2007).

Additionally, the study area has a warm sub-humid climate with summer rains (Lazcano and Avalos, 2005), with an average annual temperature ranging from 11.3 to 17.7 °C, and with a mean annual precipitation around 598.8 mm, distributed between May through October (SMN, 2010). The superficial hydrography comprises the Cuautitlán river (Emisor Poniente), the Chico river, and the Zumpango Lake, which is fed by the channel Santo Tomás (Lazcano and Avalos, 2005), where wastewater flows in it (Fig. 1).

The local vegetation includes bulrush and cattail marshes, induced grasslands and halophytic plants, according to INEGI (1982). Irrigated agriculture is the main human activity in the area, where forage such as alfalfa (*Medicago sativa*), grasses (*Lolium multiflorum*), maize (*Zea mays*), and oats (*Avena sativa*) are the main crops. These staples in addition, are destined to livestock feeding (mainly cattle), whether for dairy or meat production purposes (Lazcano and Avalos, 2005).

2.2. Fieldwork

Soil survey was carried out based on the land local knowledge of farmers, using the methodology proposed by Ortiz et al. (1990); which consisted in carrying out field trips visiting

each plot, with the direction and guidance of a few farmers. Further, we interviewed a total of twenty four people, which represented about 75% of the population of farmers. This group of interviewees ranged different age groups (from 34 to 89 years old, in 2009), and answered questions about their land, such as:

- How many distinct land classes do you distinguish in your parcel?
- How do you identify them? and,
- What are the main characteristics for each land class?

Furthermore, interviews to the twenty four farmers included questions directly related to their wastewater and amendments management practices. These questions were:

- What types of amendments do you use?
- How and when do you apply them?
- When do you use sewage?
- What is your irrigation frequency? and,
- How do you irrigate your plots?

The interviews concluded when the information became redundant.

The observation units were the plots of farmers, where it was noticed that only one land class occurs in every plot. Additionally, it was necessary to use a soil auger, boring each 100 m along selected transects, in order to determine the thickness of the new soil / incorporated material. The information obtained was further transferred to a base map (satellite image provided by Google, 2009), for the drawing of a soil-land class map of the area.

In each land class a modal soil profile was obtained and associated with a pedological pit (Fig. 2). In addition, soil profiles were described based on FAO (2006). Bulk soil samples were taken for each horizon, throughout the soil profile reaching the water table (between 57 and 113 cm of depth), and prepared for laboratory analysis. Further, soils were classified following WRB (2006) and Soil Taxonomy (SSS, 2010).

Wastewater quality was assessed collecting samples in two dates, during the final period of the dry season (May-June), because it was found that sewage quality does not change during such a period (Jiménez, 2005). In addition, we selected four representative sites: three in secondary irrigation channels, and one at the gates of the main channel of the Emisor Poniente (Fig. 1). Single samples were collected every 2.5 hours (three in total) around noon, and at the same time pH and EC were determined. Then, the sample units were mixed to form a composite sample per day and stored in PET (polyethylene terephthalate) sterilized bottles, and refrigerated (3 °C) according to Eaton et al. (1995).

2.3. Laboratory analysis

Bulk soil samples were air-dried at room temperature, grounded and sieved with a 2 mm sieve. Physical, chemical and mineralogical analyses were performed following Van Reeuwijk (2003) procedure. Basically, these analyses were: texture (pipette method), color from dry and wet samples (Munsell color chart), bulk density (clod in paraffin), organic matter (Walkley and Black) soil reaction (pH in 1:2, soil:water solution), electrical conductivity (EC) and soluble bases (saturation paste), total carbonate CaCO_3 , cation exchange capacity (CEC), percentage of exchangeable sodium and exchangeable bases by ammonium acetate method (Ca and Mg by atomic absorption spectrophotometry (AAS), Na and K by flame emission spectrophotometry), base saturation from the sum of exchangeable cations, and soluble phosphorus in citric acid.

Wastewater samples were analyzed within 24 hours after field collection. Determinations included chemical oxygen demand (COD) by the closed reflux method, total solids (oven, 105 °C), fixed solids and volatile solids (flask, 550 °C) and sodium (pNa equipment brand HANNA model HI98202). All procedures, except for Na, were obtained from Eaton et al. (1995). Both, COD and volatile solids were used as indicators of the amount of organic matter in wastewater.

3. Results

3.1. Land class survey

Two kinds of added material for agricultural land leveling were found in the study area. The first one corresponded to lacustrine sediments from dredging irrigation channels and the bottom of the Laguna de Zumpango basin, dragged during the establishment of irrigation district (after

year 1976). The second one comprised alluvial sediments scoured from the Canal Santo Tomás channel, which was an old river bed, and extracted during year 2000. These materials buried at different depths the original lacustrine sediments. According to the dragged material, farmers recognize two land classes. The first land class named "Tierra negra" (black land) is composed of lacustrine / lacustrine sediments, which presents a variant (tierra negra salina). The second land class named "Tierra Lama" (ooze land) is composed of alluvial / lacustrine sediments, with several variants: lama arcillosa, lama arenosa, and lama salina, which were generated according to the type of dredged material. The spatial distribution for the land classes is illustrated in Fig. 2, as a 1:9,000 scale map, therefore this survey constitutes a highly detailed inventory of soils and other related landscape attributes.

The tierra negra occupies the greatest surface (260 ha). These soils are fertile, despite their weary features for management, which includes cracking at the surface, high moisture retention, and poor subsurface drainage; all these causing great problems when implementing mechanical agricultural systems. The tierra negra salina variant (with nearly 19 hectares) presents salt crystals at the surface (locally called "salitre") and is less productive. The farmers have reclaimed such soils through wastewater irrigation and the incorporation of manure. Both soils, the tierra negra, and tierra negra salina, are used to establish forage crops such as forage grasses (*Lolium multiflorum*), oats (*Avena sativa*) and alfalfa (*Medicago sativa*); although the latter is also used to grow halophytes, mainly salt grass (*Distichlis spicata*), rosemary (*Suaeda nigra*), and pigweed (*Chenopodium sp.*).

Tierra lama covers an area of 98 hectares, with the following variants proportions: lama (44 ha), lama arcillosa (~ 2 ha), lama arenosa (15 ha), and lama salina (37 ha). Except for the lama salina, all variants are fertile and friable, have a high biological activity, low moisture retention, and do not present subsurface drainage problems. As a matter of fact, these soils are used to improve the manageability of other soils. In addition, these land classes are used to cultivate alfalfa, forage grass and maize. Tierra lama salina is a class with no agricultural activity, and presents the same halophytic vegetation as the tierra negra salina class. Both saline classes (negra salina and lama salina) are prone to flooding during the rainy season, because of their near location to the Zumpango Lake.

3.2. Soil properties of land classes

Tables 1 and 2 show the results of the chemical and physical analysis of land classes, respectively. Because the tierra negra was originated from lacustrine sediments, lithological discontinuities occur throughout the soil profile, with a predominance of silty-clay textural class, high bulk densities (up to $1.7 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$) and dark colors (10YR 3/3 or less). In the case of tierra lama, textural classes corresponded to what farmers confirmed during the interviews: clay (lama arcillosa) to clay loam (lama and lama salina). These soils are brown to dark in color, and also have high bulk densities (up to $1.6 \text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Organic matter (from 0.22 to 4.28 %) and soluble phosphorus (from 298 to $1332 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) contents are high in general, especially in the soil surfaces, and present both, irregular (profiles 1, 3 and 5) and regular (profiles 2 and 4) decreasing values with increasing depth. Tierra negra salina and lama salina have EC values of 19 and 14 dS m^{-1} , respectively; in contrast with the other land classes, which do not present saline features.

As regards to soil structure, the Ap horizon may present either loose material, subangular blocks, or spherical aggregates (tierra lama salina), or just spherical aggregates (tierra negra). In the subsoil horizons, all soil profiles show angular blocks or prisms separated by cracks. All aggregates are highly stable in water (they do not collapse even under saturated conditions), and present redoximorphic features (strong effervescence to H_2O_2 on ped surfaces). Other aggregates showed effervescence to HCl (profiles 1, 2 and 3).

3.3. Soil Classification (Table 3)

According to WRB, tierra negra and tierra lama salina classes are classified as Hydragric Terric Gleyic Anthrosols (Eutric, Sodic, Alcalic), because they have been subject to saturation or flooding for long time periods, and because they come from loamy and clayish materials, which were amended using manure. The tierra lama classes are designated as Hydragric Terric Horti-Fluvisols (Eutric, Sodic) because, although they present characteristics similar to the previous soils, they also present high biological activity, especially of mesofauna; and because they were originated from river sediments, as it was made evident through the decreasing contents of organic carbon with increasing depth. Finally, tierra negra salina and

tierra lama arcillosa classes that present added materials whose thickness is less than 50 cm are classified as Gleyic Solonetz (Transportic) and as Gleyic Mollic Fluvisol (Anthric), respectively.

In the case of Soil Taxonomy, the tierra negra class is classified as Mollic Endoaquepts, the tierra lama salina class as Aeric Halaquepts, and the tierra lama class as Fluventic Endoaquepts; despite the fact all these soils meet the requirements of having a plaggen epipedon. The reason for such a result is because the classification system gives a higher priority to aquic conditions than to anthropogenic processes. Likewise, tierra negra salina class is classified as Typic Endoaquepts, whereas tierra lama arcillosa class is classified as Mollic Endoaquepts. In summary, soils from all land classes, regardless of the thickness of added material, are classified either as Aquepts or Aquepts, without any expression indicating human influence in the resulting designation.

3.4. Management of land classes

A common problem the farmers faced in their plots resulting from the partial drainage of Lake Zumpango was the accumulation of salts at the soil surface, being these lands identified as tierra salina classes. The most important strategies for improving the fertility and productivity of these soils were the irrigation with wastewater, and the incorporation of soils (from tierra lama classes) and of organic (manure from cow and swine herds) and mineral (commercial gypsum and marl obtained from sediments of a white land class, known as “tierra blanca”, from the outskirts of neighboring communities) amendments. These strategies rendered successful results when applied for more than three decades, as the saline soils decreased to 15% of their initial extension, where the remaining saline soils are located at the outskirts of the Zumpango Lake (Fig. 2). Manure from dairy production of milk is the most available and better quality because the diet from these animals consists mainly of forage. In contrast, manure from meat livestock production, is less used because the diet of these animals includes ingredients with a considerable amount of salt.

The application frequency of manure is dependent of the land management: 1) high, when manure is applied throughout the year or at least during the dry season every year; 2) medium, when it is applied every 3 or 4 years; and 3) low, when it is applied every 7 or 8 years. The latter two frequencies concur with the renewal of alfalfa.

There is a significant difference between the medium and low frequencies of manure incorporation, because wastewater carries the Bermuda grass seed (*Cynodon dactylon*) a very invasive plant that reduce alfalfa coverage with every irrigation event. Some farmers prefer to use only alfalfa as the forage ingredient to feed their cattle, and therefore, renew this crop every three or four years. Contrastingly, others use in an alternate way using alfalfa with Bermuda grass as ingredient to their forage, and consequently renew alfalfa every seven or eight years. At the end of the alfalfa cycle, farmers fertilizing with manure, grow then a maize cycle, where tillage breaks the stolon of the grass, letting a free-stolon soil to re-establish alfalfa.

Forages are used to feed dairy cattle, mainly, and the milk is used in the production of milk derivates (cheese, cream, and yoghurt; Lazcano and Avalos, 2005). Farmers reported that milk was sold to a dairy corporate company; however, currently this is not so, since their milk does not meet the required quality.

3.5. Wastewater quality and management

In the area there are two strategies for the use of wastewater: flood irrigation of the plots for several days and frequent irrigation without flooding (Fig. 3). The first one is used to recover saline lands, under the principle of leaching of salts, enabling its incorporation into agriculture. This strategy has been used since the farmers had access to wastewater (approximately 35 years ago), but nowadays is less common, especially in the tierra negra class, due to its clayey nature and poor subsurface drainage which generates salt concentration on soil surface.

The frequent irrigation without flooding is used for forage production, in substitution of rainwater, and depends of the land class and the crop. In the lama land, irrigation is made every 20 days for alfalfa and corn, and every 15 days for forage grass. In contrast, in the tierra negra class, irrigation is every 30 days in alfalfa and oats, every 30 or 60 days in corn and every 15 days in forage grass. It seems that corn, alfalfa, and oats are more sensitive to excess water, compared to forage grass, which is more tolerant.

Irrigation applied by gravity uses a system of locks to allow passage of water to the plot, with a slope lesser than 2%, resulting in a homogeneous watering of the plot. When the watered proportion reaches half of the total surface of the plot, farmers use these locks to cut flow of

water and the rest of the surface is watered with the remaining overflow. In the study area there is not a drainage system to remove excess surface water; therefore, a strategy to prevent the passage of water from one field to another is through the use of back plates that interrupt the flow of water.

Wastewater in the field presents a clear yellowish color and has a strong smell of decomposed organic matter. The water analysis data is shown in Table 4, where the sodium content and the electrical conductivity is low (38 mg L^{-1} and 1.0 dS m^{-1} , respectively), and the pH is slightly alkaline (highest value below 7.7). In addition, we found that the organic matter in the irrigation water accounts for 50% of the total solids. The organic matter content is generally high (373 mg L^{-1}); therefore, its application to soils eases the reclamation of saline lands. Table 5 shows the amount of organic matter that can be incorporated into the soil through irrigation by land class and culture.

4. Discussion

4.1. Local knowledge

The use of wastewater in agricultural practices has been questioned by several researches, because of its potential to cause soil degradation (Oster, 1994; Bahri, 1999). Despite of such an outcome, the farmers of the study area risked their agricultural livelihood and decided to produce empirical knowledge, so as to manage their saline soils with wastewater and other amendments, with the lowest negative impact to their plots. In any case, these farmers had a very limited number of options to adapt to the prevailing conditions, if they were to remain working and living with their families, in this location. The use of wastewater and amendments by the farmers was carried out according to the different land classes they identified, and in turn, these practices shaped the pedological development of the current soils.

The resulting landscape formed by these management practices is the present agricultural valley, regardless of the chemical and biological problems that represent a current environmental hazard to the population in the region (Jiménez, 2001, 2005; Perló, 2005).

Contrary to what newcomers could believe, the problem of soil salinity was not unfamiliar to the farmers of the study area. These lands granted to them by former President Cárdenas in 1938,

were saline soils (Tellez Gaytan, 1985; Hurtado and Rojas, 1989; García, 1995). With the addition of freshwater and manure however, the farmers succeeded in transforming positively the productivity of these soils for agricultural use.

Unavertedly, the problem was reversed when in 1976 a new drainage plan for Mexico City was designed, since the material dredged from the basin of the Lake Zumpango and surrounding channels was dumped to the agricultural lands of Los Insurgentes Irrigation District. The resulting effect of adding these saline lacustrine sediments was the salinization of the soils (Maldonado, 2005).

Nonetheless, the farmers were able to achieve in a similar period of time, a desalinization of 85% of the total area, using amendments and untreated wastewater. The rest of the area remained saline because of the influence of water from Lake Zumpango, and because of the poor internal drainage within the basal lacustrine sediments (Fig. 2); where current edaphic processes are leading to a secondary salinization of soils (Keren, 2000).

During the processes of desalination, the farmers applied techniques that were used since pre-Hispanic times (reported in the Florentine Codex), including the addition of amendments such as *tierra blanca* (which has high CaCO_3 and MgCO_3 contents), and gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Both amendments release Ca^{2+} ions to the soil solution, favoring the substitution of Na^+ with Ca^{2+} in the soil exchange phase (Jayawardane and Chan, 1994; Levy, 2000). Calcium ions in the presence of organic matter (obtained by manure and wastewater additions to the soil), act as a bridge between polycarboxylic macromolecules (humic acids) and clays (Munner and Oades, 1989), promoting stable aggregation of soil, in particular in sodic soils (Jayawardane and Chan, 1994). Consequently, the rate of infiltration increases, enhancing soil Na^+ washing from the soil profile, with flooding irrigation and natural soil drainage (García-Orenes et al., 2005). The practice of flooding irrigation has been substituted nowadays with frequent irrigation of soils by farmers, since they realized that the earlier practice tends to resalinize soils from *tierra negra* class. The use of wastewater for soil desalination has been poorly documented at international level; nevertheless, is a common practice in the Valley of Mexico (Luna-Guido et al., 2000; Ruiz-Romero et al., 2009).

4.2. Soil properties

The irregular distribution (through the soil profile) of some physical and chemical properties such as texture, CEC, OM, and soluble P is explained by the nature of the materials added (Blume and Leiweber, 2004). In contrast, the regular distribution of other chemical properties such as pH, EC, and soluble Na is a result of the process of accumulation of salts in the soil surface due to moisture evaporation (Sarah, 2001; Porta, 2003). The high content of soluble P (between 250 and 2200 mg·kg⁻¹), is a common feature of soils with anthropic management resulting from the application of manure (Giani et al., 2004; Hubbe et al., 2007).

Particularly striking is the presence of spherical aggregates in the topsoil of all land classes, despite the high bulk densities, high exchangeable sodium, and clay textures, which contrasts with that reported in the literature (Bronick and Lal, 2005; Brady and Weil, 2008; Oades, 1993). In addition, it was expected that in the horizons with high content of exchangeable sodium, low EC, and under saturation conditions, the structure would collapsed (Barzegar et al., 1997; Chadwick and Graham, 2000; Reddy et al., 2000). However, such is not the case; in fact, we found in the field that soil aggregates were very stable in horizons under saturation. This feature is not related to organic matter content, as this material tends to build-up on the faces of the aggregates when saturated conditions prevail in the system (Reddy et al., 2000; Sahrawat, 2003). In this paper we suggest the presence of amorphous silica plays an influential role in the stability of aggregates from clayish soils with high exchangeable sodium levels. Our reasons to postulate such a hypothesis resides in the findings of Gutiérrez-Castorena and Ortiz-Solorio (1992), and Segura et al. (2000), who reported that agricultural clay soils of the Valley of Mexico have high contents of amorphous silica. Kay and Angers (2000) reported in contrast, that the influence of amorphous silica in the stability of aggregates from soils with low-hardness minerals is ambiguous. In theory, it is expected that amorphous silica, with its valence creates more stability than the Fe³⁺ (Franzmeier et al., 1996) within soil aggregates. In summary, the hypothesis that amorphous silica is responsible for the flocculation of clays, despite high concentrations of sodium may presumably hold (McNeal et al., 1968, Baldock and Nelson, 2000; Aguirre, 2007) within the conditions found in the soils of the study area. We suggest conducting more research on this subject to understand better this process.

4.3. Taxonomic classification of soils

From a pedogenic point of view, extraction, mixing and addition of terric materials during the establishment of the irrigation district, reverted the development process of soils and caused their degradation. However, in little more than three decades the human practices transformed the landscape, rehabilitating 84% of the land for agricultural use. These results provide evidence of the importance of man as a formative soil factor, and the fast – acting of anthropogenic processes, compared to the natural soil formation processes (Dazzi and Monteleone, 2007; Dazzi et al., 2009) could well sustain such an argument. Therefore, these soils should be classified as Anthrosols. Indeed, most of the soils were classified as anthrosols, however, the depth of material added determined the classification of soils, and consequently, for soils with a layer of added material less than 50 cm were classified as Solonetz or Fluvisols with side qualifiers (Transportic or Anthric), in spite of the incorporation of terric materials and amendments, as well as irrigation are agricultural activities that determine soil antrosolization (Dudal, 2004; WRB, 2007; Dazzi et al., 2009).

In the case of Soil Taxonomy, although anthropogenic processes in the Inceptisols are recognized through the presence of plaggan epipedon (Soil Survey Staff, 2010) and designated as Typic Plaggantrepts, aquic conditions are of greater importance. Consequently, the soils are classified as Endoaquepts. Therefore the existing soil classification systems need to be analyzed to include much more detail regarding human influenced formed soils. Because human influence occurs in all "natural soils" as an integrated part of the genetic processes that give rise to these soils (Effland and Pouyat, 1997), an alternative to improve this classification is to integrate human factors into the existing soil taxa (Dudal, 2004). As regards to this subject, the International Committee of the USDA Soil Anthropogenic (ICOMANTH) through Circular No. 7, proposes moving the suborder Antrepts at the subgroup level, which would classify soils with plaggan epipedon and aquic conditions. Based on the results of this research, we proposed to include the anthropogenic factor in the suborder Aquepts.

Finally, the local land classification is very detailed, as farmers in their lands recognized the influence of irrigation (Hydragric horizon), the kind of material added and incorporation of manure (Terric horizon), the high biological activity (Horizon hortico), and the limiting factors

(salinity, sodicity, alkalinity and reduced drainage), taking into account such aspects in the delimitation of land classes and their boundaries. Sánchez et al. (2002) indicate in addition, that the land classes correspond not only to soil series, but also to soil phases. An interesting particularity about this research is the identification of two levels in the nomenclature to define land classes, which has not been reported in previous research on this topic (Luna, 1982; Sánchez, 2002). Likewise, the mapping of land classes resulted in higher detailed soil units (with rectangular shapes), compared to what could be obtained with any classification system and with any detailed soil survey method (Lleverino et al., 2000). An additional benefit that ethnopedological surveys provide to development of local knowledge about soils is the relatively economical cost it entails compared to its similar systems (first order) of soil survey.

As regards to Soil Taxonomy, a map unit delineation of soils with plaggen epipedons would tend to have straight-sided rectangular bodies (SSS, 2010). As a matter of fact, such observation was found in the study area, despite the final classification disregarded this observation.

It is noteworthy that these soils were classified as Vertisols by INEGI (1982), but no slickensides occur despite cracks, indicating that the latter is formed by a process of desiccation of lacustrine material (Pape and Lager, 1995).

5. Conclusions

The main contributions farmers are adding to the body of knowledge of ethnopedology are the use of wastewater in the reclamation of saline soils with low agricultural productivity, the different strategies for using wastewater regarding crop selection and added material to existing soils, and the appropriate combination of amendments (manure, soil, and gypsum) and irrigation frequency to increase agricultural productivity of soils. The reduction of salt-degraded lands after three decades of farming shows therefore, a deep knowledge of farmers dealing with processes of degradation (salination) and land reclamation, which allowed developing specific feasible actions, coherent to the possibilities of the community. Besides, this case of study shows how human beings are able to adapt to degraded environments and to produce knowledge and strategies to transform their surrounding landscapes, in order to survive despite the hazardous environmental conditions.

The local land classification provides more detail about soils and their properties, compared to other soil classification systems, and correspond to a first order soil survey.

The soils of the study area are classified by WRB as Hidragic Terric Gleyic Anthrosols, in contrast to Soil Taxonomy, where they are classified as Endoaquepts and Endoaquents; a feature that states clearly WRB takes better into account anthropogenic processes within its classification system than Soil Taxonomy. We suggest, therefore, including anthropogenic processes with aquic (irrigation) conditions in Soil Taxonomy.

This research presents evidence of a multi-level local land classification; likewise this study applies on a first basis, local knowledge as a frame of reference to mapping Anthrosols, and to learn about their management by farmers from “Los Insurgentes” irrigation district, Mexico.

6. Acknowledgments

The authors wish to express their gratitude to the Laboratory of Environmental Chemistry, in particular, to Dr R. Carrillo, for his assistance in the collection and analysis of water samples. Likewise, we wish to express our gratitude to the personnel of the Environmental Soil Physics Laboratory and the Pedology Lab, for their support in the analysis of soil samples; in particular, to Mr. Oscar Sánchez, for his support during the fieldwork and the production of the soil map.

7. References

Aguirre G., A., 2007. Química de los suelos de Inundación Temporal y perenne. UNAM, México.

Alcalá de Jesús, M., C. A. Ortiz Solorio y M. C. Gutiérrez Castorena. 2001. Clasificación de los suelos de la Meseta Tarasca, Michoacán. *Terra* 19: 227-239.

Bahri, A., 1999. Agricultural reuse of wastewater and global water management. *Water Sci. Tech*, 40, 4-5, 339-346.

Baldock, J. A., y P. N., Nelson. 2000. Soil Organic Matter. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. B-25– B-84.

Barrera, J. M. 2007. Agoniza la mejor zona agrícola del Valle de México. *Diario “El Universal”* disponible en <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/82389.html> (consultado marzo 2011)

Barzegar, A. R., P. N., Nelson, J. M., Oades, and P., Rengasamy., 1997. Organic matter, sodicity, and clay type: influence on soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61: 1131-1137.

- Blume, H. P., and P., Leinweber, 2004. Plaggen Soils: landscape, history, properties, and classification. *J. Plant Nut. & Soil Sci.*, 167, pp. 319-327.
- Brady, N. C., and R. R., Weil. 2008. *The nature and properties of soils*. 14 ed. Prentice Hall.
- Bronick, C. J., and R., Lal, 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124, 3-22.
- Chadwick, O. A y R. C., Graham. 2000. Pedogenic processes. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. E-41– E-76.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2009. Usos del agua en la Cuenca del Valle de México, México, disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/ocavm/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=5e5c0cc2-be94-43ff-b1c1-1b671ee1b316> (Acerca de la Cuenca) (accesado septiembre 2010)
- Dazzi, C., G. Lo Papa, V. Palermo. 2009. Proposal for a new diagnostic horizon for WRB Anthrosols. *Geoderma*, 151, 16–21.
- Dazzi, C., S. Monteleone. 2007. Anthropogenic processes in the evolution of a soil chronosequence on marly-limestone substrata in an Italian Mediterranean environment. *Geoderma*, 141, 201–209)
- Dudal R. 2004. The sixth factor of soil formation. “International Conference of Soil Classification 2004”, Petrozavodsk, Rusia, August, 2004. Disponible en http://www.itc.nl/~rossiter/research/suitma/Dudal_6thFactor.pdf (consultado dic. 2010)
- Effland, W. R., R. V. Pouyat. 1997. The genesis, classification and mapping of soils in urban areas. *Urban Ecosystems*, 1, 217-228.
- Franzmeier, D. P., C. J. Chartres & J. T. Wood. 1996. Hardsetting soils in southeast Australia: landscape and profile processes. *SSSAJ*, 60, 1178 – 1187.
- Friedel, J. K., T., Langer, C., Siebe, K., Stahr., 2000. Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in Central México. *Biol. Fertil. Soils*, 31, 414-421.
- García H., S. 1995. Estudio de rehabilitación de suelos con problemas de salinidad y/o sodicidad dentro del proyecto de riego de la Laguna de Zumpango. Tesis de Ingeniero Agrícola FES-Cuautitlán, UNAM, 131 p.
- García-Orenes, F., C. Guerrero, J. Mataix-Solera, J. Navarro-Pedreño, I. Gómez, J. Mataix-Beneyto. 2005. Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil & Tillage Research*, 82, 65-76.
- Giani, L., O., Chertov, C., Gebhardt, O., Kalinina, M., Nadporozhskaya, E., Tolkdorf-Lienemann., 2004. Plaggentrepts in northwest Russia? Genesis, properties and classification. *Geoderma*, 121, 113-122.

- Gobierno del Estado de México (GEM), 2009. Consejo Estatal de Población, La Zona Metropolitana del Valle de México, México. Disponible en: http://www.edomex.gob.mx/portal/page/portal/coespo/variablesociodemograficas/zonas_metro
- Gray, J. M., G. F. Humphreys, J. A. Deckers. 2011. Distribution patterns of World Reference Base soil groups relative to soil forming factors. *Geoderma*, 160, 373–383.
- Gutierrez - Castorena M. C. y C. A. Ortiz – Solorio. 1999. Origen y evolución de los suelos del ex lago de Texcoco, México. *Agrociencia*, 33. 199 – 208.
- Gutierrez-Castorena, M. C., y Ortiz-Solorio, C.A., 1992. Caracterización del tepetate blanco en Texcoco, México: *Terra*, 10, 202-209.
- Hubbe, A., O., Chertov, O., kalinina, M., Nadporozhskaya, E., Tolksdorf-Lienemann, and L., Giani., 2007. Evidence of plaggen soils in Europe North Russia (Arkhangelsk region). *J PlantNut.SoilSci*, 170, 329 - 334.
- Hurtado C., G. y J. S. Rojas. 1989. Estudio Técnico para el aprovechamiento de las aguas residuales municipales de Zumpango, Estado de México con fines de riego agrícola. Tesis de Ingeniero Agrícola, FES-Cuautitlán, UNAM, 222 p.
- International Committee for Anthropogenic Soils (ICOMANTH) Circular Letter 7. Proposed Revision to the 12th Edition Keys to Soil Taxonomy. Sent for the global soil science community by IUSS Alert 68 (Dec. 2010)
- 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.
- INEGI 1982. Síntesis Geográfica del Estado de México. Secretaría de Programación y presupuesto, Coordinación General de los Servicio nacionales de Estadística, Geografía e informática.
- Jayawardane N. S. and K. Y. Chan. 1994. The management of soil physical properties limiting crop production in Australian sodic soils- a review. *Australian J. Soil R.*, 32, 13 - 44.
- Jiménez, C. B. E., 2001. La contaminación ambiental de México: causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa. México.
- Jiménez, C. B. E., 2005. El Mezquital, México: The largest Irrigation District Using Wastewater. In: *Water Reuse for Irrigation: Agriculture, Landscapes, and Turfgrass*. Lazarova V. and A. Bahri (eds.). CRC. Washington D. C.
- Kay B. D. and D. A. Angers. 2000. Soil structure. *In Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. A-229 – A-276.
- Keren, R., 2000. Salinity. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. B-25– B-84.

- Khalkheili, T. A., G. H., Zamani., 2009. Farmer participation in irrigation management: the case of Doroodzan Da Irrigation Network, Iran. *Agr. Water Manage.*, 96, 859 - 865.
- Krogh, L., B., Paaraup-Laursen., 1997. Indigenous soil knowledge among the Fulani of northern Burkina Faso: Linking soil science and anthropology in analysis resource management. *Geojournal*, 43, 189 - 197.
- Lazcano H., A. F., y R., Ávalos., 2005. Enciclopedia de los municipios de México, Estado de México. Instituto Nacional para el federalismo y desarrollo municipal. Gobierno del estado de México.
- Levy, G. J., 2000. Sodicity. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. G-27 – G-63.
- Licona V., A. L., 1991. Metodología para el levantamiento de tierras campesinas a nivel regional y la técnica de producción agrícola en ejidos del centro de Veracruz. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Luna, O., P. 1982. Estudio comparativo sobre la clasificación campesina de suelos en dos comunidades del Valle de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Luna-Guido, M. L., R. I., Beltrán-Hernández, N. A., Solís-Ceballos, N., Hernández-Chavez, F., Mercado-García, J. A., Catt, V., Olalde-Portugal, L., Dendooven. 2000. Chemical and biological characteristics of alkaline saline soils from the former Lake Texcoco as affected by artificial drainage. *Biol. Fertil. Soils*, 132, 102-108.
- Lleverino, E., C. Ortiz, and C. Gutierrez, “Calidad de los mapas de suelos en el ejido de Atenco, Estado de Mexico,” *Terra* 18, 103–113 (2000).
- 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. *N. Antropología (UNAM)*, 19, 64, UNAM.75-97.
- Mc Neal, B. L., D. A., Layfield, W. A., Norvell, and J. D., Rhoades. 1968. Factors influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixed-salt solutions. *Soil Sci. Am. Proc*, 32: 187 - 190. Citado por Levy G. J. 2000. Sodicity. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. G-27 – G-64.
- Munner, M. and Oades, J. M. 1989. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. *Australian Journal of Soil Research*, 27(2), 411 - 423
- Niemeijer, D. and V., Mazzucato. 2003. Moving beyond indigenous soil taxonomies: Local theories of soils for sustainable development. *Geoderma*, 111: 403 - 424.
- Oades, J. M., 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56: 377 - 400.

Organización de la Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO), 2006. Manual para la descripción de suelos. 4ta.Ed., Roma.

Ortiz – Solorio, C. A. y M. C. Gutiérrez – Castorena. 2001. Mexican ethnopedology: the experience in soil mapping. *In Science and tradition: Roots and wings for development*. Royal Academy of overseas sciences. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Brussels, Belgium. Pp. 107 – 136.

Ortiz S., C. A., D., Pájaro H., y V. M., Ordaz CH., 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo México.

Ortiz – Solorio, C. A., M. C. Gutiérrez – Castorena , A. J. Licona – Vargas and P. Sánchez – Guzmán. 2005. Contemporary influence of indigenous soil (land) classification in México. *Eurasian Soil Science*, 38, S89 – S94.

Oster, J. D., 1994. Irrigation with poor quality water. *Agric. Water Manage*, 25, 271 - 297.

Pablo-Galán, L., J.J., de Pablo, and M. L., Chávez–García. 2002. Clay Mineralogy and diagenesis of the Recent-Pleistocene volcanogenic sedimentary sequence of the Mexican Basin. *Rev. Mex. Cienc.Geológicas*, 19, 1, 38 - 49.

Pape, T., and D.,Laggen.,1995. Manual for soil description and classification. Department of Soil Science and Geology. Wageningen, Netherlands. .

Perló, C. M., y A. E., González R. 2005. ¿Guerra por el Agua en el Valle de México? UNAM, México.

Porta, J., M., López-Acevedo y C., Roquera, 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundi-Prensa. 3era.ed. México.

Qadir, M., D., Wichelns, L., Raschid-Sally, P., G., McCornick, P., Drechel, A., Bahri, P. S., Minhas., 2009. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. *Agric. Water Manage*.

Reddy, K. R., E. M., D' Angelo, and W. G., Harris., 2000. Biogeochemistry of wetlands. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. G-89 – G-119.

Ruíz-Romero, E., R., Alcántara Hernández, C., Cruz-Mondragon, R., Marsh, M. L., Luna-Guido, L., Dendooven., 2009. Denitrification in extreme alkaline soils of the former lake Texcoco. *Plant Soil*. 319, 247 - 257.

Sahrawat, K. L., 2003. Organic matter accumulation in submerged soils. *Adv. Agronomy*, 81, 169 - 201.

Sánchez, G. P., C. A., Ortiz S., M. C., Gutiérrez C., J. D., Gómez., 2002. Clasificación campesina de tierras y su relación con la producción de caña de azúcar en el sur de Veracruz. *Terra*, 20, 4, 359 - 369.

Sarah, P., 2001. Soluble salt dynamics in the soil under different climatic conditions. *Catena* 43, 307 - 321.

Segura, C. M. A., M. C., Gutiérrez C., C. A., Ortiz S., D. J., Gómez D., 2000. Suelos arcillosos de la zona oriente del Estado de México. *Terra*, 18, 1, 35 - 44.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales climatológicas 1971-2000 de la estación meteorológica 15115, Santo Tomás, Teoloyucan. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx> (consultada dic. 2010)

Standard Methods for the examination of water and wastewater., 1995. Eaton A. D., L. S. Clesceri, A. E. Greenberg (eds.) 19th edition, American Public Health Association .U. S. A.

Soil Survey Staff., 2010. Claves para la Taxonomía de Suelos, Ortiz-Solorio C. y M. C. Gutiérrez-Castorena (Trads.) Décima Edición. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales. México.

Téllez L., J. L. y M. C. Gaytán C., 1985. Determinación del tipo de suelo y formulación de un programa para la rehabilitación de suelos con problemas de salinidad en la unidad de riego "Santiago Atocan" del municipio de Santa Ana Nextlalpan en el Estado de México. Tesis de Ingeniero Agrícola, FES Cuautitlán, UNAM.

Van Reeuwijk., 2003. Procedimientos para el análisis de suelos clasificación y correlación. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco, México.

Zurayk, R., F., el-Awar, S., Hamadeh, S., Talhouk, C., Sayegh, A., Chelab, K., al Shab., 2001. Using indigenous knowledge in land use investigations: a participatory study in a semi-arid mountainous region of Lebanon. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 86, 247 - 262.

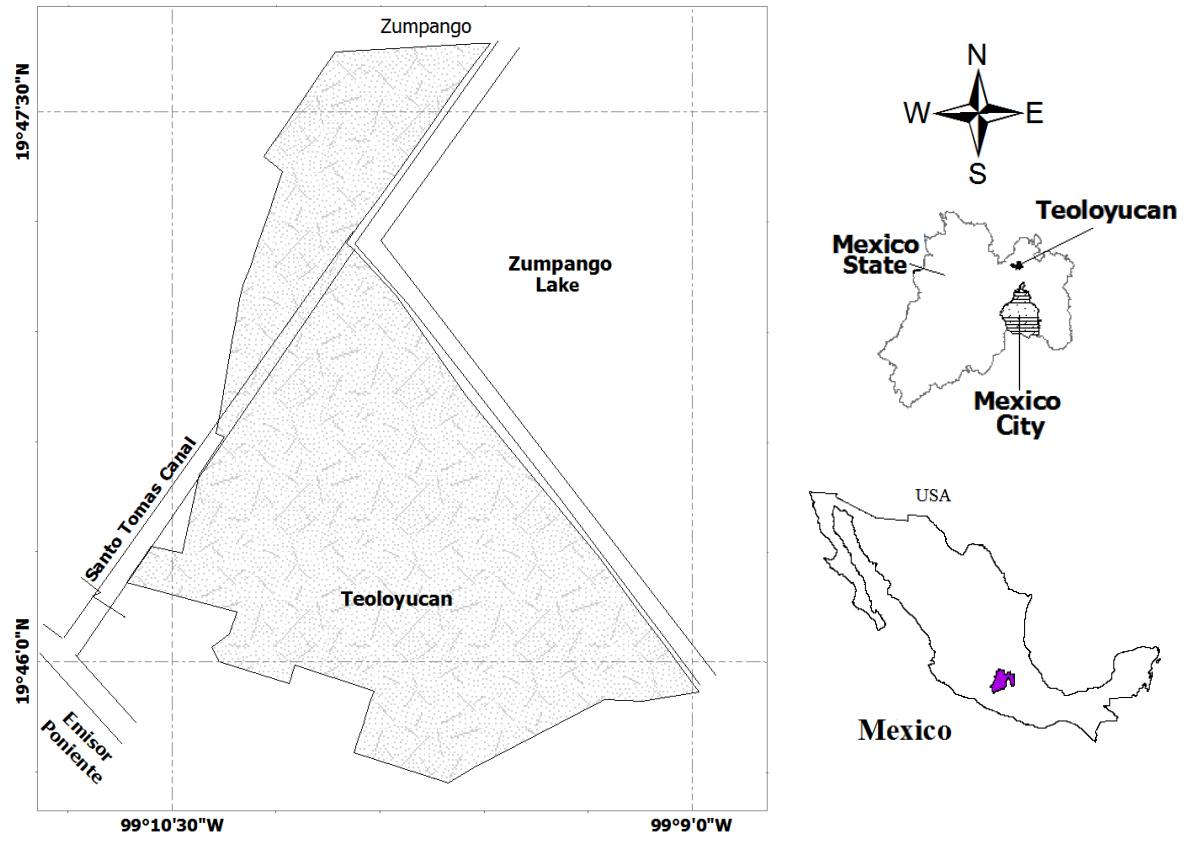


Figure 1. Location of the study area.

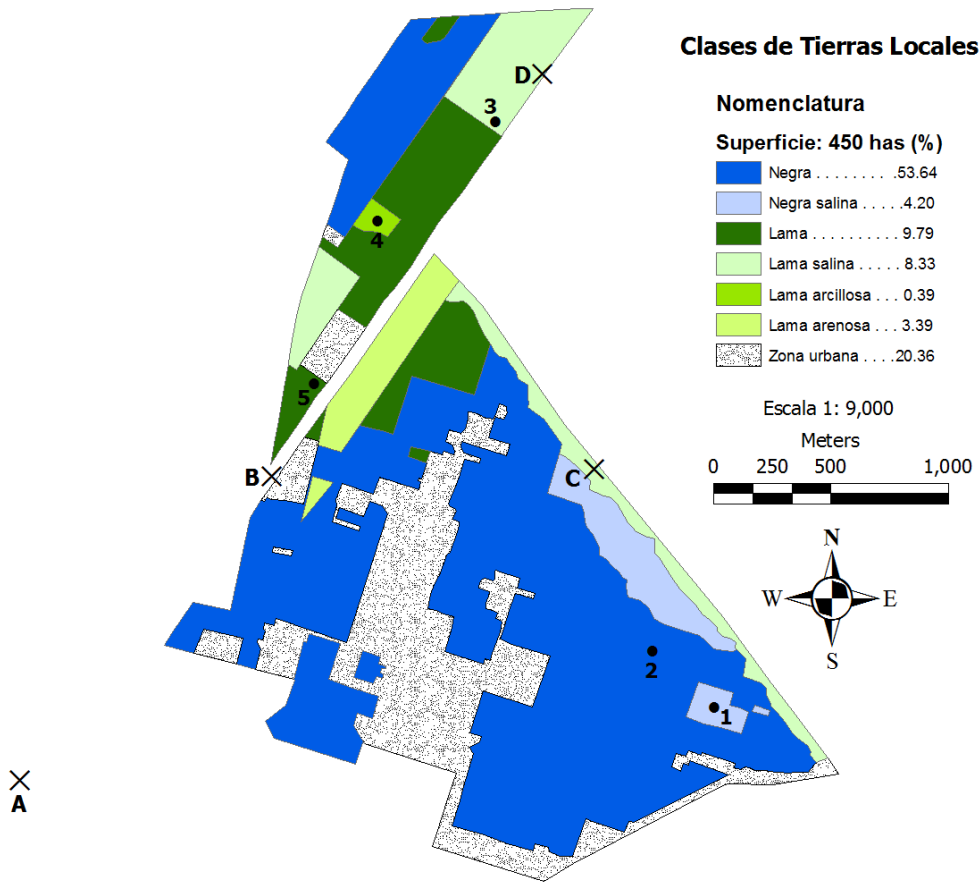


Figure 2. Local land classes. The numbers indicate locations where modal profiles were designated and described. The letters indicate location of wastewater sampling collection.

Table 1. Chemical analyses for the farmer land classes found in the study area.

Farmer land class	Soil profile	Soil horizon	Depth (cm)	pH (2:1) (H ₂ O)	OM (%)	OC (%)	CEC [cmol (+) Kg ⁻¹]	Exchangeable cations [cmol (+) Kg ⁻¹]						BSP	ESP	CaCO ₃ (%)	P ₂ O ₅ (mg Kg ⁻¹)	EC (dS m ⁻¹)	SAR	Soluble cations [meq L ⁻¹]			
								Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺							Ca ²⁺	Mg ²⁺		
<i>Negra salina</i>	1	Apuz	0-22	8.2	3.7	2.1	65.3	59.6	6.1	19.0	11.5	+100	91.1	0.33	1332.3	19.0	62.3	5129.3	236.1	253.7	162.1		
		A	22-37	8.2	1.1	0.6	84.2	56.9	1.8	20.6	13.6	+100	67.6	0.4	85.9	10.3	48.5	2521.3	23.8	82.6	76.3		
		2Cb	37-65	8.3	0.8	0.5	63.0	36.4	0.6	9.0	8.6	+100	57.8	0.31	55.5	7.4	59.2	2002.4	9.0	32.3	34.0		
		2Cb ₂	65-91	8.4	2.5	1.5	60.2	54.9	0.7	9.0	12.0	+100	91.2	0.62	85.9	3.6	35.8	877.9	31.7	14.0	19.7		
		2Cb ₃	91-110	8.6	0.94	0.5	68.3	32.4	1.1	14.6	15.2	+100	47.4	0.38	55.5	1.2	16.4	326.5	7.6	6.0	14.9		
<i>Negra</i>	2	Ap	0-25	7.0	2.83	1.63	46.5	3.9	1.0	21.0	8.6	+100	8.4	0.55	298.7	1.23	6.7	220.0	11.8	42.1	24.0		
		A	26-56	7.8	1.38	0.79	55.4	3.9	0.4	18.8	7.7	+100	7.0	0.60	116.3	0.95	8.3	215.0	3.3	23.3	17.4		
		2Cb	57-83	8.1	0.36	0.21	102.0	12.5	0.7	30.5	16.0	+100	12.3	0.66	85.9	0.71	8.1	158.3	4.0	5.8	14.3		
<i>Lama salina</i>	3	Apz	0-17	8.8	1.23	0.71	36.6	34.4	11.9	17.4	7.7	+100	93.8	0.82	481.1	13.6	91.8	4048.2	733.3	74.0	45.6		
		A	18-34	9.2	1.67	0.96	42.4	29.1	13.4	13.0	7.0	+100	68.6	0.84	2213.9	6.14	70.4	1928.4	237.5	22.6	21.3		
		C	35-48	9.3	1.82	1.05	54.5	41.7	13.8	15.0	7.4	+100	76.5	3.0	511.5	5.62	71.1	1681.8	127.6	14.2	17.6		
		2Cb	49-67	9.5	0.51	0.29	49.3	25.8	10.3	13.6	4.5	+100	52.3	2.76	633.1	1.8	32.9	534.1	32.3	1.5	11.6		
<i>Lama arcillosa</i>	4	Ap	0-22	7.3	4.28	2.46	88.3	2.6	1.7	14.0	7.4	57.3	2.9	0.33	511.5	0.96	7.3	195.3	27.8	23.0	19.5		
		A	23-45	7.6	1.82	1.05	63.8	5.2	3.1	23.6	10.6	+100	8.2	0.35	359.5	0.87	8.4	187.9	22.8	11.8	16.1		
		C	46-66	7.7	1.09	0.63	74.4	5.2	1.9	20.6	8.6	96.6	7.0	0.20	177.1	0.65	7.1	146.0	8.4	8.3	4.9		
<i>Lama</i>	5	Ap	0-28	7.1	3.27	1.88	58.2	2.0	0.5	17.4	5.8	87.1	3.4	0.22	815.5	0.88	6.2	175.6	7.2	32.0	17.8		
		A	29-58	8.0	1.09	0.63	30.9	5.9	0.3	17.6	8.0	+100	19.0	0.38	116.3	0.95	8.9	210.1	3.9	16.1	16.3		
		C	58-64	8.0	0.94	0.54	28.7	6.5	0.4	17.4	7.4	+100	22.8	0.4	146.7	1.13	9.4	227.4	4.1	17.7	16.3		
		C ₂	65-77	7.9	1.38	0.79	60.6	5.2	0.4	14.6	6.1	85.7	8.6	0.33	207.5	1.23	10.8	267.3	3.9	19.2	16.8		
		2Cb	78-90	8.0	1.09	0.63	44.9	5.2	0.4	16.4	7.7	+100	11.6	0.35	55.5	0.80	9.0	170.6	3.6	6.5	13.0		
		2Cb ₂	91-98	8.1	0.36	0.21	39.2	9.2	0.8	21.6	12.0	+100	23.5	0.29	85.9	0.76	8.8	165.7	5.6	4.8	13.6		
		2Cb ₃	99-118	8.3	0.22	0.13	103.0	5.2	1.0	10.6	5.8	43.5	5.1	0.42	177.1	0.82	9.7	185.4	8.8	5.5	13.7		

Table 2. Physical analysis for the farmer land classes found in the study area

Farmer land class	Soil profile	Soil horizon	Depth (cm)	Moist color	Dry color	Bulk density	% Sand	% Silt	% Clay	Textural class
<i>Negra salina</i>	1	Apuz	0-22	10YR 3/2	10YR6/1	1.51	6.3	49.5	44.3	Silty clay
		A	23-37	10YR2/1	10YR5/1	1.6	1.8	52.4	45.8	Silty clay
		2Cb	38-65	10YR3/1	10YR6/1	1.32	0.8	49.6	49.6	Silty clay
		2Cb2	66-91	10YR2/1	7.5YR2/0	1.43	5.2	33.7	61.1	Clay
		2Cb 3	92-110	10YR3/1	7.5YR3/0	1.57	1.9	27.7	70.4	Clay
<i>Negra</i>	2	Apz	0-25	10YR3/2	10YR5/2	1.77	7.7	44.6	47.6	Silty clay
		A	26-56	10YR3/1	10YR5/3	1.7	2.9	66.3	30.8	Loamy silt clay
		2Cb	57-83	10YR2/1	10YR5/1	1.45	1.3	30.0	68.6	Clay
<i>Lama salina</i>	3	Apz	0-17	10YR4/2	10YR6/3	1.51	36.6	27.2	36.2	Loamy clay
		A	18-34	10YR4/2	10YR5/1	1.39	42.8	30.0	27.2	Loamy
		C	35-48	10YR4/3	10YR6/3	1.45	27.0	44.9	28.1	Loamy
		2Cb	49-67	10YR4/1	10YR6/2	1.61	25.5	40.9	33.7	Loamy clay
<i>Lama arcillosa</i>	4	Ap	0-22	10YR3/2	10YR5/2	1.60	18.2	33.9	48.0	Clay
		A	23-45	10YR2/1	10YR5/2	1.64	10.1	30.8	59.1	Clay
		C	46-66	10YR3/2	10YR5/2	1.55	4.9	33.3	61.8	Clay
<i>Lama</i>	5	Ap	0-28	10YR3/1	10YR4/2	1.63	33.4	32.0	34.6	Loamy Clay
		A	29-58	10YR4/2	10YR5/3	1.56	9.8	45.1	45.1	Silty clay
		C	59-64	10YR4/3	10YR5/3	1.38	64.3	10.2	25.5	Loamy sand clay
		C2	65-77	10YR3/2	10YR5/2	1.3	4.8	65.5	29.8	Loamy silt clay
		2Cb	78-90	10YR3/2	10YR5/2	1.7	18.7	39.1	42.1	Clay
		2Cb2	91-98	10YR3/1	10YR6/2	1.61	5.1	42.2	52.7	Silty clay
		2Cb3	99-118	10YR4/1	10YR6/1	1.58	2.8	30.8	66.4	Clay

Table 3. Soil classification by WRB and SSS.

Farmer land class	Soil profile	Soil Survey Staff (2010)	WRB (2007)
Negra salina	1	Typic Endoaquepts	Gleyic Solonetz (Transportic)
Negra	2	Mollic Endoaquepts	Hidragic Terric Gleyic Antrosol (Eutric)
Lama salina	3	Aeric Halaquepts	Hidragic Terric Gleyic Antrosol (Sodic Alcalic)
Lama arcillosa	4	Mollic Endoaquents	Gleyic Mollic Fluvisol (Anthric)
Lama	5	Fluventic Endoaquepts	Hydragric Terric Hortic Fluvic Gleyic Anthrosols (Eutric, Sodic)

Figure 3. Wastewater from the study zone (up) and irrigation strategies (down), with flooded zones (left) and free flooded zones (right).



Table 4. Chemical Analysis of wastewater

Sample	pH	EC (dS m ⁻¹)	mg L ⁻¹				
			Na ⁺	COD	TS	FS	VS
A	7.4	1.0	47	478	1,301	511	790
B	7.3	1.0	38	329	755	395	360
C	7.4	1.0	38	358	740	311	431
D	7.7	1.0	30	373	803	474	329

A = sample collected from Emisor Poniente, BCD = samples collected from secondary channels in the study zone; EC= Electrical conductivity; COD = Chemical oxygen demand; TS = Total solids; FS = Fixed solids; VS= Volatile solids.

Table 5. Organic matter incorporated to soils through wastewater irrigation.

Land class	IWV ¹ (m ³ /Ha)	Crop	IPY ²	IOMPIE ³ (Kg)	YIOMPH ⁴ (Ton)
<i>Lama</i>	605	Forage grass	24	225	5.4
		Alfalfa	18	225	4.05
		Maize	3	225	0.68
<i>Negra</i>	725	Forage grass	24	270	6.48
		Alfalfa	12	270	3.24
		Maize	2	270	0.54
		Oats	2	270	0.54

1)Irrigated water volume estimated for an irrigation event that moistens soil to a depth of 20 cm; 2) Irrigation events per year;
3) Amount of organic matter incorporated per irrigation event; 4) Yearly incorporation of organic matter per hectare.

Descripción de perfiles de campo

TIERRA SALITROSA

Perfil No. 1

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

Fecha: 10/10/08 Descrito por: Ma. de la Luz Reséndiz Paz

Localidad: Sto Tomás, Teoloyucan, Estado de México

Coordenadas:

Elevación: 2252 m Relieve: Plano Pendiente: 1%

Drenaje superficial: sitio receptor

Material parental: sedimentos lacustres arcillosos.

Flora: pastos y hierbas silvestres, *Suaeda nigra*, *Chenopodiaceas* y Pirules, *Salix* sp. ahuejote en las orillas.

Fauna: no aparente

Vegetación cultivada: ninguna

Condiciones meteorológicas: lluvias la semana anterior

Prácticas agronómicas: se ha aplicado yeso y estiércol en grandes cantidades.

Observaciones: En la superficie se observan grietas y sales cristalizadas distribuidas irregularmente.



DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

Apuz 0-22 cm; color 10YR6/1 en seco y 10YR3/2 en húmedo; textura arcillosa; húmedo, estructura bloques subangulares de 1-2 cm y esferoidales con desarrollo moderado; consistencia ligeramente firme, pegajoso y ligeramente plástico; permeabilidad moderada; pocas fisuras menores a 1 mm, poros finos discontinuos intersticiales; raíces muy finas raras; efervescencia ligera al HCl y muy fuerte al H₂O₂; se observa un 50% de estructura masiva; transición ondulada marcada por color al siguiente horizonte.

A 22-37 cm; color 10YR5/1 en seco y 10YR2/1 en húmedo; textura arcillosa; húmedo; con bloques angulares mayores a 5 cm de Θ de desarrollo pobre; consistencia ligeramente friable ligeramente plástica y pegajosa; permeabilidad lenta; pocos poros canales muy finos y poros vesiculares finos; raíces muy finas raras; efervescencia ligera al HCl y al H₂O₂; transición ondulada marcada por color al siguiente horizonte.

2Cb 37-65 cm; color 10YR6/1 en seco y 10YR3/1 en húmedo; textura arcillosa; húmedo; con bloques angulares de 1-3 cm con desarrollo pobre; consistencia firme, plástico y pegajoso; permeabilidad lenta; con pocos canales cámara finos fisuras muy finas;

raíces muy finas y relictos; con efervescencia moderada al HCl y ligera al H₂O₂; transición ondulada marcada.

2Cb₂65-91 cm; color 7.5YR2/0 en seco y 10YR2/1 en húmedo; textura arcillosa; muy húmedo; bloques angulares de entre 2 y 5 cm con desarrollo moderado; consistencia ligeramente firme pegajoso y plástico, permeabilidad lenta; poros canales finos y fisuras muy finas pocos; raíces muy finas muertas; efervescencia ligera al HCl y muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal tenue a la siguiente capa.

2Cb₃91-110 cm; color 7.5YR3/0 en seco y 10YR3/1 en húmedo; textura arcillosa; muy húmedo; bloques angulares de 1-3 cm y desarrollo moderado; consistencia ligeramente firme, pegajoso y plástico; permeabilidad muy lenta; fisuras muy finas y poros cámara pocos; efervescencia ligera al HCl y muy fuerte al H₂O₂.

113 cm Manto freático.

Descripción de perfiles de campo

TIERRA NEGRA

Perfil No. 2

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

Fecha: 23/03/09 Descrito por: Ma. de la Luz Reséndiz Paz

Localidad: Sto Tomás, Teoloyucan, Estado de México

Coordenadas:

Elevación: Relieve: Plano Pendiente: < 3%

Drenaje superficial: Sitio receptor

Material parental: sedimentos lacustres

Flora: *Salix bonplandiana*, árboles (borde)

Fauna: Sin fauna aparente

Vegetación cultivada: Maíz

Condiciones meteorológicas: Día soleado



DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

Ap 0-25 cm; color pardo grisáceo muy oscuro en seco (10YR3/2) y pardo oscuro en seco (10YR 3/3); textura arcillosa; húmedo; estructura no colapsada formada principalmente bloques esferoidales principalmente, aunque también se presentan bloques subangulares de 1-2 cm de Θ ; consistencia friable; permeabilidad rápida; poros canales y fisuras de 3 mm de Θ ; raíces delgadas y finas comunes, sin efervescencia al HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal y marcada por color al siguiente horizonte.

A 26-56 cm; color pardo oscuro en seco y húmedo (10YR4/3); textura arcillosa; húmedo; estructura no colapsada formada por bloques subangulares principalmente, aunque también se presentan esferoidales, los bloques subangulares presentan revestimientos rojizos; consistencia que va de friable a muy friable; permeabilidad rápida, con fisuras de 2mm de Θ ; raíces finas comunes; sin efervescencia al HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal marcada por humedad al siguiente horizonte.

2Cb 57-83 cm; color pardo grisáceo muy oscuro en seco y en húmedo (10YR3/2, 10YR3/1); textura arcillosa; muy húmedo; estructura no colapsada formada por bloques angulares de 1-2 cm de Θ , presentan caras de fricción y revestimientos rojizos y grisáceos; consistencia friable; permeabilidad lenta porque está saturada; fisuras; raíces finas raras; efervescencia moderada al HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂.

84 cm Manto freático.

TIERRA LAMA SALINA

Perfil No. 3

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

Fecha: 16/03/09 Descrito por: Ma. de la Luz

Reséndiz Paz

Localidad: Sto Tomás, Teoloyucan, Estado de México

Coordenadas:

Elevación: Relieve: Plano Pendiente: < 3%

Drenaje superficial: Sitio receptor

Material parental: sedimentos lacustres

Flora: *Salix*, capulines, romeritos, amarantáceas

Fauna: Insectos, golondrinas y otras aves migratorias, en el suelo sin evidencia de actividad de insectos o vermes.

Vegetación cultivada: ninguna

Condiciones meteorológicas: Día soleado



DESCRIPCIÓN DEL PERFIL

Apz 0-17 cm; color pardo amarillento claro en seco (10YR6/4) y pardo oscuro en húmedo (10YR 3/3); textura que va de arcilla arenosa a migajón arenoso; ligeramente húmedo, estructura material suelto, bloques esferoidales y subangulares; con una consistencia blanda a ligeramente duro; con permeabilidad rápida; poros canales y fisuras frecuentes; raíces medias y delgadas comunes, efervescencia en presencia de HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal y marcada al siguiente horizonte por la presencia de motas rojizas.

A 18-34 cm; color pardo en seco (10YR5/3) y pardo oscuro en húmedo (10YR4/3); textura arcilla arenosa; húmedo; estructura material suelto, bloques esferoidales y subangulares; consistencia blanda, permeabilidad moderada; poros canales y fisuras; raíces medias y delgadas comunes, efervescencia fuerte en presencia de HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal y marcada al siguiente horizonte por la presencia de manchas pardas.

C 35-48 cm; color pardo amarillento en seco (10YR6/3) y pardo amarillento oscuro en húmedo (10YR4/4); textura migajón arenoso; húmedo; estructura masiva que se desintegra en bloques angulares pero permite el desarrollo de raíces intrabloques; consistencia firme, plástica; permeabilidad lenta-moderada, con fisuras y poros canales y vesiculares pocos; raíces finas comunes; efervescencia muy fuerte al HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal marcada por humedad al siguiente horizonte.

2Cb 49-67 cm; color gris claro en seco (10YR7/2) y pardo grisáceo oscuro en húmedo (10YR4/2); textura arenosa; húmedo; estructura masiva que se desintegra en bloques angulares, sin resistencia al desarrollo de raíces; consistencia ligeramente pegajosa;

68 cm

permeabilidad lenta-moderada, con poros canales, vesiculares y fisuras frecuentes; raíces finas raras; efervescencia muy fuerte al HCl y efervescencia moderada al H₂O₂.
Manto freático.

Descripción de perfiles de campo

TIERRA LAMA ARCILLOSA

Perfil No. 4

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

Fecha: 25/09/09 Descrito por: Ma. de la Luz
Reséndiz Paz

Localidad: Sto. Tomás, Teoloyucan, Estado de
México

Coordenadas:

Elevación: Relieve: Plano

Pendiente: <3%

Drenaje superficial: Sitio receptor

Material parental: sedimentos acarreados por agua

Flora: *Opuntia* sp. *Agave* sp. hiervas silvestres y
sauce llorón en la orilla de la parcela.

Fauna: Garzas, sin presencia aparente en el suelo

Vegetación cultivada: pasto jardín y forrajero

Condiciones meteorológicas: Día soleado



DESCRIPCIÓN DEL PERFIL



Ap 0-22 cm; color 10YR5/2 en seco y 10YR3/2 en húmedo; textura franco arcilloso; húmedo, estructura agregados esferoidales y subangulares; con una consistencia pegajosa; con permeabilidad moderada; poros canales, poros cámara y fisuras; raíces medias y finas abundantes, sin efervescencia en presencia de HCl y efervescencia fuerte al H₂O₂; transición ondulada por color al siguiente horizonte.

A 23-45 cm; color 10YR5/2 en seco y 10YR2/1 en húmedo; textura franco limoso; húmedo; con agregados esferoidales, subangulares, consistencia ligeramente pegajosa; permeabilidad moderada, con fisuras y poros canales; raíces medias y finas pocas; sin efervescencia al HCl y efervescencia fuerte al H₂O₂; transición horizontal ondulada por color al siguiente horizonte.

C 46-66 cm; color 10YR5/2 en seco y 10YR3/2 en húmedo; textura arcillosa; muy húmedo; con caras de fricción y agregados angulares y subangulares de 3mm a 2cm de Θ ; consistencia ligeramente pegajosa; permeabilidad lenta, con fisuras abundantes, poros canales y poros cámara; raíces muy finas abundantes; sin efervescencia al HCl y efervescencia fuerte al H₂O₂; motas rojizas en la base.

67 cm

Manto freático.

Descripción de perfiles de campo

TIERRA LAMA

Perfil No. 5

DESCRIPCIÓN DEL SITIO

Fecha: 25/09/09 Descrito por: Ma. de la Luz
Reséndiz Paz

Localidad: Sto Tomás, Teoloyucan, Estado de
México

Coordenadas:

Elevación: Relieve: Plano

Pendiente: < 3%

Drenaje superficial: Sitio receptor

Material parental: sedimentos lacustres de carácter
arenoso y arcilloso.

Flora: Agave, calabazas y árboles de *Salix* sp. y eucalipto a las orillas de la parcela.

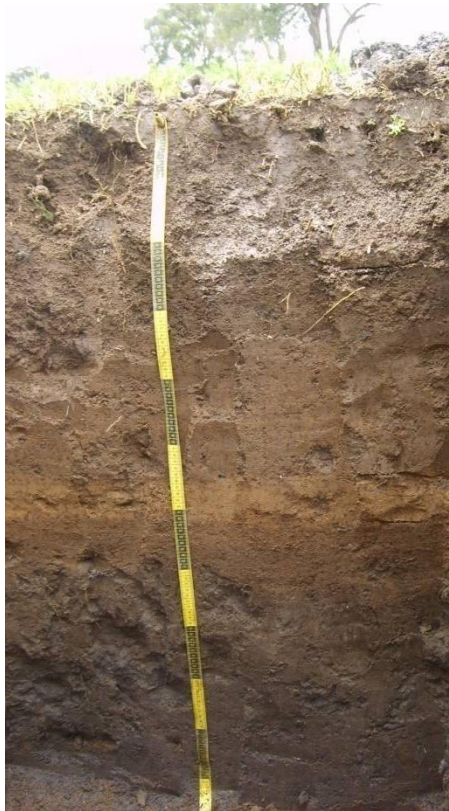
Fauna: muchas lombrices

Vegetación cultivada: alfalfa

Condiciones meteorológicas: Día soleado



DESCRIPCIÓN DEL PERFIL



Ap 0-28 cm; color 10YR4/2 en seco y 10YR3/1 en húmedo; textura franco arcillo limoso; húmedo, estructura bloques esferoidales y subangulares, hasta de 3 cm de Θ ; con una consistencia friable; con permeabilidad rápida; poros canales; raíces gruesas pocas y finas abundantes, efervescencia moderada en presencia de HCl y muy fuerte en presencia de H_2O_2 ; transición ondulada y marcada por color al siguiente horizonte.

A29-58 cm; color 10YR5/3 en seco y 10YR4/2 en húmedo; textura franco arcillo limoso; húmedo; con agregados esferoidales, subangulares y angulares de hasta 5 cm de Θ ; consistencia friable; permeabilidad rápida, con fisuras y poros canales; raíces medias pocas; sin efervescencia al HCl y muy fuerte al H_2O_2 ; transición horizontal marcada por color al siguiente horizonte.

C 58-64 cm; color 10YR5/3 en seco y 10YR4/3 en húmedo; textura limosa; húmedo; con bloques angulares y material suelto; consistencia muy friable; permeabilidad rápida, con poros canales y poros cámara y fisuras abundantes; raíces medias pocas; sin efervescencia al HCl y efervescencia fuerte al H₂O₂; transición horizontal marcada a la siguiente capa.

C₂ 65-77 cm; color 10YR5/2 en seco y 10YR3/2 en húmedo; textura arenosa; con bloques angulares y material suelto; consistencia friable; permeabilidad rápida, con poros canales, cámara y fisuras abundantes; raíces medias pocas; sin efervescencia al HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal en ciertas secciones y ondulada en otras a la siguiente capa.

2Cb 78-90 cm; color 10YR5/2 en seco y 10YR3/2 en húmedo; textura limosa; húmedo; con bloques angulares de 0.5 a 4 cm de Θ con caras de fricción y revestimientos de arcillas grisáceas en los bloques angulares; consistencia ligeramente firme; permeabilidad moderada; con algunos poros canales y fisuras abundantes; muy pocas raíces; sin efervescencia al HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal marcada a la siguiente capa.

2Cb₂ 91-98 cm; color 10YR6/2 en seco y 10YR3/1 en húmedo; textura arcillosa; húmedo; con bloques angulares mostrando caras de fricción y revestimientos de arcillas grisáceas; consistencia firme; permeabilidad rápida; con algunos poros canales y fisuras abundantes; raíces medias pocas; sin efervescencia al HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂; transición horizontal ondulada a la siguiente capa.

2Cb₃ 99-118 cm; color 10YR5/1 en seco y 10YR4/1 en húmedo; textura arcillosa; húmedo; con bloques angulares mostrando caras de fricción y revestimientos de arcillas grisáceas en ellas; consistencia friable; permeabilidad moderada; fisuras abundantes; raíces finas muy pocas; sin efervescencia al HCl y efervescencia muy fuerte al H₂O₂.

119 cm Manto freático.

**CAPÍTULO 2. PRACTICAS DE MANEJO Y CALIDAD AGRÍCOLA EDÁFICA DEL
DISTRITO DE RIEGO “LOS INSURGENTES”, MÉXICO.**

Prácticas de manejo y calidad agrícola edáfica del distrito de riego “Los Insurgentes”, México.

Ma de la Luz Reséndiz-Paz^a, Arturo Aguirre G. ^b, Ma del Carmen Gutiérrez-Castorena, Alejandro Alarcón^a, Carlos A. Ortiz S. ^a, Gerardo S. Benedicto V. ^a, Antonio Trinidad S. ^a y Patricio Sánchez G. ^a

^a*Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco 56230. Edo. de México, México.*

^b*Departamento de Ciencias Químicas. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán-UNAM, Carretera Cuautitlán-Teoloyucan Km. 2.5. Cuautitlán Izcalli 54714, Edo de México, México.*

Resumen

Los agricultores del distrito de riego “los Insurgentes”, Estado de México, México, han desalinizado sus suelos mediante prácticas agrícolas que incluyen riegos con aguas residuales no tratadas de la ciudad de México. Una forma de conocer el impacto de estas prácticas en los suelos, así como su eficiencia para desalinizar, es valorando la calidad agrícola edáfica. Con este propósito y para identificar los parámetros más sensibles a las prácticas agrícolas, se colectaron muestras de los suelos de la capa arable y de la biomasa aérea de los forrajes principales de la zona. Los suelos fueron analizados para diferentes parámetros físicos, químicos y biológicos; y con la biomasa se estimó la productividad agrícola. Los resultados mostraron que el uso de materiales de textura franca, la incorporación de mejoradores con alto contenido de calcio y materia orgánica, además de los riegos con aguas residuales controlados que evitan inundaciones, redujeron la sodicidad ($PSI < 15$), la alcalinidad (pH neutro) y la salinidad ($CE < a 0.7 \text{ dS m}^{-1}$) e incrementaron la reserva de CO (hasta $107 \text{ ton C ha}^{-1}$), la actividad biológica (AD de $56 \mu\text{g de TPF g}^{-1}$ de suelo seco d^{-1}) la estabilidad estructural (EE hasta 64.7%) y la productividad agrícola (hasta $180 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de alfalfa). Por lo tanto, las prácticas de manejo mejoraron la calidad agrícola edáfica; aunque el riesgo por contaminación debido al uso de aguas residuales no tratadas demerita su éxito. Los parámetros pH, Na_i , $\text{Ca}^{2+}_{(ac)}$, CIC, CO, N_t , AD y EE fueron los más sensibles a las prácticas de manejo, por lo que constituyen los mejores indicadores de calidad de estos suelos.

Palabras clave: *calidad agrícola edáfica, indicadores de calidad; aguas residuales no tratadas, prácticas de manejo, Antrosoles, análisis de componentes principales*

Abstract

The farmers of the irrigation district "Los Insurgentes", State of Mexico, Mexico, have desalinated their soils through different practices, including sewage irrigation from Mexico City. One way to assess the impact of these practices in the soil as well as its particular efficiency for desalination, is through the agricultural soil quality assessment. To this purpose and to identify the more sensitive parameters to the management practices, soil and biomass samples were collected from crop fields and forage. Soils were analyzed for different physical, chemical and biological parameters; and with the biomass it was estimated the agricultural productivity. Results showed that the use of loamy materials, the incorporation of amendments with high calcium content and organic matter, as well as the controlled irrigation with wastewater to prevent floods, they all reduced the sodicity, alkalinity and salinity ($PSI < 15$, neutral pH and $EC < 0.7 \text{ dS m}^{-1}$), and raised the CO reserve (up $107 \text{ ton C ha}^{-1}$), the biological activity (AD $56 \mu\text{g of TPF g}^{-1} \text{ of d}^{-1} \text{ dry soil}$), the structural stability (EE up 64.7%) and the agricultural productivity (up to $180 \text{ ton ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of alfalfa). Therefore, these management practices increased the agricultural soil quality; although the contamination risk by the use of untreated wastewater may jeopardize their success. The most sensitive parameters to management practices were pH, Na_i , $\text{Ca}^{2+}_{(ac)}$, CIC, CO, N_t , AD, and EE, so these parameters are the best soil quality indicators.

Keywords: *agricultural soil quality, soil quality indicators, sewage water, management practices, Anthrosols, principal component analysis*

1. Introducción

En la zona periurbana de la ciudad de México el uso de aguas residuales no tratadas en la agricultura se ha incrementado, debido a que su producción continua permite la actividad agrícola durante todo el año. Adicionalmente, las aguas residuales pueden proveer a los suelos de materia orgánica y nutrientes útiles para los cultivos (Ortega-Larrocea et al., 2001; Jiménez et al., 2005; Lucho-Constantino, et al., 2005). La ciudad de México produce en la temporada de sequía hasta $45 \text{ m}^3 \text{ seg}^{-1}$ de aguas residuales, de los cuales la mayoría se destina a la agricultura en el valle del Mezquital, Estado de Hidalgo (aproximadamente 100 km al norte de la ciudad de México) (Jiménez, 2005). Sin embargo, antes de llegar a este lugar, las aguas residuales se utilizan en las zonas agrícolas aledañas a los canales por los que se transporta, aunque presentan una calidad menor (Downs et al., 2000, Jiménez et al., 2005). Una de estas zonas es el distrito de riego “Los Insurgentes” establecido en 1976 en las inmediaciones de la Laguna de Zumpango, Estado de México (Maldonado, 2005). Los suelos de este distrito, adicionalmente, fueron diagnosticados como salinos, por lo que se clasificaron como no aptos para la agricultura (Maldonado, 2005); sin embargo, el panorama que se observa actualmente es predominantemente agrícola. Con la finalidad de conocer las estrategias que permitieron la rehabilitación de estos suelos, Reséndiz et al. (Capítulo 1) realizaron un levantamiento etnoedafológico de suelos, y encontraron que los agricultores de la zona han efectuado prácticas que van desde enterrar los suelos nativos con suelos de textura franca no salinos, hasta la desalinización y desodificación a través del uso de mejoradores químicos que liberan calcio (yeso y suelos calcáreos), mejoradores orgánicos (estiércol) y riegos con aguas residuales. Con estas estrategias se rehabilitaron 84% de los suelos de la zona y se modificaron las propiedades edáficas de forma que actualmente los suelos se clasifican como Antrosoles (Reséndiz et al., Capítulo 1); no obstante, las prácticas antrópicas son diferentes para cada clase de suelo (tierra) y en consecuencia se observan diferentes niveles de rehabilitación.

Una forma de evaluar la eficiencia de las prácticas de manejo en la recuperación de suelos salinos, es valorando la calidad agrícola de los suelos actuales, conocimiento que además permite identificar si la función del suelo es sostenible (Shukla et al., 2006) o si están ocurriendo procesos de degradación (Qi et al., 2009). Si la calidad del suelo no es sostenible, su valoración

enfatisa la necesidad de llevar a cabo medidas de remediación y/o implementar prácticas de manejo adecuadas para prevenir la degradación del recurso (Rezaei et al., 2006; Mandal et al., 2008; Qi et al., 2009).

La valoración de la calidad de un suelo se realiza a través de la evaluación de parámetros y/o procesos que son claves para llevar a cabo la función que se les ha designado, así como factores específicos del lugar como es el uso del suelo y las prácticas de manejo (Andrews et al., 2004; Karlen et al., 2008; Mandal et al., 2008, Qi et al., 2009). Estos parámetros han sido denominados indicadores de la calidad del suelo (Bastida et al., 2008) y deben reunir las siguientes características: 1) integrar propiedades y/o procesos físicos, químicos y biológicos, 2) ser aplicables bajo diversas condiciones de campo, y 3) complementar las bases de datos existentes (Bautista et al., 2004; De la Rosa, 2005, Shukla et al., 2006). No obstante, estos criterios de selección generan un gran número de parámetros indicadores de calidad, lo que deriva en que los resultados de diferentes investigaciones sean difícilmente comparables (Karlen et al., 2008). En consecuencia, existe la necesidad de reducir y estandarizar el número de propiedades indicadoras de la calidad del suelo (Rezaei et al., 2006; Bastida et al., 2008), donde el análisis multivariado ha mostrado ser una herramienta útil (Shukla et al., 2006). Los objetivos de la presente investigación fueron: (1) Determinar el impacto de las prácticas de manejo (mejoradores y aguas residuales) en las propiedades edáficas relacionadas con la calidad agrícola, y (2) Identificar los indicadores de calidad más sensibles al manejo antrópico de los suelos del distrito de riego “Los Insurgentes”, México

2. Materiales y Métodos

2.1. Zona de estudio

El presente estudio se realizó dentro del distrito de riego “Los Insurgentes” en un valle agrícola de 450 ha que se ubica en la periferia de la Laguna de Zumpango, Municipio de Teoloyucan, Estado de México, México. El área se localiza entre las coordenadas de 19°43'11" y 19°47'11" de latitud N, y 99°43'15" y 99°12'57" de longitud W, a 2250 m de altitud (Figura 1). Esta zona ha sido irrigada con aguas residuales no tratadas de la ciudad de México por poco más de tres décadas (Maldonado, 2005). La zona presenta un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano; con una temperatura media anual que oscila entre los 11.3 y 17.7 °C y una precipitación

media anual de 598.8 mm distribuida entre mayo y octubre (SMN, 2010). Los suelos se clasifican taxonómicamente como Antrosoles hidrágicos térricos gléyicos (WRB, 2007), y localmente se designan como tierras lamas y negras con subtipos de acuerdo con la salinidad (Reséndiz et al. Capítulo 1), todos ellos valorados en la presente investigación.

2.2. Características y prácticas de manejo de las clases de tierra locales

Tierras lamas. Estas tierras ocupan una superficie de 96 ha y se formaron a partir de la adición de materiales de textura franca que sepultaron los suelos arcillosos salinos originales. La tierra lama (subtipo no salino) ocupa una superficie de 58.5 ha y en ella se practican riegos frecuentes con aguas residuales donde se evita la formación de zonas anegadas y se incorpora estiércol durante todo el año; el cultivo principal es la alfalfa. Asimismo, la tierra lama salina ocupa una superficie de 37.5 ha; se ubica en la periferia de la laguna de Zumpango y presenta costras salinas superficiales; en esta clase, rara vez se incorpora estiércol o cualquier otro mejorador y no presenta actividad agrícola.

Tierras negras. Estas tierras ocupan una superficie de 279 ha y se formaron a partir de sedimentos arcillosos salinos dragados de la laguna de Zumpango. Dentro de estas, la tierra negra (subtipo no salino) ocupa una superficie de 260 ha y en ella se ha incorporado un mejorador denominado localmente como tierra blanca, que contiene altas cantidades de carbonatos de Ca y Mg (Gutiérrez et al., 1998), así como estiércol (práctica que se lleva a cabo durante todo el año). También se llevan a cabo riegos frecuentes con aguas residuales donde se evita la formación de zonas anegadas. Los cultivos principales son la alfalfa y el pasto forrajero, aunque algunos agricultores permiten la invasión de sus parcelas con pasto Bermuda (*Cynodon dactylon* L.), a través de los riegos con aguas residuales, para utilizarlo también como forraje. El otro subtipo es la tierra negra salina que ocupa una superficie de ~19 ha y presenta costras salinas superficiales características. En esta tierra se han incorporado mejoradores como yeso, tierra blanca y estiércol, este último de forma esporádica. Es común la formación de zonas anegadas durante el riego, o bien se practican riegos por inundación que duran varios días. Se cultiva principalmente pasto forrajero y avena.

2.3. Trabajo de campo

Para valorar la calidad de los suelos se seleccionaron 13 parcelas representativas de las cuatro clases de tierra con base en el mapa elaborado por Reséndiz et al. (Capítulo 1) (Figura 1). El número de parcelas estuvo en función de su superficie, quedando de la siguiente forma: cuatro parcelas de tierra lama, dos parcelas de tierra lama salina, cinco parcelas de tierra negra y tres parcelas de tierra negra salina. En cada parcela se ubicaron cinco puntos distribuidos al azar y en cada uno de ellos se colectaron dos muestras de suelo a profundidad de la capa arable (0 – 30 cm), cada muestra con una réplica. Una de las muestras se utilizó para determinar la actividad de la enzima deshidrogenasa (AD), por lo que se refrigeró tras su colecta a 4 °C. Todas las muestras fueron transportadas hasta el laboratorio, para su posterior análisis.

La calidad de las clases de tierra locales obtenida a través de los parámetros indicadores, se valoró mediante la productividad agrícola. Para ello, de las 13 parcelas donde se evaluó la calidad edáfica, se excluyeron las parcelas de la tierra lama salina (no agrícolas) y con el cultivo recién establecido o al final de su ciclo productivo. El número final de parcelas en las que se llevó a cabo esta valoración fueron ocho. En cada parcela se ubicaron cinco puntos distribuidos al azar y en cada uno se colectó y se pesó la biomasa aérea fresca del forraje cultivado en 1 m², método utilizado tanto por Saito et al. (2006) como por Rusan et al. (2007). Los cinco datos obtenidos por parcela fueron promediados para obtener un valor único de productividad.

La productividad promedio de las parcelas se utilizó para calcular la productividad total por hectárea, valor que correspondió a un solo corte de biomasa. Sin embargo, la alfalfa, el pasto forrajero y el pasto bermuda producen 14 y 4 cortes por año, respectivamente (Reséndiz et al., (Capítulo 1), información que se utilizó en el cálculo de la productividad anual.

2.4. Procesamiento de las muestras y variables evaluadas

Todas las muestras de suelo, excepto la utilizada para evaluar la actividad enzimática, fueron secadas a la sombra, a temperatura ambiente. Posteriormente, se seleccionaron tres terrones de cada muestra para evaluar la densidad aparente (Da) y el resto del suelo fue molido y tamizado a través de una malla con apertura de 2 mm, para su posterior análisis en el laboratorio.

Los análisis que se realizaron fueron: reacción del suelo (pH) en agua (2:1 p/v), conductividad eléctrica (CE), bases solubles (pasta de saturación), capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (ajustado al Na intercambiable) y bases intercambiables por el método de acetato de amonio (Ca^{2+} y Mg^{2+} fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica y, Na^+ y K^+ por espectrofotometría de emisión de flama). También se evaluó Da (terron en parafina), nitrógeno total (N_t) (micro- Kjeldahl), carbono orgánico (CO) (Walkley y Black), materia orgánica (MO) (calculada multiplicando el valor de CO por el factor 1.9, considerando que el contenido promedio de C en la MO fue de 52.63 % (Aguilar et al., 1987)), y la relación C/N. Todos los métodos anteriores se extrajeron del Manual de Procedimientos Analíticos para Suelos de van Reeuwijk (2003).

La distribución y estabilidad de los agregados (DEA) fue reportada como estabilidad estructural (EE) y diámetro medio ponderado (DMP) y el análisis se basó en la propuesta de Kemper y Rosenau (1986). También se determinó la respiración basal del suelo (RBS) (método de Anderson, 1982), y la actividad de la enzima deshidrogenasa (AD), por el método de Thalmann (1968), modificado por Alef (1995). La RBS se evaluó en muestras de 100 g de suelo, donde el contenido de CO_2 se analizó cada 24 h por cuatro días. Los resultados mostrados representan la suma de las cantidades de CO_2 determinadas durante las 96 h que duró el ensayo. Los análisis de la AD y DEA se realizaron sólo en cinco parcelas, las cuales incluyeron las cuatro clases de tierra locales. Para el análisis de AD, en cada parcela se evaluaron seis muestras, con sus respectivas réplicas; la cantidad de TPF (trifenil formazan) producido se leyó en cuatro réplicas y se determinó a través de una curva patrón [0 – 15 $\mu\text{g/mL}$ de TPF (Sigma) en metanol, cuya ecuación de regresión lineal fue $y = 0.1236x$, con una $R^2 = 0.9965$].

Con la finalidad de establecer comparaciones entre las propiedades edáficas, los datos de calidad de los suelos mostrados son resultado de ocho parcelas modales, las cuales se eligieron por representatividad del manejo específico que se lleva a cabo en las clases de tierra.

2.5. Análisis estadístico

Las diferencias en los parámetros de calidad del suelo por clase de tierra se analizaron a través de un análisis de varianza, utilizando el procedimiento GLM (General Lineal Model) con una prueba de comparación de medias (Tukey, $p = 0.05$). Posteriormente, se realizó un análisis

de correlación de Pearson para determinar las relaciones entre los parámetros edáficos y un análisis de componentes principales (ACP) para identificar los indicadores de calidad más sensibles a las prácticas de manejo, además de reconocer los factores que afectan la función agrícola del suelo y explicar mejor la variabilidad de los datos. En los análisis de correlación y componentes principales no se incluyeron los parámetros de DMP, EE y AD porque se evaluaron solo en cinco parcelas. Todos los procedimientos estadísticos se llevaron a cabo con el programa Statistical Analysis System (SAS) Versión 9 (2002).

3. Resultados

3.1. Propiedades de las clases de tierra y sus relaciones

Los resultados de los parámetros físicos, químicos y biológicos evaluados en las clases de tierra se presentan en los Cuadros 1, 2, y en la Figura 2. La orientación de las prácticas antrópicas hacia la disminución de la salinidad de los suelos originales derivó en que las tierras negra y lama presentaran dominancia de Ca^{2+} en la fase de intercambio, con el consecuente desplazamiento del Na^+ hacia la solución del suelo, exponiéndolo a la lixiviación. En consecuencia, en estos suelos los valores de PSI (< 15), CE ($< 2 \text{ dS m}^{-1}$) y pH (< 7.6) se ubican en el rango de los suelos no salinos. En contraste, la predominancia del Na^+ en la fase de intercambio de las tierras negra salina y lama salina determinaron los valores de PSI, pH y CE característicos de suelos salino sódicos, siendo la tierra lama salina la que presenta los valores más altos (PSI 64.6, pH 10.06 y CE $\sim 12 \text{ dS m}^{-1}$).

La incorporación de estiércol y el riego con aguas residuales, como estrategias de desalinización, han incrementado la reserva de carbono de los suelos, a juzgarse por los contenidos de MO y N_t , que son en general altos, aunque con diferencias entre las clases de tierra. Las clases lama, negra y negra salina presentaron los valores más altos de MO (2.94, 4.12 y 2.75 %) y N_t (0.11, 0.17 y 0.11 %). Por el contrario, la tierra lama salina presentó los valores más bajos de MO (0.93 %) y de N_t (0.07 %). Los altos valores de N_t se traducen en relaciones C/N entre 9.2 y 15.4, lo que indica que la MO que se incorpora a los suelos es fácilmente degradable.

Las diferencias en salinidad, sodicidad y MO en las clases de tierra determinaron la AD y EE. Las tierras lama y negra presentaron la mayor actividad biológica (AD de 45.3 y 56 μg de TPF g^{-1} de suelo seco d^{-1}), y la mayor estabilidad estructural (EE de 64.7 % y 58.3 %). En contraste, las tierras lama salina y negra salina mostraron la menor actividad biológica (AD de 9.9 y 24.8 μg de TPF g^{-1} de suelo seco d^{-1}) y estabilidad estructural (EE de 12.6 y 34.9 %). Estos resultados indican que la EE y AD presentan una relación positiva con el contenido de MO y una relación negativa con la salinidad y sodicidad.

Por otra parte, el DMP indicó que la resistencia de los agregados a la ruptura por humedecimiento en las clases de tierras sigue el siguiente gradiente: lama > negra salina > negra > lama salina. Estos resultados indican que las tierras lamas pueden tener agregados resistentes al agua cuando no son salinas; mientras que en las tierras negras, los agregados son más estables en condiciones de salinidad.

El impacto de la salinidad y la MO observado en los parámetros descritos anteriormente no fue visible en la Da y la RBS. De este hecho dan evidencia los altos valores de Da en todas las clases de tierra (1.45-1.6 g cm^{-3}) y la mayor RBS en las tierras negras (340-358 $\text{mg de CO}_2 \cdot 100 \text{ g} \cdot 96 \text{ h}^{-1}$), a pesar de sus diferencias en salinidad y contenido de MO. Por lo tanto, estos resultados indican que existen otros factores que inciden en la Da y RBS de los suelos estudiados.

Con la finalidad de reafirmar y entender mejor las relaciones entre los parámetros evaluados, se realizó un análisis de correlación de Pearson (Cuadro 3). Las correlaciones negativas significativas ($P=0.05$) entre el sodio (ya sea como PSI o Na_i) y la MO (-0.39) y el N_t (-0.36), reafirmaron el impacto negativo de la sodicidad en la reserva de MO y N_t . La RBS mostró correlaciones negativas significativas ($p \leq 0.05$) con el pH (-0.38), Na intercambiable (-0.37), K intercambiable (-0.36) y PSI (-0.34); mientras que la Da presentó correlaciones significativas ($P=0.05$) positivas y negativas con la CIC (0.35) y el N_t (-0.34), respectivamente.

A pesar de las correlaciones significativas entre varios de los parámetros evaluados, la variabilidad de los datos explicada por los parámetros individuales fue baja (máximo 15%), por

lo que se procedió con el ACP, ya que una de sus aplicaciones es explicar mejor la variabilidad de los datos.

3.2. Indicadores de calidad generales

El ACP además de explicar mejor la variabilidad de los datos, también indica cuales de las variables analizadas son más sensibles a los factores que se están evaluando. Los componentes principales (CP) más significativos se seleccionaron con base en su autovalor (≥ 1) y la varianza explicada ($\geq 10\%$). Así de los 18 CP obtenidos (tantos como variables evaluadas), solo los tres primeros reunieron dichos requisitos, por lo que son los que se utilizaron en esta sección (Cuadro 4). El componente principal uno (CP1) explicó 31 % de la variabilidad total y los parámetros que más contribuyeron están asociados con la salinidad, la sodicidad y la alcalinidad (Na_{ac} , Na_i , CE, K_{ac} , pH, y PSI), los cuales estuvieron negativamente correlacionados con el contenido de CO y N_t , así como con la relación C/N y la RBS. El componente principal dos (CP2) explicó 17 % de la variabilidad total y las variables de mayor peso fueron la CIC, el $\text{Ca}^{2+}_{(\text{ac})}$ y el $\text{Mg}^{2+}_{(\text{ac})}$, por lo tanto este componente está relacionado con la naturaleza de los materiales de relleno y la aplicación de mejoradores fuente de calcio. El componente principal tres (CP3) explicó 13 % de la variabilidad y los parámetros de mayor peso en este fueron el CO, la MO y el N_t , por lo que se relaciona con la incorporación de MO a través de los riegos con las aguas residuales y la adición de estiércol. En resumen, el ACP reveló que las fuentes principales de variación de los suelos estudiados fueron los procesos de sodificación, alcalinización y salinización (CP1), la naturaleza de los materiales usados como relleno y la incorporación de mejoradores que son fuente de calcio (CP2), así como el contenido de materiales orgánicos (CP3). Estas fuentes de variación en conjunto explican dos terceras partes de la variabilidad de los datos. Asimismo, el ACP mostró que los suelos con procesos de sodificación, alcalinización y salinización (CP1) disminuyeron los valores de MO, relación C/N y RBS.

Los parámetros $\text{Na}^{+}_{(\text{ac})}$, Na_i , CE, $\text{K}^{+}_{(\text{ac})}$, pH, PSI, CIC, $\text{Ca}^{2+}_{(\text{ac})}$, $\text{Mg}^{2+}_{(\text{ac})}$, CO, MO y N_t fueron los que más aportaron a los tres primeros CP, por lo que representan de las fuentes principales de variación de los datos, y en consecuencia, podrían utilizarse como los indicadores de calidad de los suelos estudiados. Sin embargo, varios de ellos presentaron correlaciones significativas altas

($p \leq 0.001$) (Cuadro 3), por lo que fueron excluidos, dejando a los parámetros de Na_i , pH, CIC, $\text{Ca}^{2+}_{(ac)}$, CO y N_t como los mejores indicadores de la calidad de los suelos estudiados.

La proyección gráfica de los dos primeros CP asociados con las clases de tierra (Figura 3), por una parte reafirmó que la diferencia entre las tierras lama y negra con sus fases salinas fueron los procesos de sodificación, alcalinización y salinización; de igual forma, las tierras negras fueron diferentes de las tierras lamas por la CIC y la abundancia de $\text{Ca}^{2+}_{(ac)}$ y el $\text{Mg}^{2+}_{(ac)}$. Por otra parte, esta proyección permitió situar a las clases de tierra en un gradiente de calidad con base en su ubicación en el cuadrante positivo y/o negativo del CP1. La clase más alejada del punto de origen y colocada en el cuadrante negativo del CP1, se definió como la de mejor calidad (tierra lama), y la clase de tierra ubicada en el cuadrante positivo del CP1 y alejada del origen fue definida como la de menor calidad (tierra lama salina). Así, el gradiente de calidad establecido por el ACP en las clases de tierras fue el siguiente: lama > negra > negra salina > lama salina.

El gradiente de calidad de las clases de tierra fue evaluado a través de la estimación de la productividad agrícola (Cuadro 5). La productividad agrícola presentó el siguiente gradiente: tierra lama (180 ton de alfalfa $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) > tierra negra (125 ton de alfalfa $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, 60.7 ton de pasto forrajero $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) > tierra negra salina (35.1 ton de pasto forrajero $\text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$). La tierra lama salina no es agrícolamente productiva. En conclusión, el gradiente de productividad ratificó el gradiente de calidad establecido por el ACP.

4. Discusión

4.1. Propiedades de las clases de tierra y prácticas de manejo

4.1.1. Tierras negra y lama

En las tierras lama y negra, el uso de materiales francos, la incorporación de mejoradores con alto contenido de calcio y de materia orgánica, además de los riegos con aguas residuales controlados que evitan inundaciones, disminuyeron la salinidad e incrementaron el contenido de la MO. Estos resultados son evidentes a través de los valores bajos de PSI (< 15), CE (< a 4 dS m^{-1}), y de pH (< a 6.95), y los altos contenidos de la MO (> 2.94 %). Esta última, de acuerdo con la relación C/N (< 14.5), es fácilmente degradable y, en consecuencia, es fuente de nutrientes

útiles para los microorganismos y los cultivos (Duckworth y Cresser, 1991; Gil-Sotres et al., 2005; Núñez, 2008).

Los bajos valores de salinidad y altos contenidos de MO determinaron una alta actividad biológica (valores de la AD mayores a $45 \mu\text{g}$ de TPF g^{-1} de suelo seco d^{-1}), alta estabilidad estructural ($> 58 \%$), y predominancia de mesoagregados mayores a 0.73 mm . Estas condiciones estructurales pueden atribuirse a la alta actividad biológica, ya de acuerdo con Bronick y Lal, (2005), Annabi et al. (2007) y Wong et al. (2010) los microorganismos y los productos derivados de su actividad (polisacáridos, lípidos, materia orgánica particulada y sustancias húmicas), funcionan como agentes estabilizadores de los agregados e incrementan su resistencia a la ruptura en condiciones de humedad.

Las condiciones físicas, químicas y biológicas resultantes de las practicas de manejo en estas clases de tierra, generaron un ambiente adecuado para la germinación, establecimiento y crecimiento de los cultivos de acuerdo con Annabi et al (2007), Abid y Lal, (2008) y Karlen et al. (2008), como lo comprueba su alta productividad agrícola ($> a 125 \text{ ton}$ de alfalfa $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

4.1.2. Tierras negra salina y lama salina

En la tierra negra salina la incorporación esporádica de estiércol y yeso, así como la aplicación de riegos por inundación durante varios días, no han sido prácticas efectivas para su rehabilitación, como lo demuestran sus altos valores de sodicidad ($\text{PSI} > 15$), alcalinidad ($\text{pH} > 8.2$), y salinidad ($\text{CE} > 2 \text{ dS m}^{-1}$). En la tierra lama salina, aunque se originó de sedimentos francos iguales a los de la tierra lama, su cercanía con la Laguna de Zumpango ha ocasionado que el drenaje sea reducido, motivo por el cual de acuerdo con Keren (2000), ha ocurrido un proceso de salinización secundaria que domina su comportamiento. En consecuencia, esta clase de tierra presenta las condiciones de sodicidad ($\text{PSI}=64.6$), alcalinidad ($\text{pH}=10.06$) y salinidad ($\text{CE}=11.93 \text{ dS m}^{-1}$) más elevadas de la zona.

La alta sodicidad de estos suelos con valores de $\text{PSI} > 25$ ha promovido la dispersión de las arcillas, y ésta, a su vez, ha expuesto a la MO para ser mineralizada, lixiviada o erosionada según los criterios de Wong et al. (2010). Estos procesos tienden a reducir la reserva de MO, tal y como se observa en la tierra lama salina que presenta valores bajos de MO, del orden de 0.93% ,

condición que es aún más pronunciada por la frecuencia esporádica de incorporación de estiércol que se lleva a cabo en esta clase de tierra. En contraste, en la tierra negra salina, el alto contenido de MO (2.75 %) es resultado del esfuerzo para rehabilitarla, ya que la sodicidad requiere de incrementar las entradas de MO, para así lograr un balance estacionario de C (Wong et al., 2004). Sin embargo, esta clase de tierra sigue siendo salina, posiblemente debido a la baja frecuencia de incorporación de estiércol, lo que puede afectar la efectividad de la MO para rehabilitar estos suelos (Abiven et al., 2009). Otro factor que dificulta la desalinización de estos suelos, es la alcalinización, proceso que ocasiona la precipitación en carbonatos del calcio adicionado a través del yeso y la tierra blanca. Precipitación que no permite la sustitución del Na^+ del complejo de intercambio (Qadir et al., 2007; Lal, 2009).

De acuerdo con Barzegar et al. (1997), So y Aylmore, (1993) y Wong et al. (2010), la sodicidad dispersa los agregados, fenómeno encontrado en las tierras lama salina y negra salina donde los valores de EE fueron menores a 35 %. Dentro de estas clases, la tierra lama salina presentó la menor EE (~10 %), resultado que es consistente con sus altos valores de sodicidad ($\text{PSI} > 65$). Respecto al DMP, los bajos valores (0.32 mm) en la tierra lama salina indican una baja resistencia de los agregados a la ruptura cuando se hidratan y da evidencia de la dispersión característica de las arcillas en los suelos sódicos (Barzegar et al., 1997; Levi, 2000). Sin embargo, en la tierra negra salina el alto valor de DMP (0.97 mm) implica una mayor resistencia a la ruptura por humedecimiento, que incluso su contraparte no salina, la tierra negra. Esta resistencia puede ser producto de la estabilidad que brinda la alta salinidad a la dispersión de las arcillas, según lo reportan Bolt et al. (1978) y Aguirre (1993), o por su naturaleza arcillosa. La baja resistencia de los agregados de los suelos sódicos a la ruptura en condiciones de humedad, también depende de la presencia de los macroporos (Barzegar et al., 1997; Levy, 2000), los cuales son comunes en la tierra lama salina a consecuencia de su carácter franco. Sin embargo, en la tierra negra salina, la textura arcillosa promueve la formación de microporos que restringen la conductividad hidráulica (Hassink et al., 1993), microporos que además pueden estar colapsados por la sodicidad (Barzegar et al., 1997). En consecuencia, los agregados de estos suelos se endurecen cuando están secos (So y Aylmore, 1993; Churchman et al., 1993; Barzegar et al., 1997; Wong et al., 2010), fenómeno que puede derivar en una mayor resistencia de los agregados a la ruptura.

Desde el punto de vista biológico, el impacto de la sodicidad en la estructura crea un ambiente anóxico, el cual en asociación con la baja disponibilidad de agua y nutrientes, así como con la toxicidad por iones específicos, reducen la actividad biológica (Batra y Manna, 1997; Friedel et al., 2000; Yuan et al., 2007; Raiesi, 2007; Wong et al., 2010), tal y como lo constatan los valores bajos de la AD ($< 25 \mu\text{g de TPF g}^{-1}$ de suelo seco d^{-1}) y la baja productividad agrícola del pasto forrajero en la tierra negra salina (40% menor que la tierra negra) (Cuadro 5).

4.1.3. Emisión de CO₂

La RBS es un parámetro que ha sido utilizado como un indicador de la actividad biológica en los suelos (Oyonarte et al., 2012), por lo que la salinidad y la MO deberían reducir e incentivar la emisión de CO₂ del suelo, respectivamente. Al respecto, el análisis de correlación mostró un impacto negativo de la sodicidad en la RBS (Cuadro 3), resultado que es consistente con el efecto nocivo de la sodicidad en la actividad biológica. Sin embargo, la mayor emisión de CO₂ ($> 340 \text{ mg de CO}_2 \cdot 100 \text{ g} \cdot 96 \text{ h}^{-1}$) ocurrió en las tierras negras a pesar de sus diferencias en MO y salinidad (Figura 2). En estos suelos, otro factor que puede determinar la alta emisión de CO₂, es la presencia de carbonatos (Tamir et al., 2011) derivados tanto de los procesos de alcalinización, que propician la formación de carbonatos secundarios (Bronick y Lal, 2005; Qadir et al., 2007; Wong et al., 2010), como de la incorporación de tierra blanca. Por lo tanto, la emisión de CO₂ originado de la descomposición de los materiales orgánicos, puede ser enmascarado por el CO₂ que proviene de los carbonatos inherentes o adicionados a través de los mejoradores minerales.

4.1.4. Densidad aparente

La densidad aparente es un parámetro que ha sido utilizado como indicador de la calidad física de los suelos (Karlen et al., 2008), porque se relaciona con el proceso de la compactación (Houlbrooke et al., 1997). Este proceso determina el desarrollo y volumen de exploración de la raíz, y en consecuencia, determina la capacidad de absorción de agua y de nutrimentos de las plantas (Karlen et al., 2008). De acuerdo con Annabi et al. (2007), Abiven et al. (2009) y Mastro et al. (2009) la Da de un suelo se relaciona con el contenido de MO, arcillas y sodio; donde la MO reduce los valores de Da y las arcillas y el sodio incrementan los valores de este parámetro. Sin embargo, en la presente investigación todas las clases de tierra presentaron valores de Da

altos (hasta 1.78 g cm^{-3}), a pesar de sus diferencias en textura, contenidos de MO y sodicidad. Por lo tanto, estos resultados dan evidencia de otros factores que inciden en la floculación de los agregados y corroboran los altos valores de D_a observados en los perfiles de las clases de tierra, a pesar de las variaciones en el contenido de MO y sodicidad (Reséndiz et al., Capítulo 1). En dicho trabajo se propuso que las arcillas amorfas son los agentes responsables de la estabilización de los agregados en la zona incluyendo la alta D_a . El fundamento de esta hipótesis fue que las arcillas amorfas son compuestos comunes en el área, debido a que estos suelos se ubican dentro del Eje Neovolcánico (Gutiérrez-Castorena et al., 2005), además presentan una alta capacidad de estabilización de los agregados (Goldberg y Glaubig, 1987; Bronick y Lal, 2005; Annabi et al., 2007; Abiven et al., 2009), aun en condiciones de sodicidad y saturación hídrica (Churchman et al., 1993; Acevedo et al., 2004; Aguirre, 2007). Asimismo, los agregados estabilizados por arcillas amorfas cuando se secan se contraen y su recuperación se vuelve irreversible, por lo que pueden modificarse algunas propiedades físicas como la porosidad (Gutiérrez-Castorena et al., 2005; Woingner et al., 2007); y en consecuencia, se pueden incrementar los valores de D_a . Los resultados de la presente investigación apoyan dicha hipótesis, ya que se encontró una correlación positiva entre la D_a y la CIC (parámetro que está en función de la densidad de cargas de las arcillas) y una correlación negativa con los valores de N_t . Esta última correlación, también puede atribuirse a las arcillas amorfas, ya que presentan la capacidad de inmovilizar N, especialmente en forma de NH_4^+ (Okamura y Wada, 1983; Nakara y Wada, 1994; Dendooven et al., 2010) que deriva en una menor cantidad de N extraíble durante la cuantificación del N_t . El NH_4^+ es una forma de N abundante en los suelos regados con aguas residuales y con incorporación de estiércol (Amon et al., 2001; Dendooven et al., 2010).

4.1.5. Prácticas de manejo y reserva de carbono de los suelos

Desde el punto de vista ecológico, la sodicidad provoca una baja capacidad de secuestro de carbono de los suelos; sin embargo, estos suelos pueden ser importantes sumideros de carbono cuando son recuperados (Lal, 2009; Wong et al., 2010). En este sentido, la alta estabilidad de los agregados y su resistencia a la ruptura por humedecimiento en las clases de tierra con mayor contenido de MO, dan evidencia del impacto positivo de las prácticas de manejo en la capacidad de secuestro de carbono de los suelos. Los porcentajes de CO en las

tierras negra, lama, negra salina y lama salina equivalen a 107.4, 76.7, 71.3 y 24.1 ton de C ha⁻¹, respectivamente. Estas reservas de C, aún en la tierra lama salina, superan los objetivos de secuestro de carbono de proyectos de protección forestal y agroforestería en áreas que van desde las zonas áridas y semiáridas hasta los bosques forestales tropicales, según lo reportado por la FAO (2004), lo que ratifica la importancia de la reserva de C en los suelos, como estrategia para mitigar el calentamiento global.

Dada la baja relación C/N de la MO que se incorpora en la zona, se podría esperar la rápida liberación del C hacia la atmósfera a través de la respiración microbiana. Sin embargo, las correlaciones bajas y negativas entre los valores de RBS y MO con la sodicidad (Cuadro 3); así como los altos valores de EE y DMP en las tierras lama, negra y negra salina (Cuadro 2), indican una baja disponibilidad de la MO para los microorganismos. De acuerdo con Jiménez y Lal (2006) y Lützow et al. (2006), algunos factores que pueden restringir la disponibilidad de la MO para los microorganismos, son la formación de complejos organominerales y la baja accesibilidad a la misma. Los complejos organominerales se forman en presencia de cationes polivalentes (por ej. Ca²⁺, Mg²⁺, Fe³⁺ y Al³⁺) que actúan como puentes entre la fase mineral del suelo y la MO, dando como resultado agregados altamente estables en medio acuoso (Bronick y Lal, 2005; Jiménez y Lal, 2006; Wong et al., 2010). Asimismo, de acuerdo con Hassink et al. (1993) y Juma, (1993) la accesibilidad de los seres vivos a la MO puede restringirse por valores de Da altos, debido a la predominancia de microporos que restringen el paso de los microorganismos. Adicionalmente, Wong et al. (2010) también incluyen a la salinidad y la presencia de carbonatos, como factores que restringen la accesibilidad de la MO a los microorganismos, ya que la salinidad, especialmente cuando predominan los cationes divalentes, tiende a flocular los agregados del suelo, mientras que los carbonatos funcionan como agentes cementantes.

4.2. Calidad de las clases de tierra y sus indicadores

El ACP identificó a los procesos de sodificación, alcalinización y salinización, a la CIC, y a los contenidos de Ca²⁺_(ac), Mg²⁺_(ac), CO y N_t, como los factores principales de variación de los datos, que en conjunto explican dos terceras partes de la variabilidad total. Estos factores dan evidencia del gran impacto de las prácticas antrópicas en los suelos del área, ya que todos ellos

dependen de alguna práctica agrícola en particular. Los procesos de sodificación, alcalinización y salinización representan las condiciones originales de los sedimentos que dieron origen a estos suelos y su presencia depende de la eficiencia de las prácticas de manejo para erradicar el problema. De igual forma, las diferencias en CIC y abundancia de $\text{Ca}^{2+}_{(\text{ac})}$, $\text{Mg}^{2+}_{(\text{ac})}$ son resultado de los materiales de relleno utilizados en la nivelación de las parcelas durante el establecimiento del Distrito de Riego (Reséndiz et al., (Capítulo 1)); así como de la incorporación de tierra blanca y yeso. Finalmente, el contenido de CO y de N_t es resultado de la incorporación de MO a través de las aguas residuales y el estiércol.

De los factores principales de variación de los datos, los procesos de sodificación, alcalinización y salinización fueron asociados con la reducción de la función agrícola de los suelos, ya que su presencia y magnitud permitió deducir el siguiente gradiente de calidad: lama > negra > negra salina > lama salina (Figura 3). Este gradiente no solo es consistente con el grado de salinidad de los suelos, sino también con el contenido de MO, N_t , la actividad biológica (AD), la estabilidad estructural (EE) y la productividad agrícola. Las tierras lama y negra, que son las de mayor calidad, presentaron los valores más bajos de sodicidad ($\text{PSI} < 15$), de salinidad ($\text{CE} < 0.7 \text{ dS m}^{-1}$), y valores de pH que tienden a la neutralidad. Además, estas clases de tierra presentaron altos contenidos de MO ($> 2.9 \%$) y de N_t ($> 0.12 \%$); así como una alta actividad biológica ($\text{AD} > 45 \mu\text{g de TPF g}^{-1}$ de suelo seco d^{-1}), alta estabilidad estructural ($> 58 \%$), y alta productividad agrícola ($> 125 \text{ ton de alfalfa ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). En contraste, las tierras negra salina y lama salina que son las de menor calidad, presentaron los valores más altos de sodicidad ($\text{PSI} > 25$), de alcalinidad ($\text{pH} > 8.6$), y de salinidad ($\text{CE} > 3 \text{ dS m}^{-1}$). Estos suelos también presentaron valores bajos de MO ($< 2.75 \%$) y N_t ($< 0.12\%$), baja actividad biológica ($\text{AD} < 25 \mu\text{g de TPF g}^{-1}$ de suelo seco d^{-1}), baja estabilidad estructural ($\text{EE} < 35 \%$), y baja productividad agrícola ($35 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de pasto forrajero en la tierra negra salina, 40% menos que en la tierra negra). En la tierra lama salina las condiciones de salinidad son tan altas que no han permitido su incorporación a la agricultura.

El comportamiento de las propiedades edáficas evaluadas en las clases de tierra y el ACP, permitieron identificar a los parámetros de Na_i , pH, CIC, $\text{Ca}^{2+}_{(\text{ac})}$, CO, N_t , EE y AD como los más sensibles a las prácticas de manejo, por lo que constituyen los mejores indicadores de

calidad de los suelos estudiados. De estos parámetros, el pH, CIC, N, MO y AD son propiedades ya ampliamente reconocidas como indicadores de la calidad (Gianfreda et al., 2005; Gil-Sotres et al., 2005; Shukla et al., 2006; Bielinska et al., 2008; Karlen et al., 2008 y Sharma et al., 2011). Adicionalmente, en los suelos regados con aguas residuales también se utiliza el Na_i como indicador de calidad (Andrews et al., 2002). No obstante, en la zona de estudio el Na_i también es un indicador de la naturaleza salina de los sedimentos lacustres que originaron estos suelos (Reséndiz et al., Capítulo 1).

Las prácticas que se han llevado a cabo en el área para desalinizar los suelos son ampliamente reconocidas (Mkrtchyan, 1991; Naidu y Rengasamy, 1993; García-Orenes et al., 2005; Tejada et al., 2006; Qureshi et al., 2008, Wong et al., 2010); no así el uso de aguas residuales no tratadas, aunque es una práctica común en el Valle de México (Luna-Guido et al., 2000; Ruíz-Romero et al., 2009). Estas prácticas han generado condiciones favorables para la agricultura en 84% de los suelos de la zona (Reséndiz et al., Capítulo 1) como lo demuestra la mejor calidad edáfica, el incremento en la reserva de CO y la alta productividad agrícola de las clases de tierra rehabilitadas. Cabe mencionar que la productividad agrícola de la alfalfa estimada en este trabajo supera las 120 Ton ha^{-1} reportadas para este forraje en el valle del Mezquital (Jiménez, 2005).

A pesar del impacto positivo de las practicas manejo en estos suelos, el riesgo de contaminación por metales pesados y agentes biológicos son problemas latentes en la zona, a causa del uso de agua residuales domésticas e industriales no tratadas (Downs et al., 2000; Friedel et al., 2000; Vázquez – Alarcón et al., 2001; Jiménez, 2005; Lucho – Constantino et al., 2005). Por lo tanto, el uso de las aguas residuales no tratadas de la ciudad de México compromete el éxito de las prácticas antrópicas en la rehabilitación de estos suelos.

5. Conclusiones

En el distrito de riego “Los Insurgentes”, México, el uso de materiales de relleno con texturas francas, la incorporación de mejoradores minerales fuente de calcio, la aplicación de estiércol, así como los riegos con aguas residuales donde no se permite la formación de zonas anegadas, como estrategias de desalinización, resultó en el incremento de la calidad agrícola de los suelos (tierras). El gradiente de calidad de las clases de tierra fue: lama > negra > negra salina

> lama salina, donde el incremento en la calidad estuvo representado por la reducción de la salinidad ($PSI < 15$, pH neutro y $CE < 0.7 \text{ dS m}^{-1}$) y el incremento de la reserva de CO (hasta $107 \text{ ton C ha}^{-1}$), de la actividad biológica (AD de $56 \mu\text{g}$ de TPF g^{-1} de suelo seco d^{-1}), de la estabilidad estructural (EE hasta 64.7%) y de la productividad agrícola (hasta $180 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de alfalfa). El ACP, además de reafirmar el gradiente de calidad, también determinó que dos terceras partes de la variabilidad de los datos se explican a través de tres factores principales: 1) la relación salinidad – sodicidad – alcalinidad, 2) la CIC y la abundancia de $\text{Ca}^{2+}_{(\text{ac})}$ y $\text{Mg}^{2+}_{(\text{ac})}$, y 3) la abundancia de materiales orgánicos, todos ellos son resultado o han sido modificados por las prácticas agrícolas. De estos factores, la relación salinidad – sodicidad – alcalinidad constituye el factor principal que se asocia con la disminución de la función agrícola del suelo. Las variables más sensibles a las prácticas de manejo, obtenidas a través del ACP y el análisis de las propiedades de las clases de tierra fueron: pH, Na_i , $\text{Ca}^{2+}_{(\text{ac})}$, CIC, CO, N_t , AD y EE, por lo que constituyen los mejores indicadores de calidad agrícola de los suelos de la zona. Estos resultados muestran que las prácticas agrícolas mejoraron la calidad agrícola de los suelos; no obstante, el riesgo por contaminación de metales pesados y agentes biológicos, derivados del uso de aguas residuales no tratadas compromete su éxito y, en consecuencia, el esfuerzo de los agricultores para rehabilitar estos suelos.

6. Literatura citada

- Abid, M., Lal, R., 2008. Tillage and drainage impact on soil quality I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. *Soil & Till. Res.*, 100: 89–98.
- Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C., 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability-A literature analysis. *Soil Biol. & Biochem.*, 41: 1-12
- Aguilar, S.A., Etchevers, B. J. D., Castellanos, R. J. Z., 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México.
- Aguirre G., A., 1993. Química de los suelos salinos y sódicos. UNAM, México.
- Aguirre G., A., 2007. Química de los suelos de Inundación Temporal y perenne. UNAM, México.
- Alef, K., 1995. Dehydrogenase activity. *In*: K. Alef and P. Nannipieri (Eds). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press, London, UK.

- Amon, B., Amon, Th., Boxberger, J., Alt, Ch., 2001. Emissions of NH₃, N₂O and CH₄ from dairy cows housed in a farmyard manure tying stall (housing, manure storage, manure spreading). *Nut Cycling in Agroecosystems*, 60: 103-113.
- Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M., Le Bissonnais, Y., 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *SSSAJ*, 71, 2, 413-423.
- Anderson, J. P. E., 1982. Soil respiration. In: Page Al (ed) *Methods of soil analysis, part 2*, (2nd ed.) Soil Sci Soc Am, Madison Wisconsin.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., Cambardella C. A., 2004. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *SSSAJ*, 68: 1945-1962.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., Mitchell J. P., 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agri Eco & Environ*, 90: 25-45.
- Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M., Le Bissonnais, Y., 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *SSSAJ*, 71, 2: 413-423.
- Barzegar, A. R., Nelson, P. L., Oades, J. M., Rengasamy, P., 1997. Organic matter, sodicity, and clay type: Influence on soil aggregation. *SSSAJ*, 61:1131-1137.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., García, C., 2008. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. *Geoderma*, 147: 159-171.
- Batra, I. and Manna, M. C., 1997. Dehydrogenase activity and microbial biomass carbon in salt-affected soils of semiarid and arid regions. *Arid Soil Res & Reha*, 11: 295-303.
- Bautista, C. A.; Etchevers, B. J.; del Castillo, R. F. Gutiérrez, C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13, 2: 90-97.
- Bielinska, E.J., Mocek, A., Paul-Lis, M., 2008. Impact of the tillage system on the enzymatic activity of typologically diverse soils. *J Res Appli in Agri Engineering*, 53, 3: 10-13.
- Bolt, G. H., 1978. Surface interaction between the solid phase and the soil solution. In: *Soil Chemistry Part "A". Basic Elements*. Bolt, G. H. y M. G. M. Bruggenwert (Eds.), 2a. Ed., Elsevier, North-Holland, INC.
- Bronick, C. J. and Lal., R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3-22.
- Churchman, G. J., Skjemstad, J. O. and Oades, J. M., 1993. Influence of clay minerals and organic matter on effects of sodicity on soils. *Aust J Soil Res*, 31: 779-800.
- De la Rosa, D., 2005. Soil quality evaluation and monitoring based on land evaluation. *Land Degrad & Develop*, 16: 551-559.

- Dendooven, L., Alcántara H., R. J., Valenzuela E., C., Luna G., M., Pérez G., F., Marsch, R., 2010. Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: A review. *Soil Biol & Biochem*, 42, 865-877.
- Downs, T. J., Cifuentes, E., Ruth, E., Suffet, I., 2000. Effectiveness of natural treatment in a wastewater irrigation district of the Mexico City Region: A synoptic Field Survey. *Water Environ Res*, 7, 1: 4-21.
- Duckworth, C. M. S. and Cresser., M. S., 1991. Factors influencing nitrogen retention in forest soils. *Environ Pollution*, 72: 1-21.
- Friedel, J. K., Langer, T., Siebe, C., Stahr, K., 2000. Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in Central México. *Biol Fertil Soils*, 31: 414-421.
- García-Orenes, F., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., Gómez, I., Mataix-Beneyto, J., 2005. Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil & Till Res*, 82: 65-76.
- Gianfreda, L., Rao, M. A., Piotrwska, A., Palumbo, G., Colombo C., 2005. Soil Enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. *Sci Tot Environ*, 341, 265-279.
- Gil-Sotres, F., Trasar-Cepeda, C., Leirós, M. C., Seoane, S., 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol & Biochem*, 37, 877-887.
- Goldberg, S. and Glaubig, R. A., 1987. Effect of cation saturation, pH, and aluminum and iron oxide on the flocculation of kaolinite and montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 35, 3: 220-227.
- Gutiérrez-Castorena, M.C., Stoops, G., Ortiz S., C.A., Ávila, G.L., 2005. Amorphous silica materials in soils and sediments of the Ex-lago de Texcoco, Mexico: an explanation for its subsidence. *Catena*, 60: 205-226.
- Gutiérrez C., M. C., Stoops, G., Ortiz S., C. A., 1998. Carbonato de calcio en los suelos del ex Lago de Texcoco. *Terra*, 16, 1: 11-19.
- Hassink, J., Bouwman, L. A, Zwart, K. B., Bloem, J. and Brussaard, L., 1993. Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils. *Geoderma*, 57: 105-128.
- Houlbrooke, D. J., Thom, E. R., Chapman, R., Mc Lay, C. D. A., 1997. A study of the effects of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines. *New Zealand J Agri Res*, 40: 429-435.
- Jiménez, C. B. E., 2005. El Mezquital, México: The largest Irrigation District Using Wastewater. *In: Water Reuse for Irrigation: Agriculture, Landscapes, and Turfgrass*. Lazarova V. and A. Bahri (eds.). CRC. Washington D. C.

- Jiménez, J. J., and Lal, R., 2006. Mechanisms of C sequestration in soils of Latin America. *Critical Rev Plant Sci*, 25: 337-365.
- Juma, N. G., 1993. Interrelationships between soil structure/texture, soil biota/soil organic matter and crop production. *Geoderma*, 57: 3-30.
- Karlen, K. L., Andrews, S. S., Wienhold, B. J. and Zobeck, T. M., 2008. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. *Electronic J Integr Biosc*, 6,1: 3-14.
- Kemper. W., and Rosenau, C., 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Agronomy 9. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. ASA, SSSA. Madison WI, 425-442.
- Keren, R., 2000. Salinity. *In: Sumner M (ed.). Handbook of Soil Science*. CRC Washington D. C. pp. B-25-B-84.
- Lal, R., 2009. Carbon sequestration in saline soils. *J Soil Salinity & Water Quality*, 1 y 2: 30-40.
- Levy, G. J., 2000. Sodicity. *In: Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. G-27-G-63.
- Lucho-Constantino, C. A., Prieto-García, F., Del Razo L. M., Rodríguez-Vázquez, R., Poggi-Varaldo, H. M., 2005. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agri Eco & Environ*, 108: 57-71.
- Luna-Guido, M. L., Beltrán-Hernández, R. I., Solís-Ceballos, N. A., Hernández-Chávez, N., Mercado-García, F., Catt, J. A., Olalde-Portugal, V., Dendooven, L., 2000. Chemical and biological characteristics of alkaline saline soils from the former Lake Texcoco as affected by artificial drainage. *Biol Fertil Soils*, 132: 102-108.
- Lützow, M. V., Kögel – Knabner. I., Ekschmith, K., Matzner, E. Guggenberger, G. Marschner, B. & Flessa H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review. *European J soil Sci*, 57: 426-445.
- 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. *N. Antropología (UNAM)*, 19, 64: 75-97.
- Mandal, U. K., Warrington, D. N., Bhardwaj, A. K., Bar-Tal, A., Kautsky, L., Minz, D., Levy, G. J., 2008. Evaluating impact of irrigation water quality on calcareous clay soil using principal component analysis. *Geoderma*, 144: 189-197.
- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., Patra, A. K., 2009. Changes in soil quality indicators under long-term sewage irrigation in a sub-tropical environment. *Environ Geol*, 56: 1237-1243.
- Mkrtchyan, S. M. 1991. Ameliorative processes in saline sodic soils. *J Indian Soil Sci.*, 39: 212-214.

- Naidu, R. and Rengasamy, P., 1993. Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. *Australian J Soil Res*, 31: 801-819.
- Nakahara, O. and Wada, S. I., 1994. Ca^{2+} and Mg^{2+} adsorption by and allophanic and humic Andisol. *Geoderma*, 61: 203-212.
- Núñez, E. R. 2008. El suelo como medio natural en la nutrición de cultivos. *In: Alcantar G. G y Trejo T.L. (eds). Nutrición de cultivos. Mundi-Prensa. México. Pp. 93-157.*
- Okamura, Y. and Wada, K., 1983. Electric charge characteristics of horizons of Ando (B) and red-yellow B soils and weathered pumices. *J Soil Sci*, 34: 287-295.
- Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO) 2004. A review of carbon sequestration projects, Roma.
- Ortega-Larrocea, M.P, Siebe, C., Bécard, G., Méndez, I., Webster, R., 2001. Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soils of the Mezquital Valley of Mexico. *Applied Soil Ecology*, 16: 149-157.
- Oyonarte, C., Rey, A., Raimundo, J., Miralles, I., Escribano, P. 2012. The use of soil respiration as an ecological indicator in arid ecosystems of the SE of Spain: Spatial variability and controlling factors. *Ecological Indicators*, 14, 40-49.
- Qadir, M., Oster, J. D., Schubert, S., Noble, A. D. and Sahawat, K. L., 2007. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in Agronomy*, 96: 199-247.
- Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., Gu, Z., 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149: 325-334.
- Qureshi, A. S., McCornick, P. G., Qadir, M., Aslam, Z., 2008. Managing salinity and waterlogging in the Indus Basin of Pakistan. *Agric Water Manage*, 95: 1-10.
- Raiesi, F., 2007. The conversion of overgrazed pastures to almond orchards and alfalfa cropping systems may favor microbial indicators of soil quality in Central Iran. *Agri Eco & Environ*, 121: 309-318.
- Reséndiz P., M. L., Gutiérrez C., M. C., Gutiérrez C., E. V., Ortiz S., C. A., Cajuste B., L., Sánchez G., P., Local Knowledge and management of antrosols in the valley of Mexico. *Geoderma* (enviado para publicarse).
- Rezaei, S. A., Gilkes R. J. Andrews, S. S., 2006. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands. *Geoderma*, 136: 229-234.
- Ruíz-Romero, E., Alcántara Hernández, R., Cruz-Mondragon, C., Marsh, R., Luna-Guido, M. L., Dendooven. L. 2009. Denitrification in extreme alkaline soils of the former lake Texcoco. *Plant Soil*, 319: 247-257.
- Rusan, M. J. Hinnawi, M., Rousan S., 2007. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, 215: 143 – 152.

Saito, K. Linquist, B., Keobualapha, B., Shiraiwa, T., Horie, T., 2006. Farmers' knowledge of soils in relation to cropping practices: A case study of farmers in upland rice based slash-and-burn different organic materials. *Agri Eco & Environ*, 31: 325-335

Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales climatológicas 1971-2000 de la estación meteorológica 15115, Santo Tomás, Teoloyucan. Disponible en: <http://smn.cna.gob.mx> (consultada dic. 2010)

Sharma, S. K., Ramesh, A., Sharma, M. P., Joshi, O. P., Govaerts, B., Steenwerth, K. L. and Karlen, D. L., 2011. Microbial community structure and diversity as indicators for evaluating soil quality. *In*: E. Lichtfouse (ed.), *Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture, Sustainable Agriculture Reviews*, 5, Springer – Verlag, Berlin., 317-358.

Shukla, M. K., Lal, R., Ebinger, M., 2005. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil & Till Res* 87: 194-204.

So, H. B. and Aylmore, A. G., 1993. How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behavior. *Aust J Soil Res*, 31: 761-777.

Tamir, G., Shenker, M., Heller, H., Bloom, R. R., Bar-Tal, P. F. A., 2011. Can soil carbonate dissolution lead to over estimation of soil respiration? *SSSAJ*, 75, 4: 1388-1396.

Tejada, M., García, C., González, J. L., Hernández, M. T., 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biol & Biochem*, 38: 1413-1421.

van Reeuwijk., 2003. *Procedimientos para el análisis de suelos clasificación y correlación*. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco, México.

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

Woingnier, T., Pochet, G., Doumenc, H., Dieudonné, P., Duffours, L., 2007. Allophane: a natural gel in volcanic soils with interesting environmental properties. *J. Sol-Gel Sci Techn*, 41, 25-30.

Wong, V. N. L., Greene, R. S. B., Murphy, B. and Dalal, R., 2004. The effects of salinity and sodicity on soil carbon turnover. 3rd Australian New Zeland Soils Conference, 5-9 dec, 2004. University of Sidney, Australia.

Wong. V. N. L., Greene, R. S. B., Dalal, R. C., Murphy, B. W., 2010. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review. *Soil Use & Manage*, 26: 2-11.

Yuan, B. H., Li, Z. Z., Liu, H., Gao, M., Zhang, Y. Y., 2007. Microbial biomass and activity in salt affected soils under arid conditions. *App Soil Eco*, 35: 319-328.

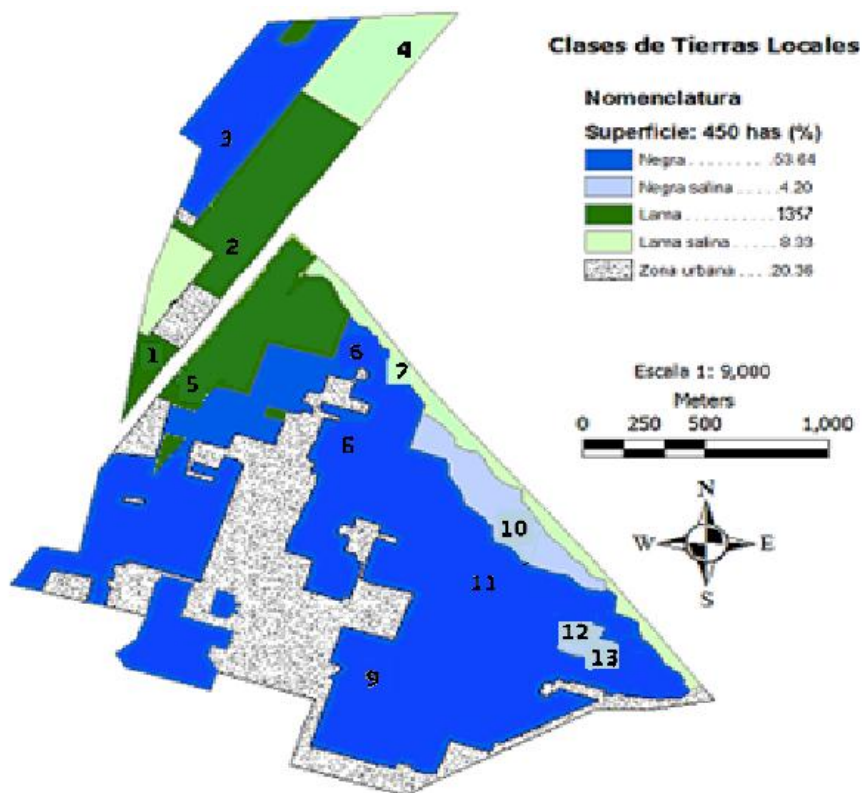


Figura 1. Zona de estudio. Los números muestran las parcelas donde se evaluó calidad agrícola del suelo.

Cuadro 1. Propiedades químicas evaluadas en las clases de tierras locales.

Clase de tierra	CE (dSm ⁻¹)	pH (2:1) (H ₂ O)	Cationes solubles (mmol (+) L ⁻¹)				CIC [cmol (+) Kg ⁻¹]	Bases Intercambiables [cmol (+) Kg ⁻¹]				PSI
			Na	K	Ca	Mg		Na	K	Ca	Mg	
			Lama	0.61 (0.04)*	6.82 (0.13)	6.66 (0.47)		0.12 (0.01)	0.53 (0.08)	1.10(0.05)	34.3 (7.07)	
Lama salina	11.93 (6.44)	10.06 (0.12)	216.43 (133.78)	3.05 (1.8)	0.26 (0.10)	0.93 (0.05)	29.1 (4.42)	28.08 (5.53)	2.63 (1.21)	11.78 (10.68)	0.96 (0.18)	64.6 (12.7)
Negra	0.67 (0.15)	6.95 (0.21)	6.49 (1.58)	0.27 (0.08)	0.72 (0.19)	1.23 (0.10)	28.9(4.35)	2.47 (0.62)	1.04 (0.32)	14.07 (0.87)	6.45 (0.46)	8.4 (9.5)
Negra salina	2.96 (1.01)	8.57 (0.20)	37.83 (13.78)	0.95 (0.29)	0.72 0.22)	1.27 (0.08)	60.9 (10.10)	15.26 (2.81)	2.63 (0.53)	11.9 (2.47)	5.49 (0.84)	27.5 (11.0)

*error estándar

Cuadro 2. Propiedades orgánicas y físicas de las clases de tierras locales. Las letras indican las diferencias estadísticas por clase de tierra.

Clase de tierra	CO (%)	MO (%)	N _t (%)	Rel. C/N	Da (g cm ⁻³)	DMP (mm)	EE (%)
Lama	1.55 (0.23)* a	2.94 (0.43) a	0.11 (0.01) b	15.4 (3.0) a	1.6 (0.04) a	1.44 (0.26) a	64.7 (5.35) a
Lama salina	0.49 (0.09) b	0.93 (0.17) b	0.07 (0.03) b	9.2 (1.99) a	1.47 (0.11) a	0.32 (0.12) b	12.6 (1.67) b
Negra	2.17 (0.30) a	4.12 (0.57) a	0.17 (0.02) a	13.1 (1.02) a	1.55 (0.06) a	0.73 (0.05) b	58.3 (5.8) a
Negra salina	1.44 (0.21) a	2.75 (0.41) a	0.11(0.01) b	15.4 (3.44) a	1.6 (0.03) a	0.97 (0.12) b	34.9 (8.72) b

* error estándar

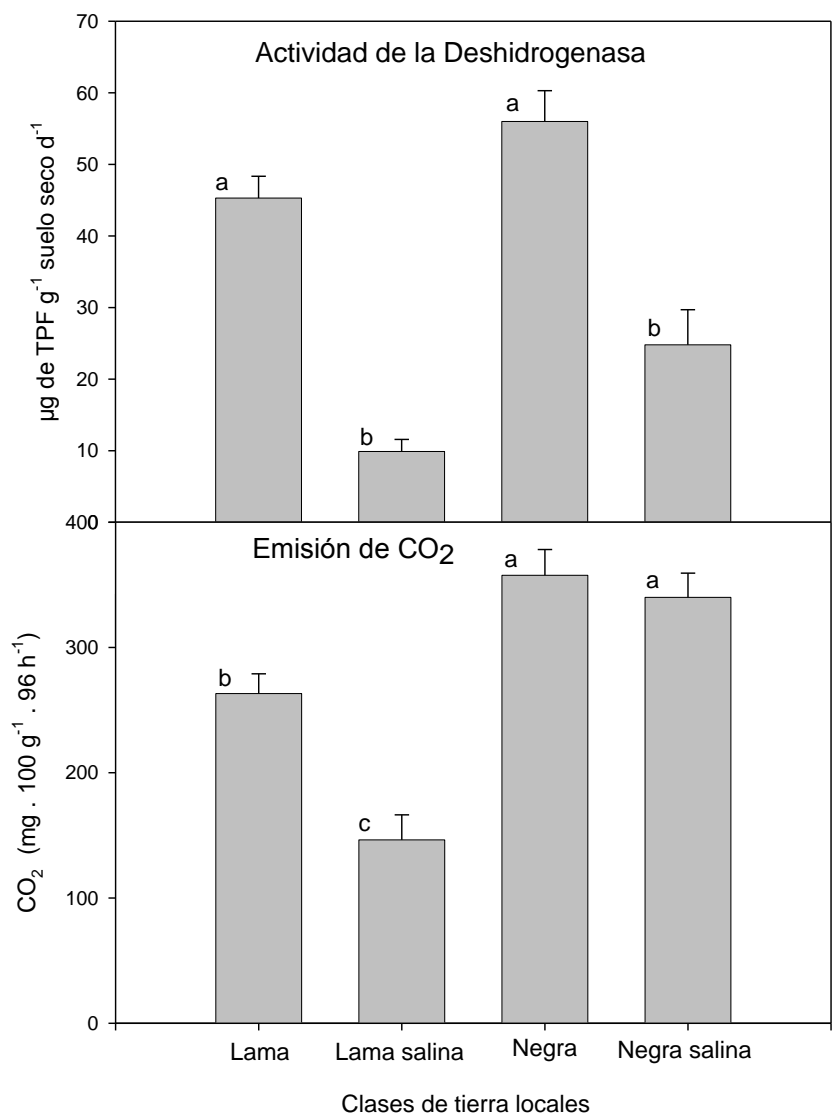


Figura 2. Emisión de CO₂ y actividad de la enzima deshidrogenasa en las clases de tierra locales. Las letras indican las diferencias estadísticas por clase de tierra.

Cuadro 3. Correlaciones entre las variables físicas, químicas y biológicas evaluadas en las clases de tierras locales.

	CE	pH	Na _{ac}	K _{ac}	Ca _{ac}	Mg _{ac}	CIC	Na _i	K _i	Ca _i	Mg _i	PSI	CO	MO	N _t	Rel. C/N	Da	RBS
CE	1.0																	
pH	0.64***	1.0																
Na _{ac}	0.97***	0.58***	1.0															
K _{ac}	0.91***	0.58***	0.95***	1.0														
Ca _{ac}	0.02	0.36	-0.06	-0.14	1.0													
Mg _{ac}	-0.07	-0.02	-0.16	-0.21	0.94***	1.0												
CIC	0.01	0.00	-0.06	-0.05	0.49**	0.54***	1.0											
Na _i	0.69***	0.66***	0.65***	-0.71***	0.18	0.11	0.31	1.0										
K _i	0.47**	0.49**	0.40*	0.52*	0.32	0.33*	0.28	0.68***	1.0									
Ca _i	0.25	0.07	0.25	0.24	-0.04	0.02	0.33*	0.26	0.15	1.0								
Mg _i	-0.44**	-0.24	-0.49**	-0.42*	0.04	0.20	0.35*	-0.18	-0.07	0.68***	1.0							
PSI	0.35*	0.53***	0.32*	0.45**	-0.08	-0.15	0.05	0.81***	0.51**	-0.04	-0.24	1.0						
CO	-0.28	-0.18	-0.28	-0.24	0.21	0.23	0.04	-0.39*	-0.06	0.03	0.22	-0.36*	1.0					
MO	-0.28	-0.19	-0.28	-0.24	0.21	0.24	0.06	-0.39*	-0.07	0.03	0.20	-0.37*	0.99***	1.0				
N _t	-0.17	-0.13	-0.12	-0.11	0.13	0.06	-0.13	-0.36*	-0.07	0.04	-0.03	-0.37*	0.70***	0.70***	1.0			
Rel. C/N	-0.09	-0.06	-0.16	-0.14	0.08	0.17	0.11	0.16	0.01	0.01	0.17	-0.15	0.53***	0.53***	0.13	1.0		
Da	0.14	-0.23	0.11	0.17	0.13	0.18	0.35*	0.11	0.27	0.06	-0.01	-0.07	-0.21	-0.22	-0.34*	0.17	1.0	
RBS	-0.18	-0.38*	-0.16	-0.22	-0.21	-0.27	-0.10	-0.37**	-0.36*	0.20	0.13	-0.34*	0.25	0.26	0.23	0.24	-0.04	1.0

***, **, * correlaciones significativas a los niveles 0.001, 0.01 y 0.05, respectivamente

Cuadro 4. Análisis de componentes principales (ACP) de las propiedades físicas, químicas y biológicas evaluadas en las clases de tierras locales.

Parámetro	CP1	CP2	CP3
Autovalor inicial	5.63	3.14	2.39
% varianza	31.28	17.42	13.27
% v. acumulada	31.28	48.71	61.98
Autovectores			
CE	0.36	0.04	0.23
Na ⁺ _(ac)	0.40	- 0.02	0.26
K ⁺ _{ac}	0.36	0.00	0.25
Ca ²⁺ _(ac)	- 0.01	0.45	-0.05
Mg ²⁺ _(ac)	- 0.04	0.48	-0.12
pH	0.30	0.06	0.19
Na _i	0.37	0.16	-0.02
K _i	0.26	0.29	0.06
Ca _i	0.08	0.20	-0.05
Mg _i	-0.16	0.22	-0.26
CIC	0.03	0.40	-0.22
PSI	0.30	-0.01	-0.04
CO	-0.25	0.25	0.42
MO	-0.25	0.25	0.41
N _t	-0.18	0.08	0.43
Rel. C/N	-0.12	0.19	0.14
RBS	-0.18	-0.16	0.18
Da	0.07	0.13	-0.24

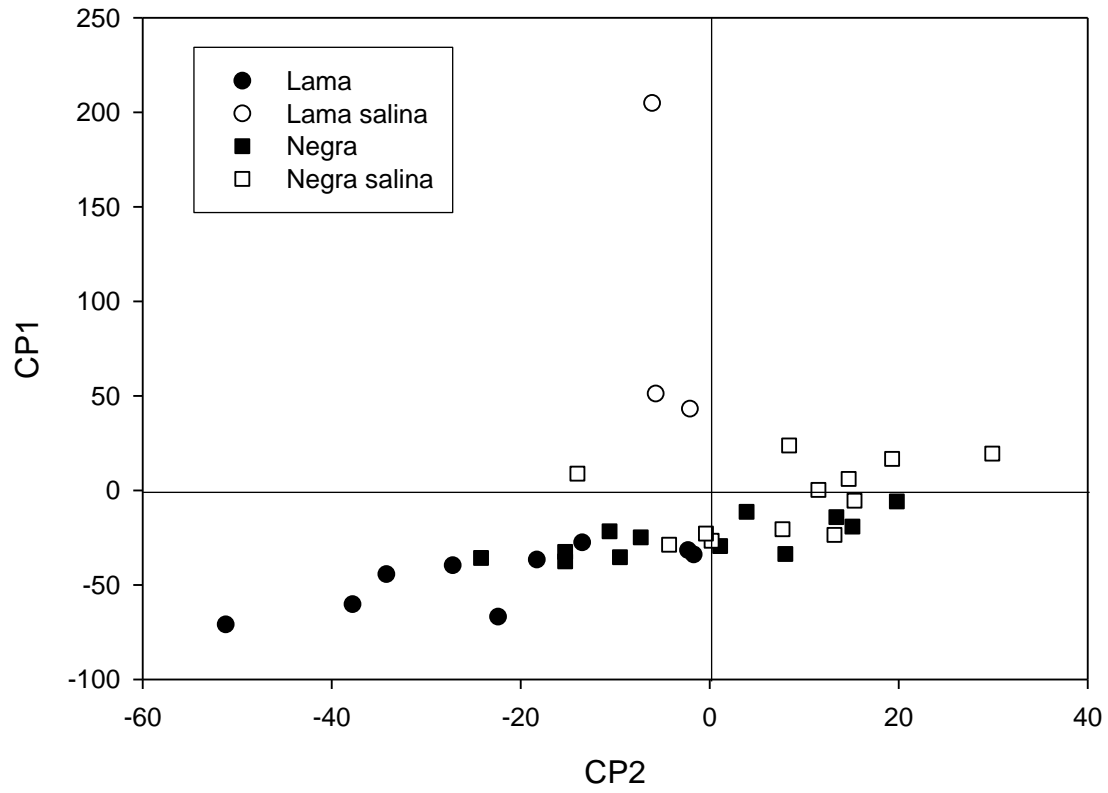


Figura 3. Diagrama de dispersión de las clases de tierras locales asociadas a los dos primeros componentes principales.

Cuadro 5. Productividad agrícola (Ton de biomasa fresca ha⁻¹ año⁻¹) de los forrajes cultivados en las clases de tierra locales.

Clase de Tierra	Alfalfa	Pasto Forrajero	Pasto Bermuda	Avena
Lama	180.0	-	-	-
Negra	125.0	60.7	52.5	-
Negra salina	-	35.1	-	19.8

Nota: La clase lama salina no se contempla porque no presenta actividad agrícola.

**CAPÍTULO 3. ESTRUCTURA EDÁFICA, ARCILLAS AMORFAS Y PLANTAS
INDICADORAS DE SALINIDAD EN EL DISTRITO DE RIEGO “LOS
INSURGENTES”, MÉXICO.**

Estructura edáfica, arcillas amorfas y plantas indicadoras de salinidad en el distrito de riego “Los Insurgentes”, México.

Ma de la Luz Reséndiz-Paz^a, Ma del Carmen Gutiérrez-Castorena^a, César O. Montoya-García.^b

^a*Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco 56230. Edo. de México, México.*

^b*Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Calzada del Hueso 1100. Col. Villa Quietud 04960, México. D. F.*

Resumen

Los suelos del distrito de riego “Los Insurgentes”, Estado de México, presentan agregados esferoidales superficiales y bloques angulares arcillosos floculados en el subsuelo, a pesar de las condiciones de saturación hídrica y alta sodicidad (PSI > 65). Todos los agregados en seco muestran valores altos de densidad aparente (Da). Estas características no corresponden con el comportamiento de los suelos sódicos, ni con la presencia de factores que inciden en la Da; no obstante, pueden explicarse por la presencia de arcillas amorfas, siempre que ocurran en cantidades suficientes. Para comprobar esta hipótesis, se realizaron análisis micromorfológicos, de difracción de rayos X y de extracción selectiva de Si, Al y Fe. Se encontró que los agregados contienen arcillas amorfas (principalmente alófano) y los minerales goethita, kaolinita, haloisita y cristobalita. De estos minerales, la goethita formó hipo-revestimientos sobre las caras de los agregados, los cuales, en interacción con la kaolinita favorecen la alta estabilidad de los agregados en condiciones de saturación hídrica y sodicidad. Los revestimientos, además pueden contener haloisita y cristobalita, los cuales incrementan la capacidad de floculación de los agregados. Asimismo, la deshidratación de estos minerales puede derivar en los altos valores de Da y la formación de agregados esferoidales superficiales no biológicos. El análisis micromorfológico también mostró que las prácticas agrícolas incrementaron el volumen poroso de 11.85 % hasta 49 %, lo que permitió la rehabilitación de los suelos salinos originales. Finalmente, otra característica de la zona que valdría investigar es el uso de plantas indicadoras de la calidad del suelo o del esfuerzo para desalinizar los suelos originales, enfoque que se llevó a cabo en la presente investigación.

Palabras Clave: *Agregados, arcillas amorfas, suelos sódicos, densidad aparente, mineralogía del valle de México, prácticas agrícolas.*

Abstract

The soils of the irrigation district "Los Insurgentes", State of Mexico, present superficial spheroidal aggregates, and stable angular blocks in the subsoil, although the conditions of waterlogging and high sodicity (ESP > 65). All dry aggregates show high values of bulk density (Bd). These features do not correspond with the average characteristics of sodic soils, or the presence of factors that affect the Bd. However, these features can be explained by amorphous clays, if they occur in sufficient quantities. To verify this hypothesis, micromorphological, X-ray diffraction and selective extraction of Fe, Si and Al analysis were made. The results showed that aggregates containing amorphous clays (mainly allophane), and the minerals goethite, kaolinite, halloysite and cristobalite. Of these minerals, the goethite formed coatings onto the aggregate faces, which in interaction with kaolinite, favor the high aggregate stability under conditions of waterlogging and sodicity. The coatings can also contain halloysite and cristobalite, which increases the ability of flocculation of aggregates. Also, the dehydration of these minerals can lead to high values of Bd and non-biological surface spheroidal aggregates formation. The micromorphological analysis also showed that agricultural practices increased the porous volume of 11.85 % to 49 %, allowing the rehabilitation of original saline soils. Finally, another feature of the area that would be worth investigating is the use of plants as indicators of soil quality or the effort to desalinate the original soils, approach that was carried out in the present research.

***keywords:** aggregates, amorphous clays, sodic soils, bulk density, mineralogy of the valley of Mexico, agricultural practices.*

1. Introducción

Los suelos del distrito de riego “Los Insurgentes”, estado de México, presentan agregados esferoidales superficiales no biológicos, con altos valores de densidad aparente (D_a) y bloques angulares floculados en el subsuelo bajo condiciones de saturación hídrica y alta sodicidad (PSI de hasta 65). La presencia de ambas clases de agregados contradice lo reportado en la literatura, ya que de acuerdo con Oades, (1993) y Bronick y Lal, (2005), los agregados esferoidales superficiales generalmente son de origen biológico por lo que muestran valores bajos de D_a debido al alto contenido de poros internos. De igual forma, de acuerdo con So y Aylmore, (1993), Barzegar et al. (1997), Levy, (2000) y Wong et al. (2010) los suelos sódicos tienden a dispersar sus arcillas, por lo que su estructura se colapsa, especialmente en condiciones de saturación hídrica. Por consiguiente, en los sedimentos basales la estructura debería estar colapsada y no presentar agregados floculados como se observa en el campo. Otra característica que llama la atención son los altos valores de D_a (hasta de 1.78 g cm^{-3}) de los agregados secos (tanto superficiales como subsuperficiales), en todos los suelos. Esto es porque los suelos presentaron contenidos variables de materia orgánica, sales, sodio y carbonatos (Capítulo 1 y 2), los cuales, de acuerdo con So y Aylmore, 1993; Churchman et al. (1993); Barzegar et al. (1997); Annabi et al. (2007), Abiven et al. (2009), Aguirre, (2007), Mastro et al. (2009) y Wong et al. (2010) son agentes que modifican la D_a , por lo que los valores de D_a en estos suelos deberían ser heterogéneos.

La presencia de arcillas amorfas en estos suelos puede explicar las características y el comportamiento de los agregados. Los fundamentos de esta hipótesis residen en que son compuestos cuya presencia es posible en la zona de estudio debido a que se ubica en el eje Neovolcánico (Gutiérrez-Castorena et al., 2005); además de su capacidad para estabilizar agregados (Goldberg y Glaubig, 1987; Bronick y Lal, 2005), en condiciones de sodicidad y saturación hídrica (Churchman et al., 1993; Baldock y Nelson, 2000; Aguirre, 2007). Adicionalmente, de acuerdo con Gutiérrez-Castorena et al. (2005) y Woingner et al. (2007) los agregados estabilizados por arcillas amorfas se contraen en forma muy notoria y su recuperación se vuelve irreversible, por lo que se modifican algunas propiedades físicas como la porosidad, y en consecuencia, se pueden aumentar los valores de D_a de los agregados secos.

Esta hipótesis fue reforzada durante la evaluación de la calidad agrícola de los suelos (Capítulo 2), donde la Da presentó una correlación positiva con la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y una correlación negativa con el contenido de nitrógeno total (N_t). Estos resultados, por lo tanto, indicaron que la Da está en función de la mineralogía de los suelos y la correlación negativa con el contenido de N_t nuevamente pone en escena a las arcillas amorfas, dada su capacidad para inmovilizar nitrógeno (Okamura y Wada, 1983; Woingner et al., 2007; Dendooven et al., 2010), el cual es difícilmente liberado para cuantificarse con el N_t de los suelos. La relación entre las arcillas amorfas y la estructura de los suelos estudiados, constituye el primer tema de interés de la presente investigación.

Adicionalmente, la caracterización micromorfológica de los agregados en los horizontes superficiales de los suelos, también puede revelar el impacto de las prácticas agrícolas en la estructura edáfica. Este conocimiento dará evidencia del proceso de rehabilitación de los suelos, el cual es esencial para obtener la calidad agrícola de los suelos actuales (Capítulo 2).

Por otra parte, otra característica valiosa de la zona de estudio es la utilización de la presencia de plantas halófitas para identificar parcelas salinas, práctica que llevan a cabo los agricultores locales. El uso de plantas para indicar calidad o procesos de degradación de los suelos ha sido un tema valorado por investigadores como Juma (1993), Barrios et al. (2003), Madejón et al. (2006), Saito et al. (2006) y Escobar y Hue, (2007), por su capacidad integradora de los procesos que ocurren en los suelos. No obstante, el uso de plantas como indicadores del esfuerzo a realizar para recuperar suelos degradados es un tema poco explorado, por lo que fue el enfoque que se le dio en el ensayo presentado en este capítulo.

Los objetivos del presente capítulo fueron: 1) determinar la relación de las arcillas amorfas en la formación de agregados, 2) valorar el impacto de las prácticas agrícolas en la estructura edáfica, y 3) comparar los niveles de sodicidad, alcalinidad y salinidad de los suelos en los que se desarrollan las plantas halófitas silvestres y los cultivos principales de los suelos del distrito de riego “Los Insurgentes” México.

2. Materiales y Métodos

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra dentro del Distrito de Riego “Los Insurgentes”, es un valle agrícola de 450 ha que se ubica en la periferia de la Laguna de Zumpango, Municipio de Teoloyucan, Estado de México, México. El área se localiza entre las coordenadas de 19°43'11" y 19°47'11" de latitud N, y 99°43'15" y 99°12'57" de longitud W, a 2250 m de altitud. Los suelos originales del área se formaron a partir de sedimentos arcillosos salinos derivados del drenado artificial de la Laguna de Zumpango (Capítulo 1), en consecuencia las personas han llevado a cabo varias prácticas para incorporar estos suelos a la agricultura, las cuales incluyen sepultar los sedimentos originales con materiales de mejor calidad (Capítulo 2). Las prácticas agrícolas han mejorado las condiciones para la función agrícola de los suelos (Capítulo 2) en el 84 % de la zona (Capítulo 1) y han transformado la clasificación de los suelos a Antrosoles hidrágicos, térricos, gléyicos (capítulo 1). Estos suelos localmente se designan como tierras lamas y negras, ambas con clases de acuerdo con la salinidad y cada una de ellas con prácticas de manejo específicas (Capítulo 2). Todas las clases de tierra locales se evaluaron en la presente investigación.

2.2. Agregados

Para analizar las características de los agregados se elaboraron y describieron 15 secciones delgadas de las capas superficiales (10) y los sedimentos basales (5) de todas las clases de tierra locales (lama, negra, lama salina y negra salina). Las secciones delgadas fueron obtenidas de muestras de suelo inalteradas que se colectaron durante la descripción de los perfiles de suelo en campo. El método utilizado tanto para la colecta como para su procesamiento fue el propuesto por Murphy (1986) y Stoops (2003). En términos generales, las muestras inalteradas se secaron al aire y a la sombra; luego se impregnaron con resina poliéster insaturada y monómero de estireno con una relación 3:1 (v/v); posteriormente se colocaron a la sombra durante dos meses para que la resina se integrara completamente a la muestra. Una vez endurecidas, las secciones delgadas se cortaron con un disco de punta de diamante y se procedió a fijarlas en un vidrio (portaobjetos) de dimensiones 7.5 cm de largo x 6 cm de ancho. Para terminar, las secciones

delgadas se pulieron con diversos abrasivos como el carburo de silicio (primero) y bauxita (final). Cada sección delgada se fotografió con una cámara canon réflex y se describió en cuanto a las características de los agregados, la porosidad y algunos rasgos pedogenéticos, utilizando un microscopio petrográfico marca Olympus Bx52 y de acuerdo con los criterios de Stoops (2003).

En las secciones delgadas también se calculó el porcentaje ocupado por poros y agregados. Esto se llevó a cabo a través de un proceso de escaneado de las secciones delgadas utilizando el programa *Photoshop CS3* auxiliado por el programa *Image Pro Plus* versión 5.0. En términos generales, el proceso consiste en modificar la imagen con el procesador de imágenes donde se le asigna una tonalidad específica a los poros y los agregados pixel por pixel utilizando como base el histograma HSI (tonalidad-saturación-intensidad). Esta modificación de la imagen permite que el programa *Image Pro Plus* pueda escanear y asignar un porcentaje a las tonalidades, las cuales corresponden con los porcentajes de poros y agregados. Las diferencias por clase de tierra de estos parámetros se analizaron a través de un análisis de varianza, utilizando el procedimiento GLM (General Lineal Model) con una prueba de comparación de medias (Tukey, $p = 0.05$) utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS) Versión 9 (2002).

2.3. Mineralogía de la fracción fina

La mineralogía de la fracción arcillosa silicatada se llevó a cabo mediante el análisis de difracción de rayos X y por la extracción selectiva de formas de Fe, Al y Si con una solución ditionito-citrato-bicarbonato y oxalato ácido. Ambos métodos se extrajeron del Manual de Procedimientos Analíticos para Suelos de van Reeuwijk (2003). Para estos análisis, las muestras de suelo colectadas en campo se secaron a temperatura ambiente y a la sombra; después fueron molidas y tamizadas con una maya con apertura de 2 mm.

2.3.1. Rayos X

Para este análisis, la fracción arcillosa ($<2\mu$) de 12 muestras (9 de los horizontes superficiales de las cuatro tierras locales y 3 de los sedimentos basales) fue separada de las arenas y los limos por sedimentación. Luego, a cada muestra se le eliminó la materia orgánica y los carbonatos, con H_2O_2 y HCl, respectivamente. Después de 24 horas de sedimentación se colectó una alícuota de arcilla suspendida y se depositó en un portaobjetos para provocar la

orientación de las arcillas. Las muestras se analizaron en un difractómetro de rayos X (GBC) con un tubo de cobre y radiación $\text{CuK}\alpha$. La interpretación de los difractogramas se hizo con el programa ICCD (2002).

2.3.2. *Extracción selectiva de Fe, Al y Si*

Este análisis se llevó a cabo en 24 muestras de suelo, de las cuales 16 fueron de horizontes superficiales que en conjunto representaron las cuatro clases de tierra locales (6 de tierra lama, 2 de tierra lama salina, 4 de tierra negra y 4 de tierra negra salina) y las 8 muestras restantes fueron de los sedimentos basales de las tierras lama, negra y negra salina. Los sedimentos basales de la tierra lama salina no se evaluaron porque en campo la baja profundidad del manto freático (20 cm desde la superficie en temporada de sequía) no permitió la extracción de las muestras. Los resultados se utilizaron para calcular diferentes índices con la finalidad de definir los tipos de minerales presentes. Los índices empleados fueron: $\text{Al}_{\text{ox}} + \frac{1}{2}\text{Fe}_{\text{ox}} \geq 2 \%$, para alófono + imogolita + ferrihidrita (Parfitt y Clayden, 1991); $\text{Al}_{\text{ox}}/\text{Si}_{\text{ox}}$ de 1 a 2.5 para alófono (Parfitt y Henmi, 1982) (Parfitt, 1990); $\text{Si}_{\text{ox}}/\text{Al}_{\text{ox}} \approx 0.5$ para imogolita (Wada, 1989); $\text{Fe}_{\text{ox}}/\text{Fe}_{\text{di}}$ para hierro amorfo y cristalizado (Gamble y Daniels, 1972).

2.4. *Muestreo de halófitas y cultivos*

Las halófitas utilizadas por los agricultores para identificar parcelas salinas así como los cultivos principales del área fueron ubicados durante el recorrido y delimitación de los linderos de las clases de tierra locales al llevar a cabo el levantamiento etnoedafológico (Capítulo 1). Para este ensayo, se delimitaron áreas de 50 x 70 cm donde predominara una población vegetal específica, ya sea de halófitas o cultivos, y en cada área se colectaron tres muestras de suelo superficial (5 cm). Estas se mezclaron para formar una muestra compuesta en la que se evaluaron los parámetros de pH, CE y Na soluble. El número de muestras compuestas analizadas fue de 52.

3. Resultados

3.1. *Agregados*

La descripción microscópica de las secciones delgadas mostró que en los sedimentos basales predominaron los bloques angulares separados por fisuras. Estos agregados presentaron poros

vesiculares, que indican problemas de drenaje interno, hipo-revestimientos de goethita y nódulos amiboidales microesparíticos de carbonato de calcio (Figura 1).

En contraste con los sedimentos basales que presentaron un porcentaje poroso de 11.85 %, las capas superficiales presentaron un espacio poroso que varió entre 31.5 y 49 % (Cuadro 1). El carácter arcilloso y salino de los suelos originales ocasionó que los agricultores utilizaran mejoradores orgánicos y con altas cantidades de calcio con la finalidad de incorporar estos suelos a la agricultura (Capítulo 1). Estos mejoradores favorecen la floculación en los agregados (García-Orenes et al., 2005), y en consecuencia, se incrementó el espacio poroso total como dan evidencia las secciones delgadas. En la tierra negra salina, aunque la incorporación de estiércol y yeso ha sido esporádica (Capítulo 2), las secciones delgadas mostraron la presencia de agregados granulares separados por poros de empaquetamiento, donde el porcentaje de poros es de 37 % y el porcentaje de agregados es de 68 % (Cuadro 1). Estos valores reflejan el impacto positivo de estos mejoradores. No obstante su carácter salino ($PSI=22$, $pH=8.2$ y $CE=2 \text{ dS m}^{-1}$) y arcilloso también propició la presencia de agregados subangulares separados por fisuras curvadas acomodadas que evidencian procesos de contracción-expansión (Figura 2). De igual forma que los sedimentos basales, los agregados superficiales presentaron hipo-revestimientos de goethita.

En la tierra negra (tipo no salino) las prácticas de manejo determinaron la estructura. En una parcela que no ha sido labrada por 10 años y donde la incorporación de estiércol es mínima, el porcentaje de poros se redujo (31.5 %), y por consiguiente se incrementó en el porcentaje de agregados (61 %) (Cuadro 1). En consecuencia, los procesos de contracción-expansión nuevamente se muestran como los determinantes del comportamiento de estos suelos; además de incrementarse la presencia de poros vesiculares, los cuales indican que estos suelos presentan drenaje interno deficiente (Figura 3). En contraste, en una parcela de tierra negra con aplicación periódica de estiércol y mejoradores fuente de calcio, predominaron los agregados granulares rodeados de poros de empaquetamiento. Aunque, su naturaleza arcillosa también propició la formación de bloques subangulares que contienen poros vesícula y están separados por fisuras acomodadas, los cuales dan evidencia de que estos suelos también presentan un drenaje interno deficiente y procesos de contracción-expansión (Figura 4). A pesar de estas características contrastantes, el impacto de las prácticas de manejo en estos suelos es positivo, ya que el

porcentaje de poros se incrementó a ~ 49 % y el porcentaje de agregados se redujo a 49 % (Cuadro 1); además, de la presencia de numerosas raíces en las fisuras (Figura 4). En esta clase de tierra también se observaron hipo-revestimientos de goethita en las caras de los agregados

Otra estrategia que los agricultores utilizaron para evitar los problemas con las sales de los sedimentos originales, fue el relleno de los suelos con materiales de textura franca, práctica que dio origen a las tierras lamas. La naturaleza franca de estas tierras (capítulo 1) derivó en un mayor espacio poroso (>34 %), en comparación con las tierras negras (>31 %). No obstante, en la tierra lama salina (Figura 5) también se presentaron vestigios de los sedimentos arcillosos nativos, donde los procesos de expansión-contracción y las deficiencias de drenaje fueron visibles a través de la formación de fisuras y poros vesícula. En consecuencia, y a pesar de su naturaleza franca, el porcentaje de poros en esta clase de tierra fue de ~ 34 % y el porcentaje de agregados se incrementó a ~ 57 % (Cuadro 1). En la tierra lama (tipo no salino), la textura franca y la incorporación periódica de estiércol incrementaron el porcentaje de poros a 40 % y redujeron el porcentaje de agregados a 48 % (Cuadro 1). Los poros de empaquetamiento fueron los predominantes, aunque también se observaron algunas fisuras acomodadas, que indican procesos de expansión-contracción (Figura 6). Esta clase de tierra presentó poros canales y pedorrasgos fecales que son resultado de una alta actividad de la mesofauna, características que reafirman la abundancia de lombrices visualizada durante la descripción de los perfiles, misma que determinó la identificación del horizonte hórtico en estos suelos (Capítulo 1). En esta clase de tierra también ocurrieron acumulaciones de goethita en las caras de los agregados.

3.2. Extracción selectiva de Al, Fe y Si

Los resultados se presentan en el Cuadro 2. Los valores que se aproximan o son mayores a 2 % del índice $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$ indican que la presencia de minerales de Fe y Al en los suelos estudiados es importante. Dentro de estos, los minerales de Fe son los más abundantes, ya que son las que más contribuyeron a dicho índice. Asimismo, la similitud de los porcentajes de Al y Si extraídos con oxalato ácido y con ditionito-citrato-bicarbonato indican cantidades similares de formas amorfas y cristalinas, donde la forma de sílice amorfo más abundante fue el alófano, como lo reveló el índice Al_{ox}/Si_{ox} . Por el contrario, la similitud entre los valores de Fe extraído con oxalato ácido y con ditionito citrato indica la predominancia tanto de formas cristalinas,

como la hematita y la goethita, como de formas amorfas (ferrihidrita). En resumen, estos resultados revelaron que las formas de Fe, cristalinas (posiblemente goethita y hematita) y amorfas (ferrihidrita); así como las formas amorfas de sílice (principalmente alófono) ocurren en estos suelos, siendo las primeras más abundantes.

3.3. Rayos X

Los resultados del análisis de rayos X se muestran en la Figura 7. Las reflexiones en 7.1 y 4.4 Å indican la abundancia de las arcillas tipo kaolinita y haloisita en todos los suelos de la zona, tanto en las capas superficiales como en los sedimentos basales. La presencia de haloisita se reafirmó con la reflexión en 10 Å visualizada en la tierra negra salina y en los sedimentos basales de las tierras negras. Contrario a esta tendencia, la falta de reflexiones prominentes en el área de las arcillas de la tierra lama salina y los sedimentos basales de la tierra negra, indicaron la predominancia de arcillas amorfas. Las reflexiones que se asocian con la presencia de arcillas tipo 2:1, especialmente la montmorillonita (14.5 Å), solo fueron evidentes en los sedimentos basales de la tierra lama. Otro mineral común en todos los suelos fue la cristobalita (4.04 Å). Así mismo, algunos minerales que solo fueron identificados en algunas clases de tierra fueron: la goethita (4.18 Å) en las tierras lama, negra y sedimentos basales de la tierra negra; la tridimita (4.1, 4.32 y 3.8 Å) en las tierras lama salina, negra salina y en los sedimentos basales de ambas clases de tierras; y la albita (3.75 Å) en las tierras negra y lama salina.

3.4. Halófitas y cultivos principales

Las plantas silvestres utilizadas por los agricultores de la comunidad para identificar parcelas salinas son el pasto salado (*Distichlis spicata* L.), el romerito (*Suaeda nigra* L.) y el quelite cenizo (*Chenopodium album* L.) (Figura 8); todas ellas tolerantes a la sodicidad (Na soluble > 250 mmol L⁻¹), alcalinidad (pH > 9.2) y salinidad (CE > 2 dS m⁻¹), aunque con diferencias de tolerancia entre ellas. De acuerdo con los datos obtenidos, el pasto salado resultó ser el más tolerante a la salinidad (CE ≥ 22 dS m⁻¹) y la alcalinidad (pH ≥ 10.2); y el quelite cenizo fue el más tolerante a la sodicidad (Na soluble ≥ 467 mmol L⁻¹) (Figura 9). Por otra parte, los cultivos principales de la zona son la alfalfa (*Medicago sativa* L.), el pasto forrajero (*Lolium multiflorum* Lam.) y la avena (*Avena sativa* L.) (Figura 8). De acuerdo con los datos obtenidos, estos cultivos

se desarrollan en valores de Na soluble menores a $112.5 \text{ mmol L}^{-1}$, de pH menores a 8.5, y de CE menores a 4.6 dS m^{-1} (Figura 9). Por lo tanto, para establecer cualquiera de estos cultivos, se requiere disminuir los valores de pH de 10.2 a por lo menos 8.5, de conductividad eléctrica desde 22 a menos de 5 dS m^{-1} y el sodio soluble de más de 400 hasta casi 100 mmol L^{-1} .

4. Discusión

4.1. Mineralogía y estabilidad de agregados

La hipótesis principal de esta investigación fue que las arcillas amorfas se encuentran en cantidades suficientes como para estabilizar los agregados en condiciones de sodicidad y saturación hídrica; además de ser las responsables de la formación de agregados esferoidales superficiales no biológicos, e incrementar los valores de Da de los agregados secos. Al respecto, los resultados obtenidos mostraron que las arcillas amorfas, principalmente alófono, ocurren en el área por lo que constituyen un factor que incide en la estabilidad de los agregados. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por Gutiérrez-Castorena et al. (2007), quienes encontraron que las formas amorfas de sílice son comunes en los suelos del oriente del valle de México. No obstante, la mayor resistencia de los agregados a la ruptura en condiciones de saturación hídrica, sigue el siguiente gradiente: tierra lama > tierra negra salina > tierra negra (Capítulo 2), resultados que son consistentes con los valores del índice $\text{Al}_{\text{ox}} + \frac{1}{2}\text{Fe}_{\text{ox}}$, ya que la tierra lama presentó los valores más altos (2.49 %), seguida de la tierra negra salina (1.76 %), seguida de la tierra negra (1.56 %). Por lo tanto, estos resultados indican que los minerales de Fe y Al también determinan la estabilidad de agregados. La influencia de estos minerales en los agregados, también se debe a las altas cantidades en las que se presentan (Cuadro 2), mismas que son similares o superan las encontradas en Andosoles de Cofre de Perote, Veracruz, México (Campos et al., 2001) y de la Isla Francesa Oriental Martinica (Chevallier et al., 2010). Dentro de los minerales de Fe y Al, las formas amorfas de hierro (ferrihidrita) fueron las que más contribuyeron en el índice $\text{Al}_{\text{ox}} + \frac{1}{2}\text{Fe}_{\text{ox}}$, lo que indica una participación más activa de los minerales de hierro en la estabilización de los agregados. Adicionalmente, el análisis de rayos X, reveló que la goethita (una forma cristalina de hierro) es un mineral común en los suelos estudiados. Esta forma de hierro, de acuerdo con el análisis micromorfológico, forma revestimientos sobre las caras de todos los agregados (tanto superficiales, como

subsuperficiales), por lo que constituye otro factor que estabiliza los agregados de acuerdo con los criterios de Acevedo et al. (2004).

Adicionalmente, el análisis de difracción de rayos X también reveló que las arcillas 1:1 kaolinita y haloisita, así como la cristobalita (una forma de sílica) son minerales comunes en todos los suelos estudiados. La presencia de estos minerales, además del alófono y goethita, demuestran la importancia de los materiales de origen volcánico. La zona de estudio está rodeada por las sierras de Guadalupe, Tepetzotlán y Las Cruces, las cuales son unidades montañosas volcánicas formadas durante el mioceno temprano (Lugo-Hubp y Salinas-Montes, 1996; Huizar-Álvarez et al., 2002). Estas sierras están formadas por materiales que contienen abundante vidrio y toba volcánicos, además de cuarzo, opalo C y feldespatos de K (Pablo-Galan, 2002; Carrera-Hernández y Gaskin 2007), los cuales fueron arrastrados hasta las zonas bajas, y formaron los depósitos lacustres, como los que originaron la zona de estudio. Los productos de estos materiales pueden originar por precipitación alófono (Wada, 1989), kaolinita (Dixon, 1989), haloisita, ferrihidrita (Dubroeuq et al., 1998), y cristobalita (Drees et al; 1989). La ferrihidrita se transforma en goethita por recristalización en condiciones climáticas templadas (Kämpf et al, 2000; Acevedo et al., 2004), como las que ocurren en el valle de México.

La importancia de la kaolinita, haloisita y cristobalita, para el caso que nos ocupa en la presente investigación, es que son minerales que también inciden en la floculación de los agregados. Los suelos donde predomina la kaolinita presentan una baja capacidad de dispersión a consecuencia de su baja densidad de cargas, que reduce las fuerzas de repulsión entre ellas; además, los cationes intercambiables ubicados en los límites de las láminas incrementa su capacidad de floculación (Dixon, 1989). Sin embargo, cuando la sodicidad deriva en condiciones de pH mayores a 10.5 (condición que llega a presentarse en las tierras lama salina y negra salina), la kaolinita se dispersa (Dixon, 1989). En este estado, los óxidos de hierro constituyen otro factor que propicia la estabilidad de los agregados. La estabilización de los agregados por interacción entre la kaolinita y los óxidos de hierro, se debe a la interacción entre la carga variable positiva de los óxidos de hierro, con la carga negativa permanente de las arcillas (Schwertmann y Taylor, 1989; Breuer y Schwertmann, 1999; Kämpf et al., 2000). Las uniones logradas por este medio son tan estables a la influencia de fuerzas disruptivas, que se requiere

extraer el hierro para lograr destruirlas (Kämpf et al., 2000), siendo además estables a valores de pH neutros y alcalinos (Acevedo et al., 2004). Por lo tanto, la interacción kaolinita-goetita constituye otro factor que contribuye a la estabilidad estructural de los agregados en condiciones de sodicidad y saturación hídrica.

Por otra parte, Dubroec et al. (1998) y Gutiérrez-Castorena et al. (2007) observaron en Andosoles de la región de Cofre de Perote, Veracruz, y un Regosol en el oriente del valle de México, respectivamente, la presencia de revestimientos parecidos a los descritos en los horizontes del subsuelo de los suelos estudiados (Capítulo 1). En la investigación de Dubroec et al. (1998), el análisis de rayos X reveló que los revestimientos estaban compuestos por una mezcla de haloisita, óxidos de hierro y cristobalita; mientras que en la investigación de Gutiérrez-Castorena et al. (2007) los revestimientos estaban compuestos por haloisita y cristobalita. Por lo tanto, es posible que en la zona de estudio los revestimientos de goethita también contengan haloisita y cristobalita, los cuales en conjunto con la kaolinita incrementan la estabilidad de los agregados, en condiciones de sodicidad y saturación hídrica. Un trabajo que sustenta la posible participación de la cristobalita en la floculación de los agregados, es el de Mizuno et al. (2003) quienes reportaron que las altas cantidades de cristobalita en una bentonita (arcilla tipo 2:1 con alta capacidad de contracción (Borchardt, 1989)), propició la formación de estructura de suelo y redujo su capacidad de contracción; lo que revela su participación en la floculación de arcillas, y por lo tanto en la floculación de los agregados.

De igual forma, la deshidratación de formas sílice amorfo (alófano), haloisita, óxidos de hierro, kaolinita; así como la sodicidad, pueden ocasionar una cementación temporal e incrementar la contracción de los agregados, de acuerdo con los criterios de Fransmeier et al. (1996), Dubroecq et al. (1998), Breuer y Schwetmann, (1999), Gutiérrez-Castorena et al., (2005) y Podwojewsky y Germain, (2005). Por lo tanto, estos procesos pueden explicar la formación de agregados esferoidales superficiales no biológicos y los valores altos de D_a de todos los agregados secos.

En resumen, la presencia de arcillas amorfas, principalmente alófano, así como la kaolinita, la goethita, la haloisita y la cristobalita constituyen factores que explican la formación de

agregados granulares superficiales no biológicos y la floculación de agregados en condiciones de saturación hídrica y alta sodicidad; además del endurecimiento de todos los agregados secos.

4.2. Agregados y prácticas de manejo

La presencia de agregados granulares y el incremento en el porcentaje de poros en los suelos superficiales respecto a los sedimentos basales (de 11.85 % a 49 %), revelaron el impacto positivo de las prácticas agrícolas en la estructura de los suelos (Figura 10). Estas características pueden atribuirse principalmente a la incorporación de materia orgánica y de minerales fuente de calcio, así como el uso de materiales de textura franca que enterraron los sedimentos originales. El uso de materia orgánica y mejoradores fuente de calcio incrementaron la estabilidad de agregados y en consecuencia la capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica de los suelos (Bronick y Lal, 2005; García-Orenes et al., 2005; Tejada et al 2006, Leroy et al., 2008). Por una parte, el aumento en la infiltración y conductividad hidráulica provocó el lavado parcial de las sales y el sodio (Badia, 2000, Tejada et al 2006), y en consecuencia, la reducción de la salinidad y sodicidad de los suelos originales, permitiendo su rehabilitación. Por otra parte, una mayor floculación de agregados también incrementó el espacio poroso (Leroy et al 2008). Dentro de los tipos de poros, los mesoporos ($> 30 \mu$) permiten el paso del agua, es decir, mejoran el drenaje; asimismo los mesoporos y microporos ($<30 \mu$) retienen el agua (Kladivko, 1994). Por lo tanto, los mesoporos en las tierra negras incrementaron la capacidad de infiltración y conductividad hidráulica y, en consecuencia, disminuyeron las condiciones de anoxia y drenaje interno deficiente, dos problemas comunes en estos suelos por su textura arcillosa. Por el contrario, la predominancia de poros de empaquetamiento en las tierras lamas, determinó una mayor capacidad de retención de agua, misma que puede ser aprovechada por los cultivos. Estas condiciones son favorables para los cultivos (Tejada et al 2006, Badia, 2000), los cuales, en consecuencia, incrementaron sus rendimientos agronómicos (Leroy et al 2008) como se encontró en Capítulo 2. Por otra parte, desde el punto de vista de conservación, la floculación de los agregados y el incremento del espacio poroso aumentan la penetración del agua al suelo, por lo que se reduce su pérdida por erosión (Kladivko, 1994, Rasa et al., 2012).

El análisis micromorfológico también mostró que las clases de tierras salinas presentaron el mayor porcentaje de agregados (hasta 57 %), con la consecuente disminución en el porcentaje de

poros (< 34 %) (Cuadro 1). Estos resultados dan evidencia de la contracción de los agregados secos, típica de los suelos sódicos (Barzegar et al., 1997; Levy, 2000; Wong et al., 2010). Adicionalmente, el hecho de que la tierra negra, donde la incorporación de estiércol y mejoradores fuente de calcio ya no es frecuente, también presente un incremento en el porcentaje de agregados (61.4 %) y una reducción en el volumen de poros (31.5 %) indicó el carácter dinámico de estos mejoradores. Por consiguiente, la calidad de las tierras negras depende del manejo constante que el agricultor lleva a cabo. Asimismo, estos resultados mostraron que la práctica de manejo que tuvo el impacto más duradero en estos suelos fue el uso de sedimentos de textura franca que enterraron los suelos originales. Cabe mencionar que la modificación de la estructura por las practicas de manejo ha sido un tópico ampliamente investigado (Barrera-Bassols y Zink, 2003) como dan evidencia los trabajos de Abiven et al., (2009), Annabi et al., (2011), Cotrufo et al. (2011), Jiang et al. (2011) y Rasa et al. (2012). No obstante, el impacto de las prácticas de manejo que incluyen el uso de aguas residuales no tratadas en los agregados, ha sido poco explorado.

4.3. Halófitas y cultivos principales

Las plantas han sido utilizadas como indicadores de la calidad del suelo (Escobar y Hue, 2007), para evaluar sitios agrícolas potenciales (Barrios et al., 2003) y para identificar suelos de mala calidad para la agricultura (Saito, 2006). En este sentido, los agricultores de la zona de estudio se utilizan la presencia de plantas halófitas para identificar parcelas salinas, es decir sitios de mala calidad para la agricultura. No obstante, la comparación de los valores de salinidad en los que se desarrollan las plantas halófitas y los forrajes principales de la zona, también pueden ser utilizados como indicadores del esfuerzo que debieron invertir los agricultores locales para rehabilitar los suelos salinos originales, enfoque que se le dio en la presente investigación. Se encontró que el pasto salado (*Distichlis spicata* L.), el romerito (*Suaeda nigra* L.) y el quelite cenizo (*Chenopodium album* L.) son las halófitas utilizadas para identificar parcelas salinas; así mismo los cultivos principales de la zona son la alfalfa (*Medicago sativa* L.), el pasto forrajero (*Lolium multiflorum* Lam.) y la avena (*Avena sativa* L.).

Los valores de salinidad en los que se desarrollan las halófitas y los cultivos, indicaron que para establecer cualquiera de los cultivos fue necesario disminuir los valores de pH de 10.2 a por

lo menos 8.5, bajar la conductividad eléctrica desde 22 a menos de 5 dS m⁻¹ y reducir el sodio soluble de más de 400 hasta casi 100 mmol L⁻¹ p. Estas condiciones equivalen a una cuarta parte de las condiciones originales, mismas que en términos de prácticas agrícolas (Capítulo 2) equivale a rellenar los suelos salinos con materiales de mejor calidad, incorporar estiércol durante todo el año, aplicar mejoradores fuente de calcio, no aplicar riegos con aguas residuales por inundación y no permitir la formación de zonas anegadas durante el riego.

5. Conclusiones

Las arcillas amorfas ocurren en los suelos estudiados, por lo que constituyen un factor que incide en la estabilización de agregados. No obstante, la mayor resistencia de los agregados a romperse en condiciones de humedad, ocurrió en los suelos con los mayores valores de la relación $Al_{ox}+1/2Fe_{ox}$, lo que reveló la importancia de estos minerales en la estabilización de los agregados. El análisis de rayos X y las secciones delgadas también revelaron la importancia de la goethita (una forma cristalina de Fe) en la estabilización de los agregados. Adicionalmente, el análisis de rayos X reveló que otros minerales comunes en el área fueron la kaolinita, la haloisita, y la cristobalita. Estos minerales, en asociación con los óxidos de hierro y el alófono inciden en la estabilidad de los agregados en condiciones de saturación hídrica y alta sodicidad, además de la formación de agregados esferoidales no biológicos superficiales, e incrementar los valores de D_a de los agregados secos. Adicionalmente, el análisis micromorfológico reveló que las prácticas de manejo incrementaron el porcentaje de poros desde 11.85 % en los sedimentos basales, hasta 49 % en las tierras lama y negra. El cambio en la estructura permitió la desalinización de los suelos originales y propició un ambiente favorable para el desarrollo de los cultivos. Asimismo, la comparación de los valores de salinidad en los que se desarrollan las halófitas y los cultivos, indicó que los agricultores locales debieron disminuir a una cuarta parte los niveles de salinidad originales para incorporar sus suelos a la agricultura.

6. Literatura citada

Abiven, S., Menasseri, S., Chenu, C., 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability-a literature analysis. *Soil Biol & Biochem*, 41: 1-12

Acevedo, S. O., Ortiz, H. E., Cruz, S. M., Cruz, C. E., 2004. El papel de los óxidos de hierro en suelos. *Terra*, 22, 4: 485-497.

- Aguirre, G. A., 2007. Química de los suelos de inundación temporal y perenne. UNAM, México.
- Annabi, M., Houot, S., Francou, C., Poitrenaud, M., Le Bissonnais, Y., 2007. Soil aggregate stability improvement with urban composts of different maturities. *SSSAJ*, 71, 2, 413-423.
- Annabi, M., Le Bissonnais, Y., Le Villio-Poitrenaud, M., Houot, S., 2011. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to an cultivated silty loam soil. *Agri Eco & Environ*, doi:10.1016/j.agee.2011.07.005
- Badia, D., 2000. Straw management effects on organic matter mineralization and salinity in semiarid agricultural soils. *Arid Soil Res and Reha*, 14: 193-203.
- Baldock, J. A., and Nelson, P. N., 2000. Soil Organic Matter. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. B-25-B-84.
- Barrera-Bassols N., Zinck, J. A., 2003. Ethnopedology: a worldwide view on the soil knowledge of local people. *Geoderma*, 111, 171-195.
- Barrios, E. and Trejo, M. 2003. Implications of soil knowledge for integrated soil management in Latin America. *Geoderma*, 111, 217-231.
- Barzegar, A. R., Nelson, P. L., Oades, J. M., Rengasamy, P., 1997. Organic matter, sodicity, and clay type: Influence on soil aggregation. *SSSAJ*, 61:1131-1137.
- Borchardt, G., 1989. Smectites. In Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in soil environments*, SSSA, Book Series: No. 1. Madison, WI, pp. 675-728.
- Breuer, J., Schwertmann, U., 1999. Changes to hard setting properties of soil by addition of metal hydroxides. *Euro J Soil Sci*, 50, 657-664.
- Bronick, C. J., and Lal, R., 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124: 3-22.
- Campos, C. A., Oleschko, K., Cruz, H. L., Etchevers, B. J. D., Hidalgo, M. C., 2001. Estimación de alófono y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *Terra*, 19, 2: 105-116.
- Carrera-Hernández, J. J. and Gaskin, S. J., 2007. The basin of Mexico aquifer system: regional groundwater level dynamics and database development. *Hidrogeology J*, 15: 1577-1590.
- Chevallier, T., Woignier, T., Toucet, J., Blanchart, E., 2010. Organic carbon stabilization in the fractal pore structure of Andosols. *Geoderma*, 159, 1-2, 182-188.
- Churchman, G. J., 2000. The alteration and formation of soil minerals by weathering. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M. (ed.). CRC Washington D. C. pp. F-3-F-76.
- Churchman, G. J., Skjemstad, J. O., and Oades, J. M., 1993. Influence of clay minerals and organic matter on effects of sodicity on soils. *Aust J Soil Res*, 31, 779-800.

- Cotrufo, M. S., Conant, R. T., Paustian, K., 2011. Soil organic matter dynamics: land use, management and global change. *Plant Soil*, 338: 1-3.
- Dendooven, L., Alcántara, H. R. J.; Valenzuela, E. C., Luna, G. M., Pérez, G. F., Marsch, R., 2010. Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: A review. *Soil Biol & Biochemistry*, 42, 865-877.
- Dixon, J. B., 1989. Kaolin and serpentine group minerals. In Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in soil environments*, SSSA, Book Series: No. 1. Madison, WI, pp. 675-728.
- Drees, R.L., Wilding, L.P., Smeck, N.E., Senkayi, A.L., 1989. Silica in soils: Quartz and disordered silica polymorphs. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in soil environments*, SSSA, Book Series: No. 1. Madison, WI, pp. 913-974.
- Dubroeuq, D., Geissert, D., Quantin, P., 1998. Weathering and soil forming processes under semi-arid conditions in two Mexican volcanic ash soils. *Geoderma*, 86: 99-122.
- Escobar, O. M. E., and Hue, N. V., 2007. Current developments in organic farming. *Recent Res Dev Soil Sci*, 2: 29-62.
- Fransmeier, D. P., Chantres, C. J. and Wood, J. T., Hardsetting soils in Southeast Australia: landscape and profile processes. *SSSAJ*, 60, 1178-1187.
- Gamble, E.E. and Daniels, R.B., 1972. Iron and silica in water, acid ammonium oxalate and dithionite extracts of some North Carolina coastal plain soil. *Soil Sci Soc Am Proc*, 36, 939-943.
- García-Orenes, F., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., Gómez, I., Mataix-Beneyto, J., 2005. Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil & Till Res*, 82: 65-76.
- Goldberg, S., and Glaubig, R. A., 1987. Effect of saturation cation, pH, and aluminum and iron oxide on the flocculation of kaolinite and montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 35, 3: 220-227.
- Gutiérrez-Castorena, M. C., Ortiz-Solorio, C. A., Sánchez-Guzmán, P., 2007. Clay coatings formation in tepates from Texcoco, Mexico. *Catena*, 71: 411-424.
- Gutiérrez-Castorena, M.C., Stoops, G., Ortiz S., C.A.; Ávila, G.L., 2005. Amorphous silica materials in soils and sediments of the Ex-lago de Texcoco, Mexico: an explanation for its subsidence. *Catena*, 60: 205-226.
- Huizar-Álvarez, R., Hernández, G., Carrillo-Martínez, M., Carrillo-Rivera, J. J., Hert, T., Ángeles, G., 2002. Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, central Mexico. *Environ Geo*, 43: 385-399.
- Jiang, X., Wright, A. L., Wang, J., Li, Z., 2011. Long-term tillage effects on the distribution patterns of microbial biomass and activities within soil aggregates. *Catena*, 87: 276-280.

- Juma, N. G., 1993. Interrelationships between soil structure/texture, soil biota/soil organic matter and crop production. *Geoderma*, 57: 3-30
- Kämpf, N., Scheinost, Schulze, D. G. Oxide minerals. In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M. (ed.). CRC Washington D. C. Pp.F-125-F-168.
- Kladivko, J. E. ,1994. Efectos de los residuos orgánicos en las propiedades físicas del suelo. In: *Managing Agricultural Residues*. Unger W. P. (Ed.), CRC press. Pp. 13-141.
- Lugo-Hubp, J. y Salinas-Montes, A., 1996. Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al norte de la ciudad de México) y su relación con peligros naturales. *Rev Mex de Ciencias Geol*, 13, 2:240-251.
- Leroy, B. L. M., Herath, M. S. K., De Neve, S., Gabriels, D., Bommele, L., Reheul, D. and Moens, M., 2008. Effect of vegetable, fruit and garden (VFG) waste compost on soil physical properties. *Compost Sci & Uti*, 16, 1: 43-51.
- Levy, G. J., 2000.Sodicity.In: *Handbook of Soil Science*. Sumner M (ed.). CRC Washington D. C. pp. G-27-G-63.
- Madejón, P., Marañón, T., Murillo, J. M., Robinson, B., 2006. In defense of plants as biomonitors of soil quality. *Environ Poll*, 142:1-3.
- Masto, R. E., Chonkar, P. K., Singh, D., Patra, A. K., 2009. Changes in soil quality indicators under long-term sewage irrigation in a sub-tropical environment. *Environ Geol*, 56: 1237-1243.
- Mizuno, K., Kondo, M., Kamon, M., 2003. A study on a peculiarity of the consistency of various bentonite clays, and interrelationships between the consistency and other primary characteristics of bentonite. *Nendo Kagaku*, 43, 1: 1-13.
- Murphy, C. P. 1986. Thin section preparation of soils and sediments.ABA, UK, 149 p.
- Oades, J. M., 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56: 377-400.
- Okamura, Y. & Wada, K., 1983. Electric charge characteristics of horizons of Ando (B) and red-yellow B soils and weathered pumices. *J Soil Sci*, 34, 287-295.
- Pablo-Galán, L., de Pablo, J.J., and Chávez-García, M. L., 2002. Clay Mineralogy and diagenesis of the Recent-Pleistocene volcanogenic sedimentary sequence of the Mexican Basin. *Rev Mex Cienc Geológicas*, 19, 1: 38-49.
- Parfitt, R. L., 1990. Allophane in New Zealand-a review. *Aust J Soil Res*, 28: 343-360.
- Parfitt, R. L., and Henmi, T., 1982. Comparison of an oxalate-extraction method and an infrared spectroscopic method for determining allophane in soil clays. 28: 183-190.

- Parfitt, R. L., and Clayden, B., 1991. Andisols: the development of a new order in Soil Taxonomy. *Geoderma*, 49: 181-198.
- Podwojewski, P. & Germain, N., 2005. Short-term effects of management on the soil structure in a deep tilled hardened volcanic-ash soil (cancagua) in Ecuador. *European J Soil Sci*, 56: 39-51.
- Rasa, K., Eickhorst, T., Tippkötter, R., Yli-Halla, M., 2012. Structure and pore system in differently managed clayey surface soil as described by micromorphology and image analysis. *Geoderma*, 173-174:10-18.
- Saito, K., Linquist, B., Keobualapha, B., Shiraiwa, T., Horie, T., 2006. Farmers' knowledge of soils in relation to cropping practices: A case study of farmers in upland rice based slash-and-burn different organic materials. *Agri Eco & Environ*, 31: 325-335
- Schwertmann, U., & Taylor, R. M., 1989. Iron Oxides. In Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in soil environments*, SSSA, Book Series: No. 1. Madison, WI, pp. 380-438.
- So, H. B., & Aylmore, A. G., 1993. How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behavior. *Aust J Soil Res*, 31: 761-777.
- Stoops, G., 2003. Guidelines for the analysis and description of soil and regolith thin sections. SSSA, Madison, WI, 184 p.
- Tejada, M., García, C., González, J. L., Hernández, M. T., 2006. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: influence on the physical, chemical and biological properties of soil. *Soil Biol & Biochem*, 38: 1413-1421.
- van Reeuwijk., 2003. Procedimientos para el análisis de suelos clasificación y correlación. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco, México.
- Wada, K., 1989. Allophane and imogolite. In Dixon, J.B., Weed, S.B. (Eds.), *Minerals in soil environments*, SSSA, Book Series: No. 1. Madison, WI, USA. pp. 1051-1088.
- Woingnier, T., Pochet, G., Doumenc, H., Dieudonné, P., Duffours. L., 2007. Allophane: a natural gel in volcanic soils with interesting environmental properties. *J Sol-Gel Sci Tech*, 41, 25-30.
- Wong, V. N. L., Greene, R. S. B., Dalal, R. C., Murphy, B. W., 2010. Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review. *Soil Use & Manage*, 26: 2-11

Cuadro 1. Porcentaje de poros y agregados en la capa arable de las clases de tierra locales.

Clase de tierra	% Agregados	% Poros
Sedimentos basales	88.15 (3.86) c	11.85 (3.86) d
Lama	48.31 (16.25) b	40.18 (19.01) b
Lama salina	56.92 (15.94)ab	33.59 (18.36) bc
Negra *	64.8 (15.05) a	27.50 (16.84) c
Negra **	48.64 (19.01) b	48.83 (19.30) a
Negra salina	56.88 (15.40)ab	37.27 (16.93) bc

* Tierra negra donde no se han incorporado estiércol ni mejoradores fuente de calcio desde hace 10 años. ** Tierra negra donde se incorporan estiércol y mejoradores fuente de calcio periódicamente. Los valores que se muestran son medias y sus respectivas desviaciones estándar entre paréntesis. Las letras indican las diferencias estadísticas.

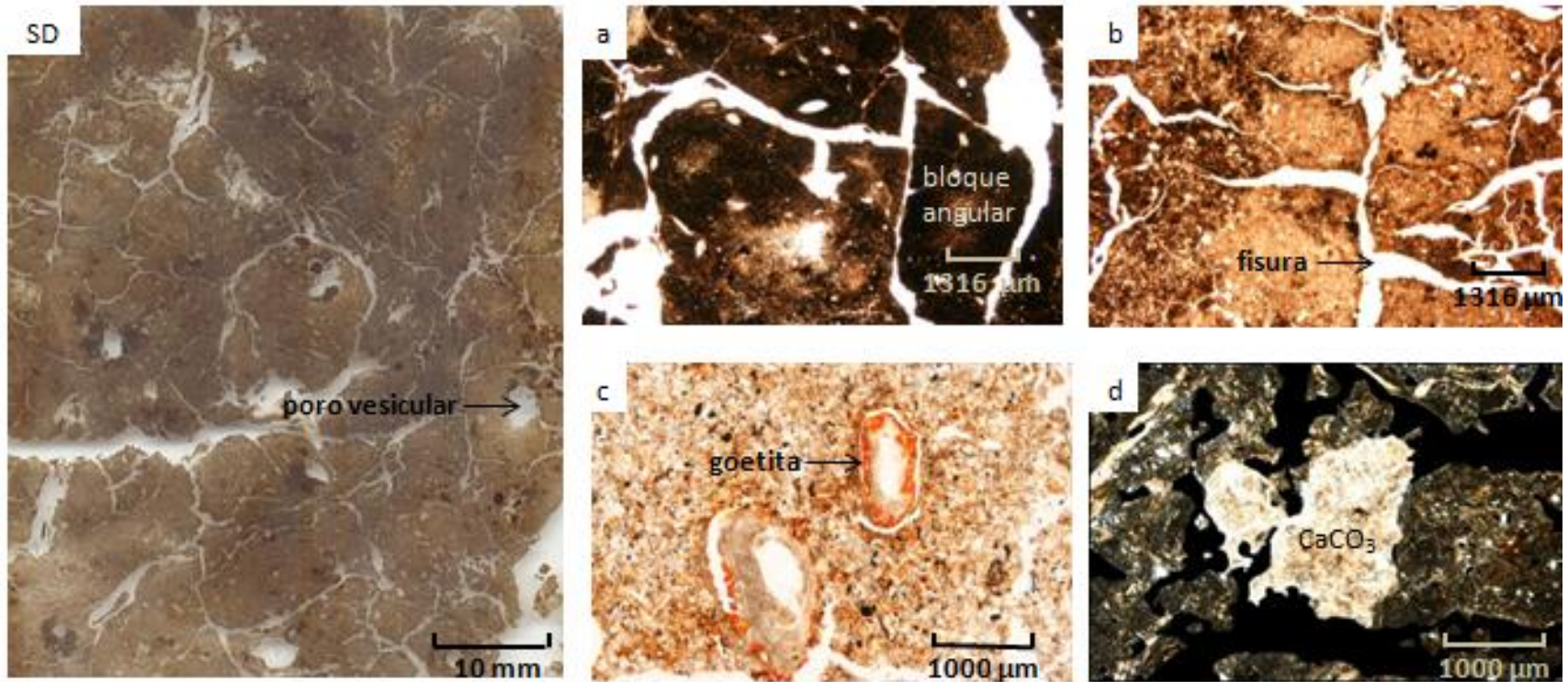


Figura 1. Micromorfología de los sedimentos basales de las clases de tierra. Predominaron los bloques angulares que contienen poros vesiculares y están separados por fisuras (b). Los poros presentan revestimientos del óxido de hierro goethita (c). También se observaron nódulos de carbonatos de calcio (d).

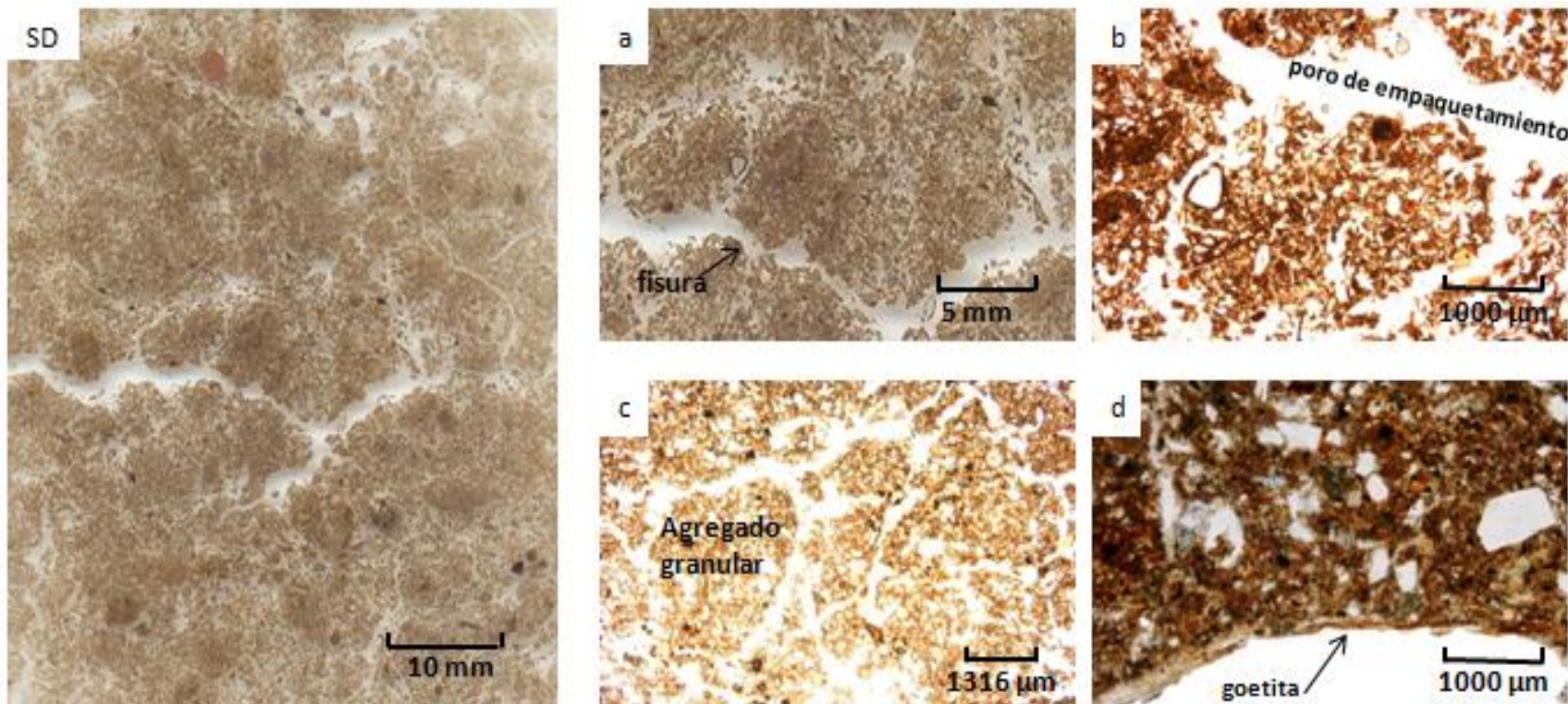


Figura 2. Micromorfología de la capa superficial (0-20 cm) de una parcela de tierra negra salina donde se han aplicado estiércol, yeso y tierra blanca. Se observaron agregados granulares rodeados de poros de empaquetamiento (b) y fisuras acomodadas (SD, a y c) que indican procesos de contracción-expansión. También se presentaron hipo-revestimientos con goethita en las caras de los agregados (d).

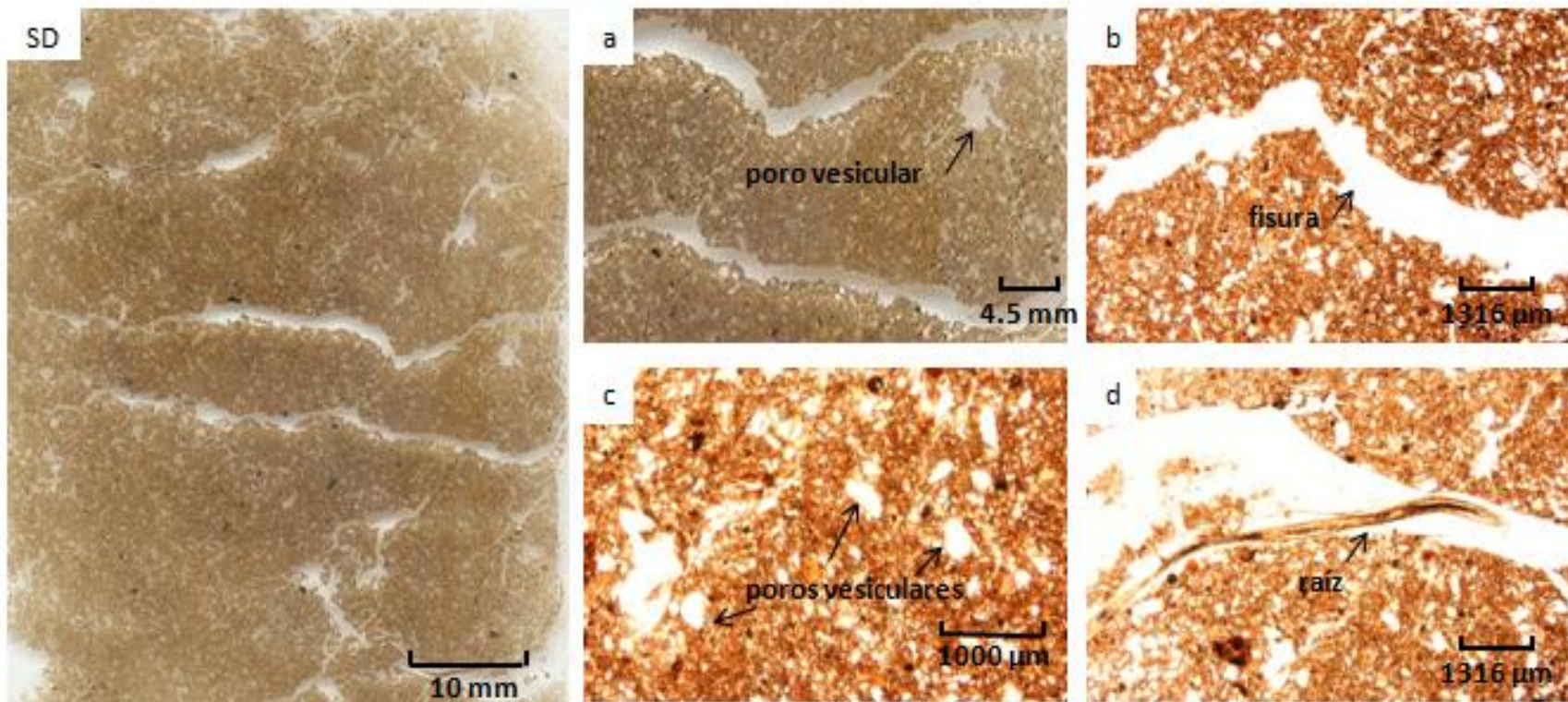


Figura 3. Micromorfología de la capa superficial (0-20 cm) de una parcela de tierra negra que no se ha labrado durante 10 años y sin aplicaciones periódicas de estiércol. Se observó una reducción en el volumen poroso (31 %) y dominancia de fisuras (SD, a y b) que indican procesos de contracción-expansión. La estructura está débilmente desarrollada como dan evidencia los agregados que no se alcanzan a separar, los cuales además exhiben poros vesiculares (SD, a y c) que indican drenaje reducido. También se observó la presencia de raíces en las fisuras (d).

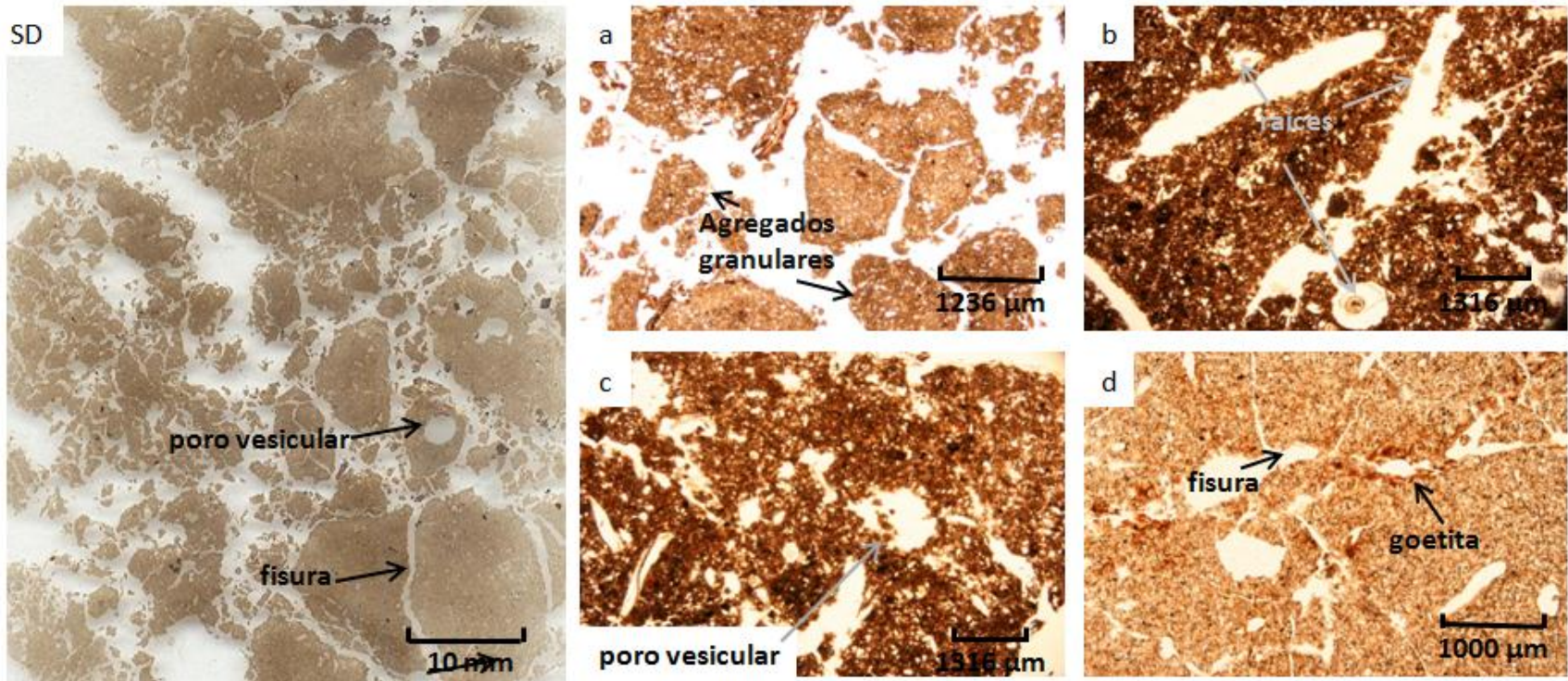


Figura 4. Micromorfología de la capa superficial (0 – 20 cm) de una parcela de tierra negra donde se ha incorporado estiércol y tierra blanca. Se presentan agregados granulares rodeados por poros de empaquetamiento (a), así como bloques subangulares separados por fisuras (SD y a). Ambos tipos de agregados con poros vesícula (SD y c). También se observaron varias raíces desarrollándose en las fisuras (b). Así mismo, se observaron hipo-revestimientos de goethita en las caras de los agregados (d).

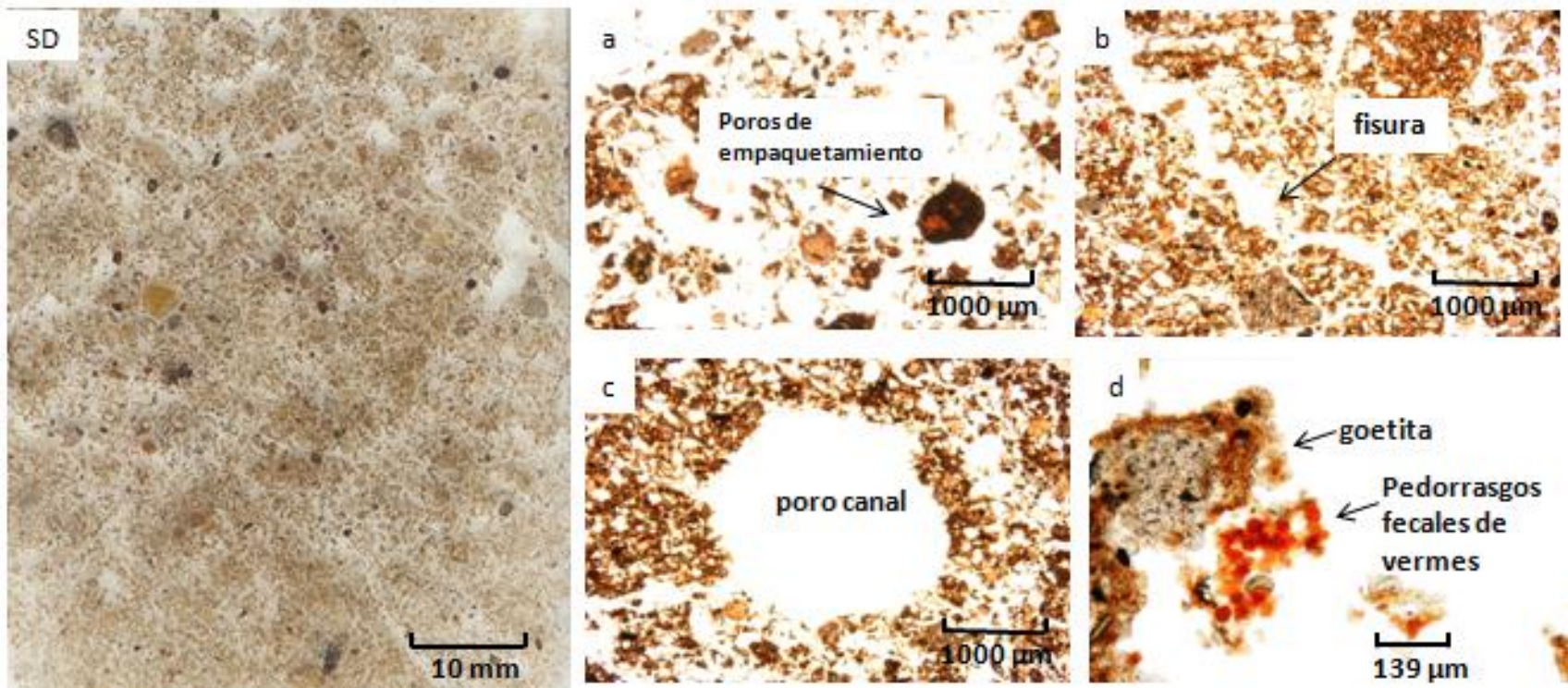


Figura 6. Micromorfología de la capa superficial (0-20 cm) de una parcela de tierra lama donde se incorpora estiércol periódicamente. Predominan los agregados migajosos que contienen poros de empaquetamiento (a). También se observan fisuras acomodadas (b), que indican procesos de contracción-expansión. En esta clase de tierra se presentaron poros canales y pedorrasgos fecales (c y d) que son resultado de la alta actividad biológica por mesofauna visualizada en campo. Además se observaron acumulaciones de goethita sobre las caras de los agregados (d).

Cuadro 2. Extracción selectiva de formas de Fe, Al y Si de las clases de tierra locales.

Clase de tierra	Fe _{ox}	Fe _{di}	Al _{ox}	Al _{di}	Si _{ox}	Si _{di}	Al _{ox} +1/2Fe _{ox}	Al _{ox} /Si _{ox}	Si _{ox} /Al _{ox}	Fe _{ox} /Fe _{di}
	%									
<i>Capas superficiales</i>										
Lama	3.80	3.90	0.53	0.72	0.98	0.84	2.49	0.54	1.85	1.04
Lama salina	2.20	2.30	0.52	0.74	1.30	0.95	1.69	0.40	2.50	1.05
Negra	2.40	2.00	0.55	0.66	0.68	0.93	1.56	0.81	1.24	0.83
Negra salina	2.80	2.40	0.58	0.76	0.82	0.98	1.76	0.71	1.41	0.86
<i>Sedimentos basales</i>										
Lama	3.60	3.80	0.58	1.10	1.75	0.90	2.47	0.33	3.02	1.06
Negra	4.10	4.30	0.80	1.25	1.75	1.06	2.92	0.46	2.19	1.05
Negra salina	1.50	1.70	0.50	0.70	1.42	1.14	1.35	0.35	2.84	1.13

Al_{ox}, Fe_{ox} y Si_{ox} = formas de Al, Fe y Si extraídas con oxalato ácido; Al_{di}, Fe_{di} y Si_{di} = formas de Al, Fe y Si extraídas con ditionito-citrato-bicarbonato. Los sedimentos basales de la tierra lama no se incluyeron porque la profundidad del manto freático en campo (20 cm desde la superficie en temporada de sequía) no permitió su colecta.

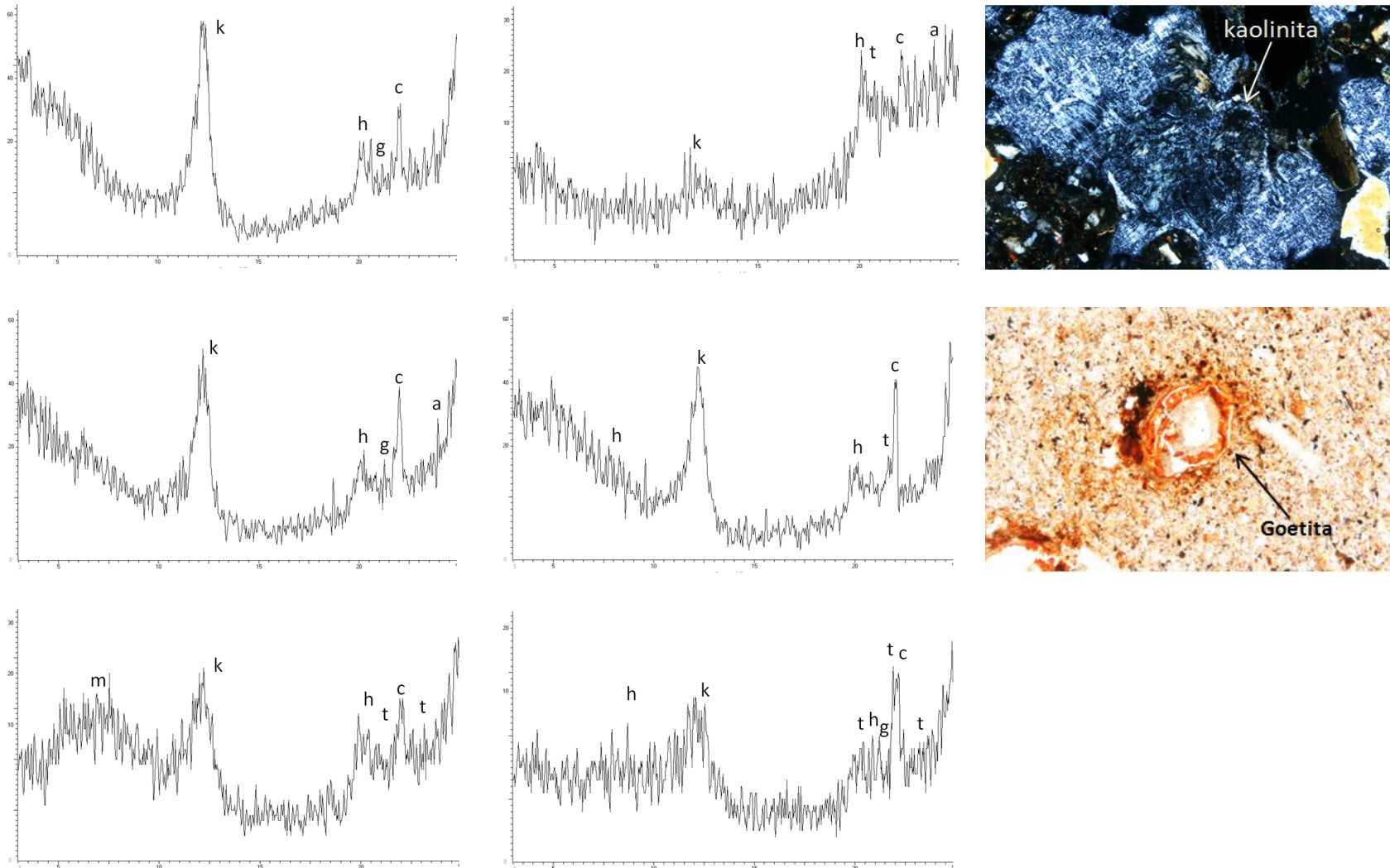


Figura 7. Mineralogía y micromorfología de la tierra lama (izquierda) y tierra negra (derecha), de las capas superficiales no salinas (arriba), salinas (medio) y sedimentos basales (abajo). Kaolinita (k), haloisita (h), goetita (g), cristobalita (c), tridimita (t), albita (a), y montmorillonita (m).



Pasto salado (*Distichlis spicata* L.)



Romenito (*Suaeda nigra* L.)



Quelite cenizo (*Chenopodium album* L.)



Pasto forrajero (*Lolium multiflorum* Lam.)



Avena (*Avena sativa* L.)



Alfalfa (*Medicago sativa* L.)

Figura 8. Plantas indicadoras de salinidad y cultivos principales de la zona de estudio.

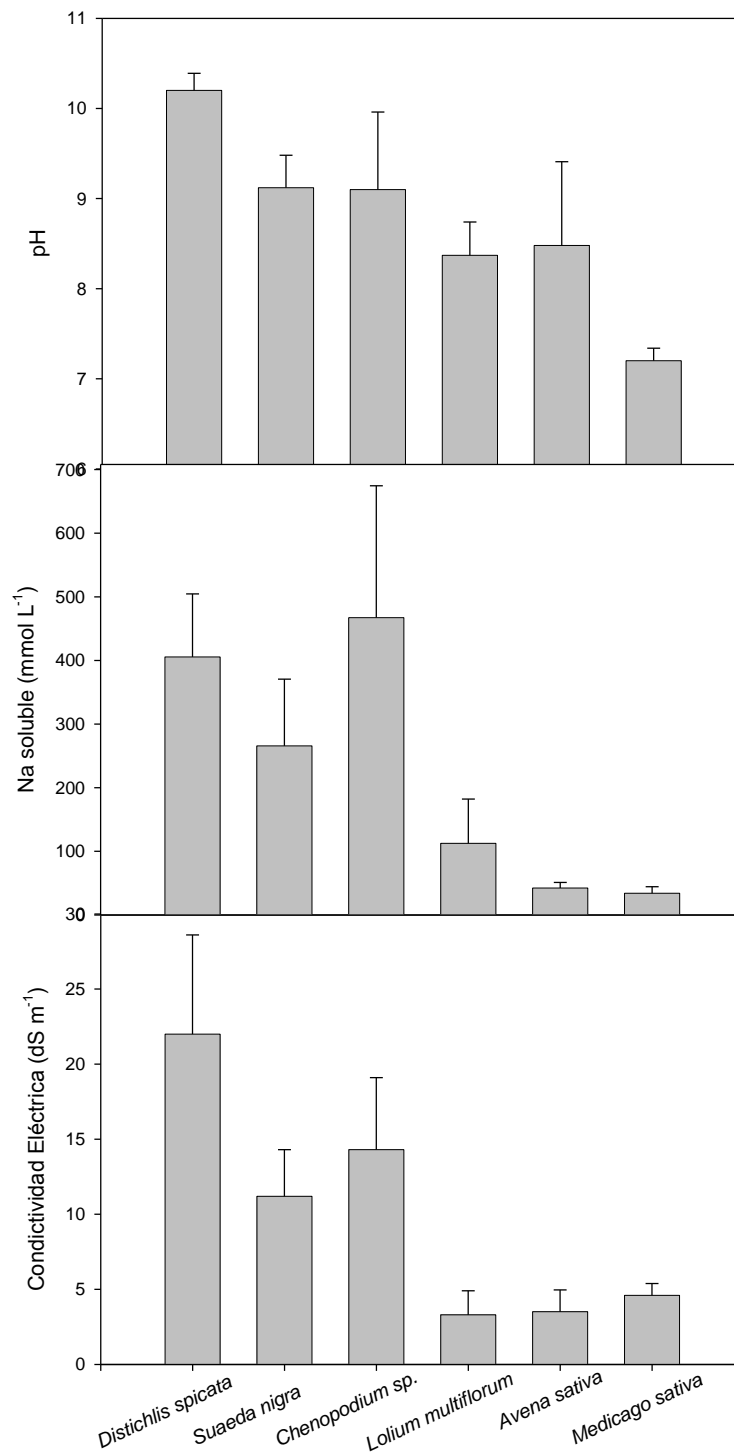


Figura 9. Niveles de salinidad, sodicidad y alcalinidad en los que se desarrollan las plantas halófitas y los cultivos en la zona de estudio. Las barras sobre las columnas muestran la desviación estándar.

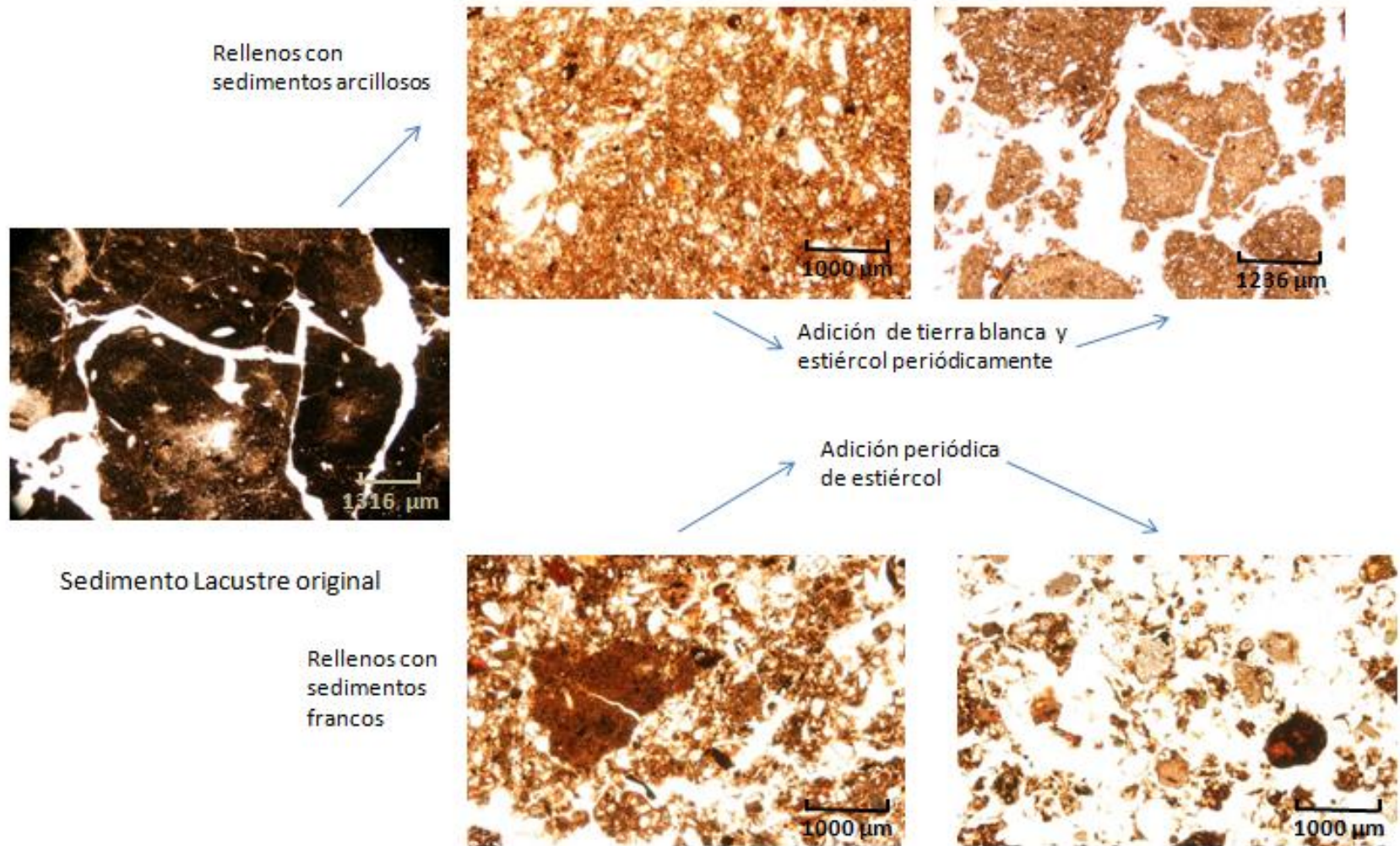


Figura 10. Impacto de las practicas antrópicas en la estructura de las clases de tierra locales.

CONCLUSIONES GENERALES

Los suelos resultantes del establecimiento del distrito de riego “Los Insurgentes” fueron diagnosticados como no aptos para la agricultura debido a la salinidad. Sin embargo, las personas de la localidad utilizaron suelos francos y calcáreos, así como yeso, estiércol y riegos con aguas residuales, que en poco más de tres décadas desalinizaron el 84% de los suelos, permitiendo su incorporación a la agricultura. Este proceso, a su vez, modificó las propiedades edáficas y en consecuencia la clasificación y calidad agrícola de los suelos.

La influencia de las prácticas antrópicas en estos suelos solo fue reconocida a través de la WRB donde fueron designados como Antrosoles, hidrágicos, térricos, gléyicos. En contraste, para Soil Taxonomy las condiciones ácuicas derivadas de la cercanía de la Laguna de Zumpango, fueron más importantes que los procesos antrópicos por lo que los suelos se clasificaron como Endoaquepts y Endoaquents. Por lo tanto, con base en los resultados de la presente investigación, se recomendó reconocer el factor antrópico dentro de las condiciones ácuicas en Soil Taxonomy con la finalidad de reconocer los procesos antrópicos en los suelos donde se presentan las condiciones ácuicas.

Los suelos localmente se clasifican como tierras lamas y negras, ambas clases con tipos de acuerdo con la salinidad. De estas, las tierras lamas se formaron a partir de la adición de materiales de textura franca que sepultaron los suelos arcillosos salinos originales y las tierras negras se formaron a partir de sedimentos arcillosos salinos dragados de la laguna de Zumpango. La presencia de los tipos salinos depende tanto del manejo como de la cercanía de la laguna de Zumpango, a través de la influencia del manto freático.

De las prácticas antrópicas que se llevan a cabo, el uso de materiales de relleno con texturas francas, la incorporación de mejoradores fuente de calcio y estiércol, así como los riegos con aguas residuales controlados donde no se permite la formación de zonas anegadas, también mejoraron la calidad agrícola de los suelos (tierras). El gradiente de calidad en las clases de tierras fue: lama > negra > negra salina > lama salina, donde el mejoramiento de la calidad estuvo representado por la reducción de la salinidad ($PSI < 15$, pH neutro y $CE < 0.7 \text{ dS m}^{-1}$) y el incremento de la reserva de CO (hasta $107 \text{ ton C ha}^{-1}$), de la actividad biológica (AD de $56 \mu\text{g}$

de TPF g^{-1} de suelo seco d^{-1}), de la estabilidad estructural (EE hasta 64.7 %) y de la productividad agrícola (hasta $180 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de alfalfa). De acuerdo con estos resultados, los parámetros más sensibles a las prácticas de manejo fueron el pH, el Na_i , el $\text{Ca}^{2+}_{(\text{ac})}$, la CIC, el CO, el N_t , la AD y la EE, por lo que constituyen los mejores indicadores de calidad.

Estos resultados dan evidencia del impacto positivo de las prácticas agrícolas en los suelos de la zona. Sin embargo, el uso de aguas residuales no tratadas constituye una fuente de contaminación, que compromete el éxito de estas prácticas para rehabilitar los suelos.

Adicionalmente, los suelos estudiados presentaron agregados esferoidales superficiales con valores altos de densidad aparente (D_a), agregados arcillosos floculados en el subsuelo bajo condiciones de saturación hídrica y sodicidad ($\text{PSI} > 65$); y altos valores de D_a en todos los agregados secos. Estas características no correspondieron con el contenido de materia orgánica, la actividad biológica, la textura arcillosa, la salinidad ó la sodicidad de los suelos, lo que dio evidencia de su relación con otros factores. Los resultados obtenidos de la investigación de estas características reveló que otro factor que incide en la floculación y comportamiento de los agregados, fue la presencia de arcillas alofánicas, kaolinita, haloisita, goetita y cristobalita, todos ellos productos derivados de materiales volcánicos.

Las contribuciones de la presente investigación al campo de conocimiento de la edafología fueron: la aplicación del conocimiento local como marco de referencia para cartografiar, aprender del manejo y evaluar la calidad agrícola de Antrosoles en el valle de México. También se obtuvo la clasificación taxonómica y la calidad agrícola de los suelos del distrito de riego “Los Insurgentes”, correspondiente al Municipio de Teoloyucan, Estado de México. En estos suelos los parámetros pH, sodio intercambiable, calcio soluble, capacidad de intercambio catiónico, carbono orgánico, nitrógeno total, actividad de la deshidrogenasa y estabilidad estructural, resultaron ser los mejores indicadores de calidad. Además se asociaron a las arcillas alofánicas, la kaolinita, la haloisita, la goetita y la cristobalita con la estabilidad de los agregados en condiciones de saturación hídrica y alta sodicidad, así como en la formación de agregados granulares superficiales no biológicos y el endurecimiento de los agregados secos que deriva en valores altos de densidad aparente.