



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOLOGÍA  
CIENCIAS AMBIENTALES Y RIESGOS

## **Evolución de suelos en planicies lacustres de reciente desecación**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:  
**José Manuel Bautista Guzmán**

Tutora:  
Dra. Christina Siebe Grabach, Instituto de Geología, UNAM

Jurado examinador:  
Lorenzo Vázquez Selem, Instituto de Geografía, UNAM  
Silke Cram Heydrich, Instituto de Geografía, UNAM  
Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena, Colegio de Postgraduados  
Miguel Castillo Rodríguez, Instituto de Geología, UNAM

Ciudad de México, septiembre de 2018.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*“Tiene que empezar en algún lado, tiene que empezar en algún momento... ...que mejor lugar que este, que mejor momento que ahora”*

Rage Against the Machine

Antes que nada, mil gracias a mi familia quien me ha apoyado siempre.

A mi madre Alejandra Guzmán Beltrán por su apoyo incondicional.

## **Agradecimientos**

A cada persona que compartió un instante y una sonrisa conmigo.

A la UNAM, por ser parte de mi vida y darme la oportunidad de crecer como ser humano y profesionalmente.

Al Instituto de Geología y al Posgrado en Ciencias de la Tierra, por darme las herramientas necesarias para obtener más conocimientos y culminar mi investigación de tesis.

Al CONACYT, por la beca otorgada para poder estudiar una maestría.

Al proyecto PAPIME PE102217.

A mi tutora la Dra. Christina Siebe Grabach, de la que eh aprendido mucho sobre suelos, por darme la oportunidad de integrarme a su grupo de trabajo donde no solo encontré amistades, si no también personas que me compartieron de sus conocimientos. Son una gran familia. Gracias también por sus consejos, han sido de mucha ayuda.

A la Dra. Lucy Mora, por ser mi compañera de campo, instructora de laboratorio, pero sobre todo por ser una amiga en este camino. Es y fue una parte importante para culminar este trabajo.

A la Dra. Blanca Lucia Prado, por permitirme tener un sitio de muestreo en el Rancho Venecia, propiedad de su familia. Pero sobre todo por los conocimientos compartidos.

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem, quien además de ser parte de mi jurado, me otorgo su apoyo para identificar algunos sitios de muestreo, por sus conocimientos compartidos.

A los miembros de mi jurado, Dra. Silke Cram Heydrich, Dra. Carmen Gutiérrez Castorena, Dr. Miguel Castillo Rodríguez, por sus comentarios acertados que ayudaron a enriquecer y mejorar este trabajo.

Al Biol. Jorge René Alcalá, por su apoyo en el análisis de texturas. A la Mtra. Kumiko Shimada Miyasaka, por el apoyo en el análisis de cationes intercambiables, extracción de Fe con oxalato y ditionito y carbono orgánico. A la Dra. Olivia Zamora Martínez, por el apoyo en el análisis de cationes solubles.

Al Dr. Sergey Sedov, de quien aprendí mucho sobre la micromorfología de suelos, por su ayuda e interés en la descripción de mis láminas delgadas de suelo. Por ayudarme a resolver algunas de mis dudas para este trabajo.

Al Mtro. Jaime Díaz Ortega, por enseñarme y orientarme en la realización y descripción de las láminas delgadas de suelo para este trabajo, por ayudarme a resolver algunas de mis dudas de micromorfología, pero sobre todo por sus consejos y amistad.

A la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, quien me dio mis primeros consejos al entrar al Posgrado de Ciencias de la Tierra y por sus conocimientos compartidos.

Al “Señor Mario” por acompañarme a campo y apoyo moral para acabar este trabajo.

A los municipios de Zumpango, Nextlalpan y Tonanitla, por otorgar los permisos para muestrear. También gracias a los municipios de Jaltengo y Tecámac, ya que también otorgaron permisos para muestrear en sus terrenos, aunque al final no se realizó trabajo de campo en estos.

A los cronistas de: Tonanitla, Felipe Flores Rodríguez y de Nextlalpan Juan Manuel Begines Juárez. Fueron, parte importante en el recorrido y selección de sitios. También gracias al señor Arturo Martínez García quien también me apoyo en algunos recorridos y ofreció un sitio de muestreo.

A la Mapoteca Manuel Orozco y Berra, por facilitar y autorizar la reproducción de los planos antiguos que ayudaron a reconocer y seleccionar los sitios de muestreo.

A Alejandra García, por el apoyo en la realización de los mapas en la parte del anexo y área de estudio.

A mis hermanos Víctor, Angélica, Mary y Roció, por su apoyo y los momentos compartidos seguimos siendo vieja escuela. A mi padre José Bautista H. A Alexa, Alan y Leo, porque siempre comparten una sonrisa y momentos agradables.

A mis queridos “tóxicos” (Maniac, Chayo, Ojos, Agrio, Ray, Rasta, Dondie, Choco, Pitufito y Príncipe) porque siempre hacen más ameno el día a día. A mis hermanos Hugo (Bobi) y Daniel (Buy) por que la amistad crece día a día a pesar de las distancias. A Jorge (señor Rojo). Víctor Arguez y Nayeli. Gracias a todos por los momentos compartidos.

Mil gracias a Arturo, Marco Pablo y Daniel Brito, quienes además de hacer más ameno la estancia durante la maestría tuvieron la paciencia de acompañarme en algunas ocasiones a campo.

A Eliuth, por sus consejos de vida y académicos, por compartir los pozoles, los burritos sobre todo por escucharme y por su amistad.

A Tere, por escucharme, aconsejarme y por tu amistad. Siempre que nos vemos es una experiencia gourmet.

A las secretarias María Luisa Reyes Ochoa y Gloria Benítez Alba, por su orientación en todos los trámites y por la paciencia que nos tienen.

A mis compañeros de cubículo: Javi, Nicté, Isaac, Fanis, Moy, Dunia, David, Felipe, gracias a ustedes fue más agradable la estancia en el instituto. A mis compañeros de maestría: Erandi, Leti, Alexia, Ale Noemí, yahir, Gina, Yazmín, Lilit, Ema, Zara, Roger, Diana, Juanito, Yus, Karla A., Toñito, Tamara. Muy en especial a Uriel (†), como me hubiera gustado que siguieras con nosotros.

# Índice

	Página
<b>Contenido</b>	
<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>2</b>
Objetivo general.....	4
Objetivos particulares.....	5
Hipótesis.....	5
<b>2. Antecedentes</b> .....	<b>6</b>
Factores formadores .....	6
El factor clima .....	6
El relieve .....	7
El material parental .....	7
La actividad de los organismos .....	7
El tiempo .....	8
Procesos pedogenéticos.....	8
Cronosecuencias.....	11
Algunos rasgos que evidencian la pedogénesis .....	13
Óxidos de hierro .....	13
Procesos reductomórficos .....	14
Estructura del suelo .....	15
Translocación y acumulación de sales solubles .....	16
Suelos afectados por la sal .....	17
Consecuencias de la presencia de sales en suelos .....	17
Rasgos morfológicos.....	21
<b>3. Generalidades de la cuenca de México y sus alrededores</b> .....	<b>24</b>
La cuenca de México .....	24
El drenaje de la cuenca.....	27
Vegetación y fauna de la cuenca.....	33
<b>4. Área de estudio</b> .....	<b>35</b>
Xaltocan.....	36
Tonanitla.....	37
Zumpango.....	38
Clima en la zona de estudio .....	38
Geología del sitio.....	38
Estudios de suelos en la zona.....	42
<b>5. Materiales y métodos</b> .....	<b>47</b>
<b>6. Resultados</b> .....	<b>53</b>
Descripción de los perfiles de suelo .....	53
Densidad aparente (DA) .....	56
Texturas.....	57
Valores de pH .....	57
Conductividad eléctrica (CE) .....	59
Saturación de sodio (Na%) .....	59
Materia orgánica (MO).....	61
Almacén de carbono orgánico en el perfil .....	62
Cationes y aniones solubles .....	63
Cationes.....	63

Aniones .....	65
Saturación de bases (cationes intercambiables) .....	66
Capacidad de intercambio catiónico y tipos de arcilla .....	68
Hierro extractable con ditionito y oxalato .....	70
Micromorfología de los suelos de la cronosecuencia .....	72
Perfil: P1.ZumS .....	72
Perfil: P2.XalN01 .....	75
Perfil: P3.XalN02 .....	78
Perfil: P4.XalT03 .....	82
Perfil: P5.XalT04 .....	86
Perfil: P6.XalT05 .....	89
<b>7. Discusión .....</b>	<b>93</b>
Constancia de los factores formadores .....	93
Tiempo de exposición .....	93
Material parental .....	95
Relieve.....	96
Clima .....	97
Actividad de los organismos .....	97
Avance de la pedogénesis a lo largo de la topocronosecuencia .....	98
Carbonatación .....	99
Formación de estructura .....	99
Iluviación de arcillas .....	100
Densidad aparente (DA).....	102
Movilización de sales .....	102
Conductividad eléctrica.....	102
Cationes y aniones solubles .....	103
pH.....	105
Saturación de sodio .....	105
Cationes intercambiables .....	106
Materia orgánica acumulada (Corg kg/m <sup>2</sup> ) .....	107
Neoformación de arcillas.....	109
Neoformación de arcillas/intemperismo .....	109
Neoformación de óxidos de Fe y procesos de óxido-reducción.....	110
Consideraciones finales.....	111
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>114</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>115</b>
Mapas consultados .....	123
Comunicación personal en campo.....	124
<b>Anexo .....</b>	<b>125</b>

## Índice de figuras

Figura	Sinopsis	Página
1.	Escala de tiempos de algunos procesos pedogenéticos y formación de algunos horizontes ....	9
2.	Variaciones temporales para alcanzar un estado estable de propiedades del suelo .....	10
3.	Representación donde el suelo alcanza una estabilidad con el tiempo .....	10
4.	Tipos de cronosecuencias .....	12
5.	Clasificación de los suelos salinos, sódicos y salino-sódicos .....	18
6.	Representación de algunos procesos de la salinización del suelo.....	20
7.	Representación de la estructura de una arcilla y la dispersión por sodio.....	21
8.	Antiguos lagos de la cuenca de la Ciudad de México .....	27
9.	Representación de la evolución de la desecación de los lagos .....	30
10.	Plano de la desecación de los lagos entre 1521-1864 .....	31
11.	Plano general del sistema de desagüe de los lagos .....	32
12.	Mapa de los municipios, área de estudio y los puntos de muestreo.....	35
13.	Mapa del uso y vegetación del suelo en la zona de estudio.....	36
14.	Series montañosas que rodean la zona de estudio .....	39
15.	Geología de la zona .....	40
16.	Zonificación del área de estudio .....	41
17.	Zonas de playas lacustres del antiguo lago de Xaltocan.....	43
18.	Perfiles de suelo descritos en el estudio de Reséndiz-Paz, 2013 .....	45
19.	Tipos de suelos y clase textural de la zona de muestreo según INEGI 2016.....	46
20.	Diagrama de flujo de los métodos utilizados para realizar la tesis .....	47
21.	Representación de la topo-cronosecuencia y los perfiles de suelo .....	49
22.	Representación de los horizontes descritos en campo .....	53
23.	Gráfica de los resultados de densidad aparente (DA).....	56
24.	Representación de la distribución de las texturas de los perfiles.....	57
25.	Gráfica de los resultados de pH .....	58
26.	Gráfica de los resultados de conductividad eléctrica (CE) .....	60
27.	Gráfica de los resultados de la saturación de sodio (Na%).....	61
28.	Gráfica de los resultados de materia orgánica (MO) .....	62
29.	Gráfica del almacén de Corg (kg/m <sup>2</sup> ) acumulado en años de exposición de los perfiles .....	63
30.	Concentraciones de los cationes solubles .....	64
31.	Concentraciones de los aniones solubles .....	66
32.	Concentraciones de los cationes intercambiables .....	68
33.	Gráfica del comportamiento de la CIC .....	69
34.	Gráficas de la comparación de las concentraciones de Fe <sub>d</sub> y Fe <sub>o</sub> .....	71
35.	Gráficas de las relaciones de Fe <sub>d</sub> /Fe <sub>t</sub> y Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub> .....	71
36.	Micromorfología de los horizontes Ap, mAp y Ah del perfil: P1.ZumS.....	73
37.	Micromorfología de los horizontes ABss, B(ss) y C del perfil P1.ZumS .....	74
38.	Micromorfología de los horizontes Ap, Ah, C1 y C2 del perfil P2.XalN01.....	76
39.	Micromorfología del horizonte C2 del perfil P2.XalN01 .....	77
40.	Micromorfología de los horizontes Ap1, Ap2 y Bnt del perfil P3.XalN02 .....	79
41.	Micromorfología de los horizontes BCwt, Cn1 y Cn2 del perfil P3.XalN02 .....	80
42.	Rasgos de iluviación de la parte profunda del perfil P3.XalN02.....	81
43.	Micromorfología de los horizontes Ap1, Ap2 y AB del perfil P4.XalT03.....	83
44.	Micromorfología del horizonte 2C del perfil P4.XalT03 .....	84
45.	Micromorfología de los horizontes 3Ah, 3AB y 3BC perfil P4.XalT03 .....	85
46.	Micromorfología de los horizontes mAp1 y Ap2 del perfil P5.XalT04 .....	87
47.	Micromorfología de los horizontes AB1, AB2 y 2Ah del perfil P5.XalT04 .....	88
48.	Micromorfología del horizonte ECw del perfil P6.XalT05 .....	90

49. Micromorfología del horizonte CB <sub>tn</sub> del perfil P6.XalT05.....	91
50. Micromorfología del horizonte CB(t) del perfil P6.XalT05.....	92
51. Regresión lineal del contenido de Corg (kg/m <sup>2</sup> ) acumulado en años .....	108
52. Resumen de los principales procesos pedogenéticos.....	112
53. Carta hidrográfica del Valle de México, plano.....	125
54. Forma original de los lagos en la época prehispánica.....	153
55. Forma de los lagos después de las primeras obras de drenaje (1824).....	154
56. Forma de los lagos en el siglo XX (de 1900 a 1930).....	155
57. Forma de los lagos en la última mitad del siglo XX (de 1959 a 2000).....	156
58. Vista actual de las áreas que abarcaban los lagos (2015) .....	157
59. Micromorfología del horizonte C(t)(k) <sub>2</sub> del perfil P2.XalN01, arcilla iluviada.....	157

### Índice de tablas

Tabla	Sinopsis	Página
1.	Descripción de algunos rasgos pedogenéticos y las condiciones en las que se forman.....	22
2.	Obras de drenaje para desecar los lagos .....	29
3.	Listado de la fauna que se encontraba en la cuenca de México .....	34
4.	Características de los perfiles de suelos en el estudio de Frederick <i>et al.</i> , (2005) .....	44
5.	Colecta, pre-tratamiento de muestras y análisis de laboratorio llevados a cabo.....	50
6.	Rasgos morfológicos más destacados de los 6 perfiles de suelo de la cronosecuencia .....	53
7.	Características generales de los sitios de muestreo y clasificación de suelos.....	55
8.	Tipos de arcilla de acuerdo a su capacidad de intercambio catiónico (CIC) .....	69
9.	Valores de la densidad aparente (DA) .....	145
10.	Texturas de cada uno de los perfiles de la cronosecuencia.....	145
11.	Valores de pH .....	147
12.	Valores de la conductividad eléctrica (CE) .....	147
13.	Porcentaje de saturación de sodio (Na%) .....	147
14.	Porcentaje de la materia orgánica (MO%).....	148
15.	Concentración de cationes solubles (meq/l) .....	148
16.	Concentración de aniones solubles (meq/l) .....	149
17.	Saturación de bases (cationes intercambiables).....	150
18.	Tipos de arcilla según la CIC (cmol/kg) para cada horizonte de los perfiles de estudio .....	151
19.	Desarrollo de la estructura de los perfiles de suelos .....	152

## Resumen

Las partes más bajas de la Cuenca de México solían estar cubiertas por 5 grandes lagos en 1325, año en el que los aztecas fundaron Tenochtitlan. Tres de los 5 lagos eran salinos y estaban ubicados en la parte norte (lagos de: Zumpango, Xaltocan y Texcoco), los otros dos lagos (Chalco y Xochimilco) estaban ubicados en la parte sur y eran de agua dulce. Para evitar las inundaciones durante la temporada de lluvias se construyeron diques en la época prehispánica y obras de drenaje artificial en la Colonia y el Porfiriato. Además, desde 1976 se implementó el sistema de drenaje profundo. Estas acciones provocaron la desecación de los lagos. El objetivo de este trabajo fue estudiar el desarrollo de suelos a partir de los sedimentos lacustres que quedaron expuestos a la pedogénesis durante los últimos 200 años en la parte norte de la cuenca de México.

La selección de los sitios se basó en mapas históricos y en información de los cronistas del sitio. Se estudiaron los procesos pedogenéticos de seis perfiles de suelos, distribuidos en las playas lacustres de los exlagos de Zumpango y Xaltocan y centro de este último. Estos perfiles se distribuyeron a lo largo de un gradiente altitudinal entre 2252 y 2241 msnm. Se formó una topocronosecuencia de suelos de edades entre 200 y 30 años. En cada sitio se describieron perfiles de suelo y se colectaron muestras de cada horizonte identificado en campo para análisis físicos, químicos y micromorfológicos. En láminas delgadas de suelo se analizó los agregados de origen pedogenético y porosidad (canales y fisuras), edaforrasgos como: la precipitación de carbonatos secundarios, la presencia de rasgos reductomórficos, la presencia de facetas de fricción-presión, así como de revestimientos de arcilla. En las muestras alteradas se analizó la distribución de partículas, el pH, la conductividad eléctrica y los iones mayores en extractos de saturación, y el contenido de carbón orgánico e inorgánico.

Se encontró que el gradiente altitudinal tiene influencia en el flujo de sales solubles acumulándolas en las partes más bajas y provoca un aumento en la saturación de sodio e iluviación de arcilla, sobre todo en los perfiles ubicados en las partes más bajas. Se observó una baja formación de estructura y baja acumulación de materia orgánica (MO) en los sitios afectados por la acumulación de sales, lo cual también inhibe la presencia de microorganismos y el crecimiento de vegetación y por ende la acumulación de materia orgánica. Hay rasgos de óxido-reducción en todos los perfiles, son más notorios en aquellos sitios que tienen el manto freático cercano a la superficie. En los sitios que corresponden con la mayor edad, el clima semiárido y la elevada evaporación ocasionan la acumulación de carbonatos secundarios en la masa basal del suelo, formando horizontes protocálcicos y cálcicos. En estos sitios también se observaron facetas de fricción-presión y una mayor acumulación de materia orgánica. Los depósitos lacustres otorgan, en su mayoría, texturas finas (limos-arcillas) que están mezcladas con restos de organismos que habitaban los lagos.

La relación entre el tiempo de exposición a la intemperie de los sitios de la topocronosecuencia arrojó que los más antiguos tienen un mayor desarrollo de estructura y una mayor acumulación de materia orgánica, principalmente. El perfil de suelo con mayor exposición a la pedogénesis (200 años) se clasificó como Haplic **Kastanozem** (Aric, Clayic, Loamic, Pachic, Raptic, Protovertic), los dos de 100 años 1) Calcic **Kastanozem** (Aric, Loamic, Raptic, Katosodic) 2) Calcic Abruptic **Solonetz** (Cutanic, Differentic, Ochric, Hypernatric, Raptic). El de 60 años Katocalcic, Mollic **Solonetz** (Cutanic, Humic, Loamic, Hypernatric, Katoprosalic). El de 50 años como Calcic **Kastanozem** (Aric, Clayic, Amphiraptic). Y el de 30 años como Calcaric Reductigleyic Mollic **Gleysol** (Alkalic, Protocalcic, Clayic, Humic, Protosalic, Sodic).

## 1. Introducción

En la cuenca de México se han ubicado asentamientos humanos desde épocas prehispánicas (Ezcurra, 1990). Los 5 lagos que cubrían el fondo de la cuenca (Xochimilco, Chalco, Texcoco, Xaltocan y Zumpango) otorgaron múltiples recursos para que estas poblaciones prehispánicas crecieran. Tres de estos lagos eran salinos (Texcoco, Xaltocan y Zumpango) y dos eran de agua dulce (Xochimilco y Chalco). Sin embargo, después de la llegada de los conquistadores se decidió drenar la cuenca para evitar las frecuentes inundaciones que sufría la ciudad. Estas obras de drenaje iniciaron en el siglo XVII y continúan hasta la fecha (Rojas, 1974; Burns, 2009; Galina, 2010; SACMEX, 2013; Jazcilevich *et al.*, 2015). Como consecuencia los lagos se han ido desecando paulatinamente hasta desaparecer casi por completo a mitad del siglo XX (Lara, 1988; Peña y Levi, 1989; Martínez de Vega, 1995; Galina, 2010). Los terrenos obtenidos a partir de la desecación de los lagos quedaron disponibles para otros usos. Al final del Porfiriato se buscaba incentivar el aprovechamiento agrícola de las planicies del lago de Zumpango, Xaltocan y San Cristóbal (González, 2011). Actualmente, el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad ha propiciado el cambio de uso de suelo de agrícola a habitacional en amplias zonas de estas planicies lacustres.

Hay pocos trabajos que describen las características de estos suelos, a pesar de que hay un gran interés por aprovecharlos, tanto como soporte de cultivos, como de infraestructura. La mayoría de los trabajos que hay se enfocan en lo que fue el ex Lago de Texcoco. Algunos de estos trabajos son:

- Gutiérrez y Ortiz (1992) determinan que los suelos del ejido de Boyeros y Atenco en el antiguo lago de Texcoco son Fluvisoles sálicos y Antrosoles y que la agregación se da solo en la parte superficial y es causada por la arcilla esmectítica y la sílice amorfa.
- Gutiérrez *et al.*, (1998) hacen un estudio sobre el origen del carbonato de calcio en los suelos del antiguo lago de Texcoco. Concluyen que es de origen lacustre, relacionado con antiguas playas donde se formaron nódulos concéntricos, o bien relacionados con aguas poco profundas donde el carbonato se precipitó micríticamente junto con los restos de los microorganismos, las acumulaciones lacustres están provocando que se formen horizontes cálcicos.

- Gutiérrez y Ortiz (1999) realizan un estudio del origen y evolución de los suelos del ex Lago de Texcoco por medio de una clasificación taxonómica, rasgos pedológicos y la influencia antropogénica, determinan que su origen es de material aluvial y depósitos lacustres, clasificándolos como Entisoles; mencionan que la acumulación de materia orgánica (MO), los sedimentos finos, los estratos ricos en carbonatos de calcio y la expansión-contracción ayudó a que estos cambiaran a Mollisol o Vertisol.
- Frederick *et al.*, (2005) quienes por medio de la geomorfología ubican algunas playas lacustres del lago Xaltocan, describiendo la presencia de carbonatos en casi todos los horizontes, los cuales determinan como Ap, AB, Bk, y C en su mayoría, con texturas finas y finas-gruesas.
- Millhauser (2013) quien realiza un análisis de muestras de suelo del municipio San Bartolomé de las Salinas, Tonanitla, dentro de lo que fue el lago de Xaltocan, y describe suelos de pH alcalino, con presencia de carbonatos de calcio y texturas en su mayoría finas.
- Reséndiz-Paz *et al.*, (2013) clasifican suelos en un sitio agrícola donde antes se ubicaba parte del ex Lago de Zumpango llegando a la conclusión que son Antrosoles, modificados por acciones antrópicas.

La desecación paulatina a lo largo de más de 400 años además ofrece la oportunidad de analizar cómo ha avanzado el desarrollo del suelo a partir de sedimentos lacustres, y de establecer qué procesos formadores de suelo actúan y a qué velocidades. Algunos de los trabajos relacionados con el tema en la cuenca de México son el de Gutiérrez y Ortiz (1999) y Gutiérrez *et al.*, 1998 (ambos mencionados arriba). En general existen pocos trabajos al respecto. Huseyin *et al.*, (2012) realizaron una investigación de la formación del suelo del antiguo lago Konya en Turquía con ayuda de una cronosecuencia y determinan que el relieve es factor que influye en la pedogénesis. Johnson *et al.*, (2015) realizan un estudio del desarrollo del suelo en una cronosecuencia de paisajes posglaciales y determinan que el tiempo es un factor primordial para el desarrollo del suelo además de las formas del relieve, otorgándoles algunos rasgos pedogenéticos como iluviación de arcilla, intemperismo y homogeneidad del material parental, por mencionar algunos.

Esta investigación pretende contribuir a comprender el patrón de distribución de suelos en cuencas sujetas a desecación. Algunos ejemplos de estas cuencas son la de Puebla, Tlaxcala y partes del Valle de Toluca y la zona de Sayula en Jalisco. Este estudio se centra en las zonas donde se encontraban los lagos de Xaltocan (5 perfiles realizados) y Zumpango (1 perfil realizado). A pesar de ser zonas ya muy pobladas, en las que la mancha urbana está creciendo e invadiendo terrenos agrícolas, hay poca información de los suelos que documente sus características y los procesos que ocurren en ellos. El conocimiento de los procesos y de los factores que los determinan es la base para comprender el patrón de distribución de suelos en las planicies lacustres y para generar mapas de suelo a escalas más detalladas que las de los mapas existentes (realizados por INEGI).

La mayoría de las cronosecuencias abarcan ventanas de tiempo de miles de años, mientras que este trabajo se enfoca en periodos cortos de tiempo (décadas a siglos), con lo cual se pretende identificar los procesos pedogenéticos que están ocurriendo desde que inició la desecación de los lagos.

Para realizar el estudio se tomaron en cuenta dos factores formadores principalmente:

- 1) el tiempo que llevan los sedimentos lacustres de exposición a la intemperie, considerando que la desecación del lago de Xaltocan se dio de las orillas de los lagos hacia el centro.
- 2) la posición que tienen los suelos en el relieve, ya que, a pesar de ser un lecho lacustre, no está totalmente plano, habiendo un gradiente altitudinal de 2252 msm en la zona más septentrional a 2241 msm en la parte más baja ubicada al centro y orilla sur del lecho lacustre. Además, hay pequeñas elevaciones en algunos sitios que anteriormente conformaban islas o islotes dentro del lago.

### **Objetivo general**

Analizar los suelos formados a partir de los depósitos lacustres y determinar los principales procesos pedogenéticos, así como su grado de avance a lo largo de un gradiente de edad de desecación del lago y la forma del relieve.

### **Objetivos particulares**

- 1) Seleccionar suelos con diferentes tiempos de exposición a la intemperie por desecación paulatina en una constancia de factores formadores.
- 2) Analizar e identificar los rasgos morfológicos y pedogenéticos en láminas delgadas de suelo, que muestren el avance de la pedogénesis en la secuencia del suelo.
- 3) Analizar el movimiento de sales en el paisaje.
- 4) Estimar la tasa de acumulación de materia orgánica, así como la formación de estructura.

### **Hipótesis**

Debido a que los lagos tuvieron una desecación gradual, dejando zonas expuestas en diferente momento desde que iniciaron las obras de desagüe de la cuenca, se espera que las áreas de lago que se desecaron primero presenten un mayor grado de pedogénesis. Dentro de los lagos hubo pequeños montículos, o pequeñas islas, que quedaban expuestas y rodeadas por el agua. Entonces estas pequeñas islas deberían tener un mayor grado de desarrollo de pedogénesis comparada con los sitios de menor altitud.

Los procesos pedogenéticos que se esperan en estos suelos son: lixiviación de sales solubles, precipitación de carbonatos, formación de agregados edáficos, acumulación de materia orgánica, así como procesos de óxido-reducción en la zona de fluctuación del manto freático (rasgos de reductomorfía). En los suelos de mayor edad se espera también neoformación de óxidos de hierro.

Se espera que las sales de sodio se acumulen en las partes más bajas debido a su alta solubilidad.

También se espera que los suelos con mejor formación de agregados sean aquellos que llevan mayor tiempo expuestos a la pedogénesis y ubicados en sitios donde haya menor acumulación de sodio y que esta agregación esté relacionada con una mayor acumulación de materia orgánica humificada.

## 2. Antecedentes

El suelo es un recurso vital, ya que nos provisiona alimento, da soporte a la infraestructura urbana, industrial y de vías de comunicación y juega un papel importante en la recarga de mantos acuíferos. Es la parte de la corteza terrestre donde la litosfera, hidrosfera, atmósfera y la biosfera interactúan entre sí, conformando un cuerpo natural cuya fase sólida, consiste en material no consolidado orgánico y mineral, y en sus poros mantiene una fase líquida y otra gaseosa. Este cuerpo natural evoluciona *in situ* obteniendo características particulares otorgadas por los factores formadores, que son el material parental, el clima, la forma del relieve, la acción de los organismos y el tiempo que estos factores están interactuando (Jenny, 1941; Joffe, 1949 en Birkeland, 1984; Ochando y Amigó, 2012).

Definir las características del suelo ayuda a aprovecharlo mejor. Existe una gran variedad de suelos con propiedades distintas y cada suelo requiere ser manejado y aprovechado en función de éstas. Las características que definen a un suelo dependen de la conjunción de los factores formadores propia de cada región.

### Factores formadores

Los factores formadores se pueden expresar como variables independientes como lo muestra la siguiente fórmula (Bockheim *et al.*, 2004; Jenny, 1941):

$$S = f(\text{cl, o, r, p, t, } \dots),$$

Dónde:

cl= clima, o= organismos, r= relieve, p= material parental, t= tiempo

Los autores mencionan que la finalidad de la ecuación es tener una idea simplificada de la compleja relación entre los factores involucrados, y así poder construir una base de los atributos del suelo en función de su génesis.

Estos factores son los que determinan las características morfológicas de los suelos, y el tiempo que éstos lleven actuando sobre un sustrato o material parental se verá reflejado en el desarrollo del suelo.

**El factor clima.** Promueve el intemperismo (físico y químico) a través de la precipitación y la temperatura. Propicia la fragmentación mecánica de la roca a través de los cambios de

temperatura, el congelamiento y descongelamiento del agua y la disolución y precipitación de sales. El intemperismo propicia la formación de nuevos minerales. Así, diferentes climas otorgan características específicas a los suelos de cada región (Jenny, 1941; Brady, 1982, 1984; Porta *et al.*, 1999; Krasilnikov *et al.*, 2011).

**El relieve.** Afecta la formación de un suelo, ya que la altitud, posición (exposición) en el terreno, la pendiente y la geoforma influyen. Por ejemplo, la posición y/o pendiente en el relieve influye en la disposición y movimiento de agua y con ello en la estabilidad del terreno, fomentándose el desarrollo del suelo en zonas planas, la erosión en laderas y la acumulación en los pies de ladera. La altitud influye en el clima y por ende también en la vegetación (Jenny, 1941; Brady, 1982, 1984; Porta *et al.*, 1999; Krasilnikov *et al.*, 2011).

**El material parental.** Es el sustrato geológico sobre el que se desarrolla el suelo, pueden ser de formación *in situ* a partir de rocas consolidadas, las cuales pueden ser ígneas, metamórficas y sedimentaria o bien pueden ser materiales transportados por viento (loess), hielo (depósitos glaciales), agua (aluviones), la gravedad (coluviones), o producto de erupciones volcánicas como ceniza volcánica o pómez. Estos materiales son afectados por el intemperismo de manera diferente en función de su composición mineralógica, en particular de la resistencia al intemperismo de los minerales, y del tamaño de la partícula (Jenny, 1941; Brady, 1982, 1984; Porta *et al.*, 1999; Krasilnikov *et al.*, 2011). En el caso de este estudio, el material parental de los suelos son depósitos lacustres, sedimentos arcillosos y limosos. Estos sedimentos son una mezcla heterogénea compuesta de materiales de origen volcánico (cenizas volcánicas y pómez), materiales transportados de las laderas (materiales detríticos y limnicos (restos de microorganismos carbonatados y silicios como diatomeas)). En las orillas de los lagos se depositaron más los sedimentos de texturas gruesas y en el centro los de texturas finas (Díaz-Rodríguez *et al.*, 1998; Díaz-Rodríguez, 2006). Estos depósitos aun contienen restos óseos de organismo que habitaban el lago (Valadez y Rodríguez, 2005). En el capítulo de la geología del sitio se menciona la composición de los depósitos lacustres.

**La actividad de los organismos.** Considera la cantidad y calidad de la biomasa que aporta la vegetación y la cantidad, tipo y actividad de los organismos que habitan en el suelo. La vegetación además de aportar materia orgánica estabiliza la superficie, y las raíces

fomentan la infiltración del agua y la retención de humedad. Los macro y microorganismos promueven la degradación y transformación de la materia orgánica muerta a través de los procesos bioquímicos, con lo cual contribuyen al ciclaje de nutrientes y a la formación de compuestos húmicos. También contribuyen al intemperismo biológico exudando ácidos orgánicos y exhalando CO<sub>2</sub>, el cual disuelto en agua forma ácido carbónico. Igualmente participan en la formación de estructura del suelo y de porosidad. En los últimos años también se está incluyendo la actividad humana como un factor, ya que afecta a los suelos desde el desmonte de vegetación, la labranza, el riego, la fertilización, la compactación, hasta el aporte de diversos materiales extraños o alóctonos que le confieren características distintas a un suelo (Jenny, 1941; Stevens y Walter, 1970; Brady, 1982, 1984; Porta *et al.*, 1999; Krasilnikov *et al.*, 2011).

**El tiempo.** Es el factor del que depende el desarrollo de un suelo, ya que los procesos pedogenéticos están medidos en función del tiempo en que los factores formadores estén actuando (Jenny, 1941; Brady, 1982, 1984; Porta *et al.*, 1999; Krasilnikov *et al.*, 2011). Los procesos suceden en tiempos variables, en los llamados ciclos cortos que tienen un estimado de hasta 1000 años, o bien en ciclos largos en un tiempo de 100,000 años o más (Targulian y Sokolova, 1996; Targulian y Goryachkin, 2004; ambos en Cruz Cruz, 2016).

### **Procesos pedogenéticos**

La interacción de los factores determina la dirección y la intensidad de los procesos formadores de suelo o procesos pedogenéticos (también llamados procesos edáficos o edafogenéticos). A su vez, estos procesos confieren a los suelos características propias. Estos procesos están marcados por el tiempo ya que su duración y velocidad determina la presencia de un rasgo pedogenético. La presencia de materia orgánica, el intemperismo, la iluviación, la lixiviación, la estructura de un suelo, la presencia de carbonatos secundarios, la movilización y translocación del hierro por procesos redox, la formación de arcillas, etc. determinarán rasgos característicos en un suelo, como los revestimientos de arcilla, los nódulos de hierro, la presencia de minerales secundarios, las concreciones de carbonatos, los rasgos de estrés (slickensides), moteados, por mencionar algunos (Porta *et al.*, 1999; Sergey y Solleiro en Krasilnikov, 2011; Loaiza *et al.*, 2015; Cruz Cruz, 2016). Estos

procesos dependen también de otras variantes como el funcionamiento interno y externo del suelo y sus propiedades (Targulian y Krasilnikov, 2007).

La presencia de un rasgo pedogenético depende de diferentes variantes de los factores formadores, es decir del clima, el material parental, relieve, etc. Sin embargo, Targulian y Krasilnikov (2007) mencionan que hay ciertos tiempos destinados y sugieren la siguiente clasificación: **Rápidos** los que ocurren entre los 10-100 años (acumulación de materia orgánica, salinización, estructuración, gleyzación). Los **Intermedios** que ocurren con un tiempo de 1,000-10,000 (iluviación, queluviación, andosolización). Y los **Lentos** con tiempos mayores a 10,000 años (ferralitización, alitización, intemperismo profundo). En estos intervalos de tiempo se dice que el suelo alcanza un estado estable de quasi-equilibrio (figura 1).

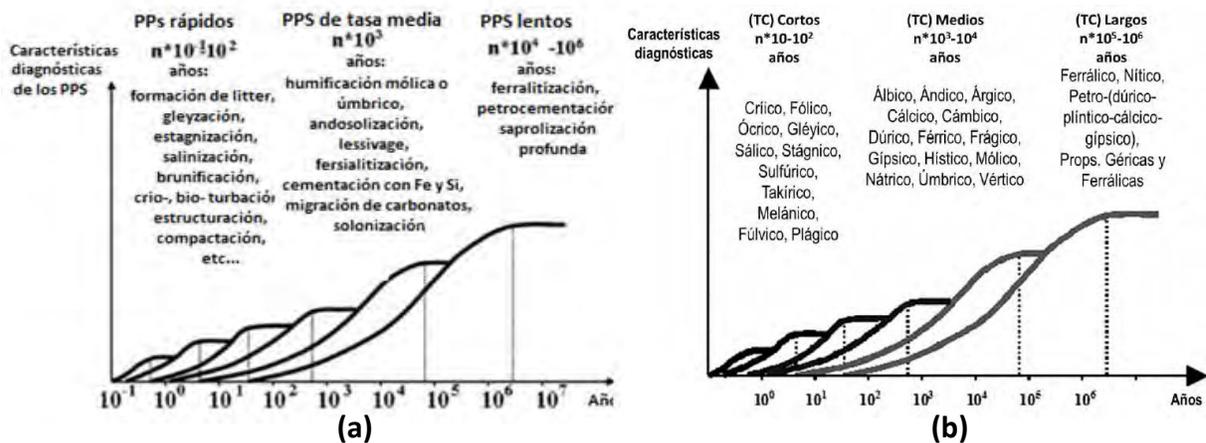


Figura 1. Escala de tiempos de algunos procesos pedogenéticos específicos (a) y de escalas de la formación de algunos horizontes y propiedades diagnósticas (b) (tomado de Hinojosa, 2016, modificado de Targulian y Krasilnikov, 2007).

Sin embargo, el tiempo necesario para alcanzar esa etapa estable, depende de diferentes factores y la intensidad de éstos, como el clima local o la resistencia del material parental al intemperismo. Birkeland (1984) menciona que la formación de un horizonte A es más rápida que la formación de un horizonte B. Así, el resultado de los diferentes factores será un perfil de suelo en el que sus propiedades diagnósticas hayan alcanzado un estado de equilibrio (figura 2). Por ejemplo, un horizonte Ah se forma en un periodo de tiempo corto, debido a la acumulación rápida de materia orgánica, siempre y cuando esté en un lugar que

lo propicie. Se considera que un centímetro de suelo tarda en formarse entre 100 a 400 años a partir de material no consolidado (Siebe *et al.*, 2007 en Cruz Cruz, 2016).

Jenny (1941) también menciona que los suelos y el comportamiento de sus propiedades pedogenéticas alcanzan un estado estable cuando el tiempo de madurez ya está avanzado, alcanzando un estado de quasi-equilibrio (figura 3).

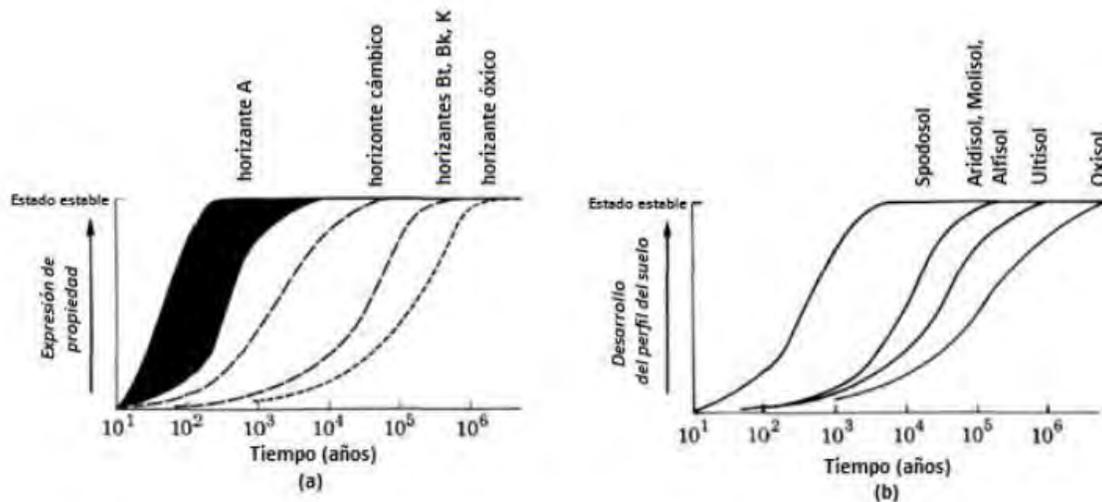


Figura 2. Esquema donde se representa las variaciones temporales requeridas para alcanzar un estado estable (a) propiedades del suelo (b) órdenes de suelo (tomado de Hinojosa, 2016, modificado de Birkeland, 1984).

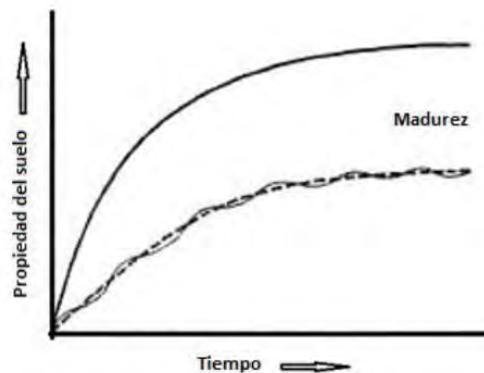


Figura 3. Representación donde el suelo alcanza una estabilidad con el tiempo. La curva de arriba es en condiciones ideales, la curva de abajo representa la fluctuación estacional, por poner un ejemplo (tomado de Hinojosa, 2016, modificado de Jenny, 1941).

Los procesos pedogenéticos siempre se intensificarán con el tiempo y se evaluarán con respecto a este factor. Así, por ejemplo, la formación de rasgos reductomórficos requerirá un menor tiempo de aparición que el desarrollo de horizontes arcillosos formados por el intemperismo, los cuales posteriormente den paso a procesos de iluviación (estos requieren una escala de tiempo mayor) (Walker, 1989 y Zhang y Gong, 2001 en Cruz Cruz, 2016; Zhang *et al.*, 2007; Brady y Weil, 2008).

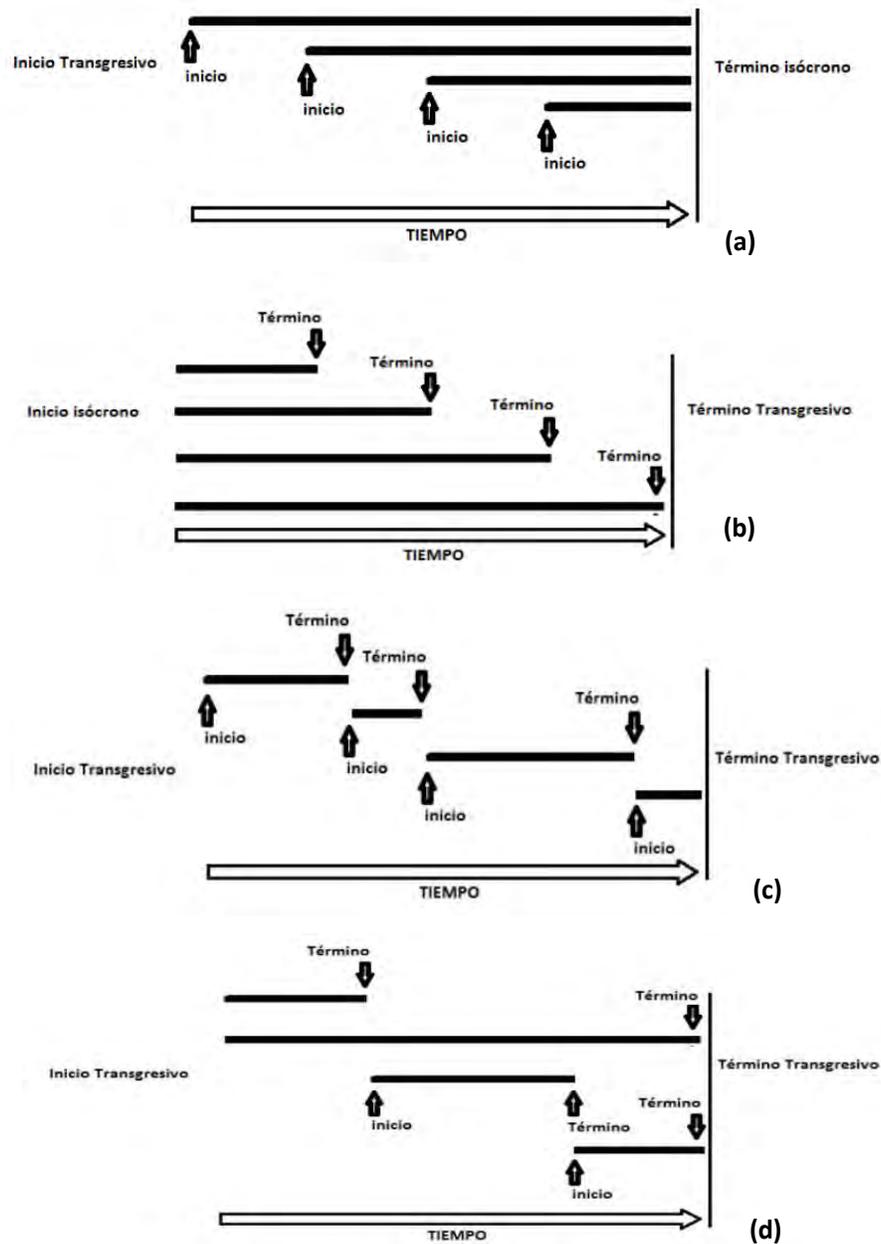
### **Cronosecuencias**

Una cronosecuencia consiste en suelos que se desarrollan en las mismas condiciones de todos los factores, menos el tiempo, es decir, condiciones bioclimáticas uniformes, a partir de materiales con similares características geológicas y geomorfológicas (litología y geoformas) pero de edad diferente. Así, las diferencias temporales de los procesos pedogenéticos serán las que determinen los rasgos morfológicos de los suelos que las componen. Las cronosecuencias se forman en geoformas como: secuencia de terrazas (marinas y lacustres), secuencias de derrames de lavas y depósitos piroclásticos (erupciones volcánicas en diferentes épocas), secuencia de dunas eólicas costeras, secuencia de sedimentos glaciales, entre otras, (Huggett, 1998; Birkerland, 1992, 1999 en Sedov y Solleiro, 2011). Harden (1982) sugiere que una cronosecuencia es una serie de suelos que están genéticamente relacionados y su evolución está dada bajo condiciones similares. Jenny (1941) definió una cronosecuencia como una suma de suelos relacionados en un área geográfica que difieren por el tiempo.

Huggett (1998) indica que las cronosecuencias son una herramienta útil para poder hacer estudios de la evolución del suelo ya que el factor tiempo está involucrado directamente en estos suelos.

Vreeken (1975) señala que hay cuatro tipos de cronosecuencias: 1) las post-incisivas formadas por depósitos de diferentes edades y en cada uno de estos lapsos se comenzó a formar un suelo. 2) Las pre-incisivas, donde los suelos sobre un depósito han comenzado a formarse al mismo tiempo, pero el sepultamiento de estos suelos ocurrió en diferentes tiempos deteniendo los procesos pedogenéticos. 3) Las crono-transgresivas son un apilamiento vertical de depósitos y suelos enterrados donde el superior es el que registra el lapso de carencia de aportes. 4) Las crono-transgresivas con solapamientos históricos;

incorporan aspectos de las anteriores como depósitos de distintas edades que sufren sepultamiento en distintos momentos. De todas las anteriores, la crono-transgresiva es la más complicada de interpretar (Calero, 2005) (figura 4).



**Figura 4. Tipos de cronosecuencias. (a) Post-incisivas (b) Pre-incisivas (c) Crono-transgresivas (d) Crono-transgresivas con solapamientos históricos (tomado de Hinojosa, 2016, modificado de Schaeztl y Thompson, 2015).**

A partir de las cronosecuencias se pueden establecer cronofunciones con aquellas propiedades del suelo de edades absolutas y conocidas. Así, una cronofunción es la expresión de las propiedades del suelo que están relacionadas con el factor tiempo y sujetas a las variaciones de los demás factores (Stevens y Walker, 1970). Dicho de otra manera, una cronofunción es el resultado de la evolución de una propiedad a lo largo de una ventana de tiempo bajo condiciones del clima, organismos, relieve y material parental similares (Jenny, 1961 en Stevens y Walker, 1970).

Así, uno de los principales objetivos de estudiar las cronosecuencias es para tener un registro de los procesos pedogenéticos en función del factor formador tiempo y poder observar la evolución de los suelos bajo las mismas condiciones (clima, material parental etc.).

### **Algunos rasgos que evidencian la pedogénesis**

La pedogénesis evidencia la evolución del suelo y los procesos que están ocurriendo en él; estos procesos requieren de tiempos característicos, de ahí que se tomen como medida de desarrollo de un suelo. Las propiedades que tiene el suelo varían con las estaciones del año, las cuales deben considerarse en periodos largos y cortos (dependiendo el objetivo) además algunos eventos locales pueden darle o quitarle una característica específica, sin embargo tendrán una tendencia ya que el material parental será el mismo (Soil Survey Staff, 1999). Una manera para identificar algunos de estos procesos consiste en cuantificar rasgos indicadores, como por ejemplo la acumulación de materia orgánica humificada se puede evaluar determinando la cantidad de C orgánico acumulado a una profundidad específica (por ejemplo, en los primeros 20 o 30 cm, aunque no hay un límite definido). Se esperaría que ésta aumente con el tiempo hasta llegar a un equilibrio. El aumento del contenido de arcilla con el tiempo está vinculado con el avance del intemperismo (Soil Survey Staff, 1999; Vidic 1998, Tsai *et al.*, 2010; Scarciglia, 2006; Sauer *et al.*, 2012; Schaetzl y Thompson, 2015; Hinojosa, 2016).

**Óxidos de hierro.** El suelo se enrojece por deshidratación y recristalización de hidróxidos de hierro en hematita, por ejemplo (Retallack, 1997, 2001 en Huang *et al.*, 2012). La formación y acumulación de óxidos de hierro secundarios requiere de tiempo y es indicadora de la evolución de un suelo. El hierro forma parte de la estructura de los silicatos

y se solubiliza por efecto de los procesos de intemperismo químico como la óxido-reducción, la quelatación y la hidrólisis. Al contacto con el oxígeno atmosférico, este hierro solubilizado se oxida y precipita en forma de óxidos de hierro. Los óxidos de hierro se pueden identificar a través de extracciones químicas selectivas. El Fe extraído con ditionito ( $Fe_d$ ) es indicativo de la presencia de óxidos de hierro cristalinos como la goethita y la hematita u óxidos de hierro de bajo orden estructural, como la ferrihidrita, dando tonos rojizos o marrones. El Fe extraído con oxalato de amonio ( $Fe_o$ ) es indicador de la presencia de óxidos de hierro poco cristalinos o de bajo orden estructural, es decir de aquellos que se forman al inicio de la pedogénesis. La relación  $Fe_o/Fe_d$  es por lo tanto un buen indicador del avance de la pedogénesis: valores cercanos a 1 indican dominancia de óxidos de hierro poco cristalinos, mientras que valores menores a 0.5 indican una dominancia de los óxidos de hierro cristalinos, es decir de un mayor avance de la pedogénesis. También la relación  $Fe_d/Fe_t$  ( $Fe_t$  hierro total) es utilizada para inferir el avance de pedogénesis, ya que indica el hierro que se produce de la pedogénesis, con respecto al hierro total que se encuentre en el suelo. A mayor razón  $Fe_d/Fe_t$  el suelo tiene mayor tiempo de desarrollo (Gamble y Daniels, 1972; Vidic 1998; Tsai *et al.*, 2010; Scarciglia, 2006; Sauer *et al.*, 2012; Schaetzl y Thompson, 2015; Hinojosa, 2016).

**Procesos reductomórficos.** Los rasgos reductomórficos son propias de suelos que han estado saturados con agua, o aun lo están (propiedades gléyicas), por periodos cortos, o bien por agua de percolación lenta proveniente de la lluvia (propiedades estágnicas), que cambian el estado de óxido-reducción del suelo, fomentando la aparición de estos rasgos. También la actividad de los microorganismos anaerobios tiene influencia en la reducción y movilización de  $Fe^{+2}$  y  $Mn^{+2}$ . Estos elementos se reducen durante la saturación migrando entre los poros y agregados del suelo, cuando el agua baja entre en acción la oxidación inmovilizando los compuestos en forma de óxidos  $Fe^{+3}$  o  $Mn^{+4}$  (Veneman *et al.*, 1976). Estas características otorgan patrones de coloración característicos en los suelos, tales como azul-verde o grisáceo en las zonas reducidas y presencia de manchas y motas rojizas a naranjas o de patrones de color reticulados rojizo/naranja en una matriz de colores claros (azul-verde o grisáceo a beige). En condiciones parcialmente limitadas en oxígeno el Mn se moviliza incluso antes que el hierro, y su translocación se manifiesta en forma de revestimientos en caras de agregados o nódulos de color negro. El Fe actúa igual que el Mn

recubriendo poros y canales además de agregados y también forma nódulos, solo que los colores son rojizos y en algunos casos oscuros, pero que a través de la luz reflejada en cortes delgados de suelo se tornan rojos (Brady y Buckman, 1982; Loaiza *et al.*, 2015). En Veneman *et al.*, 1976, sugieren que dependiendo del tiempo de saturación es la presencia de compuestos en el moteado, por ejemplo, si son periodos de días de saturación se hará presente el Mn, si la saturación es de tiempos cortos repetitivos en lapsos de meses se presentaran nódulos y recubrimientos de Fe con poca presencia de Mn y si la saturación es prolongada, meses, hay una migración de los compuestos de  $Fe^{+2}$  y  $Mn^{+2}$  con poco moteado de Mn.

**Estructura del suelo.** La estructura es una propiedad física del suelo, que comprende el arreglo de partículas primarias en partículas secundarias o agregados. El arreglo de estas partículas da como resultado un acomodo espacial, que a su vez influye en otros factores como la porosidad del suelo, la infiltración, compactación. La estructura es un ordenamiento natural de las partículas del suelo en agregados (también llamados peds) debido a procesos pedogenéticos (Bronick y Lal, 2004; Schoeneberger *et al.*, 1998 en Loaiza *et al.*, 2015). El proceso para que se desarrollen agregados depende del tiempo, puede ser un corto periodo si se habla de horizontes superficiales ya que ahí los efectos de los factores externos actúan mejor y más rápido, en cambio para los horizontes internos el proceso es lento (Bronick y Lal, 2004; Lal y Shukla, 2004 en Loaiza *et al.*, 2015). En la génesis de los agregados influyen por un lado factores internos como la textura, los tipos de minerales, el contenido de materia orgánica, la saturación de cationes tri, bi o monovalentes en los sitios de intercambio iónico. También influyen factores externos en la agregación del suelo, como las condiciones climáticas, los procesos biológicos, el uso y manejo del suelo. La arcilla y la materia orgánica hacen que el suelo tenga una mejor estructura y estabilidad de agregados, ya que tienen sitios de intercambio iónico que promueven la floculación de las partículas. El humedecimiento y el secado, la fluctuación de la temperatura, la actividad de las raíces de las plantas (por la acción erosiva de sus ramificaciones y la MO con la que contribuye), la microfauna, la degradación de la materia orgánica, las excreciones de los microorganismos y la adsorción de los cationes participan en la formación de los agregados. En suelos sódicos el ion Na ocupa una porción importante de los sitios de intercambio iónico y dispersa la estructura del suelo otorgando una inestabilidad. Por el

contrario, la adsorción del calcio favorece la agregación por su efecto floculante (pero no desarrollan una estabilidad fuerte). La estabilidad de agregados aumenta por el alto contenido de MO, o bien por la presencia de compuestos inorgánicos como los óxidos de hierro que tienen un efecto cementante en las partículas. La floculación también participa en la formación de agregados, ya que forma puentes entre las moléculas adsorbidas y las partículas coloidales coaguladas, interviniendo fuerzas electroestáticas, intra-extra moleculares y las gravitacionales, siendo los cationes  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  los que actúan como uniones entre las partículas primarias (Baver *et al.*, 1972; Brady y Buckman, 1982; Porta *et al.*, 1999; Bronick y Lal, 2004; Loaiza *et al.*, 2015).

Los agregados del suelo se dividen según su forma, tamaño y el grado de agregación. Entre los tipos de agregados están el migajón, granular, subangular en bloques, angular en bloques, prismática, columnar y laminar. En el caso de que las partículas no lleguen a formar agregados se considera grano simple o sin estructura, cementado o bien de tipo masiva (Brady y Buckman, 1982; Porta *et al.*, 1999; Siebe *et al.*, 2006; Loaiza *et al.*, 2015).

### **Translocación y acumulación de sales solubles**

Debido a que la zona de estudio está cubierta por lagos salinos, los suelos que se formaron son salinos y tienen la problemática de exceso de sales. Por ello se presenta este apartado de suelos salinos para entender algunos de los procesos ocasionados por la sal.

Las aguas de los lagos fueron salinas, otorgándoles a los suelos características de salinidad, sumado a esto, el terreno y el clima han ayudado mucho a que esto se siga preservando ya que las condiciones son de una zona semiárida. Es sabido que los suelos de manera natural presentan una concentración de sales debido al proceso de intemperización y que en zonas áridas y semiáridas, donde la evapotranspiración excede de manera importante a la precipitación, las sales no se lavan y se acumulan en los primeros horizontes. La presencia de un drenaje interno deficiente y de un manto freático cercano a la superficie (el cual propicia que las sales suban por capilaridad ya que el agua del manto freático tiende a evaporarse) son características que ayudan a que las sales se acumulen en las partes superiores de los suelos (Richards *et al.*, 1973; Barrow, 1994 en Barrera, 2000; Brady y Weil, 2008). Hay dos tipos de suelos afectados por sales, principalmente, por sales solubles de diferente tipo (Solonchaks) o afectados por sodio (Solonetz), de acuerdo con la WRB

(2014). Algunos suelos salinos se encuentran afectados por el magnesio y el yeso, los cuales también ocasionan salinización (Szabolcs, 1989 en Fernández, 2006).

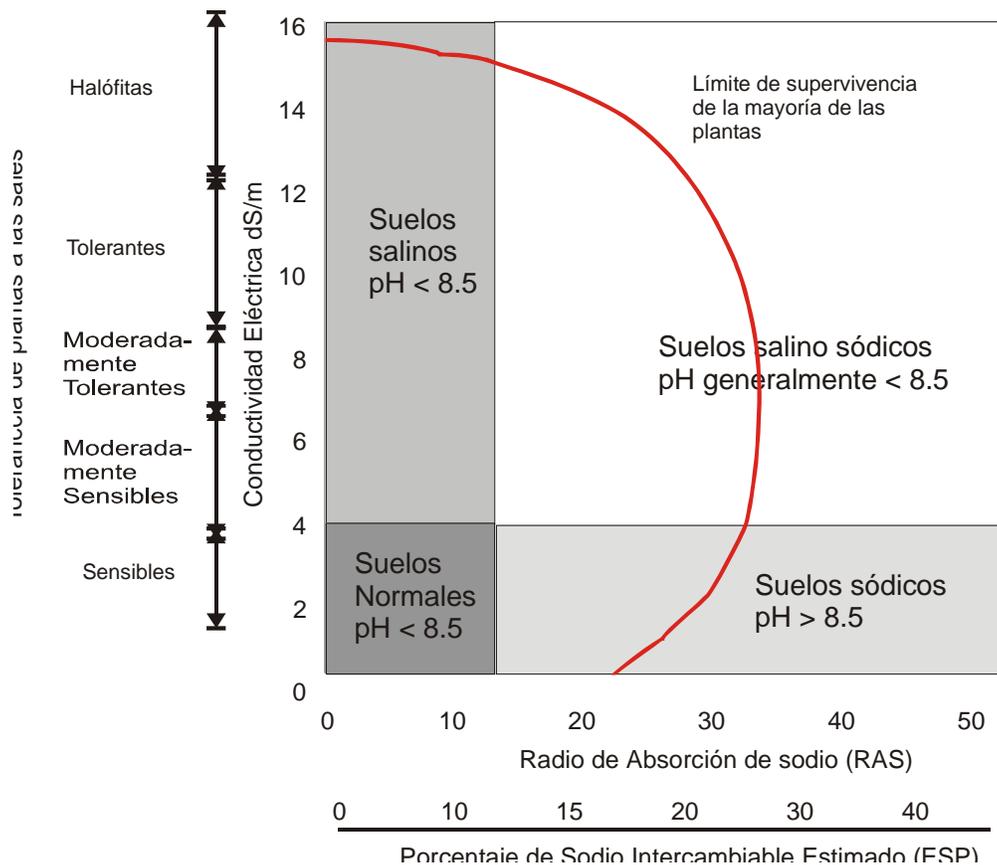
La salinización no solo se da por condiciones naturales, sino que también es propiciada de manera antrópica. A este tipo de condición se le llama una salinización secundaria y se da por los métodos de riego en la agricultura, en algunos casos contiene sales que se van acumulando, aunque esto también dependerá de las condiciones del suelo que determinan la capacidad de infiltración y conducción del agua. También la fertilización aporta algunas sales, así como el uso de sales en lugares fríos para evitar el congelamiento en las calles, entre otras (Rhoades, 1996; Porta *et al.*, 1999; Barrow, 1994 en Barrera, 2000).

**Suelos afectados por la sal.** Los **suelos salinos** se caracterizan por contener sales como sulfatos y cloruros de sodio, calcio, magnesio y potasio, principalmente; su conductividad eléctrica rebasa los 4 dS/m y tienen un porcentaje de sodio intercambiable menor a 15% y valores de pH menores a 8.5; las sales se acumulan en la superficie debido a la evaporación formando costras. Los **suelos sódicos** tienen un porcentaje de sodio intercambiable mayor a 15%, la conductividad eléctrica es menor a 4 dS/m y los valores de pH van de 8.5 a 10, presentan mayor dispersión de agregados al aumentar la cantidad de sodio intercambiable (su capa de hidratación es grande y protege su carga, ocasionando que la fuerza de atracción con otras partículas disminuya y la repulsión entre las mismas partículas de sodio es mayor). Los **suelos salino-sódicos**, combinan ambas características: tienen una conductividad eléctrica mayor a 4 dS/m y un porcentaje de sodio intercambiable mayor al 15% con un pH menor a 8.5 (figura 5). Estas características se generan cuando el sodio se acumula en un suelo salino, debido a un lavado de sales, lo que ocasiona una mayor dispersión de las partículas del suelo (Richards *et al.*, 1973; Porta *et al.*, 1999; Barrera, 2000; Fernández, 2006; Brady y Weil, 2008).

**Consecuencias de la presencia de sales en suelos.** Algunas de las variables indicadoras para determinar la salinidad de los suelos son: pH, la conductividad eléctrica (en el extracto de saturación), el contenido de sodio expresado como Porcentaje de Sodio Intercambiable (PSI) y/o la Relación de Adsorción de Sodio (RAS).

Las sales minerales presentes en los suelos están constituidas por los cationes:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^+$ ,  $\text{K}^+$  y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , principalmente. Los cationes,  $\text{Na}^+$

y  $K^+$  se caracterizan por tener mayor movilidad respecto a los demás cationes. Al haber una acumulación de sales en el suelo, los cationes remplazan a los iones de hidrógeno y aluminio y dominan los sitios de intercambio en la superficie de las arcillas y en la solución del suelo. La concentración de hidróxidos se incrementa por la presencia de algunas sales y esto trae como consecuencia el aumento del pH en el suelo y al mismo tiempo la capacidad de intercambio catiónico también aumenta (Brady y Buckman, 1982; Mille y Donahue, 1995; Jurinak, 1996; Porta *et al.*, 1999; Barrera, 2000; Fernández, 2006; Brady y Weil, 2008).



**Figura 5. Clasificación de los suelos salinos, sódicos y salino-sódicos con base en la CE y el  $Na^+$  intercambiable según Brady y Weil, 1999, en Fernández, 2006.**

La posición en el relieve influye en la movilidad y la acumulación de las sales: hay un movimiento de éstas de los sitios de mayor altitud a los de menor altitud, acumulándose en estos últimos. La movilidad también se puede dar por el ascenso de agua por capilaridad propiciado por un manto freático no muy profundo, la baja permeabilidad del suelo o bien,

por la cantidad y continuidad de los poros existentes en todo el perfil (figura 6) (Richards *et al.*, 1973; Porta *et al.*, 1999; Fernández, 2006).

Diferentes factores intervienen para generar suelos salinos y no únicamente una sal soluble. Por ejemplo, la evaporación en un sitio donde llueve poco propicia que las sales se acumulen en algunos horizontes, el drenaje deficiente de un sitio o suelo también es un factor que contribuye, ya que impide el movimiento del agua y con ello el lavado de las sales. Esta baja infiltración se puede deber a la presencia de texturas finas como las arcillas, a la presencia de caliche o una capa cementada enriquecida en sílice. La presencia de una capa freática poco profunda sumada con una concentración salina y un ascenso temporal ayudan a que las sales se acumulen en las partes superiores del suelo. El movimiento del agua subterránea hacia la superficie y la evaporación del agua superficial son factores que ayudan a la acumulación de sales en los suelos, principalmente en zonas áridas o semiáridas (Porta *et al.*, 1999; Fernández, 2006).

La salinización y sodicidad traen consecuencias en el suelo afectando algunas de sus propiedades. La sal por ejemplo reduce la absorción de agua por las plantas, ya que, al aumentar el potencial osmótico del suelo, se impide el flujo del agua del suelo hacia la planta (Fernández, 2006). El exceso de iones de  $\text{Cl}^-$  tiene efectos tóxicos para muchas plantas y altas concentraciones de  $\text{Na}^+$  pueden inhibir la absorción de  $\text{Ca}^+$  y  $\text{K}^+$ . Los elevados valores de pH ocasionan efectos cáusticos por el carbonato y bicarbonato de sodio, además, limitan la disponibilidad de nutrientes debido al pH alto; el aumento de iones de sodio provoca una pérdida de la estructura que a su vez ocasiona una baja aeración e infiltración (Brady y Buckman, 1982; Tanji, 1996; Porta *et al.*, 1999; Fernández, 2006).

Un alto contenido de iones de sodio ocasiona la dispersión de las partículas de arcilla y por consecuencia la pérdida de la estructura. Las arcillas están formadas por láminas de tetraedros de sílice y octaedros de aluminio, acomodados en triadas unidas por átomos de oxígeno y grupos hidroxilos. Estas triadas tienen una doble capa difusa con cargas negativas en su superficie, esto ocasiona una fuerza de repulsión que las mantiene separadas, generando un espacio en el cual se adsorben cationes, lo cual permite que se adhieran a otras triadas de forma paralela, formando una estructura de cuasi cristales, llamadas micelas (figura 7). La concentración de sales otorga un balance electroquímico,

las altas concentraciones de éstas reducen las fuerzas de repulsión entre las cargas negativas de las láminas manteniendo juntas a las láminas en las micelas. Sin embargo, los iones de  $\text{Na}^+$  no tienen la fuerza necesaria para contrarrestar las fuerzas de repulsión entre las triadas y por consecuencia las micelas se disgregan. Cuando el porcentaje de sodio intercambiable es superior al 15 %, el sodio penetra entre las láminas y se incrementan las fuerzas de repulsión ocasionando la desintegración de las micelas, separando las láminas cuando el sodio reemplaza un 50-60 % de los iones divalentes adsorbidos (Tanji, 1996; Porta *et al.*, 1999; Fernández, 2006). Una de las principales causas que contribuyen a la dispersión es que los iones de sodio están altamente hidratados y no se aproximan suficiente a las superficies negativas de las arcillas para neutralizar las cargas y otra causa es que la carga monovalente del sodio no es efectiva para formar puentes entre las partículas de arcillas (figura 7) (Brady y Buckman, 1982; Tanji, 1996; Porta *et al.*, 1999; Fernández, 2006; Brady y Weil, 2008). Si la salinidad se combina con la sodicidad, las partículas tienden a flocularse y el suelo no se disgrega, esta combinación hace que los suelos presenten menores problemas de dispersión (Tanji, 1996; Fernández, 2006).

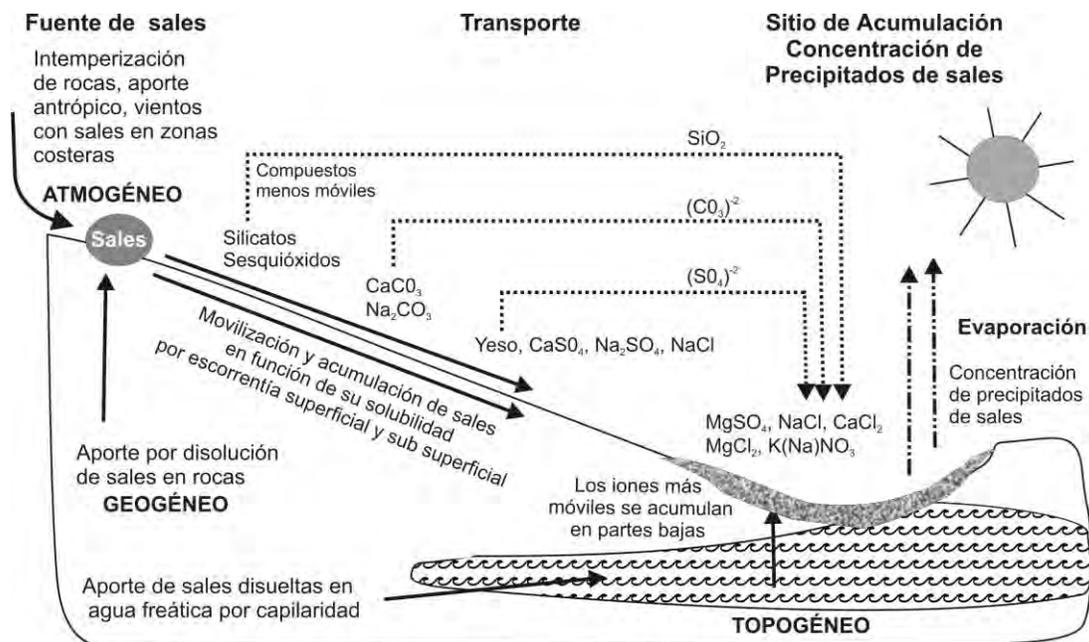


Figura 6. Representación de algunos procesos de la salinización del suelo (tomado de Fernández, 2006).

Si la cantidad de sodio no rebasa el 15 % pero hay una cantidad considerable o cercana a ese porcentaje, la dispersión puede dar en la temporada de lluvias, ya que las gotas al chocar con el suelo dispersan las partículas, sobre todo si no hay cobertura. El pH de un suelo también aumenta con el incremento de sales solubles llegando por arriba de valores de 8.5. Con estos valores la actividad biológica disminuye, así como, la neoformación de minerales o la humificación. La disponibilidad de nutrientes (nitrógeno, azufre, boro, fósforo, calcio, magnesio, potasio) se reduce afectando a la vegetación (Brady y Buckman, 1982; Porta *et al.*, 1999; Fernández, 2006).

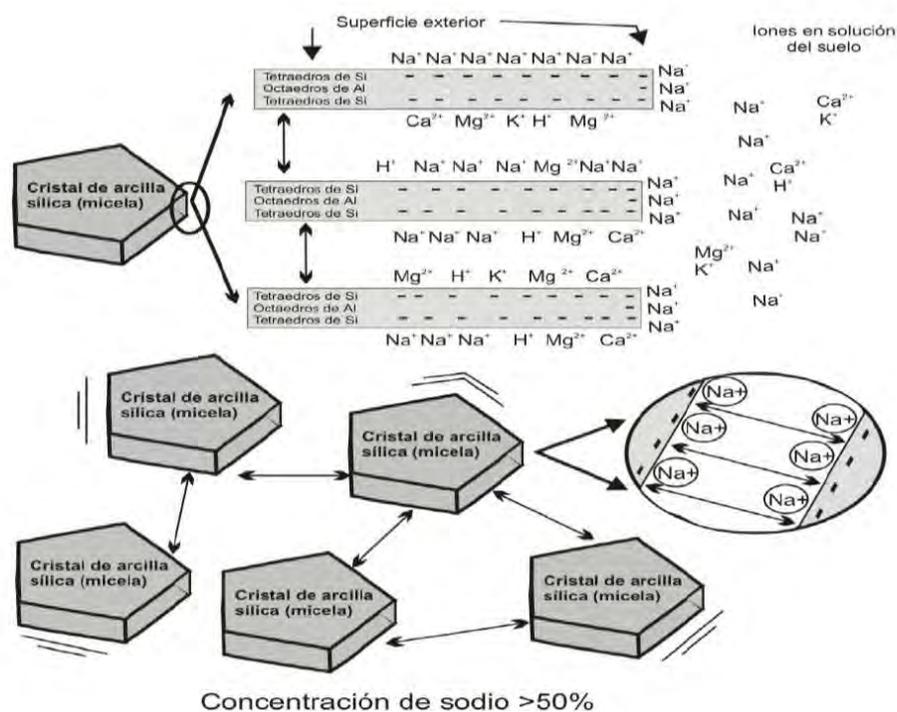


Figura 7. Representación de la estructura de una arcilla y la dispersión de la misma en una concentración de sodio mayor al 50% (imagen original de Brady y Weil, 1999 modificada en Fernández, 2006).

## Rasgos morfológicos

Una herramienta utilizada para identificar algunos rasgos de procesos pedogenéticos son los estudios micromorfológicos. Permite identificar a los procesos que apenas se estén originando, procesos incipientes, utilizando el microscopio, ya que facilita la identificación de rasgos.

En la tabla 1 se describen algunas de las características morfológicas que se pueden identificar en un suelo, ya sea en la descripción de campo y en algunos casos en lámina delgada.

**Tabla 1. Descripción de algunos de los rasgos pedogenéticos y su relación en las condiciones que se forman.**

Característica morfológica	Identificación	Clima/condición en el que ocurre
<b>Color</b>	Comparación visual: Tabla Musell (física y digital).	<p>Los colores cambian por características físicas y químicas, influencia del manto freático, drenaje del suelo, etc. En algunos casos indican procesos climáticos.</p> <p><b>Grisés-verdosos oscuros:</b> drenaje deficiente, mucha arcilla (esmeclita).</p> <p><b>Grisés y negros:</b> indica remoción de Fe (bajos cromas) y mucha MO</p> <p><b>De Amarillento a amarronado:</b> suelo seco a drenado, posible estacionalidad Hay una aireación-oxidación. Puede haber goethita/limonita (Fe hidratado), un mejor drenaje (factor textura).</p> <p><b>Colores rojizos:</b> hematita asociada a goethita, clima seco mediterráneo, Fe y arcillas se encuentran iluviadas en la estación húmeda, clima estacional, presencia de óxido/reducción.</p>
<b>Textura</b>	<p>En campo al tacto y en laboratorio por identificación de tamaños de partículas.</p> <p>Arena-2-0.05 mm</p> <p>Limo-0.05-0.002 mm</p> <p>Arcilla-menor a 0.002 mm</p>	<p><b>Algunas texturas según el tipo de área en el que se encuentran:</b></p> <p><b>Árido-</b> tipo arenoso fino grueso.</p> <p><b>Frio seco-</b> bloques grandes rocosos.</p> <p><b>Húmedo tropical-</b> limo arcilloso.</p> <p><b>Húmedo templado</b> (estacional)- limo-arcillas-arenas.</p>
<b>Moteados</b>	<p>Manchas de colores, regularmente negros a grises. Puede observarse a nivel macroscópico y microscópico (Micromorfología en láminas).</p> <p>Rellenos de cavidades o asociado a las raíces.</p>	<p>Son indicativos de condiciones óxido/reducción., por saturación de agua o mucha aireación (factor textura).</p> <p><b>Azul-violáceos:</b> agua saturada, contiene óxidos ferrosos y mucha MO también óxidos de Mn.</p> <p><b>Amarillentos a marronados:</b> indican condiciones re-oxidación de Fe, se asocia a las cavidades de raíces y/o animales.</p> <p><b>Gris oscuro a negro:</b> restos de MO de tipo carbón, tamaños pequeños.</p> <p><b>Blanquesinos:</b> asociados a agua encharcada en la parte superior, ausencia de MO, FeOx, y arcillas. Hay eluviación. Puede originar un horizonte eluvial.</p> <p><b>Naranjas:</b> presencia de jarosita, lepidocrocita en condiciones de oxidación permitidas por la</p>

infiltración.		
<b>Nódulos</b>	<p>Son manchas esféricas de colores rojizos oscuro o negros. Miden aproximadamente de 0.5 a 20 mm.</p> <p>Generalmente son de Fe o Mn. regularmente. En campo o micromorfología en láminas.</p>	<p>Causados por alternancia y superposición de condiciones de oxidación-reducción.</p> <p>Como respuesta a las fluctuaciones en la saturación de agua del suelo el Fe soluble es removido a las partes aireadas donde precipita, dando un color amarillento y en forma de nódulo. Nódulos de siderita y calcita, caracterizados por un color naranja fuerte, si hay color negro podría ser Mn.</p>
<b>Concreciones</b>	<p>En campo y micromorfología en láminas. Son precipitaciones en forma esférica a cilíndrica con diámetros de 20-60 mm.</p> <p>Colores que dependen del compuesto precipitado de óxidos de Fe, Mn, goethita</p>	<p>Colores oscuros probablemente Mn y colores marrón ricos en Fe. Las acumulaciones de Mn.</p> <p>Asociado a un deficiente drenaje con periodos alternantes de óxido-reducción.</p>
<b>Slickensides</b>	<p>En campo y micromorfología en láminas. Son rasgos, fracturas, planos de fricción. Pueden estar en superficies cóncavas. Caras brillosas en los agregados, rasgos de líneas –estrías-</p> <p>Se dan en suelos arcillosos (arcillas de tipo esmectitas).</p> <p>Orientación preferencial de los clastos de masa basal de suelo, ángulos de 90°.</p>	<p>Propias de un clima estacional, periodos secos y húmedos, generan peloturbación.</p> <p>Se forman por la expansión (hidratación)-contracción (deshidratación) y la fricción que ejerce una pared sobre otra, producto de las arcillas esmectitas.</p>
<b>Revestimientos de arcilla (cutanes)</b>	<p>En campo y micromorfología en láminas. Se originan por la iluviación de arcillas, hacia los horizontes intermedios.</p> <p>Son recubrimientos de agregados. Presentan un arreglo laminado, en algunos casos.</p>	<p>Regularmente en climas húmedos. Se dan por translocación de material de un horizonte superior a uno subsuperficial, los recubrimientos son arcillas movilizadas en suspensión por agua infiltrada.</p> <p>Presencia de eluviación-iluviación.</p> <p>Los recubrimientos también pueden ser de arcilla con MO, óxidos de Fe y Mn.</p>
<b>Raíces o rizolitos</b>	<p>En campo. Se identifican por ser estructuras organosedimentarias que adquieren las formas de las raíces.</p> <p>También incluye los rizotúbulos (cilindros rellenos).</p>	<p>Son producto de pedogénesis y la mineralización de raíces, conservando la estructura anatómica.</p> <p>Pueden ser de óxidos de Fe o Mn.</p> <p>Los colores que adquieren amarillentos o grises son producto de condiciones redox.</p>
<b>Agregados (peds)</b>	<p>En campo y microestructura en láminas. Es la estructura del suelo manifestada por su forma y su ordenamiento. La compactación puede dificultar su identificación.</p> <p>Se clasifican de acuerdo a su</p>	<p><b>Planares:</b> se forma por una rotura de una laminación, suelo de pobre desarrollo puede ser por eluviación.</p> <p><b>Prismáticos y columnares:</b> forma de prismas, formados en un eje vertical, se da en suelos arcillosos.</p>

	tamaño, forma y angulosidad.	<b>Angulosos y subangulosos:</b> forma irregular, aristas angulosas. Asociados a esmectitas. <b>Granular o bloques subredondeados:</b> son poliedros regulares a esferoides curvas planas. <b>Migajosa:</b> poliedros regulares a esferoides de pequeño tamaño, dan mucha porosidad. En Stoops, 2013 menciona que a nivel microscópico la estructura granular puede estar en formas más redondeadas o irregulares.
<b>Restos de tejidos vegetales</b>	En campo y micromorfología en láminas. Manchones de colores oscuros negruzcos. Formas alargadas.	Pueden ser tejidos de plantas carbonizadas o por alguna quema o incendio.
<b>Carbonatos</b>	En campo y micromorfología en láminas. Pequeñas concreciones de color gris a colores pastel, vistas en microscopio y además presentan birrefringencia. Recubren poros o grietas, cuando son carbonatos micríticos también llamados secundarios.	Se originan en climas cálidos y áridos, con poca humedad y que sobrepase la evaporación. Si llueve se origina una disolución de estos carbonatos.

(Elaborado a partir de: Munsell, 1990; Stoops, 1986, 2013; Kraus, 1992, 1997, 1999; Retallack, 1994, 2001; Siebe *et al.*, 2006; Loaiza *et al.*, 2015 y comunicación personal).

### 3. Generalidades de la cuenca de México y sus alrededores

#### La cuenca de México

La cuenca de México se encuentra en la parte central del territorio del país y está rodeada por las montañas de la Faja Volcánica Transmexicana. Desde el Pleistoceno temprano el drenaje superficial natural hacia el sur de la cuenca quedó obstruido por la actividad volcánica del Campo Chichinautzin (Arce *et al.*, 2013), por lo que sus partes bajas se cubrieron por un gran lago. Éste abarcaba todo lo que hoy es la ciudad de México y además llegaba hasta Zumpango en la parte norte. La cuenca central, sin contar el Valle de México, mide cerca de 180 km de norte a sur y 60 km de este a oeste cubriendo un área de 8000 km<sup>2</sup> aproximadamente. La planicie lacustre, que es la parte más baja de la cuenca está a 2,240 m de altitud. Las cadenas montañosas que rodean la cuenca central son: en la parte sur está el volcán Ajusco y la Sierra Chichinautzin, en el oriente la Sierra Nevada, la Sierra de las Cruces hacia el poniente y en el norte se encuentran diferentes cerros de poca elevación, además de la Sierra de Guadalupe (Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, Tomo I, 1975; Mooser, 1987; Ezcurra, 1990; Frederick *et al.*, 2005;

Burns *et al.*, 2009; CONAGUA, 2012). Al quedar obstruido el drenaje natural de la cuenca se comenzó a almacenar el agua de los eventos pluviales y sumando las descargas de ríos y arroyos de las sierras aledañas, en las partes bajas y por consecuencia se formó un lago de grandes dimensiones.

Los restos humanos más antiguos encontrados en la cuenca datan de 10,755 +/- 75 años AP (González *et al.*, 2015). Las evidencias de actividades agrícolas datan de al menos 4,500 años AP, según hallazgos de herramientas para moler granos de esa edad (González *et al.*, 2003). García Cook (1985) reporta la existencia de sistemas agrícolas con riego y manejo intensivo desde 2,000 años AP. El crecimiento poblacional comenzó cerca del 1,200 A.C., cuando se estableció la primera gran ciudad conocida como Cuicuilco. Posteriormente, en 550 D.C. se establece la ciudad de Teotihuacán, y comienzan los grandes cambios para la cuenca (Parsons, 1976; Peña y Levi, 1989; Ezcurra, 1990; Burns *et al.*, 2009).

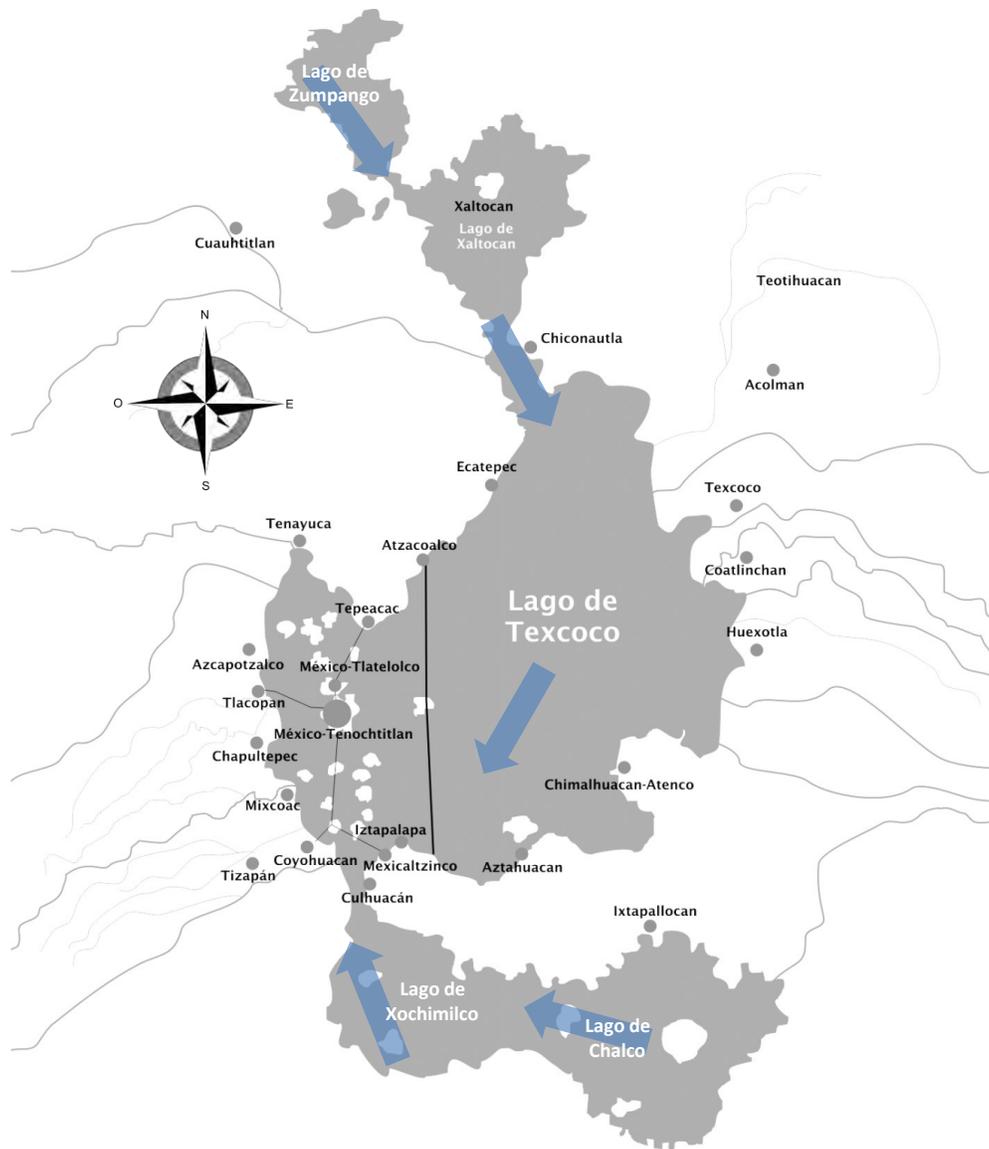
Cerca del 1300 D.C. llegaron los aztecas. En esa época la región ya contaba con varios asentamientos humanos rodeando el lago, los cuales habían dejado muy pocos lugares para nuevos pobladores. Así que las nuevas poblaciones que llegaban tenían que migrar a los alrededores de la cuenca estableciendo nuevas urbes, como las del norte del valle de México, entre las que están Xaltocan y Texcoco, entre otras (Parsons, 1976; Martínez de Vega, 1995; Brumfiel, 2005). Debido a que se había formado un lago de grandes dimensiones que en la parte sur que era de aguas dulces y en la parte norte un lago de aguas salinas, Netzahualcōyotl (gobernador de Texcoco) construyó una albarrada en 1449, para separar las aguas saladas del lago de Texcoco de las aguas dulces del centro y sur. Esta albarrada tenía también la función de evitar inundaciones en la ciudad de Tenochtitlán-Tlatelolco. Sucesivamente se construyeron calzadas en los lagos para permitir una buena comunicación entre los pobladores, iniciando así la división del gran lago (Rojas, 1974; Peña y Levi, 1989; Ezcurra, 1990; Galina, 2010; CONAGUA, 2014).

La división del extenso lago dio origen a 5 lagos: en la parte norte los lagos de Zumpango, Xaltocan y Texcoco y en la parte sur los lagos de Xochimilco y Chalco (figura 8). Los lagos ubicados al sur de la cuenca eran de agua dulce, esto por los numerosos arroyos que desembocaban desde el volcán Ajusco, además de algunos manantiales que emanaban por la zona (Rojas, 1974; Galina, 2010; SACMEX, 2012, 2013). Los lagos de Zumpango y

Xaltocan, ubicados en la parte alta y al norte de la cuenca, eran de agua salina y poca profundidad. El lago de Zumpango estaba a una mayor altitud con respecto a los demás, descargaba sus aguas en el lago de Xaltocan y éste, a su vez, en el lago de San Cristóbal (también conocido como lago de Ecatepec, el cual se formó por la construcción de un dique entre el lago de Xaltocan y el de Texcoco). El lago de Texcoco estaba en la posición más baja del relieve, lo que le otorgaba una mayor salinidad, que se incrementó con la evaporación (Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, Tomo I, 1975; Martínez de Vega, 1995; Frederick *et al.*, 2005; Burns *et al.*, 2009; SACMEX, 2012; Millhauser, 2013) (figura 8). La recarga de los lagos del norte del Valle de México dependía principalmente de la precipitación, en cambio los del sur, además de la lluvia, tenían aporte de los manantiales y de numerosos arroyos (Rojas, 1974).

El clima del valle de México se clasifica como subtropical a templado, semiseco y sin estación invernal bien definida; la temperatura media anual se estima en 15°C. La precipitación varía en amplio rango: para el suroeste es de 1,500 mm por año y para el norte de 600 mm por año, aproximadamente. Debido a que la lluvia es estacional en esta zona del país, el nivel de los lagos tuvo que haber decrecido en periodos más secos y aumentado en épocas más húmedas, sobre todo en los lagos de la parte norte. La precipitación en el valle de México ayudaba al lavado y acarreo de minerales de los cerros circundantes y debido a que era el único aporte de agua de los lagos; éstos fueron adquiriendo características salinas, sobretodo el lago de Texcoco que fue el de mayor concentración de salinidad (Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, Tomo I, 1975; SACMEX, 1984; Jáuregui, 1987 en Ezcurra, 1990).

No hay muchos registros de como los antiguos pobladores explotaban los recursos de los lagos del norte de la cuenca. Se piensa que los habitantes de la zona, sobretodo en Xaltocan, cazaban patos y otras aves que se habitaban en el lago. Procesaban la cal mineral, extraían el salitre de los suelos, practicaban la agricultura de chinampas en las que se cosechaba maíz, amaranto, frijoles, calabaza, tomates, entre otros (Brumfiel, 2005; 2009). La zona del valle y sus lagos fueron utilizados como una ruta de comercio para contribuir a la economía prehispánica.



**Figura 8. Antiguos lagos de la cuenca de la Ciudad de México. Las flechas azules indican la dirección en que fluían las aguas de los lagos (modificado de Galina, 2010).**

### **El drenaje de la cuenca**

Según Fray Toribio de Benavente, conocido como Motolinía, en los lagos ocurrió un descenso continuo del nivel de agua a partir del año 1524 hasta que se desecaron casi totalmente en el siglo XX (Ezcurra, 1990) (figuras 9 y 10). Se construyeron diferentes drenajes artificiales para comenzar con la desecación de los lagos (figura 11).

Los asentamientos humanos se dieron en sitios donde anteriormente se encontraba el lago, y las problemáticas debido a esto no se hicieron esperar. Tanto en la época prehispánica

como ya en la Nueva España las poblaciones ubicadas a orillas de los lagos se veían afectadas por inundaciones ocasionadas por las crecientes del lago de Texcoco. Fue a principios del siglo XVII cuando surge la necesidad de encontrar una solución, para lo cual se propusieron diferentes proyectos (Rojas, 1974; Burns, 2009; Galina, 2010; SACMEX, 2013; CONAGUA, 2014). Uno de los primeros registros para drenar los lagos data de 1555 por Francisco Gudiel, donde argumentaba la necesidad de drenar los lagos, detener la entrada de ésta, pero no del todo ya que también argumentaba la necesidad de agua en la ciudad. Este proyecto no se logró realizar. El proyecto de Enrico Martínez fue el más aceptado y elegido, el cual consistía en la construcción de un túnel al norte de la cuenca para desembocar las aguas de los lagos hacia el río Tula. No obstante, se decidió que sólo se desviaría al río Cuautitlán que era el más caudaloso (Rojas, 1974; Ezcurra, 1990; Martínez de Vega, 1995; González, 2011; SACMEX, 2012; CONAGUA, 2014).

En 1608 el primer canal de grandes dimensiones entró en funcionamiento; tenía 15 km de longitud y 6 de los 15 km formaban parte de una galería subterránea en Nochistongo, que desembocaba en el río Tula. Su culminación tardó casi dos siglos debido a diferentes conflictos tanto burocráticos como de planeación; se conoció como el “Tajo de Nochistongo”. Dos siglos más tarde se tuvo que abrir una nueva parte para ampliar el canal, ésta era profunda y a cielo abierto, la cual se comenzó a realizar entre los años 1868-70. Con la construcción del canal de Guadalupe, en 1796, el sistema de eliminación de aguas hacia Tula se conectó con el lago de Texcoco y los lagos comenzaron a reducirse rápidamente. Las obras del drenaje de Huehuetoca continuaron hasta inicios del siglo XX (Lara, 1988; Peña y Levi, 1989; Martínez de Vega, 1995; Galina, 2010; González, 2011; CONAGUA, 2014).

Para 1821, las obras hidráulicas continuaban. Las obras que destacaron fueron las construidas durante el Porfiriato, que son las del túnel de Tequixquiac (concluida en 1894) y el Gran Canal (concluida en 1900). Pretendían solucionar las inundaciones que sufría la Ciudad México. El túnel de Tequixquiac se terminó de construir en el año de 1954 y junto con las construcciones del drenaje profundo se pretendió dar por finalizada, ahora sí, la problemática de las inundaciones (Martínez de la Vega, 2005; Galina, 2010; González, 2011; CONAGUA, 2014). Fue así, que después de tres siglos de la primera gran obra para

desechar los lagos, éstos se desecaron en la segunda mitad del siglo XX, quedando solo algunos espejos de agua pequeños, como el lago de Zumpango, el lago de Texcoco y el lago de Xochimilco. A pesar de los esfuerzos y de las constantes obras para evitar las inundaciones en la Ciudad de México, éstas siguen debido a la condición natural de cuenca cerrada y a las intensas lluvias que suelen ocurrir entre julio y septiembre. (Ver la representación de la desecación de los lagos en el anexo (figuras 53-57)).

**Tabla 2. Obras de drenaje para desecar los lagos (Cruickshank, 1995 en Fernández, 2006).**

<b>Obra</b>	<b>Parido de construcción</b>
<b>Tajo de Nochistongo</b>	<b>1620-1822</b>
<b>Túnel de Tequixquiac</b>	<b>1630-1866</b>
<b>Gran Canal de Desagüe</b>	<b>1879-1910</b>
<b>Túnel Nuevo de Tequixquiac</b>	<b>1937-1947</b>
<b>Emisor Poniente</b>	<b>1959-1964</b>
<b>Drenaje Profundo de la Ciudad de México</b>	<b>1967-1975</b>

**Nota: algunas fechas varían según los autores.**

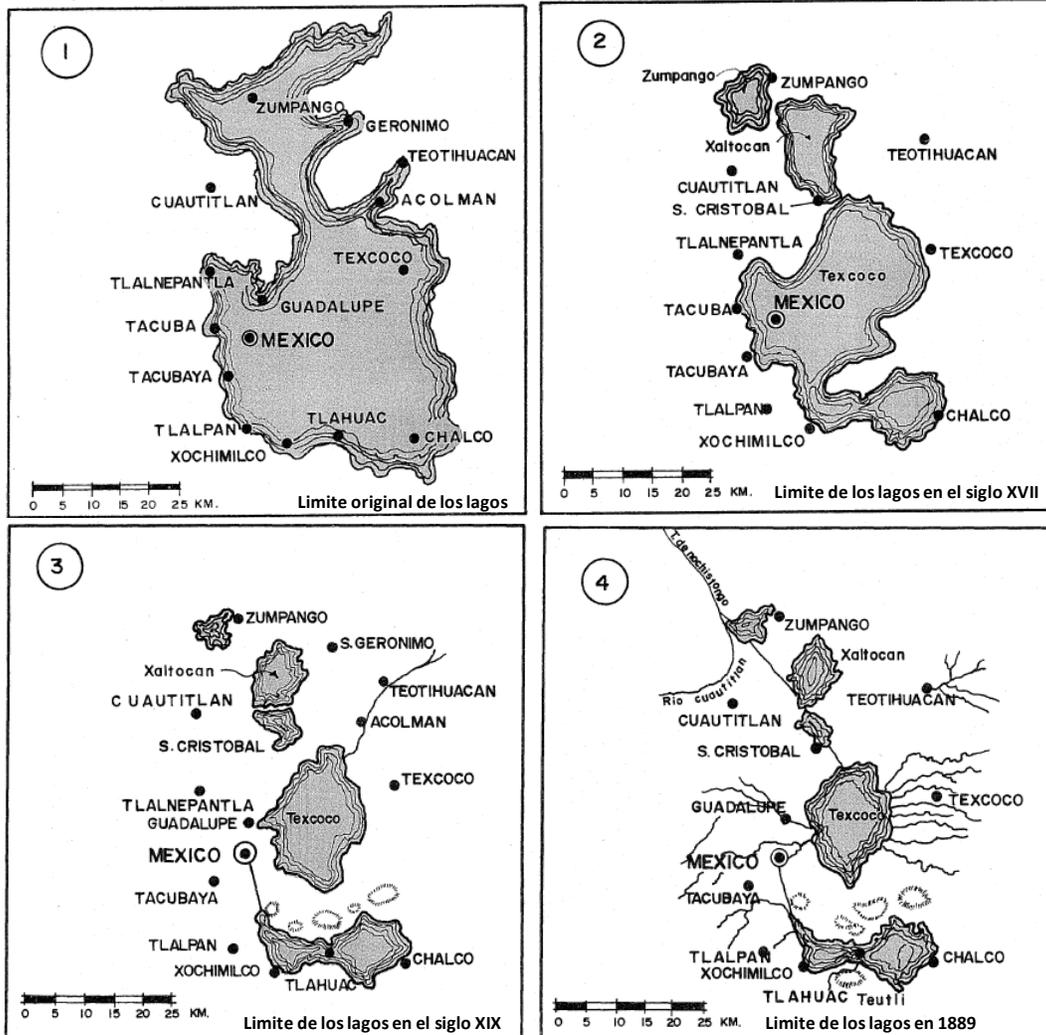
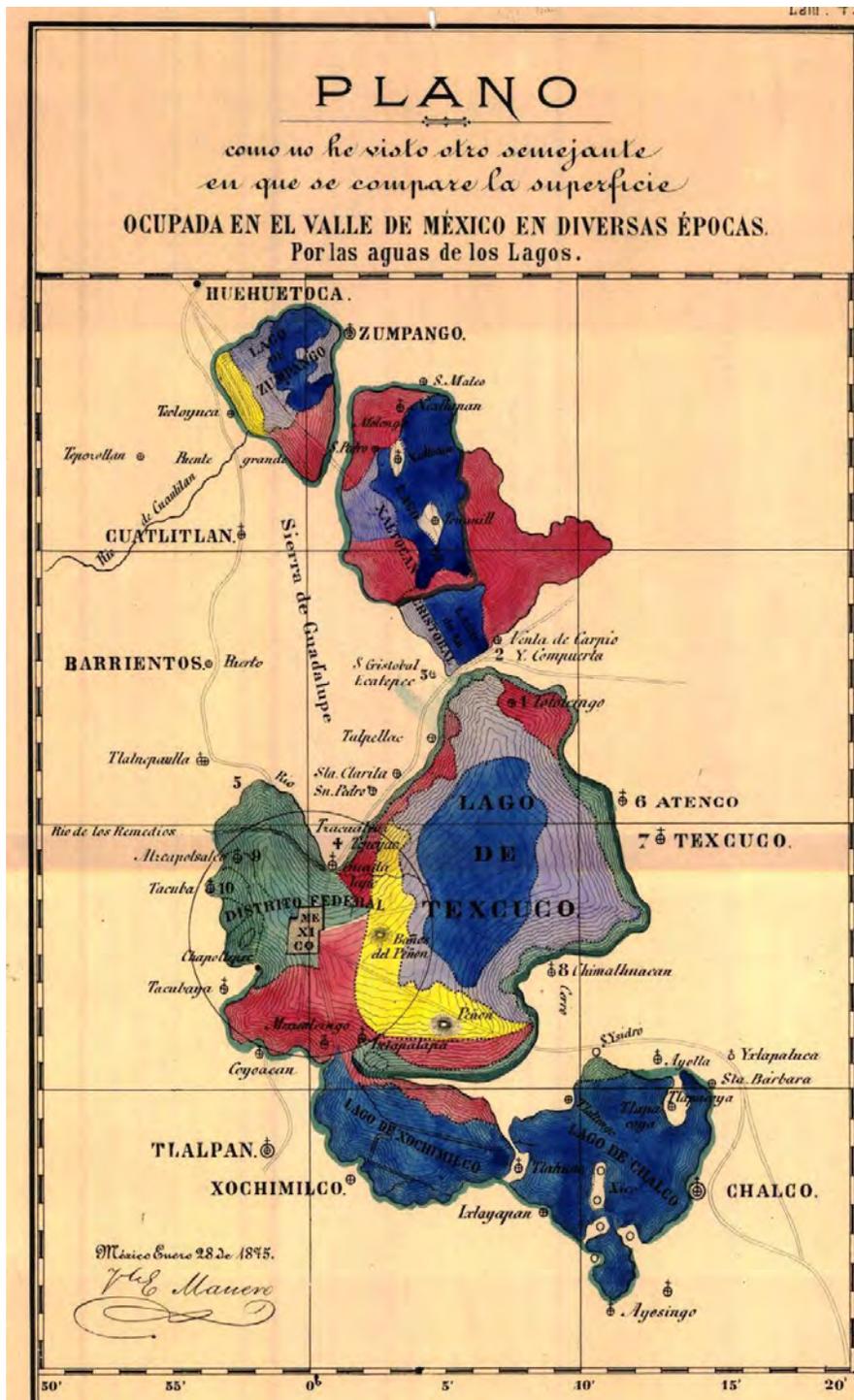


Figura 9. Representación de la evolución de la desecación de los lagos en Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, Tomo I, 1975.



**Figura 10.** Los colores verde, carmín, amarillo y azul, es como refieren los conquistadores que era la extensión ocupada por las aguas en 1521 en adelante. Rebajando la superficie ocupada por el verde, queda la extensión ocupada en 1806 (amarillo, carmín y azul). Rebajando lo carmín, queda el terreno pintado de amarillo y azul, según el mapa de D. Joaquin Velazquez de Leon, fechado en 1774. Quitando lo amarillo queda la extensión de los lagos según D. Tomás Ramon de Moral, en sus planos del Estado de México de 1829. Dentro de esos límites hay un azul más fuerte, que señala los límites del agua según la carta levantada por la comisión del Valle, pedida por D. Francisco Diaz Covarrubias y publicada por Orozco y Berra. Después de 1864 se han recortado las extensiones de los lagos con un máximo de profundidad de 45 a 65 cm. Texto contenido en este plano de V. Manero (1875), otorgado por la Mapoteca Manuel Orozco y Berra.

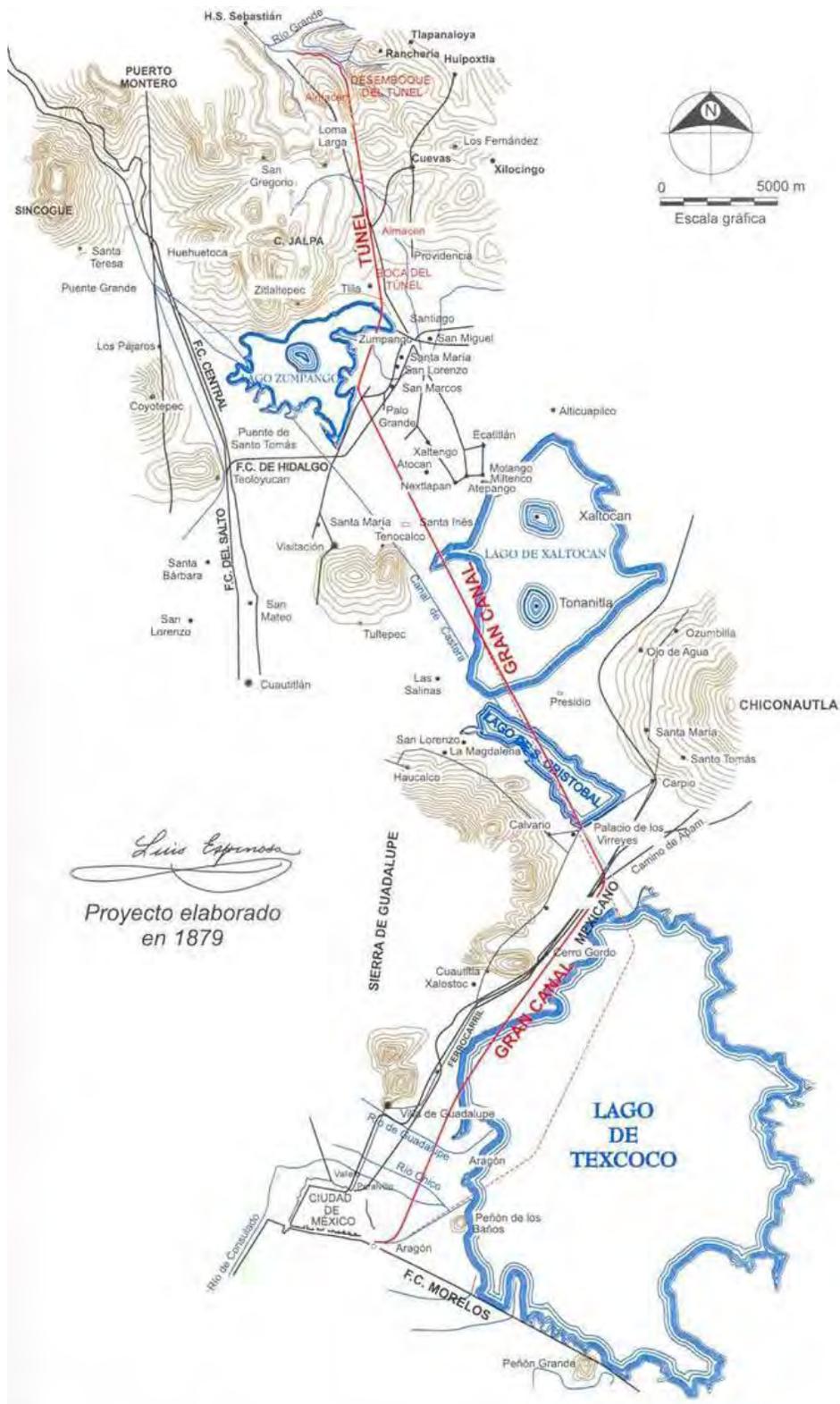


Figura 11. Se muestra el plano general del sistema de desagüe de los lagos de Texcoco, San Cristóbal, Xaltocan y Zumpango. La línea roja indica el paso del Gran Canal y la ruta del desagüe, elaborado por Luis Espinoza (1879).

## Vegetación y fauna de la cuenca

**Vegetación.** Ezcurra (1990) muestra un listado breve de la flora y fauna que se encontraba en la época prehispánica (basado en el trabajo de Sanders, Parsons y Santley, 1979; Rzedowski, 1975; Sanders, 1976b y Niederberger, 1987a y b). Además, en la *Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, Tomo I (1975)* también se presenta un listado de la biodiversidad de la cuenca, que se resume a continuación:

En primer lugar, se menciona que el lago realizaba la función de hábitat de aves que migraban al lugar, que había plantas halófilas debido a las características de los lagos salinos del norte de la cuenca. Mencionan que los suelos de material aluvial, con una mayor profundidad y características pantanosas, tenían presencia de plantas ciperáceas y ahuehuetes (*Taxodium mucronatum*). Los sitios formados a partir de material aluvial, estaban cubiertos con pastizales y magueyes (*Agave* sp.). Los suelos con una mayor elevación estaban cubiertos con vegetación de encinos (*Quercus* sp.) en las pendientes de la región sur de la cuenca y suroeste, en región norte de la cuenca y con climas más seco estaban cubiertas por huizaches (*Acacia* sp.). En el piedemonte bajo había bosques bajos de encino, mientras que el piedemonte medio estaba cubierto por encinos de hoja ancha. En las laderas había también encinos, tepozanes (*Buddleja* spp.), ailes (*Alnus* sp.) y madroños (*Arbutus xalapensis*) y en las partes con 2,700 m de altitud había pinos, oyameles (*Abies religiosa*), enebros (*Juniperos deppeana*) y zacatones (pastos amacollados).

En la parte norte se encontraban matorrales xerófilos, además de la presencia nopaleras (*Opuntia streptacantha*), uña de gato (*Mimosa biuncifera*), la palma (*Yucca filifera*) y cenicilla (*Zalzanía augusta*), matorral de guapilla (*Hechtia podantha*) y lechuguilla (*Agave lechuguilla*). Se menciona que en algunas partes de la Sierra de Guadalupe aún existe el matorral de palo dulce (*Eisenhardtia polystachya*), el cual está desapareciendo por la mancha urbana.

También existe la presencia de vegetación halófila, la cual creció en las partes donde se encontraban los antiguos lagos salinos, especialmente en el lecho seco del antiguo lago de Texcoco. Estas plantas son de tipo pastizal bajo y denso, dominadas por dos gramíneas

(*Distichlis spicata* y *Eragrostis obtusiflora*), conjuntamente también se encuentran arbustos bajos como el chamizo (*Atriplex* spp.) y el romerito (*Suaeda nigra*).

**Fauna.** La fauna ha sufrido un mayor cambio que la flora, esto debido a los asentamientos humanos los cuales han destruido los hábitats naturales (Halfpter y Reyes-Castillo, 1975 en Ezcurra 1990). Se han realizado diferentes estudios en los que se describen diferentes especies; entre las más abundantes estaban los roedores y los murciélagos. Dentro de estos estudios destaca el de Ceballos y Galindo (1984), del que Ezcurra (1990) reproduce un listado de ocho órdenes (cabe recordar que no todas están presentes en la actualidad ya que son estudios de la fauna que se realizaron cuando aún había presencia de lagos), y estas son:

**Tabla 3. Listado de la fauna que se encontraba en la cuenca de la Ciudad de México (Ezcurra, 1990).**

Orden	Número de especies
Marsupiales (tlacuaches)	1
Insectívoros (musarañas)	5
Quirópteros (murciélagos)	26
Edentados (armadillos)	1
Lagomorfos (conejos y liebres)	6
Roedores (ardillas, tuzas y ratones)	35
Carnívoros (coyote, zorra gris, puma)	12
Ungulados (venados)	1

La fauna que habitaba en los alrededores de los lagos consistía principalmente en: aves de las llamadas acuáticas, como patos, gansos, pelícanos, cisnes, cormoranes, garzas, cigüeñas, macáes, chorlos, chichicuilotos, grullas, gallaretas y patos silvestres. Reptiles como serpientes de agua y tortugas, anfibios como ranas, sapos y axolotes. Existían peces en el interior de las aguas de los lagos como los Aterínidos o peces conocidos como blancos que variaban de tamaño desde los 30 cm a 5 cm, según la especie. También había otro grupo de peces que pertenecían a los órdenes de los Ciprínidos (conocidos como juiles) y de los Goodeídos (principalmente una especie conocida como Vientre grande).

#### 4. Área de estudio

La mayor parte del trabajo se realizó en el área del ex Lago de Xaltocan, solamente un perfil se realizó en lo que fue la orilla del antiguo lago de Zumpango en su parte sur. Actualmente, el área que ocupaba el ex Lago de Xaltocan está dividida en dos municipios del Estado de México: Nextlalpan (parte norte del lago, donde se realizaron dos perfiles de suelo) y Tonanitla (que era la parte sur del lago y don se realizaron tres perfiles de suelo) (figura 12). En medio de estos dos municipios está ubicado el poblado de Xaltocan, que fuera una pequeña isla que le diera el nombre al lago en la época prehispánica. Actualmente el sitio es ocupado para cultivos agrícolas, aunque no con mucho éxito debido a la problemática de la sal (ver figura 13 usos de suelo).

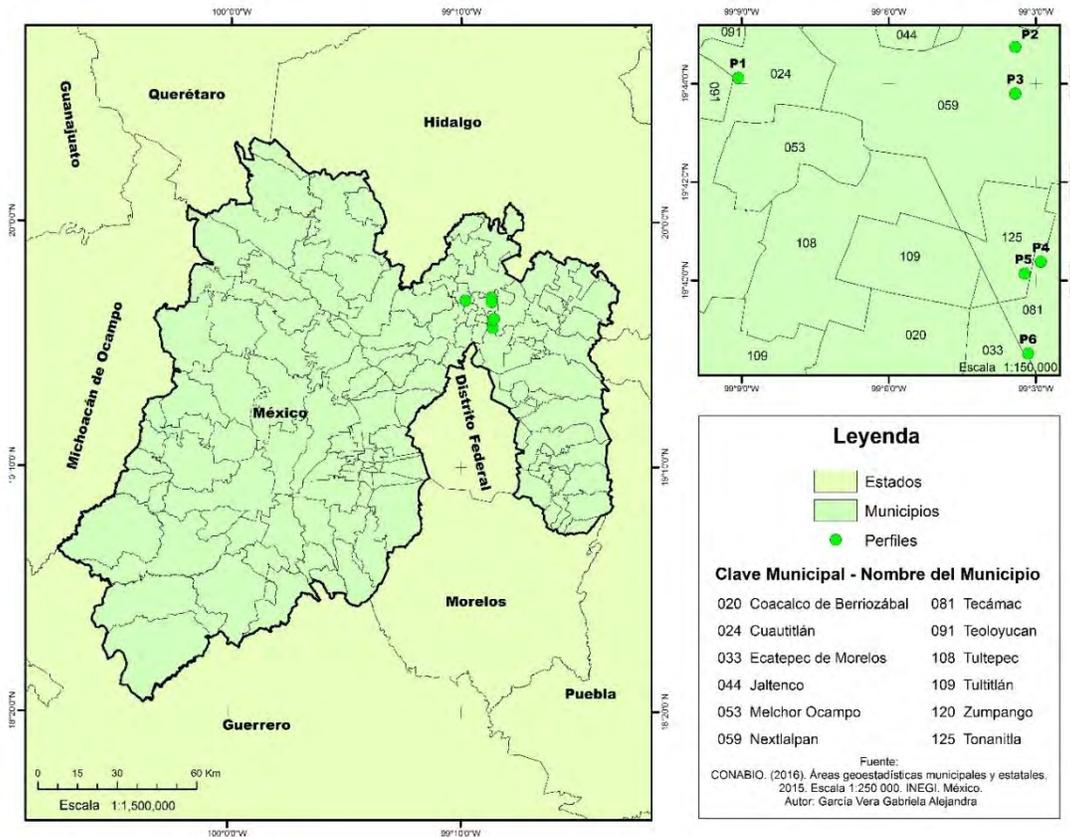


Figura 12. Mapa de los municipios, área de estudio y los puntos de muestreo con la leyenda P1, P2, etc.

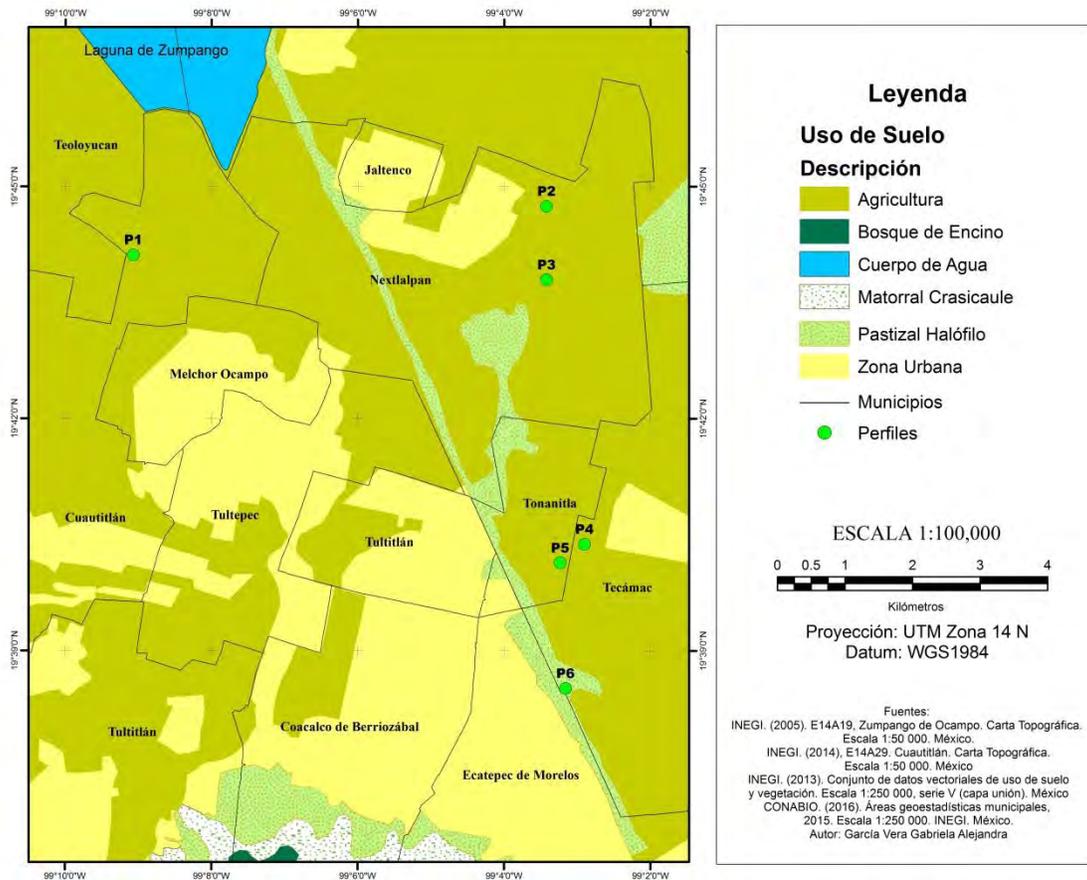


Figura 13. Mapa que muestra el uso y vegetación del suelo en el la zona de estudio, se exponen los puntos de muestreo con la leyenda P1, P2... etc.

## Xaltocan

Fue una isla que se elevaba 5 a 6 m por encima de lo que fue el lago del mismo nombre (Lago Xaltocan). Tenía unas dimensiones de 900 m de longitud de este a oeste y 500 m de ancho de norte a sur. A pesar de los esfuerzos de drenar las aguas del lago de Xaltocan por los gobiernos coloniales y republicanos de México, éste continuó con agua hasta mediados del siglo XX. Fue hasta 1945 cuando el agua que lo alimentaba fue desviada para dar paso a su desecación gradual (Frederick *et al.*, 2005; Miller, 2009; Morehart y Frederick, 2014). Antes de la mitad del siglo XX la isla estuvo rodeada por aguas someras, pantanosas y salitrosas, después de la mitad del siglo XX sus aguas fueron drenadas (Brumfiel, 2009).

En la isla de Xaltocan existía una gran producción agrícola ya que también practicaban la agricultura en chinampas. Ahí se sembraba chíá (*Salvia* spp.), epazote (*Chenopodium ambrosioides*), amaranto (*Amaranthus* spp.), entre otras (Morehart, 2009 en Brumfiel,

2009). Además, como ya se mencionó, también se practicaba la caza de aves acuáticas (*Aythya*, *Anas*, *Oxyura*, *Spatula*). En el sitio aún se encuentran restos óseos de estas aves (Valadez y Rodríguez, 2005). También, es posible encontrar restos de cerámica. En el sitio además de los recursos del lago y de la agricultura, los antiguos pobladores aprovechaban la producción de sal (Rodríguez-Alegría, 2008; Brumfiel, 2009).

En algunos documentos etnohistóricos se señala que Xaltocan fue asentado en el siglo XI y que durante los siglos XII y XIII se convirtió en un centro regional de importancia relevante ya que sus habitantes tenían alianzas con los de Culhuacán, Tollan, Huexotla, Chalco, Tenayuca y Azcapotzalco (Carrasco, 1950 en Morehart y Frederick, 2014). Sin embargo, se mantuvieron en guerra con sus vecinos de Cuautitlán siendo derrotados y quedando abandonadas sus tierras por más de 30 años. Las tierras de Xaltocan fueron divididas entre los mandatarios de Azcapotzalco y Texcoco. Así, en 1428 Xaltocan cae bajo el dominio de la Triple Alianza Azteca (Rodríguez-Alegría, 2008; Brumfiel, 2005, 2009; Morehart y Frederick, 2014).

### **Tonanitla**

El municipio de Tonanitla también fue una pequeña isla que sirvió de asentamiento de pobladores en la época prehispánica. Está a sólo 4 km de Xaltocan. Estos sitios aun pertenecen a áreas arqueológicas, por ser los primeros sitios en los que hubo asentamientos humanos en el Valle de México y que después se convirtieron en un paso importante de ruta de comercio. Tonanitla está localizada en terrenos al noreste del Gran Canal y el Circuito Exterior Mexiquense. Actualmente en el lugar se practica la agricultura de temporada, en la que se siembra maíz y alfalfa, principalmente (figura 13). Sin embargo, debido a que los suelos son salinos, por las características del lago, se complica esta práctica; cabe mencionar que anteriormente se explotaba la producción de sal en el sitio. Los suelos en superficie tienen un aspecto de ambientes secos a áridos y la vegetación es en gran parte halófila (Millhauser, 2013). Desgraciadamente hay muy pocos estudios en el sitio, y la mayoría son de aspectos arqueológicos.

## **Zumpango**

El área donde se ubicaba el antiguo lago de Zumpango actualmente tiene parcelas de riego y de ganadería. Los suelos están formados a partir de depósitos lacustres (figura 13). Presenta lluvias en verano con un clima subhúmedo, y una vegetación de pastizales inducidos y plantas halófilas (INEGI, 2016). Se realiza actividad de agricultura de riego de plantas forrajeras, alfalfa, gramíneas, maíz y avena. Al secarse las áreas que abarcaba el lago emergieron estos sedimentos arcillosos con características salinas (Reséndiz-Paz *et al.*, 2013). Las aguas del lago fluían en dirección sur donde se encontraba el lago de Xaltocan, el cual tenía condiciones más salinas (figura 8). El lugar de muestreo fue prácticamente las orillas del lago.

## **Clima en la zona de estudio**

Las estaciones meteorológicas cercanas a los perfiles arrojan los siguientes datos: en la zona de Teoloyucan, Edo. de México cerca del perfil P1.ZumS tiene una t°C max. de 23.2 y t°C min. de 6.9, una precipitación anual de 613.1 mm y una evaporación de 1,553.8 mm, de junio a septiembre se reportan las mayores precipitaciones, clima templado subhúmedo. Para los perfiles P2.XalN01 y P3.XalN02 la estación cercana es la ubicada en San Mateo Acuitlapilco en el municipio de Nextlalpan y según sus datos la t°C max. es de 25.7 la t°C min. 7.1 con una precipitación anual de 602.2 mm y una evaporación de 1,428.3 mm, sus precipitaciones máximas son en los meses de junio a septiembre, clima semiseco. Para los perfiles P4.XalT03, P5.XalT04 y P6.XalT05 la estación más cercana está ubicada en Chiconautla, Tecamac Edo. de México y según sus datos tiene una t°C max. de 24.2 y una t°C min. De 6.2 con una precipitación de 553.1 mm anuales y una evaporación de 1,681.3 mm, sus precipitaciones máximas están en los meses de junio a septiembre, clima semiseco y templado subhúmedo.

## **Geología del sitio**

El área de estudio corresponde a un llano, propio de un lecho lacustre, con una pendiente ligera en dirección hacia el sur, con trayectoria hacia el ex Lago de Texcoco. La zona está rodeada por una serie de montañas, hacia el norte la sierra de Xalpan y la sierra de Tezontlalpan, hacia el este la sierra de Tlachihualpa, hacia el sur el cerro de

Chiconautla, la sierra de Patlachique y la sierra de Guadalupe y hacia el oeste el cerro de Tultepec y la sierra de Tepotzotlán (Méndez, 2005 en Juárez *et al.*, 2011) (figura 14).

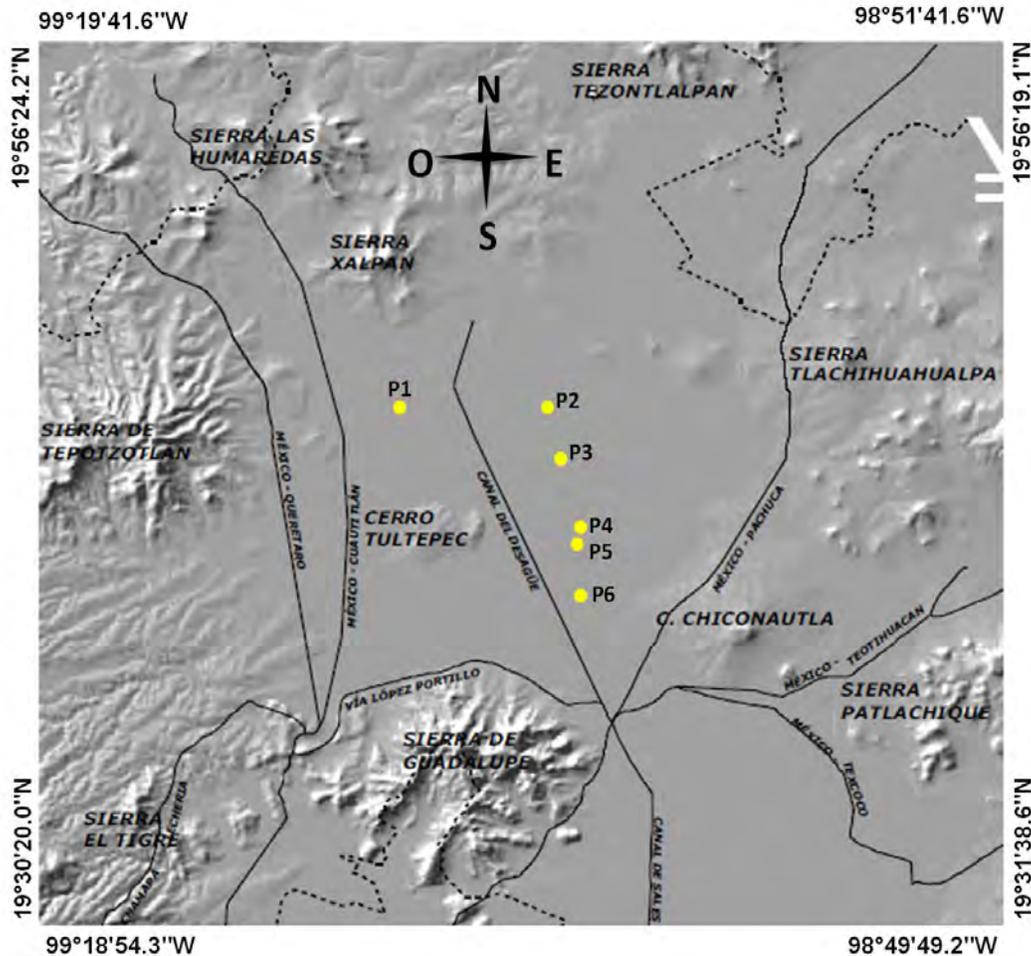
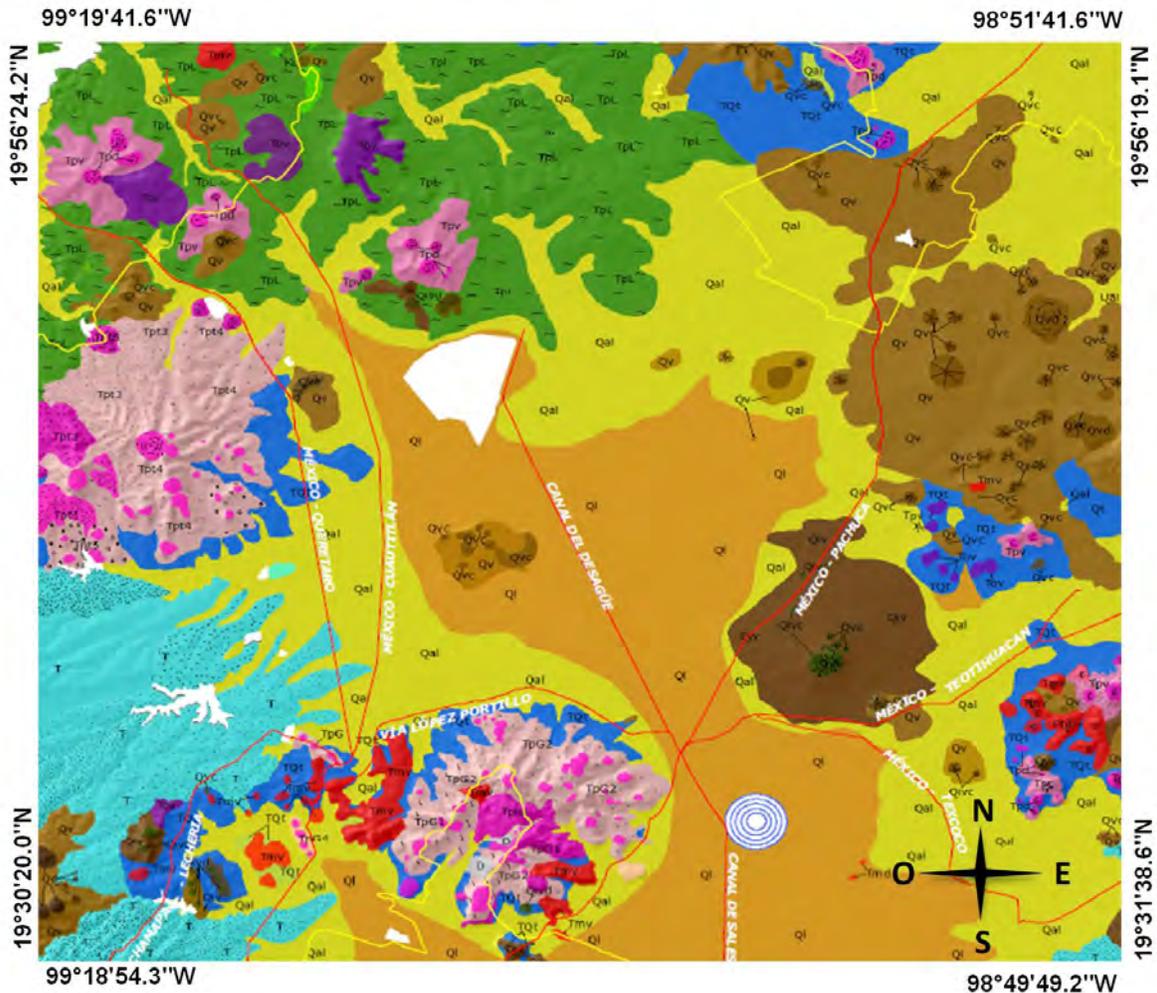


Figura 14. Se muestran las series montañosas y el modelado del relieve (modificada de Méndez, 2005 en Juárez *et al.*, 2011), los puntos amarillos representan los perfiles muestreados (las coordenadas son aproximadas).

Los estudios geológicos del sitio reportan suelos con depósitos lacustres en prácticamente toda la zona que abarcaba los lagos y por debajo de éstos, y en prácticamente toda la zona del llano hay un sustrato de una serie clástica aluvial y fluvial constituidos por materiales granulares, limosos y arcillosos con una mezcla de vidrio volcánico, pómez, arena y lava. A la periferia de la planicie lacustre existen depósitos de ladera formados por suelos tobáceos y pumícos que se originaron por las cenizas, lahares, ignimbritas, fenobasaltos y lava

andesítica y dacítica (Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, Tomo I, 1975; Mooser *et al.*, 1996; Juárez *et al.*, 2011) (figura 15).



**SIMBOLOGÍA**

<ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #D2691E; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Ql</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #F0E68C; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Qal</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #40E0D0; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> T</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #4169E1; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> TQt</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #8B4513; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Qv</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #654321; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Qiv</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #228B22; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Qivc</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #3CB371; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> TpL</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #800080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Tpv</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #DDA0DD; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Tpd</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #D2B48C; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> TpG</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #C08080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> TpT</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #DC143C; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Tmv</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #800080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Tov</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #32CD32; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Ki</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Depósitos lacustres del cuaternario</li> <li>Depósitos aluviales del cuaternario</li> <li>Vulcanitas del cuaternario (formación Tarango)</li> <li>Tobas en Depósitos de flancos del cuaternario</li> <li>Vulcanitas del cuaternario superior</li> <li>Vulcanitas del cuaternario inferior</li> <li>Conos vulcaníticos del cuaternario inferior</li> <li>Depósitos lacustres del Plioceno medio</li> <li>Vulcanitas del Plioceno</li> <li>Domos vulcaníticos del Plioceno</li> <li>Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos de la sierra de Guadalupe</li> <li>Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos de la sierra de Tepotzotlán</li> <li>Vulcanitas del Mioceno</li> <li>Vulcanitas del Oligoceno</li> <li>Formaciones del Cretácico Inferior</li> </ul>
--	--

Figura 15. Geología de la zona (modificado de Mooser *et al.*, 1996) (las coordenadas son aproximadas).

Basándose en la misma técnica para la zonificación de la Ciudad de México (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y geoestadística para estimar profundidades de los estratos del subsuelo) y tomando en cuenta las características de los depósitos y su distribución de los materiales del subsuelo, se propuso la siguiente zonificación para esta parte del Valle del México (figura 16), según Valencia (2007):

**Zona I, Lomas:**

*Subzona I a, Lomerios.* Formada por rocas o suelos firmes depositados fuera del ambiente lacustre.

*Subzona I b, Aluvial.* Integrada por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla altamente resistentes.

**Zona II Transición:**

*Subzona II a, Transición Alta.* Está formada por estratos de arcilla lacustre con espesores menores a 2.50 m.

*Subzona II b, Transición Baja.* Formada por estratos de arcilla con espesores mayores a 2.50 m.

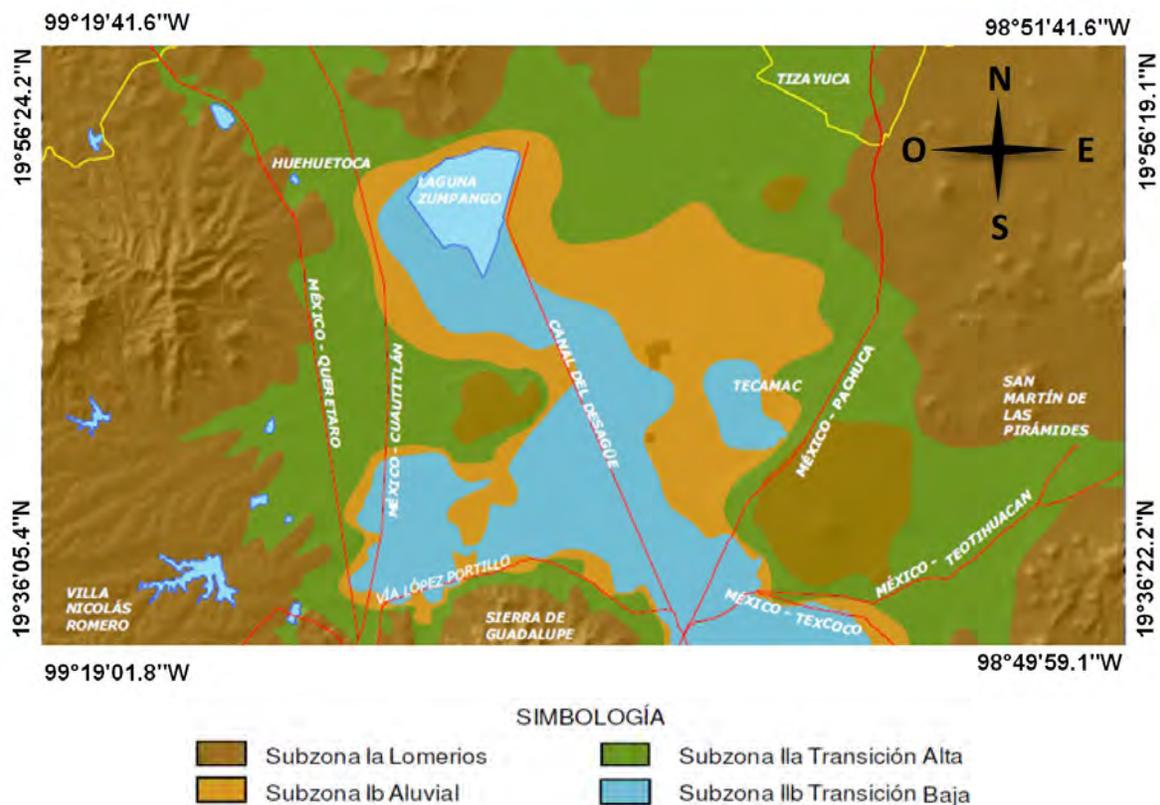


Figura 16. Se representa la zonificación propuesta por Valencia (2007) (las coordenadas son aproximadas).

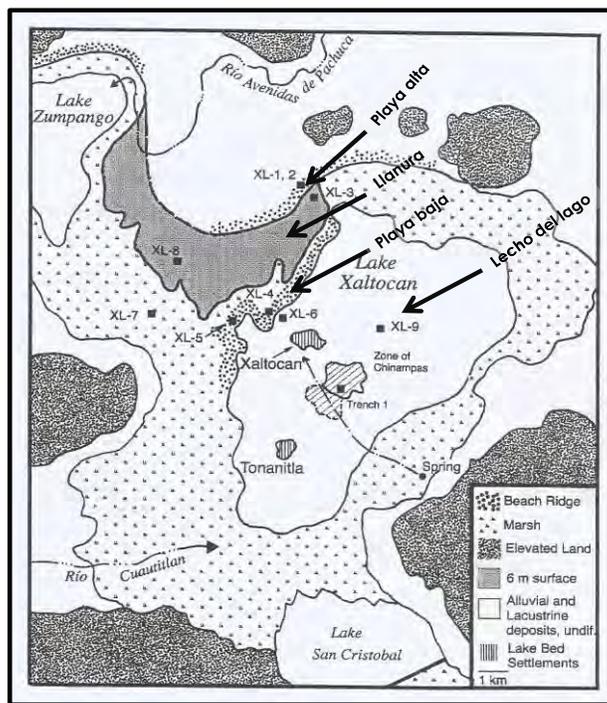
## Estudios de suelos en la zona

En la zona hay varios estudios antropológicos y arqueológicos, y en esos estudios hay algunas menciones de análisis de los suelos. Sin embargo, no existen estudios enfocados a la distribución y la génesis de los suelos.

En el estudio presentado por Millhauser (2013) se hace un análisis de la producción de sal en los suelos de San Bartolomé de las Salinas, Tonanitla, en el cual se examinaron 188 muestras donde, entre otros análisis, se determinaron los valores de pH de estas muestras con rangos de 9.3 a 10.80 con promedios de 10.08 los cuales son elevados. El autor los atribuye a la salinidad del sitio y al manto freático alcalino cercano a la superficie, que promueve el ascenso por capilaridad. También menciona que el sodio es adsorbido a las arcillas de los suelos, y los lugares de intercambio son ocupados por iones de sodio en grandes proporciones otorgando elevadas lecturas de pH. Además, determina los carbonatos de calcio del sitio con rangos moderados y concentrados en las partes con montículos, lo cual él atribuye a probables construcciones antiguas realizadas con algún tipo de cal. Realizan 9 excavaciones en la zona de 2 m x 2 m aprox., y encuentra que las texturas son en general francas-limosas y francas arcillosas, limosas y arcillosas, con muy poca presencia de arenas.

Por otra parte, Frederick *et al.*, (2005) hacen una investigación geoarqueológica en la zona del antiguo lago de Xaltocan, donde identifican por medio de visitas a campo y fotos aéreas, zonas de las orillas de lo que fuera el lago, llamadas playas lacustres. Cabe mencionar que el punto de muestreo **P2.XalN01** de esta tesis, está muy cerca de la zona Playa Baja del estudio de Frederick *et al.*, (2005) parte norte del antiguo lago. Identifican cuatro zonas que llaman: lecho del lago, playa baja, llanura y playa alta (figura 17). En el lecho moderno del lago mencionan que el suelo actual es un suelo seco, identifican principalmente una textura fina, limo y arcilla, y que estas texturas se combinan con la formación de costras de sal, hay presencia de grietas en el suelo producto de la desecación y las identifican de formas hexagonales en planta. Mencionan que para esta parte del exlago hay un 39-50 % de limos un 16 a 33 % de arcillas y el resto según el caso de arenas. Ellos describen un horizonte A con mucha materia orgánica, a lo que llaman pantanoso, identifican un 20 % de carbonatos en el suelo y lo atribuyen a las aguas del antiguo lago ahí

presente, que era el que contenía estos depósitos. En la parte de lomo de playa baja, localizado en los márgenes del noreste de Xaltocan identifican crestas de playa y un complejo de dunas de un diámetro de 2 a 3 metros sobre el terreno, donde mencionan que los depósitos son entre color marrón grisáceo, gris claro y gris olivo, identifican texturas que van de franco arenoso a arena arcillosa, presentan contenidos de carbonatos elevados y una capa de ceniza volcánica. Mencionan que algunas arenas están asociadas a depósitos eólicos en lugar de sedimentos de la playa, aunque la mayor parte del depósito es debido al oleaje del lago. También mencionan que la falta de un buen desarrollo del suelo y dispersión de cerámica azteca sugieren un depósito muy joven en esta zona. En la zona de llanura ubicada al oeste y noroeste, zona plana, ellos describen el suelo con depósitos lacustres y una posible capa de ceniza volcánica, además identifican un suelo cálcico tipo tepetate, con texturas de franco arcillosa, francas y francas arenosas, y con presencia de materia orgánica y carbonatos en el interior del suelo. Se piensa que la zona de cordillera de playa alta ubicada al norte de San Andrés Jaltenco y que se extiende a lo largo del lado occidental de Pueblo Morelos fue una línea que se extendía hasta el lago de Zumpango, está compuesta principalmente de arenas y lo describen principalmente como un suelo cálcico, con una fuerte presencia de carbonato secundario y horizontes AP y Bk.



**Figura 17. Zonas de playas lacustres, lecho y llanura del ex Lago de Xaltocan (tomado y modificado de Frederick *et al.*, 2005).**

En estas zonas antes mencionadas, Frederick *et al.*, (2005) hicieron 10 perfiles de suelos donde describieron características físicas, tipo de horizonte y algunos rasgos encontrados. La mayoría de los perfiles muestran secuencias de horizontes Ap, Bk y C; en la siguiente tabla se hace un resumen de las características de estos suelos.

**Tabla 4. Características encontradas en los perfiles de suelos en el estudio de Frederick *et al.*, (2005).**

Perfil	Horizontes (en orden se superior a inferior)	Algunas características encontradas
XL1	Ap, Ap, Ap, Bk, Bk	Rasgos de arado, abundantes carbonatos, pocos nódulos, pocos rasgos de bioturbación.
XL2	Ap, A, AB, Bk, BC	Pocos rasgos de bioturbación, endurecido, carbonatos.
XL3	Ap, Bk, C	Raíces comunes, y numerosas raíces finas, estructura laminar en profundidad, algunas partes endurecidas
XL3a	Ap, Bk, Bw-Btk, C, C, C, C, C, C	Algunas zonas duras, fragmentos de basalto, estructura laminar, ceniza.
XL4	Ap, A, AC, C,C	Estructura laminar, poca actividad biológica, restos de basalto y tefras.
XL5	Ap, AC, C	Capas delgadas de arenas y arena limosa.
XL6	Ap, A, AC, 2C	Grietas llenas de arena, laminado, restos de tefras.
XL7	2C, Ap, Ap, 2Akb, 2ABb, 2Bkb, 2Bkb	Superficie removida y compactada, presencia de muchos nódulos de carbonatos, presencia mínima de revestimientos negros en las caras de agregados y rizo concreciones.
XL8	A, Bk1, Bk2, Bk3, C	Suelo tipo tepetates, presencia de carbonatos, agregados con carbonatos.
XL9	A, ABky, Bky, 2Akyb, 2ABkyb, 3Akyb, 3ABkyb	Filamentos de sal en los poros, rizoconcreciones de carbonatos, leve endurecimiento, abundante MO difusa, pocos nódulos de carbonatos.

En otro estudio Reséndiz-Paz *et al.*, (2013) clasifican suelos de zonas agrícolas en Teoloyucan, Zumpango. Demuestran que las prácticas agrícolas han sepultado la sal y los sedimentos lacustres, que se encuentran entre los 30-70 cm de profundidad. Realizan 5 perfiles (figura 18). Identifican los siguientes tipos de suelos: lama, lama salina, lama arcillosa, negra y negra salina. Para las tierras lamas y negras definen las siguientes características:

- 1- Tierra negra (suelo negro) con una variación de tierra salina aluvial/lacustre, son de material lacustre, sedimentos y con mayor MO
- 2- Tierra lama –suelo fangoso- materiales aluviales/lacustre, sedimentos con diferente granulometría, arcillosa, arenoso, lama.

Identifican, pH y CE bajos, un elevado contenido de MO, horizontes Ap con masa basal no agregada (suelta), bloques sub-angulares, a mediana profundidad hay bloques sub-angulares y/o prismas separados por grietas, agregados estables, rasgos de óxido-reducción y carbonatos. Los suelos son clasificados de la siguiente manera (basado en la WRB): el suelo “Lama” como Hortic-terric-hydragric Anthrosol (Eutric, Sodic); el suelo “Lama salina” como Terric-hydragric Anthrosol (Sodic, Alcalic); el suelo “Lama arcillosa” como Mollic Fluvisol (Anthric, Transportic); el suelo “Negra” como Terric-hydragric Anthrosol (Eutric) y el suelo “Negra salina” como Haplic Fluvisol (Endo, Sodic, Transportic). Concluyen que las prácticas agrícolas han interferido en la formación de los suelos y su clasificación (ser humano como factor formador). Agregar sedimentos ocasionó una mayor salinización, el riego lava estas sales. Atribuyen la estabilidad de agregados por la liberación de Ca (dado por las tierras de relleno), este Ca sustituye al Na y los iones de Ca junto con la MO actúan como puente con las macromoléculas de ácidos húmicos y arcillas promoviendo una agregación estable. A pesar de las grietas no encuentran rasgos de vérticos, como marca INEGI.

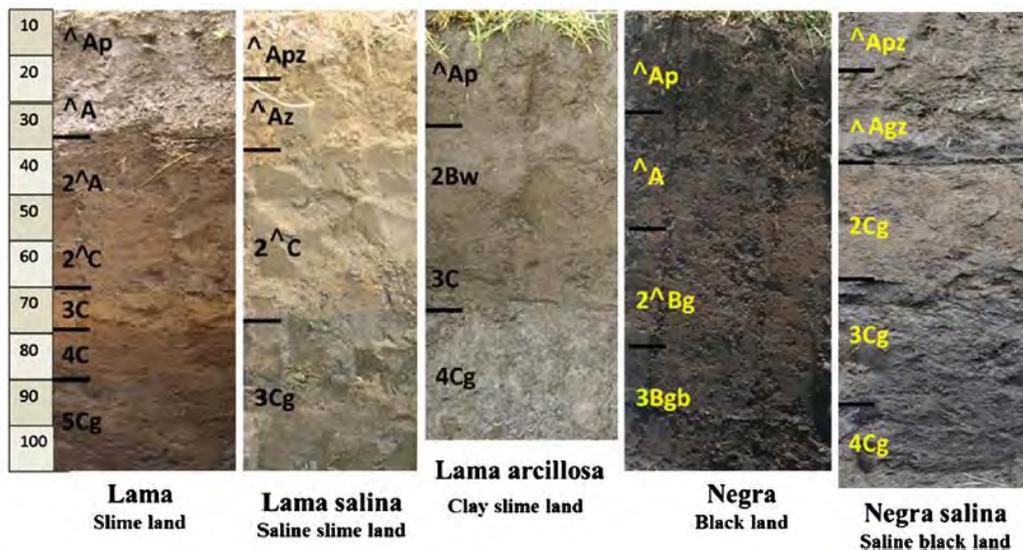
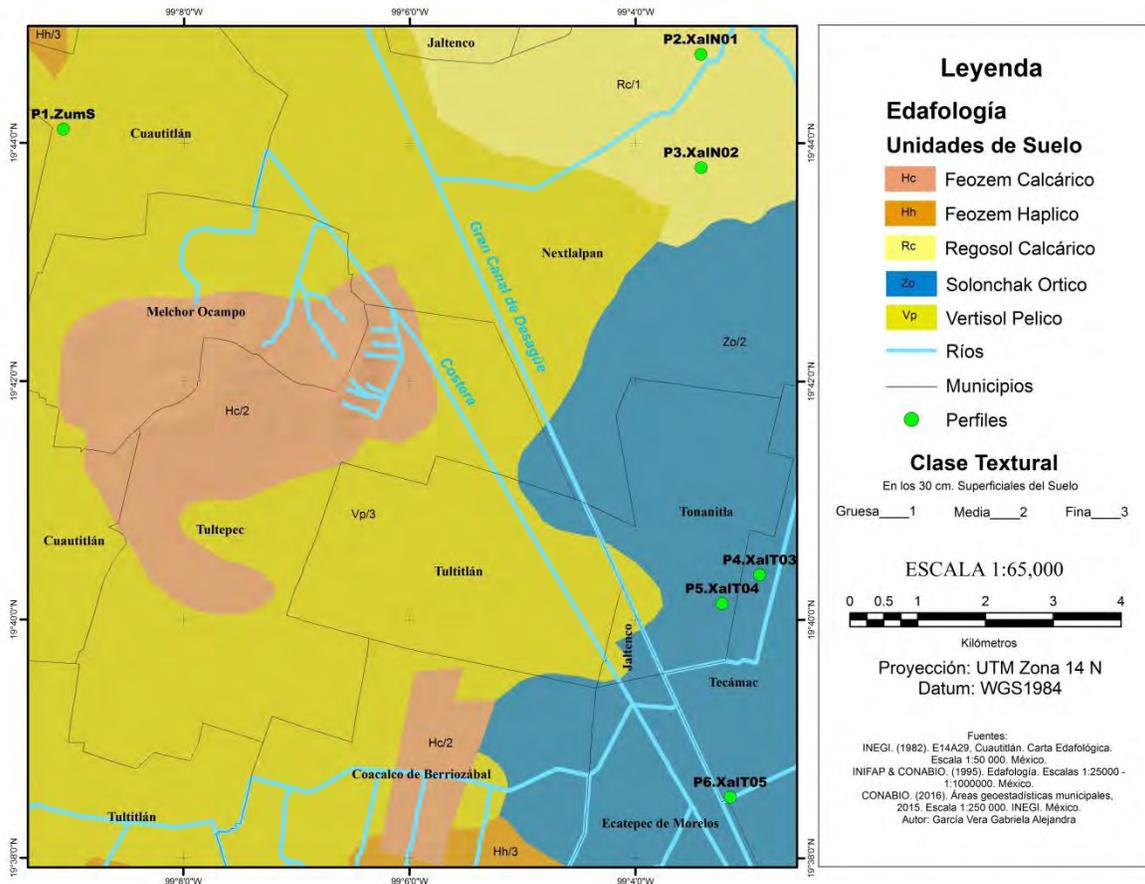


Figura 18. Perfiles de suelo descritos en el estudio de Reséndiz-Paz *et al.*, (2013).

Según los datos de INEGI (2016), en las zonas de muestreo los suelos son los siguientes: para la parte sur del ex Lago de Zumpango en el punto de muestreo P1.ZumS el suelo es de tipo Vertisol Pélico con una clase textural fina, para los puntos P2.XalN01 y P3.XalN02 (que son de la parte norte del ex Lago de Xaltocan) el suelo es de tipo Regosol Calcárico

con una clase textural gruesa, para la parte sur del antiguo lago de Xaltocan en los puntos P4.XalT03, P5.XalT04 y P6.XalT05 el suelo es de tipo Solonchak Órtico con una clase textural media (figura 19).



**Figura 19. Tipos de suelo y clase textural en los puntos de muestreo según INEGI (2016).**

## 5. Materiales y métodos



Figura 20. Diagrama de flujo de los métodos utilizados para realizar la tesis.

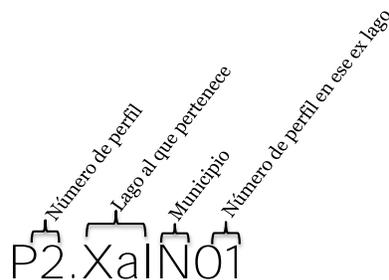
El trabajo consistió en tres fases (figura 20). En la primera parte se recopiló la información existente sobre los antiguos lagos en mapas y planos solicitados a la *Mapoteca Manuel Orozco y Berra*. Los siguientes fueron los principales para comenzar a delimitar las áreas: (1) “Plano como no he visto otro semejante en el que se comparen la superficie ocupada en el Valle de México en diversas épocas, por las aguas de los lagos”, por E. Manero en el año 1875, y (2) “Carta hidrográfica del Valle de México Levantada de orden de ministerio de fomento”, por Francisco Díaz Covarrubias y colaboradores, en el año 1862 (figuras 10 y 52, esta última en el anexo). Una vez identificadas las zonas (nombres de localidades y áreas) se buscó en Google Earth y en los mapas de la zona, elaborados INEGI, los municipios del Estado de México en que éstas se ubicaban. En la literatura se buscó información sobre la ubicación de los lagos a lo largo de los últimos 4 siglos: Morehart Christopher T. y Frederick C. (2014); Millhauser John K. (2013); Martínez de Vega M. Elisa (1995); González Morales L. Abraham (2011); Frederick C., Winsborough B. y Popper V. (2005); Elizabeth M. Brumfiel (2005); Elena Burns *et al.*, (2009).

Una vez definidas las áreas ocupadas por los lagos en las distintas épocas, se seleccionaron los sitios de muestreo de acuerdo a los siguientes criterios:

1. Tiempo de desecación, con base en los mapas y planos, reportes en la literatura y conversaciones con los cronistas de los municipios.
2. Zonas que estuvieran dentro de lo que fueron los lagos o en los límites del mismo.
3. El patrón altitudinal, dado que en general, la desecación avanzó de zonas de mayor a menor altitud.
4. La geomorfología del sitio.
5. El grado de alteración antrópica. Se buscaron sitios que no presentaran alteración como excavaciones, depósitos de materiales alóctonos, etc.

Con estos criterios se escogieron tres zonas para hacer los perfiles: 1. La zona sur del antiguo lago de Zumpango (municipio de Zumpango), 2. La parte centro del antiguo lago de Xaltocan (municipio de Nextlalpan) y 3. La parte sur del lago de Xaltocan (municipio de Tonanitla) (figura 17). Se llevaron a cabo recorridos para el reconocimiento de las zonas seleccionadas. Se acudió a los municipios para obtener permiso para realizar dichos recorridos y además poder realizar barrenaciones que permitieran seleccionar los sitios específicos donde se realizarían los perfiles de suelos.

Las claves de los perfiles se explican de la siguiente manera: **P1, 2, 3...**, **6** son el número del perfil en la catena. **ZumS** y **Xal** son las iniciales de los exlagos (Zumpango parte sur y Xaltocan). Para los sitios del ex Lago de Xaltocan la “**N**” hace referencia a aquellos ubicados en el municipio de Nextlalpan y la “**T**” al municipio de Tonanitla; ambos ubicados dentro de lo que anteriormente abarcaba el lago de Xaltocan. La numeración después de N y T **01, 02...**, **05** indica el número de perfiles hechos en el área de Xaltocan.



Se seleccionaron 6 sitios para realizar dichos perfiles, uno en el antiguo lago de Zumpango (parte sur), dos en lo que fue el norte y sur del lago de Xaltocan y tres en la parte centro del mismo lago, formando una topo-cronosecuencia de suelos (figura 21).

En la figura 21 se representa la topo-cronosecuencia, donde las flechas indican la manera en que el agua de los lagos se fue retrayendo hacia el centro. Los perfiles del centro tienen menor tiempo de desecación, además se encuentran a una menor altitud, que los sitios ubicados al norte.

Los perfiles de suelo se realizaron a 1 m de profundidad y 1.5 m de ancho aproximadamente. Se describieron sus características físicas y químicas *in situ* (ver anexo, descripción de perfiles), con base en Siebe *et al.*, (2006). Además de las descripciones también se tomaron las siguientes muestras en cada horizonte identificado:

- muestras inalteradas (para realizar el estudio micromorfológico y determinar la DA).
- muestras alteradas (para determinar las características físicas y químicas).

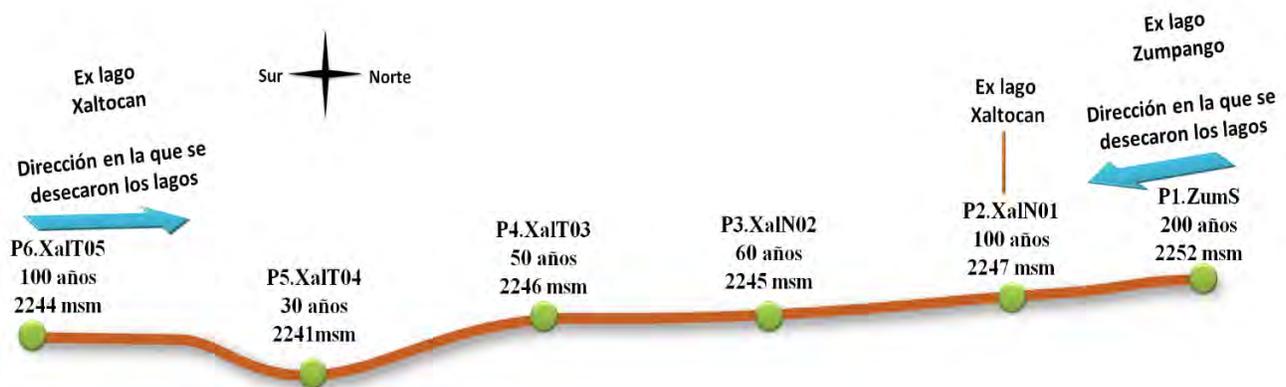


Figura 21. Representación de la topo-cronosecuencia y los perfiles de suelo; las flechas indican la dirección en la que el agua de los lagos se fue desecando.

El procedimiento de colecta y pretratamiento de muestras y de análisis de laboratorio consistió en los siguientes pasos (tabla 5):

**Tabla 5. Colecta, pre-tratamiento de muestras y análisis de laboratorio llevados a cabo.**

<b>Procedimiento</b>	<b>Principio</b>	<b>Referencia</b>
<b>Levantamiento morfoedafológico y toma de muestras de perfiles de suelos</b>	A partir de la foto interpretación y delimitación de unidades de suelo de la zona de estudio se realizó una verificación en campo por medio de barrenaciones y chequeos litológicos para seleccionar el sitio para hacer un perfil de suelo, la descripción del mismo y la toma de muestras.	Siebe <i>et al.</i> , 1996. Hodgson (1978). Schlichting <i>et al.</i> (1995). Soils Survey Manual (1993).
<b>Determinación de la densidad aparente (método del cilindro)</b>	Determinación gravimétrica de la masa de suelo seco de una muestra inalterada con un cilindro de volumen definido, en el campo, después del secado a 105°C en la estufa para eliminar el agua y relacionarla con el volumen.	Schlichting <i>et al.</i> , (1995).
<b>Determinación de pH y CE</b>	En extractos acuosos de suelo con agua destilada en relación 1:2.5 agitados por 18 hrs, se determinó en el sobrenadante el pH y CE. Con un potenciómetro (marca Beckman modelo pHi 34) y un conductímetro (marca Lamotte Con 6).	ISRIC (1992).
<b>Determinación de la textura por el método de la pipeta</b>	Obtener la proporción de tamaño de partículas de una muestra de suelo después de someterla a un pretratamiento de eliminación de sustancias cementantes como: carbonatos por acetato de sodio NaOAc 1M pH5, materia orgánica con peróxido de hidrógeno al 30% y de sales solubles lavadas con agua destilada. Para separar las fracciones de arena (2 mm – 63 µm) se usa el método de tamizado y para las fracciones de partículas de tamaños menores (limos y arcillas) el método de la sedimentación (basada en la ley de Stokes). Se ocupa hexametafosfato de sodio 0.5 g/l como medio de dispersión y se toma en cuenta la velocidad de la sedimentación, el radio de la partícula, densidad de la partícula, densidad y viscosidad del agua, gravedad, y temperatura ambiente (20°C).	Schlichting <i>et al.</i> , (1995). ISRIC (1992). Siebe <i>et al.</i> , (1996). Flores y Alcalá (2010).
<b>Determinación de cationes intercambiables por extracción con acetato de amonio.</b>	Se lavan las sales solubles, con alcohol etílico, se centrifugan las muestras (x2) después se agrega una solución de acetato de amonio 1 N pH7 para la extracción de los cationes intercambiables (Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> y K <sup>+</sup> ) de las muestras. Se hace la determinación de Ca <sup>2+</sup> y Mg <sup>2+</sup> por espectrofotometría de absorción atómica y Na <sup>+</sup> y K <sup>+</sup> por flamometría.	Bouwer <i>et al.</i> , (1952). Procedures for Soil Analysis. (1992).
<b>Determinación de carbón orgánico total.</b>	Se determinó mediante combustión con un analizador elemental Perkin Elmer 2400 II, después de un pretratamiento con ácido clorhídrico 1M a las muestras para disolver carbonatos.	Manual de operación del analizador CNHS Perkin Elmer 2400 series II.
<b>Extracción y determinación de Al, Fe y Mn utilizando oxalato de amonio (óxidos amorfos).</b>	La extracción de estos elementos se llevó a cabo con una solución de oxalato de amonio a pH 3.25 a temperatura ambiente y en la oscuridad. La determinación se realiza por espectrofotometría de absorción atómica.	Schwertmann (1964). Tamm (1922). Blume y Schwertmann (1969).
<b>Extracción y determinación de Al, Fe y Mn utilizando ditionito de sodio (óxidos cristalinos).</b>	La muestra se calentó en un buffer acomplexadamente de citrato de sodio 0.24M/bicarbonato de sodio 0.2M, agregando ditionito de sodio como agente reductor. En los extractos se determinó Fe, Al y Mn por espectrofotometría de absorción atómica.	Blume y Schwertmann (1969). Mehra y Jackson (1960). Schlichting y Blume (1966).

<b>Determinación de carbono y nitrógeno totales</b>	Se determinó la concentración de carbono y nitrógeno total en muestras de suelo en el analizador elemental CNHS Perkin Elmer 2400 series II. Este analizador utiliza un método de combustión para convertir los elementos en gases simples de CO <sub>2</sub> y N <sub>2</sub> y luego detectar la concentración de estos gases en función de su conductividad térmica.	Manual de operación del analizador CNHS Perkin Elmer 2400 series II.
<b>Determinación de fósforo (P) disponible (método de Olsen) usando cloruro estano como agente reductor</b>	Se determinó el fósforo extractable con bicarbonato de sodio a pH 8.5. El P en el extracto se determinó colorimétricamente con el método del azul del molibdato de amonio con el cloruro estano como agente reductor.	Método de Olsen et al. reportado en: Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological properties (1965).
<b>Pasta de saturación para cationes solubles</b>	Se obtuvo un extracto de saturación con agua destilada y se determinaron los iones mayores. Para ello se pesaron 10 gr de suelo, se le agregó poca agua destilada hasta realizar una pasta consistencia espesa, esta pasta se colocó en un embudo y se esperó que se filtre el agua destilada con la solución de suelo. A esta solución se le miden los iones presentes por medio de cromatografía de iones. Se utilizó un cromatógrafo de líquidos que se constituye de dos bombas binarias modelo 1525, un automuestreador modelo 717 plus y un detector de conductividad modelo 432 (marca Waters®), una columna analítica IC-Pak Anion HR (Waters®), un purificador y desionizador de agua Milli-Q modelo 185 de Millipore. Y viales para el cromatógrafo.	Laboratorio de Cromatografía. Departamento de Edafología. Instituto de Geología, UNAM

**Tipos de arcilla.** Se calculó la CIC/kg de arcilla de cada uno de los perfiles de suelo, esto con el fin de interpretar el tipo de arcilla en los horizontes, basándonos en su CIC. La fórmula utilizada fue:

$$CIC \text{ (cmol/kg de arcilla)} = ((CIC \text{ cmol/kg de suelo}) - (3 * \% \text{ de MO})) / \% \text{ de arcilla} * 100$$

Con respecto al hierro extraído con ditionito y oxalato se hizo para evaluar el avance de la pedogénesis en los diferentes perfiles de la topo-cronosecuencia. El hierro extraído con oxalato, Fe<sub>o</sub>, es el recién formado en el suelo (Fe amorfo) y es más abundante en suelos jóvenes. El hierro extraído con ditionito, Fe<sub>d</sub>, representa a los óxidos de hierro de origen pedogenético tanto amorfos como los cristalinos que son indicativos de procesos que llevan un mayor tiempo en el suelo. Se hicieron las relaciones de Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> que nos da una idea el grado de avance de la pedogénesis o bien la relación Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> que nos indica la proporción de los óxidos de hierro amorfo respecto a los cristalinos. Por lo tanto, si el valor de Fe<sub>d</sub>/Fe<sub>t</sub> es mayor al de Fe<sub>o</sub>/Fe<sub>d</sub> entonces existe un suelo con mayor tiempo expuesto a procesos

pedogenéticos y por el contrario si el valor de  $Fe_o/Fe_d$  es mayor a  $Fe_d/Fe_t$  entonces es indicativo de procesos recientes.

**Estudio micromorfológico.** Las láminas delgadas fueron elaboradas a partir de muestras inalteradas colectadas en campo. Se eliminó la humedad secándolas a 60 °C. Una vez secas se impregnaron con resina de poliéster mezclado con monómero de estireno, peróxido de metil etil cetona y un catalizador K-2000. En ese instante se introducen a una cámara de vacío a una presión de 22 atmósferas por unos 30 minutos, esto con el fin de impregnar en su totalidad a la muestra. Se exponen a la luz solar para secar la resina.

Los bloques ya endurecidos fueron segmentados con una cortadora MK PRO SERIES con disco de diamante. Se pule una de las caras de este bloque con lijas del número de 120, 220, 360, 400 y 600. Este bloque pulido se pega con resina a un portaobjetos petrográfico, se adelgaza con una cortadora petrográfica BUEHLER. Esta lamina ya adelgazada se pule y termina de adelgazar con abrasivos de carburo de tungsteno, con un grosor de 30 micrones aproximadamente, se les coloca cubre objetos a la lámina.

Se analizan en un microscopio petrográfico Olympus América BX51, equipado con una cámara fotográfica CoolSNAP-Pro COLOR de MEDIA CYBERNETICS, equipado con una lámpara de luz transmitida CL 1500 ECO, ZEISS.

La clasificación de los suelos se realizó mediante la WRB 2014.

## 6. Resultados

Los resultados de los perfiles analizados se presentan de acuerdo a la catena de suelos realizada, iniciando con los perfiles con mayor tiempo expuestos a la pedogénesis, (perfil ubicado en la orilla del ex Lago de Zumpango) y terminando con los de menor tiempo expuestos a la pedogénesis (centro del lago de Xaltocan).

### Descripción de los perfiles de suelo

La descripción de campo, de los perfiles, arrojó las siguientes características: primero se muestra figura 22 que presenta un listado de horizontes encontrados y descritos en cada perfil de suelo, en orden de la cronosecuencia. La tabla 6, muestra los rasgos morfológicos de cada perfil de suelo observados en campo y la tabla 7 menciona el lago y parte a la que pertenecieron los perfiles, el tiempo aproximado de desecación, la altitud y la clasificación de suelos a la que se llegó.

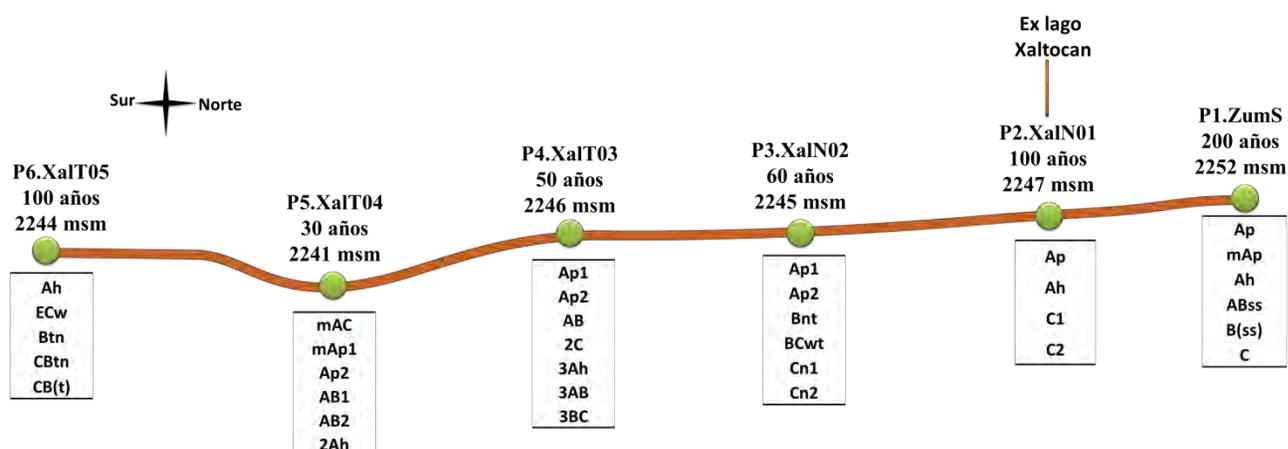


Figura 22. Representación de los horizontes descritos en campo para los 6 perfiles de suelo.

Tabla 6. Rasgos morfológicos más destacados de los 6 perfiles de suelo de la cronosecuencia.

Rasgos del perfil	<i>P1.ZumS</i>	<i>P2.XalN01</i>	<i>P3.XalN02</i>	<i>P4.XalT03</i>	<i>P5.XalT04</i>	<i>P6.XalT05</i>
<b>Profundidad (cm)</b>	0 - 75	0 - 47+	0 - 75	0 - 100	0 - 56	0 - 60
<b>Presencia de horizontes enterrados</b>	No	No	No	Sí, hay dos secuencias de suelo. En el 4° horizonte hay uno parece sepultado denominado 2C. Posteriormente hay otra secuencia con	Sí, en la última parte hay un horizonte 2Ah, que se identificó como otra secuencia.	No

				horizontes 3Ah, 3AB, 3BC.		
<b>Carbonatos</b>	Hay carbonatos en todo el perfil, primarios y secundarios.	Hay carbonatos en todo el perfil, primarios y secundarios.	Hay carbonatos en todo el perfil, primarios y secundarios.	Hay carbonatos en todo el perfil, primarios y secundarios.	Hay carbonatos en todo el perfil, primarios y secundarios.	Hay carbonatos en todo el perfil, primarios y secundarios.
<b>Estructura (de superficie a profundidad)</b>	Migajón-granular-masiva-subangular-masiva	Grano simple-subangular-granular-subangular	Grano simple-subangular-angular-	Subangular en bloques-2, subangular en bloques-3,prismática-masiva/subangular en bloques	Laminar-masiva/angular-subangular/angular-masiva/angular-2,prismática/angular	Subangular/laminar-masiva/subangular-2,subangular/angular-subangular-masiva/subangular.
<b>Estabilidad de agregados (en orden de superficie a profundidad)</b>	Media- alta-media	Nula-media-baja-alta	Nula-baja-media/baja-alta	Baja-2,alta-3,muy alta	Muy baja-moderada-media-2,media	Muy baja-2, media-alta-muy alta
<b>Densidad de raíces (en orden de superficie a profundidad)</b>	Alta-muy alta-alta	Media-baja-muy baja	Media-baja-nula	Alta-2,baja-3,media	Prácticamente es nula	Baja-media-2, alta-media-baja
<b>Características y rasgos pedogenéticos</b>	3er horizonte presenta recubrimiento de MO con arcilla en poros y caras de agregados. Presenta slickensides en el antepenúltimo y penúltimo horizonte. Poca iluviación de arcilla en la parte profunda del perfil.	Hay ligeros recubrimientos oscuros, MO, en caras de agregados y poros, a partir de la parte media del perfil. Hay presencia de sales.	A partir del tercer horizonte presenta recubrimientos oscuros de una mezcla de MO y arcilla en caras de agregados, grietas y poros. Hay presencia de sales.	5° y 6° horizonte slickensides incipientes. Hay recubrimientos de MO y arcilla en caras de agregados y poros. 2° horizonte hay presencia de bloques gruesos material redepositado. Poca iluviación de arcilla.	En la superficie hay una costra de sal. Desde su segundo horizonte presenta revestimientos en caras y poros de agregados de una mezcla de MO y arcilla. El manto freático se encuentra a menos de 60 cm.	Hay revestimientos en caras de agregados y poros de una mezcla de MO y arcilla. A partir del tercer horizonte hay presencia de revestimientos de arcilla, sobretodo en el fondo del perfil, iluviación de arcilla.
<b>Rasgos reductomórficos</b>	Presencia moderada en todo el perfil.	Presencia incipiente en todo el perfil.	Presencia de moderada en la parte superficial a moderadamente fuerte en la parte media a profunda.	Moderadamente fuerte en la parte superficial a moderada en la parte profunda.	Presencia moderada en el perfil.	Presencia incipiente en el perfil.

**Tabla 7. Características generales de los sitios de muestreo y clasificación de suelo.**

<b>Parte del lago en la que se ubicó el perfil</b>	<b>Tiempo aproximado de desecación</b>	<b>Clave del perfil</b>	<b>Altitud</b>	<b>Clasificación (WRB)</b>
Perteneció al antiguo lago de Zumpango. Ubicado en los linderos de la zona sur del lago.	200 años	P1.ZumS	2252 msm	Haplic <b>Kastanozem</b> (Aric, Clayic, Loamic, Pachic, Raptic, Protovertic)
Perteneció al lago de Xaltocan, parte norte. Ubicado cerca de un montículo que fue llamado Xacayohualco. Municipio de Nextlalpan. San Francisco Molonco.	100 años	P2.XalN01	2247 msm	Calcic <b>Kastanozem</b> (Aric, Loamic, Raptic, Katosodic)
Perteneció al lago de Xaltocan parte norte. Ubicado más en la parte central del lago. Ubicado junto al municipio de Xaltocan.	60 años	P3.XalN02	2245 msm	Katocalcic, Mollic <b>Solonetz</b> (Cutanic, Humic, Loamic, Hypernatric, Katoprotosalic)
Perteneció a la parte sur del lago de Xaltocan. Cerca de la isla de Tonanitla (hoy municipio). Parte elevada de un sitio llamado “El Charco”	50 años	P4.XalT03	2246 msm	Calcic <b>Kastanozem</b> (Aric, Clayic, Amphiraptic)
Perteneció a la parte sur del lago de Xaltocan. Ubicado en el municipio de Tonanitla, en una depresión del sitio “El Charco”. El manto freático está a 60 cm. En ocasiones se inunda.	30 años	P5.XalT04	2241 msm	Calcaric Reductigleyic Mollic <b>Gleysol</b> (Alkalic, Protocalcic, Clayic, Humic, Protosalic, Sodic)
Perteneció a los linderos del lago de Xaltocan, cerca de lo que fue el lago de San Cristóbal. Está en el municipio de Tonanitla.	100 años	P6.XalT05	2244 msm	Calcic Abruptic <b>Solonetz</b> (Cutanic, Differentic, Ochric, Hypernatric, Raptic)

## Densidad aparente (DA)

Los resultados de la densidad aparente se muestran en la tabla 9 del anexo. En los perfiles P6.XalT05, P5XalT04 y P3.XalN02 el grosor de algunos horizontes no fue suficiente para insertar el anillo, por lo que no se tienen valores de densidad para ellos.

En la mayoría de los perfiles la densidad disminuye conforme aumenta la profundidad (figura 23). El perfil **P2.XalN01** muestra los valores más altos de DA en toda la cronosecuencia ( $1.4 \text{ g/cm}^3$ , en el penúltimo horizonte). También el perfil **P1.ZumpS** presenta valores elevados en la parte superior, después tienden a disminuir. Estos dos perfiles son los únicos que rebasan el  $1 \text{ g/cm}^3$  de valor de densidad aparente (líneas de color rojo), además son de los perfiles con mayor tiempo de exposición a la pedogénesis (100 y 200 años aproximadamente de desecación, respectivamente). Los demás perfiles presentan valores por debajo del  $1 \text{ g/cm}^3$ . Los dos perfiles de suelo con menor tiempo de exposición a la pedogénesis, **P4.XalT03** y **P5.XalT04** presentan valores bajos de DA, en especial P4.XalT03 el cual tiene, los valores más bajos de densidad en toda la cronosecuencia (de  $0.8$  a  $0.7 \text{ g/cm}^3$ ).

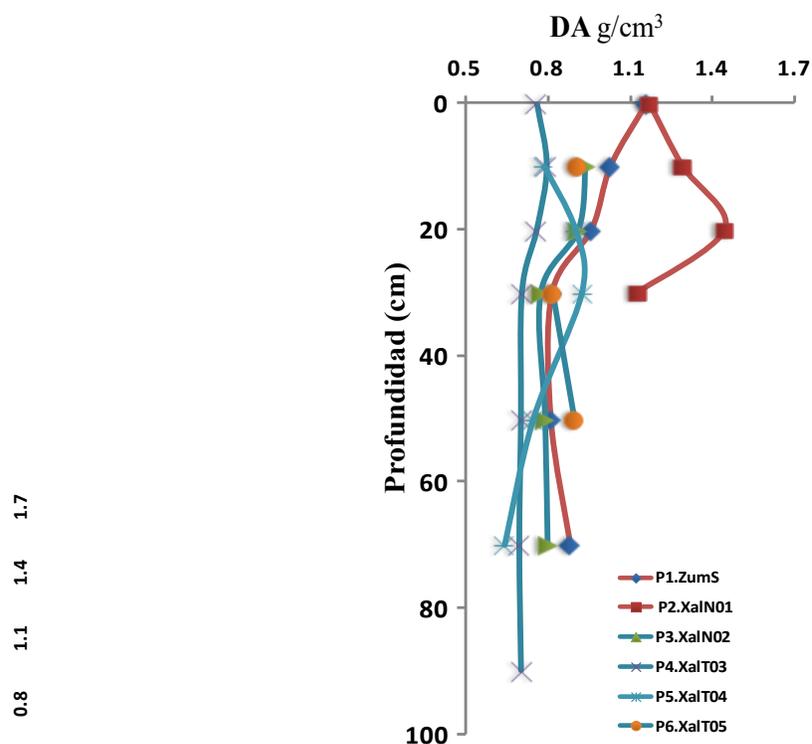
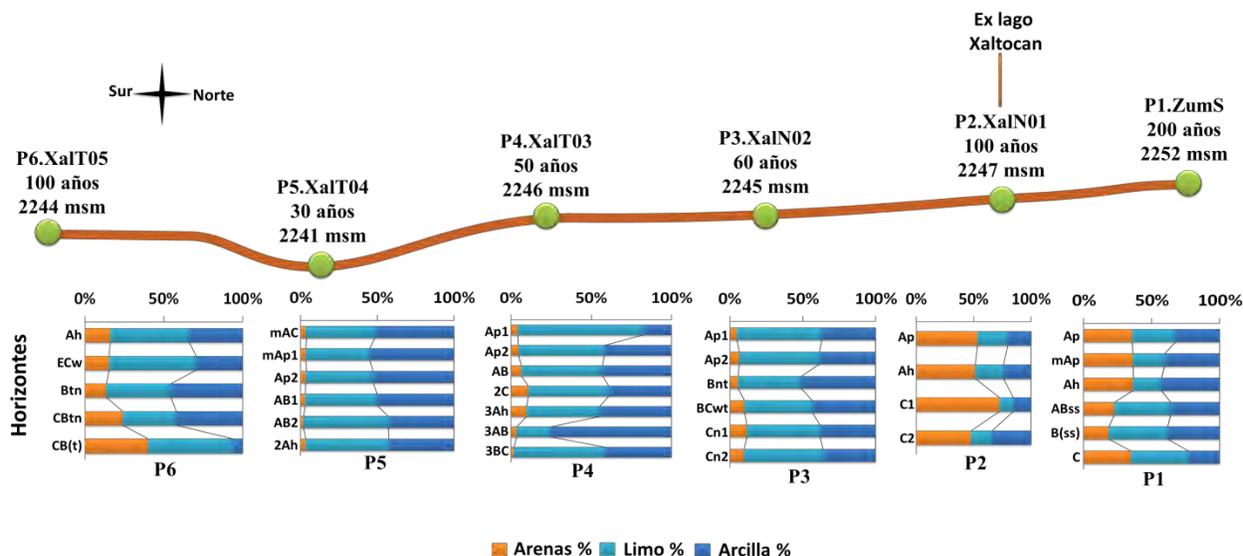


Figura 23. Valores de la densidad aparente (DA), para los 6 perfiles de suelo de la cronosecuencia.

## Texturas

Las texturas que predominan en los perfiles estudiados son las limosas y arcillosas, características de sedimentos lacustres (figura 24 y tabla 10 del anexo). Las partículas de arena únicamente se incrementan en los extremos de los antiguos lagos, es decir en las antiguas playas lacustres. En el centro de la catena el contenido de las partículas finas es mayor, sobre todo en los perfiles con menor tiempo de desecación, donde el lago permaneció en sus últimos años.



**Figura 24. Distribución del tamaño de partículas en los perfiles de suelo de la topo-cronosecuencia. Nótese, que el mayor contenido de arenas se encuentra en las orillas.**

El perfil P1.ZumS, es uno de los perfiles con mayor contenido de arenas, predominan limos y las arcillas. El perfil P2.XalN01 fue un montículo con una pequeña elevación formando una playa lacustre (fuente cronista de Xaltocan: Juan Manuel B.J., comunicación personal), es el perfil con mayor contenido de arenas en toda la cronosecuencia. En el perfil P3.XalN02 predominan los limos y las arcillas. El perfil P4.XalT03 la textura en general es arcillo-limosa. P5.XalT04 tiene un gran porcentaje de arcillas y limos. P6.XalT05 el contenido de arenas se incrementan de nuevo. Sin embargo, siguen predominando las arcillas y limos (figura 24).

## Valores de pH

Los perfiles de la cronosecuencia tienden a un pH alcalino (figura 25). Los perfiles que presentan mayores valores de pH son **P6.XalT05**, **P5.XalT04** y **P3.XalN02** (de un rango de

8.4 a 9.9) (líneas de color rojo en la figura 25). Por el contrario los perfiles con menores valores de pH son **P1.ZumS** y **P4.XalT03** (de un rango de 6.7 a 8.4) (líneas de color azul en la figura 25). El perfil **P2.XalN01** tiene valores bajos de pH en los primeros horizontes. Sin embargo, aumenta considerablemente en profundidad (un rango de 7.2 a 9.3). Los valores de pH tienden a incrementar conforme aumenta la profundidad del perfil en cinco de los seis perfiles, excepto P5.XalT04 que es el único donde los valores altos están en superficie y disminuyen cuando incrementa la profundidad. El único perfil con valores cercanos a pH neutros es P1.ZumS, los demás tienen en sus horizontes valores por encima de 8. P2.XalN01 presenta valores bajos de pH en superficie. Sin embargo, incrementan considerablemente con la profundidad. Los valores completos a profundidad se muestran en la tabla 11 del anexo.

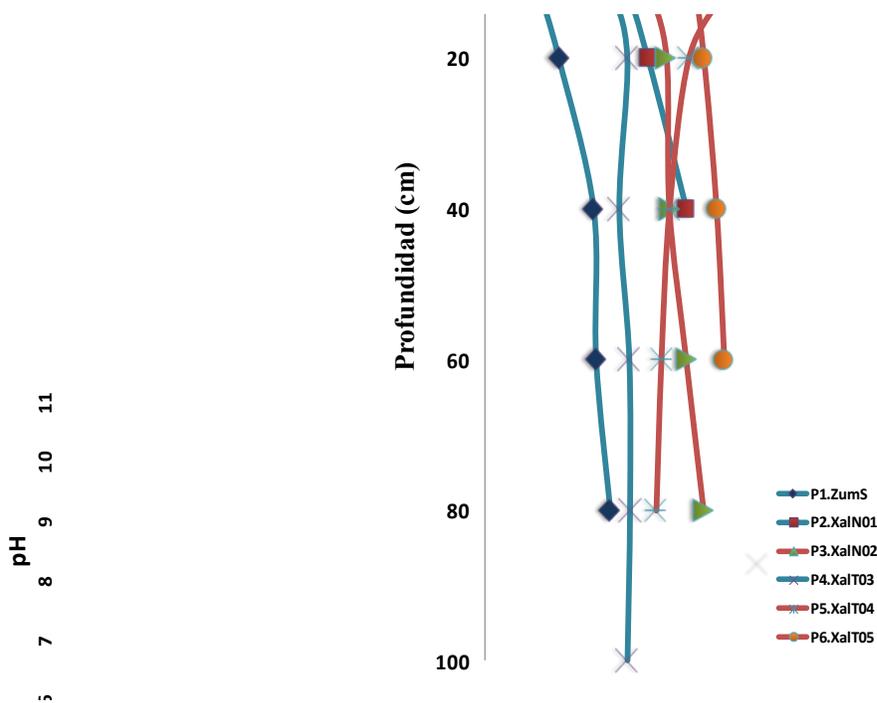


Figura 25. Valores de pH para los 6 perfiles de suelo de la cronosecuencia.

### **Conductividad eléctrica (CE)**

La CE se midió en los extractos de saturación de la solución del suelo. Los perfiles que presentan los valores más elevados de CE son **P6.XalT05**, **P5.XalT04** y **P3.XalN02** (de 1.721-2.565; 5.505, 10.130-1.812; y 0.720-6.080 mS cm<sup>-1</sup> respectivamente) (líneas de color rojo en la figura 26). Es de notar que los mismos perfiles de suelos con elevadas CE son los que presentan los valores más altos de pH. Los perfiles con los valores más bajos de CE, en la cronosecuencia, son **P1.ZumS**, **P2.XalN01** y **P4.XalT03** (de 0.482-0.355; 0.467-1.295; y 0.829-0.768 mS cm<sup>-1</sup> respectivamente) (líneas de color azul en la figura 26) (mismos perfiles que presentan también los valores bajos de pH). Valores de CE por encima de 4 mS/cm y hasta 8 mS/cm significan que plantas/cultivos sensibles a la presencia de sales mostrarán afectaciones en su crecimiento/rendimiento (Richrads, 1965). Los suelos con valores de CE por encima de 8 mS/cm solo permiten el crecimiento de plantas halófitas. El perfil que tiene los valores más bajos, de todos los demás, es P1.ZumS el cual, además, es el que tiene mayor tiempo de desecación y el que tiene un mayor altitud. En este perfil las sales no se acumularon en exceso tras la desecación, o bien han sido lavadas fuera del perfil por riego agrícola. Nótese que en los perfiles P2.XalN01, P3.XalN02, P4.XalT03 y P6.XalT05 los valores de CE se incrementan conforme aumenta la profundidad, mientras que en el perfil P1.ZumS los valores en superficie son un poco más elevados que en profundidad, mientras que en P5.XalT04, los valores crecen considerablemente en la superficie. Los valores completos a profundidad de cada perfil se muestran en la tabla 12 del anexo.

### **Saturación de sodio (Na %)**

Los perfiles con mayor porcentaje de saturación de Na son **P6.XalT05**, **P5.XalT04** y **P3.XalN02** (líneas de color naranja en la figura 27) sobrepasan los rangos de 30-40 % o incluso sobrepasando el 50 %, como el caso de P5.XalT04, cabe recordar que un rango del 15% de saturación ya se considera en afectación. Los perfiles con mayor porcentaje de saturación coinciden con los de menor altitud (P5.XalT04 y P6.XalT05). Los perfiles con menor % de saturación de sodio son **P1.ZumS**, **P2.XalN01** y **P4.XalT03**, sus porcentajes están por debajo del 10 % y se consideran ligeramente afectados o sin afectación (líneas de color azul en la figura 27). El comportamiento de esta saturación es que incrementa al aumentar la profundidad, excepto para el perfil P5.XalT04 donde la saturación se

incrementa hacia la superficie. Los valores completos a profundidad de cada perfil se muestran en la tabla 13 del anexo.

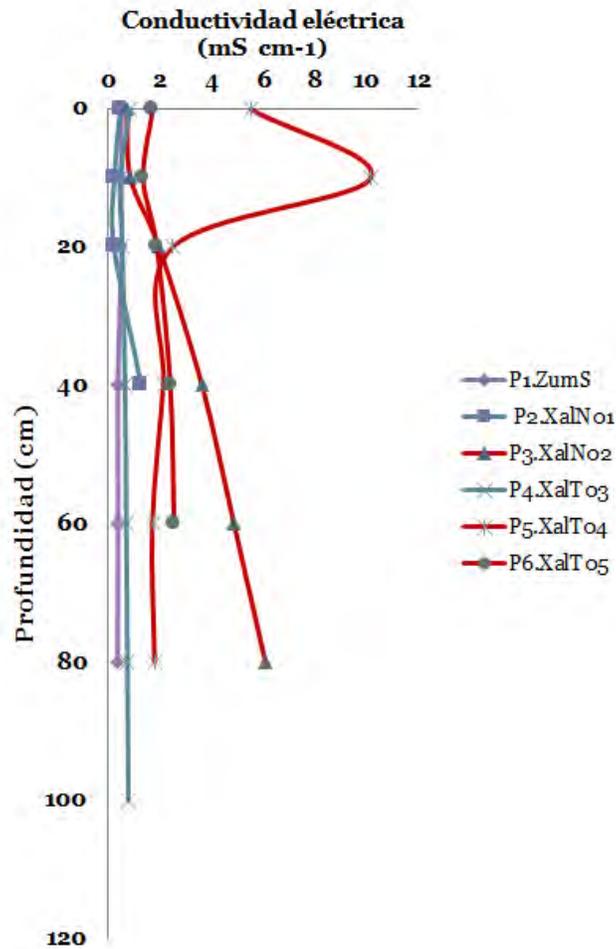


Figura 26. Comparación del comportamiento de los valores de CE con la profundidad para los 6 perfiles de la cronosecuencia.

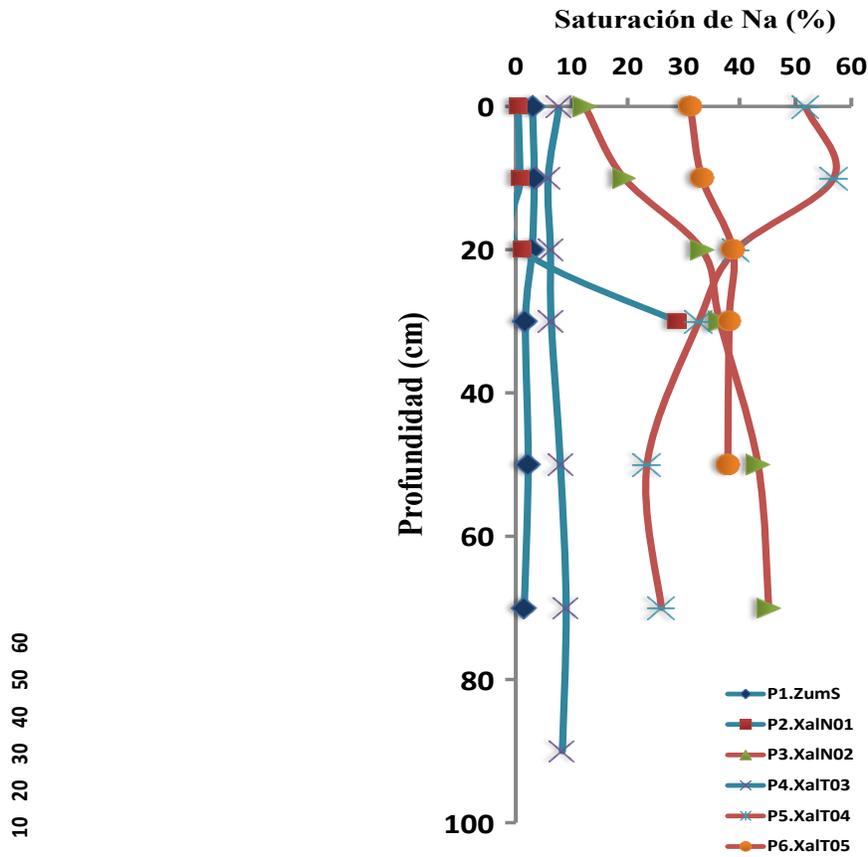


Figura 27. Comportamiento de la saturación de sodio (Na %) con la profundidad en los 6 perfiles de la cronosecuencia.

### Materia orgánica (MO)

Los resultados del contenido de materia orgánica (MO) indican que perfil con mayor contenido de MO es **P4.XalT03** (7.1-3.2 %). El perfil **P2.XalN01** tiene un rango de 5.5-0.8 %, de MO a profundidad el contenido es menor. Los perfiles **P1.ZumS** y **P3.XalN02** tienen prácticamente el mismo rango, van de 4.8-1 % y 4.8-4.2 %, respectivamente, nótese que en **P3.XalN02** el contenido de MO varía muy poco. En el perfil **P5.XalT04** sus valores se mantienen en un rango de poca variación y pocas oscilaciones (3.4-3.9 %). **P6.XalT05** es el perfil con los valores de MO más bajos rango de 2.5-07 %. El comportamiento del contenido de la MO es que los mayores valores están en superficie y disminuyen a profundidad. Los valores completos a profundidad de cada perfil se muestran en la tabla 14 del anexo.

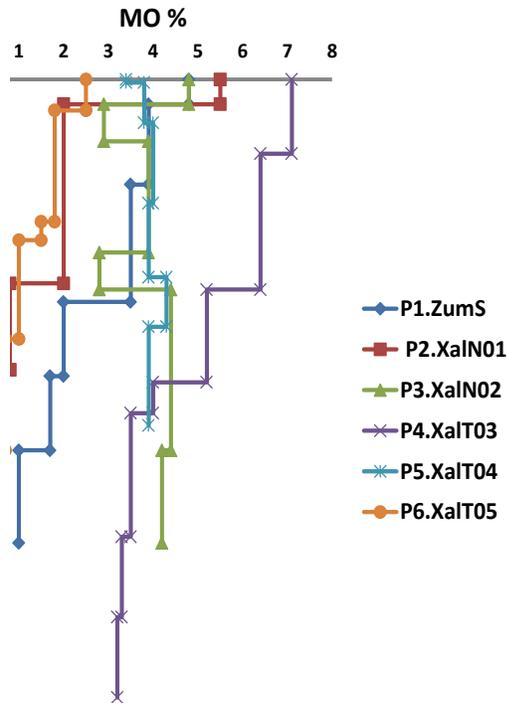


Figura 28. Contenido de MO con respecto a la profundidad en los 6 perfiles de la topo-cronosecuencia.

### Almacén de carbono orgánico en el perfil

Se calculó el almacén de carbono orgánico en cada perfil Corg (kg/m<sup>2</sup>) para verificar si los perfiles más antiguos tienen una mayor cantidad acumulada. Se observa en la figura 29 como los perfiles sí siguen una tendencia de aumento de Corg (kg/m<sup>2</sup>) acumulado en relación con el tiempo. Cabe señalar que el perfil **P6.XalT05** fue el que presentó los valores más bajos, es uno de los perfiles que presenta alta salinidad, y es lo que probablemente afectó a la acumulación de Corg.

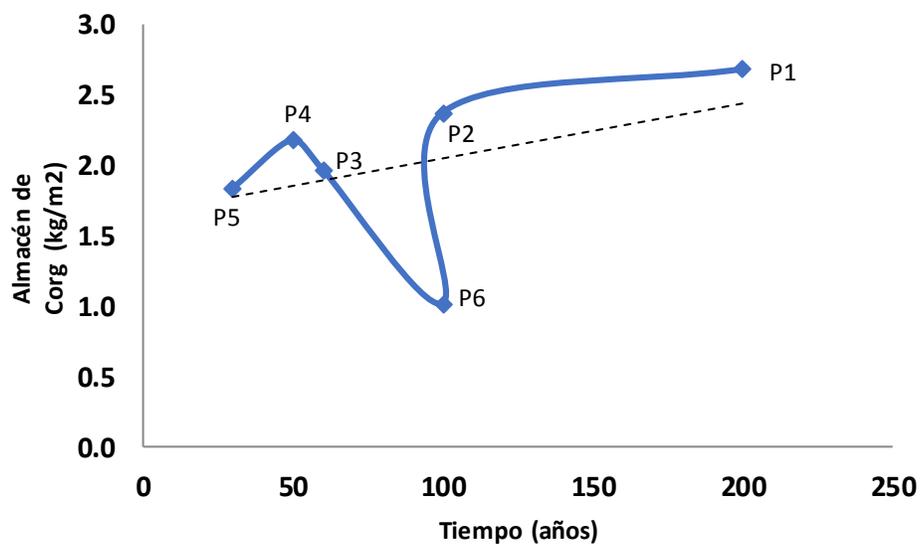


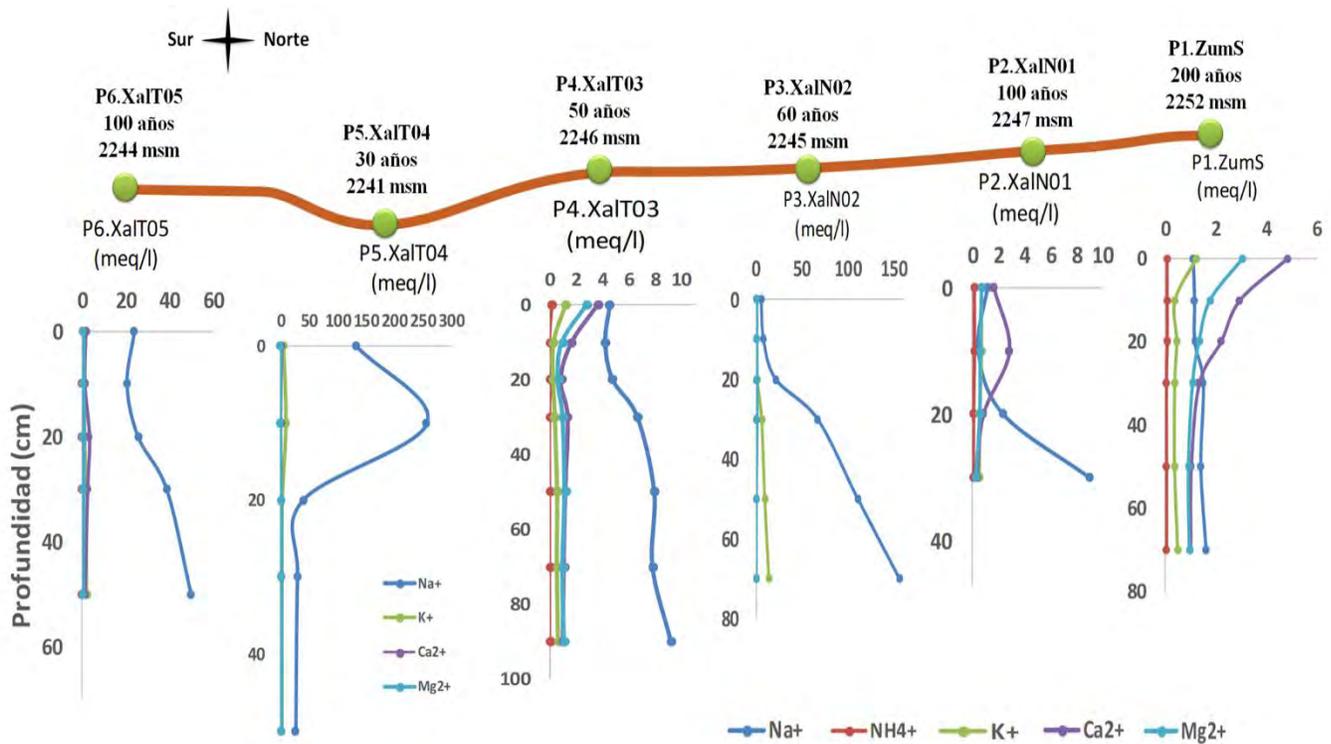
Figura 29. Almacén de Corg (kg/m<sup>2</sup>) acumulado en años de exposición a la intemperie de los perfiles de estudio.

### Cationes y aniones solubles

Después de obtener la pasta de saturación de las muestras de suelo se obtuvieron las contracciones de los iones solubles llegando a los siguientes resultados.

#### Cationes

En la figura 30, se presentan las gráficas de las concentraciones de los cationes de cada perfil de la cronosecuencia. El perfil P5.XalT04 no presentó concentración de amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Los datos de las concentraciones se presentan en la tabla 15 del anexo. Haciendo una suma de las concentraciones de los cationes de todos los perfiles, el orden en abundancia se da de la siguiente manera: en los sitios de tiempos de exposición a la pedogénesis <100 años es Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, mientras que en los perfiles con edades de >100 años es Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.



**Figura 30. Concentraciones de los cationes solubles de los 6 perfiles de suelo.**

En los perfiles **P1.ZumS** y **P2.XalN01** el  $\text{Na}^+$  incrementa a profundidad del perfil (rangos 1.1 a 1.61 y 1.12 a 9 meq/l de concentración, respectivamente) y la concentración de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  presenta una tendencia inversa en ambos casos, la concentración de estos cationes es relativamente equitativa (rangos de 1.23-0.48, 4.83-0.99 y 3.06-0.95 meq/l en P1; en P2 0.66-0.52, 1.60-0.28 y 0.72-20 meq/l respectivamente). En el perfil **P3.XalN02** las concentraciones de  $\text{Na}^+$  incrementan considerablemente, sobre todo en los horizontes más profundos del perfil (rango de 5.45-156.64 meq/l de concentración), los demás cationes tienen la misma tendencia de incrementar en los horizontes más profundos del perfil, sobretodo  $\text{K}^+$  (un rango de 0.89-14.11 meq/l). Sin embargo, el incremento de sus concentraciones no es tan abrupta. En el perfil **P4.XalT03** hay un ligero incremento en la concentración de los cationes  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  (rangos de 1.24-0.64, 3.65-1.01 y 2.85-1.13 meq/l respectivamente), el sodio,  $\text{Na}^+$ , tiene una mayor, sobre todo en profundidad (rango de 1.56-9.18 meq/l de concentración), los demás cationes tienden a disminuir en los horizontes profundos del perfil. En **P5.XalT04** las tendencias son inversas, es decir, las

mayores concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se encuentran en superficie, y no en profundidad, sobre todo  $\text{Na}^+$  presenta concentraciones muy elevadas (132.5-25.23 y 4.73-1.3 meq/l respectivamente),  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}$  tiene concentraciones que van de: 0.84-0.71 y 0.21-0.65 meq/l respectivamente. Para el perfil **P6.XalT05** el  $\text{Na}^+$  presenta también concentraciones elevadas, sobre todo en profundidad (24-49.85 meq/l),  $\text{K}^+$  presenta concentraciones, que van de: 1.75-2.33 meq/l, mientras que  $\text{Ca}^+$  las presenta un rango de 1.71-1.34 meq/l. Los valores completos de las concentraciones de los cationes de cada perfil se muestran en la tabla 15 del anexo.

### Aniones

Las gráficas de las concentraciones de los aniones de los perfiles se presentan en la figura 31. Se puede observar que en el perfil **P1.ZumS** el  $\text{NO}_3^-$  presenta mayores concentraciones en superficie y disminuye a profundidad (7.84-0.41 meq/l),  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^-$  son los otros dos aniones con mayor concentración en el perfil (0.78-199 y 1.01-0.64 meq/l, respectivamente). El perfil **P2.XalN01** presenta una concentración elevada en el anión  $\text{HCO}_3^-$  (2.9-6.6 meq/l) es el único anión con mayor concentración, los demás presentan concentraciones bajas en el perfil. En el perfil **P3.XalN02** las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  se incrementan considerablemente a profundidad (2.83-161.83 meq/l), los aniones  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^-$  presentan un ligero incremento en sus concentraciones (2.43-10.14/6.08 y 0.39-13.34 meq/l respectivamente), los demás aniones presentan bajas concentraciones. El perfil **P4.XalT03** el anión con mayor concentración es el  $\text{Cl}^-$  (5.38/1.35-7.79 meq/l) seguido también de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^-$  (2.86/4-1.70 y 2.86/1.3-3.69 meq/l, respectivamente). En el perfil **P5.XalT04** los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^-$  tienen concentraciones muy elevadas (62/140-16 y 54.87/123.72-7.91 meq/l respectivamente), el  $\text{HCO}_3^-$  presenta un incremento en su concentración. Sin embargo, no tan elevada como los aniones anteriores (14.2-3.97 meq/l), el anión  $\text{NO}_3^-$  también presenta un ligero incremento respecto a los demás perfiles (11.35/24.43-1.30 meq/l), nótese que en este perfil las mayores concentraciones se presentan cerca de la superficie y no a profundidad. En el perfil **P6.XalT05** los aniones con mayor concentración son también  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  (13.89-17, 8.44-21.21 y 7-13.28 meq/l respectivamente). Los valores completos de las concentraciones de los aniones solubles de cada perfil se muestran en la tabla 16 del anexo.

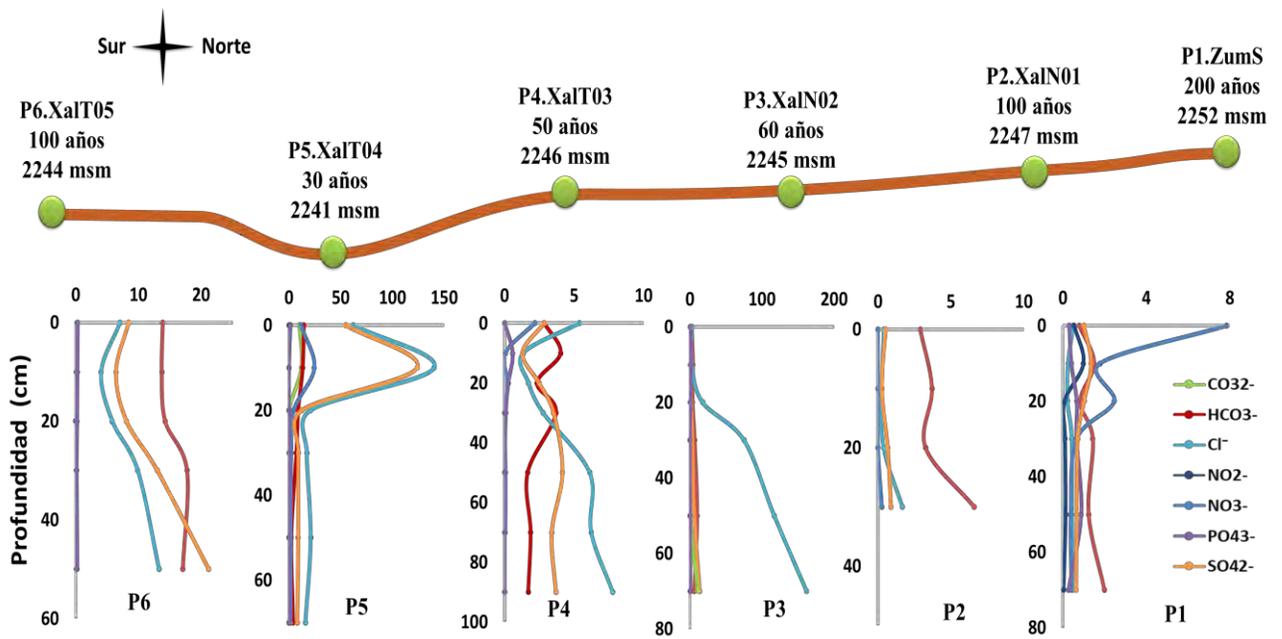


Figura 31. Distribución de las concentraciones de aniones solubles de los 6 perfiles de suelo de la cronosecuencia.

### Saturación de bases (cationes intercambiables)

Las concentraciones de los cationes intercambiables presentes en los perfiles de suelo se distribuyen de la siguiente manera:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ .

De acuerdo con Castellanos *et al.*, (2000) la clasificación de la saturación de bases en cada perfil se da de la siguiente manera:

$\text{Ca}^{2+}$ , los perfiles **P1.ZumS** y **P4.XalT03** tienen un % de saturación considerado medio (con rangos de 62.1-67.6 y 71.1-59.6 respectivamente). El perfil **P3.XalN02** tiene un % de saturación de Ca considerado moderadamente bajo (con un rango de 55.5-35.3). **P5.XalT04** es el único perfil que tiene un % de saturación de Ca considerado de moderadamente bajo a bajo (con un rango de 31.5-45.9). Los perfiles **P2.XalN01** y **P6.XalT05** tienen % de saturación de Ca considerado bajo (con rangos de 36.2-27.1 y 32-29.3 % respectivamente).

En cuanto al  $\text{Na}^+$  casi todos los perfiles tienen una clasificación de alta a muy alta, tomando en cuenta que por arriba del 20 % de saturación ya es considerado muy alto. El perfil **P5.XalT04** tiene los valores más elevados considerados como muy alto (rango de

51.8-26); **P3.XalN02** y **P6.XalT05** tienen una clasificación de alta a muy alta (con rangos de 12.3-43.3 y 17.8-38.1 respectivamente); **P2.XalN01** tiene un % de saturación muy baja en superficie y muy alta en lo profundo del perfil (rango de 0.4-28.8); **P4.XalT03** tiene una concentración moderadamente alta (rango de 7.7-8.9) y **P1.ZumS** es el de menor contenido de Na<sup>+</sup> con una clasificación de bajo a moderadamente bajo (rango de 2.9-1.5).

Las saturaciones de **Mg<sup>2+</sup>** van de la siguiente manera, tomando en cuenta que un rango superior a 30 en % se considera muy alto. **P1.ZumS** de alto a muy alto (rango de 25.3-32.9), **P4.XalT03** de medio a alto (rango de 14.1-28.5), **P5.XalT04** de bajo a moderadamente alto (rango de 4.5-18.3), **P3.XalN02** de medio a bajo en lo profundo del perfil (rango de 15.9-5.9), **P2.XalN01** de moderadamente bajo a medio (rango de 8.3-12.5), **P6.XalT05** debajo a moderadamente bajo (rango de 3.9-6.4).

Las concentraciones de **K<sup>+</sup>** se consideran altas si rebasan el 10.1% de saturación, para este estudio las concentraciones van de altas a muy altas, en los perfiles **P3.XalN02**, **P5.XalT04**, **P6.XalT05** alcanzan el rango de muy altas a altas con rangos de: 16.3-13.6, 12.2-9.6 y 9.5-12.4 de % respectivamente; **P2.XalN01**, **P1.ZumS** y **P4.XalT03** tienen concentraciones altas, de alto a moderadamente altas y de altas a medias con rangos de 6.3-8.1, 9.7-5.4 y 7.1-3.6 de % respectivamente. Los valores completos de las saturaciones de bases de cada perfil se muestran en la tabla 17 del anexo.

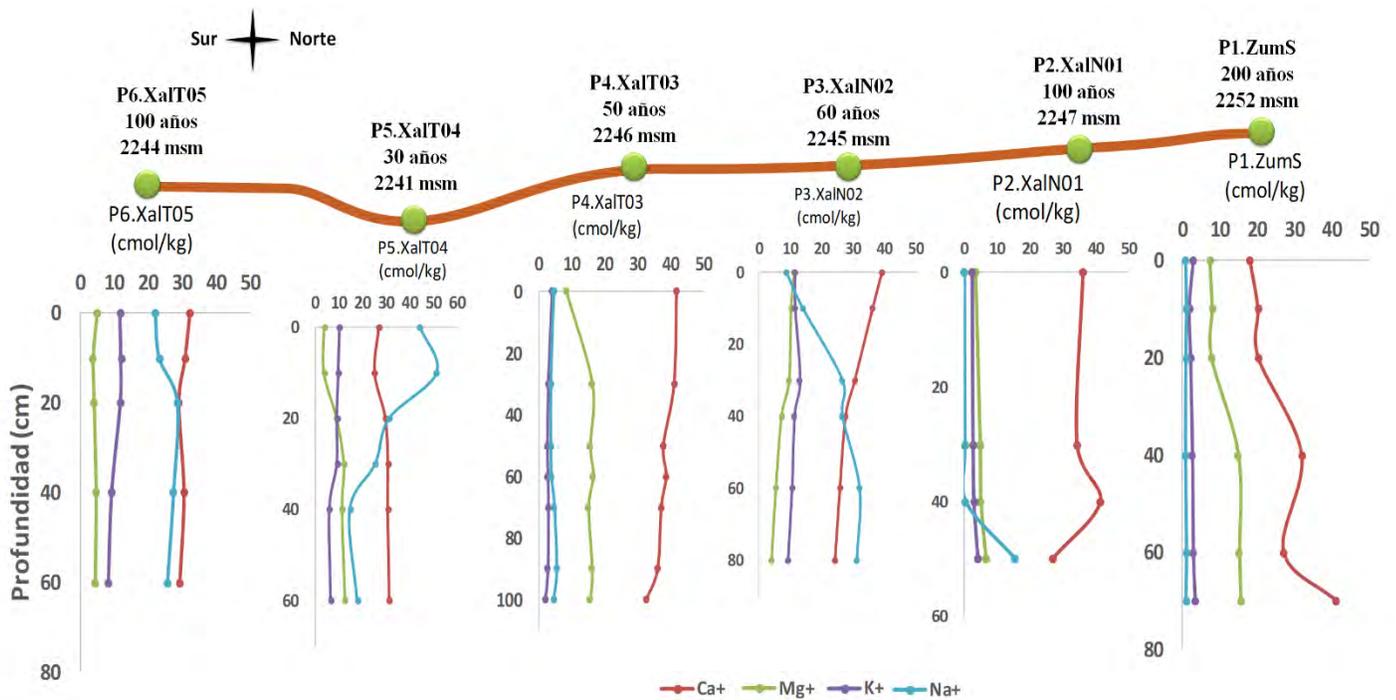


Figura 32. Distribución a profundidad de los cationes intercambiables presentes en los 6 perfiles de suelo de la cronosecuencia.

### Capacidad de intercambio catiónico y tipos de arcilla

Los resultados de la capacidad del intercambio catiónico se muestran en la figura 33 para los 6 perfiles de suelo que componen la secuencia. En la gráfica se puede ver que los perfiles **P3.XalN02**, **P5.XalT04** y **P6.XalT05** son los que tienen una mayor capacidad de intercambio catiónico y que se mantiene prácticamente estable con la profundidad del perfil, con valores entre rangos de 70-69, 85-68 y 154-67 cmol/kg respectivamente, donde según la evaluación se consideran de altos a muy altos, tomando en cuenta que muy alto es superior a 80 cmol/kg. **P1.ZumS**, **P2.XalN01** y **P4.XalT03** tienen valores que van de 29-60, 43-54 y 60-55 cmol/kg respectivamente y los cuales se evalúan como valores altos (evaluación basada en Siebe *et al.*, 2006).

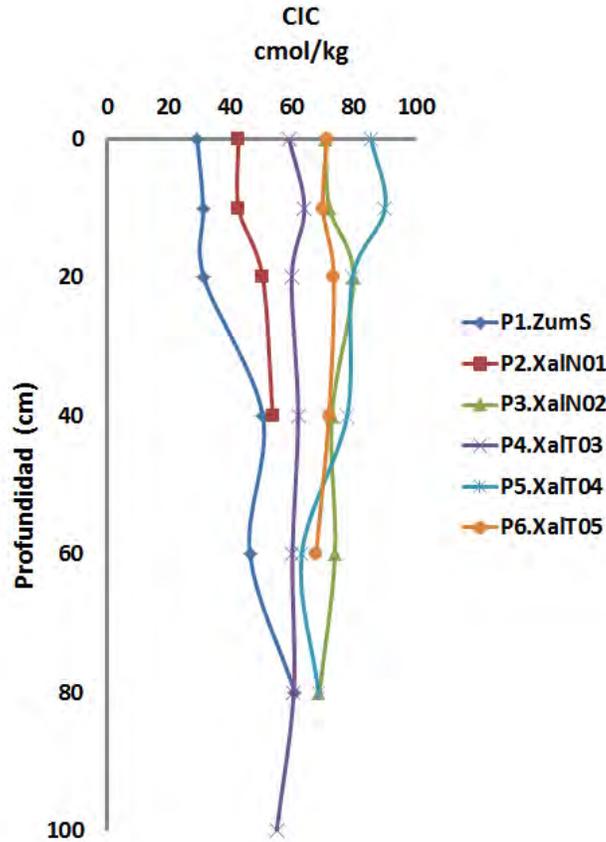


Figura 33. Comportamiento de la CIC a profundidad en los 6 perfiles de suelo de la cronosecuencia.

Para interpretar el tipo de arcilla en los horizontes de cada perfil se utilizó la tabla 8 y el cálculo previo de CIC de cada horizonte con la fórmula  $(CIC \text{ (cmol/kg de arcilla)} = ((CIC \text{ cmol/kg de suelo)} - (3 \cdot \% \text{ de MO})) / \% \text{ de arcilla} \cdot 100)$ , considerando que cada tipo de arcilla mineral tiene un valor de CIC característico.

Tabla 8. Tipos de arcilla de acuerdo con su CIC.

Tipo de arcilla mineral	CIC (cmol/kg)
Caolinita	3-15
Illita	10-40
Esmectita	80-150
Vermiculita	100-150
Alófano	5-350

(Porta *et al.*, 1999; Lal y Shukla, 2005)

Para el perfil **P1.ZumS** se tienen arcillas de tipo illita/esmectita para los primeros 36 cm (rango de 45.9-49 cmol/kg de arcilla) para los centímetros 36-60 se tiene

esmectitas/vermiculitas (rango de 123.6-107.5 cmol/kg de arcilla) y únicamente en el fondo del perfil, hasta los 75 cm se tiene alófano (255.8 cmol/kg de arcilla). Para los perfiles **P2.XalN01**, **P3.XalN02**, **P4.XalT03** y **P5.XalT04** predominan las arcillas de tipo esmectita/vermiculitas (rangos de 131.4-149.3, 151.5-155.2, 211.1-60.1 y 145.9-134 cmol/kg de arcilla respectivamente). Únicamente el perfil que presenta valores muy elevados es **P6.XalT05** (rango de 345.7-1117 cmol/kg de arcilla) los cuales no entran en una clasificación coherente en algunos de sus horizontes, es probable que debido a ser unos de los perfiles con mayor sal estas no se hayan lavado bien sobreestimando los valores (ver tabla 18 en el anexo donde se muestra la CIC cmol/kg y el tipo de arcilla por horizonte de cada perfil).

### **Hierro extractable con ditionito y oxalato**

La figura 34 muestra las gráficas de las concentraciones del hierro  $Fe_o$  y  $Fe_d$  para los perfiles de la catena. En general se puede observar que casi todos los perfiles tienen mayores concentraciones de  $Fe_o$ , lo que indica que hay una mayor cantidad de hierro amorfo (recién formado), mientras que la cantidad de hierro extractable con ditionito es menor. El único perfil que no presenta esta tendencia es el **P1.ZumS**, el cual tiene mayor concentración de hierro producto de pedogénesis, sobretodo en sus primeros horizontes con rangos de 1.30, 1.33 y 1.18 mg/g, cuando en los demás perfiles el rango es de menos de 50 mg/g.

La figura 35 muestra las comparaciones de las relaciones de Fe. Se puede observar que la relación  $Fe_o/Fe_d$  en todos los perfiles es la que presenta los mayores valores, comparándola con la relación  $Fe_d/Fe_t$  la cual muestra valores bajos. El único perfil que presenta valores mayores de la relación  $Fe_d/Fe_t$  es **P1.ZumS**. Sin embargo, éstos únicamente son en superficie,  $Fe_o/Fe_d$  incrementa en la parte profunda del perfil. En el perfil **P2.XalN01** ambas relaciones son similares a los demás, únicamente en la parte superior es donde las relaciones muestran valores similares juntándose las líneas de las gráficas. El perfil **P6.XalT05** presenta un comportamiento similar a los demás perfiles con respecto a las relaciones mencionadas. Estos tres perfiles son los que tienen mayor tiempo de exposición

a la intemperie. En general en todos los perfiles hay una mayor presencia de hierro amorfo de reciente formación y el hierro cristalino producto de la pedogénesis es muy bajo.

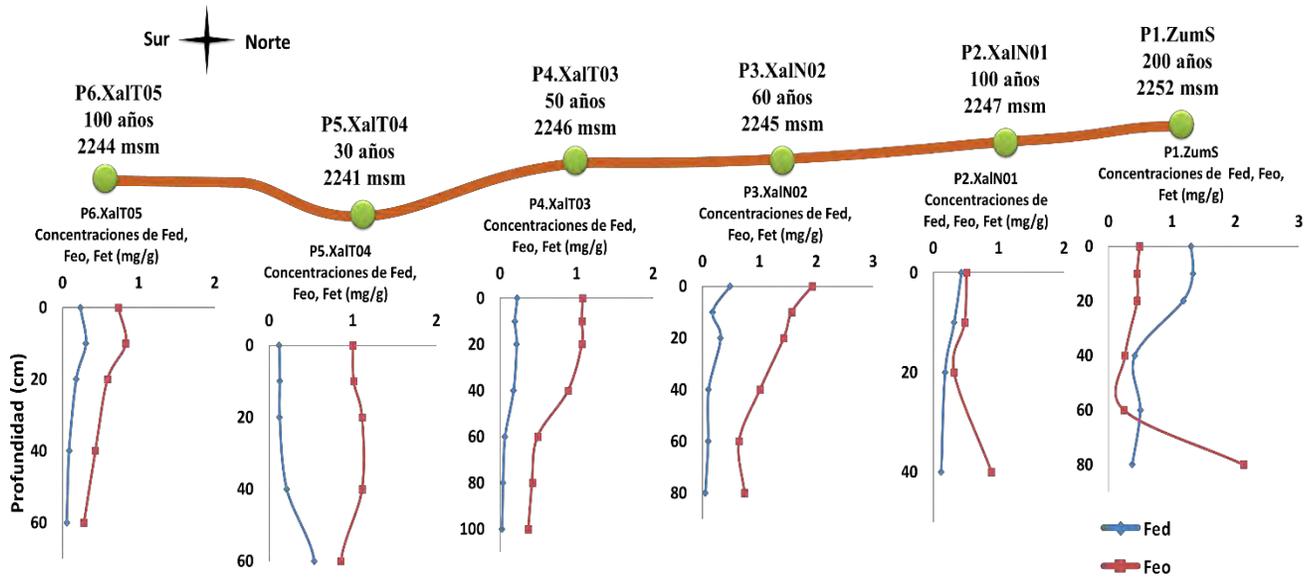


Figura 34. Comparación de las concentraciones de  $Fe_d$  y  $Fe_o$  para los 6 perfiles de suelo de la topocronosecuencia.

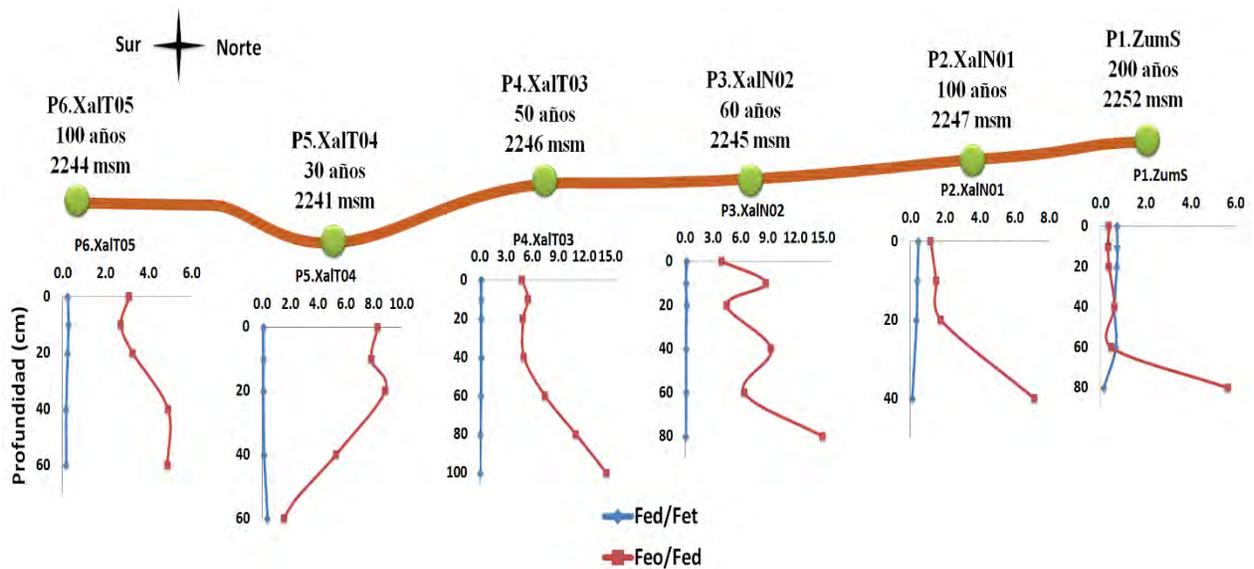


Figura 35. Comparación de las relaciones  $Fe_d/Fe_t$  y  $Fe_o/Fe_d$  para los 6 perfiles de suelo de la topocronosecuencia.

## **Micromorfología de los suelos de la cronosecuencia**

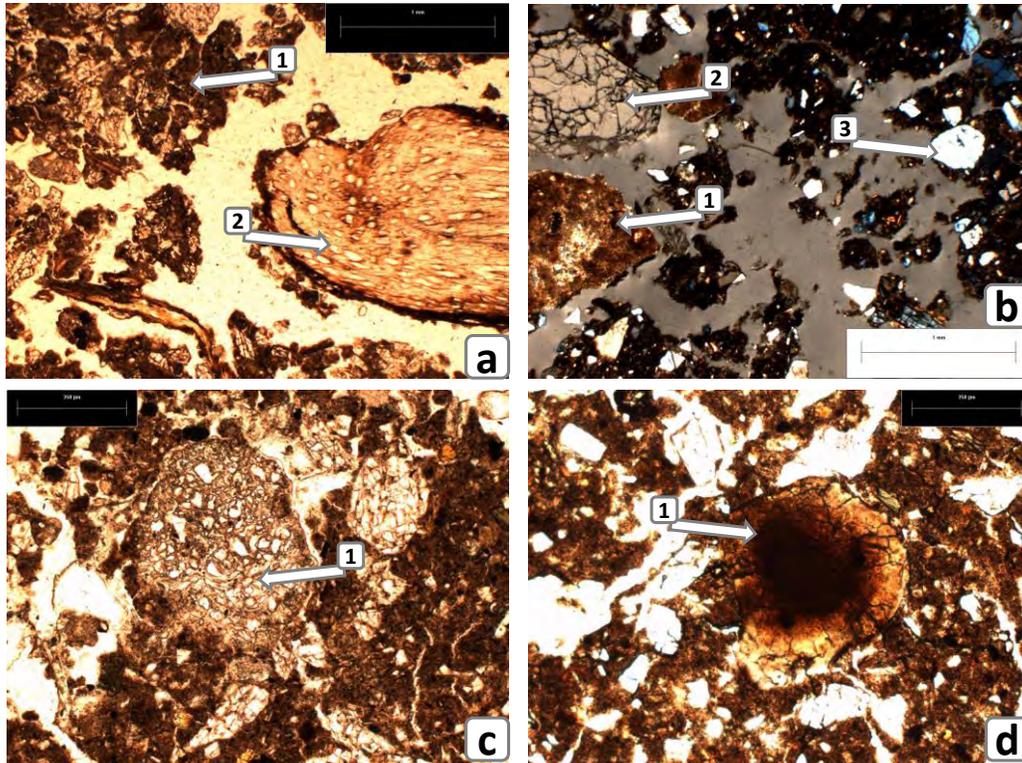
A continuación, se presentan los rasgos micromorfológicos encontrados a partir de las láminas delgadas desueto de los perfiles que componen la cronosecuencia. La estructura mencionada de cada perfil se presenta en la tabla 19 del anexo.

### **Perfil: P1.ZumS**

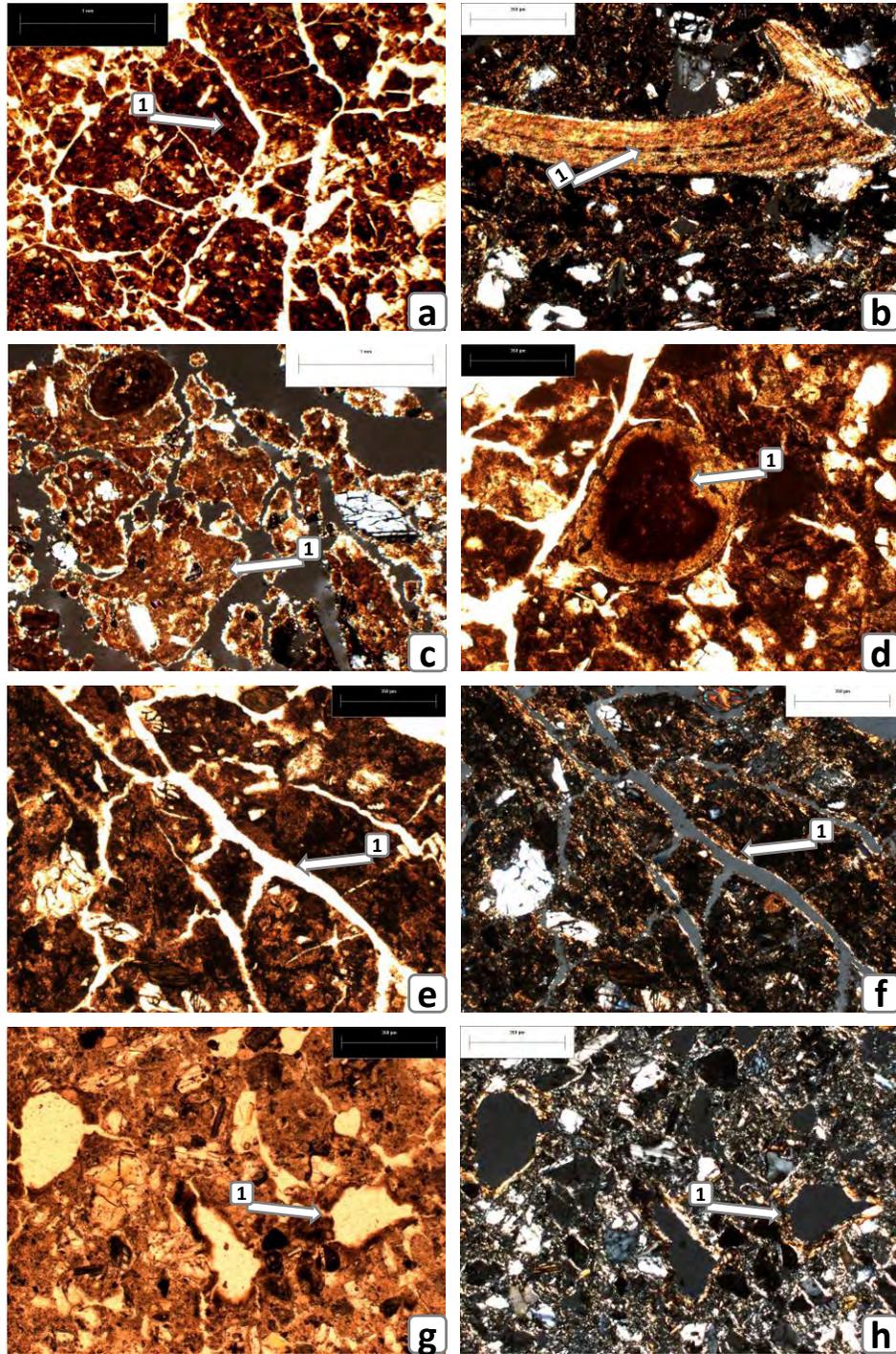
Es el perfil que se encuentra en la parte sur del antiguo lago de Zumpango, tiene un tiempo aproximado de 200 años que se desecó el sitio en donde hoy se desarrolla el suelo. Presenta los siguientes horizontes: Ap, mAp, Ah, ABss, B(ss) y C.

Sus primeros 3 horizontes (Ap, mAp y Ah) presentan características similares, una masa basal poco ordenada/fragmentada, probablemente por acción antrópica, en la parte superior; una microestructura granular a subangular; la MO es moderada con poca alteración ya que hay restos de tejido vegetal en los 3 horizontes; los minerales están fragmentados y redondeados (indicando transporte), en su mayoría son plagioclasas y cuarzos; hay restos volcánicos como pómez; poca presencia de carbonatos pedogenéticos (incrementan un poco en mAp y Ah y los cuales están en forma de concreciones y cubriendo poros en algunos casos. En el segundo y tercer horizonte muestra nódulos de Fe pequeños (procesos redox) (figura 36).

En los horizontes ABss, B(ss) y C la masa basal de suelo ya no está fragmentada como en los anteriores; la microestructura es subangular a angular a masiva; la MO disminuye en estos horizontes, ya no hay restos de tejidos vegetales; la presencia de minerales primarios es menor (plagioclasas y cuarzos); hay carbonatos primarios (restos de hueso que no presenta mucha alteración) en el cuarto horizonte; los carbonatos pedogenéticos incrementan más en estos horizontes, el último prácticamente está cementado en carbonatos (los carbonatos están en forma de concreciones y/o cubriendo poros); hay presencia de rasgos vérticos (slickensides) sobre todo en ABss, disminuyen estos rasgos en el horizonte B(ss), y son indicativos de periodos estacionales de secas y lluvias; hay presencia de procesos de óxido-reducción (nódulos de Fe); en la parte inferior presenta revestimientos de arcilla (iluviación) mezclados con Fe cubriendo poros (figura 37).



**Figura 36. *Pl.ZumS* (1).** Rasgos morfológicos y pedogenéticos de los horizontes Ap, mAp y Ah. **a)** (2x) lámina que muestra una masa basal de suelo fragmentada, (1) microestructura con microagregados tipo granular a subangular, (2) resto de tejido vegetal. **b)** (2x) lámina observada con nícoles cruzados (nx) (1) concreción de carbonato pedogenético, (2) cuarzo fragmentado, (3) mineral redondeado. **c)** (4x) fragmento de pómez. **d)** (4x) oolito.

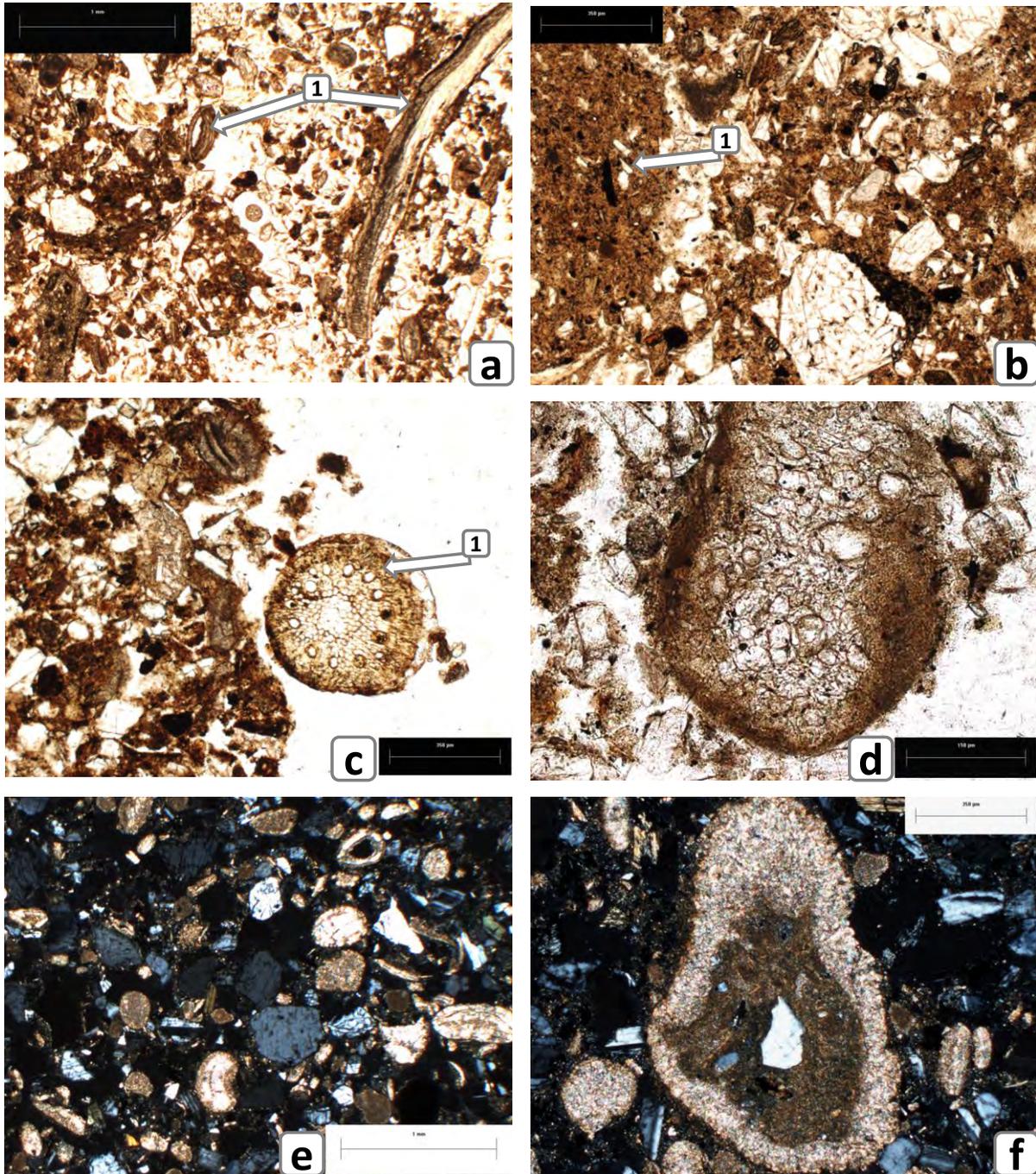


**Figura 37. *Pl.ZumS* (1).** Rasgos morfológicos y pedogenéticos de los horizontes ABss, B(ss) y C. **a)** (2x) masa basal con una microestructura de microagregados subangulares a angulares. **b)** (4x) restos de hueso (carbonato primario), además se muestran algunos minerales fragmentados. **c)** (1x) incremento de la cantidad de carbonatos pedogenéticos. **d)** (4x) nódulo de Fe. **e)** y **f)** (4x) misma lámina en vista normal y nx, de masa basal con microestructura subangular a angular que presenta rasgos verticos, la flecha indica slickensides, nótese que en luz normal no brilla la arcilla y en nx se ve claramente la alineación de la arcilla sobre el borde de la grieta. **g)** y **h)** (4x) misma lámina en vista normal y nx, muestra una masa basal con pocos poros, indicados con la flecha, los poros presentan hiporrevestimientos (mezcla de Fe y arcilla están en la lámina con nx (h) se logra ver la birrefringencia de la arcilla).

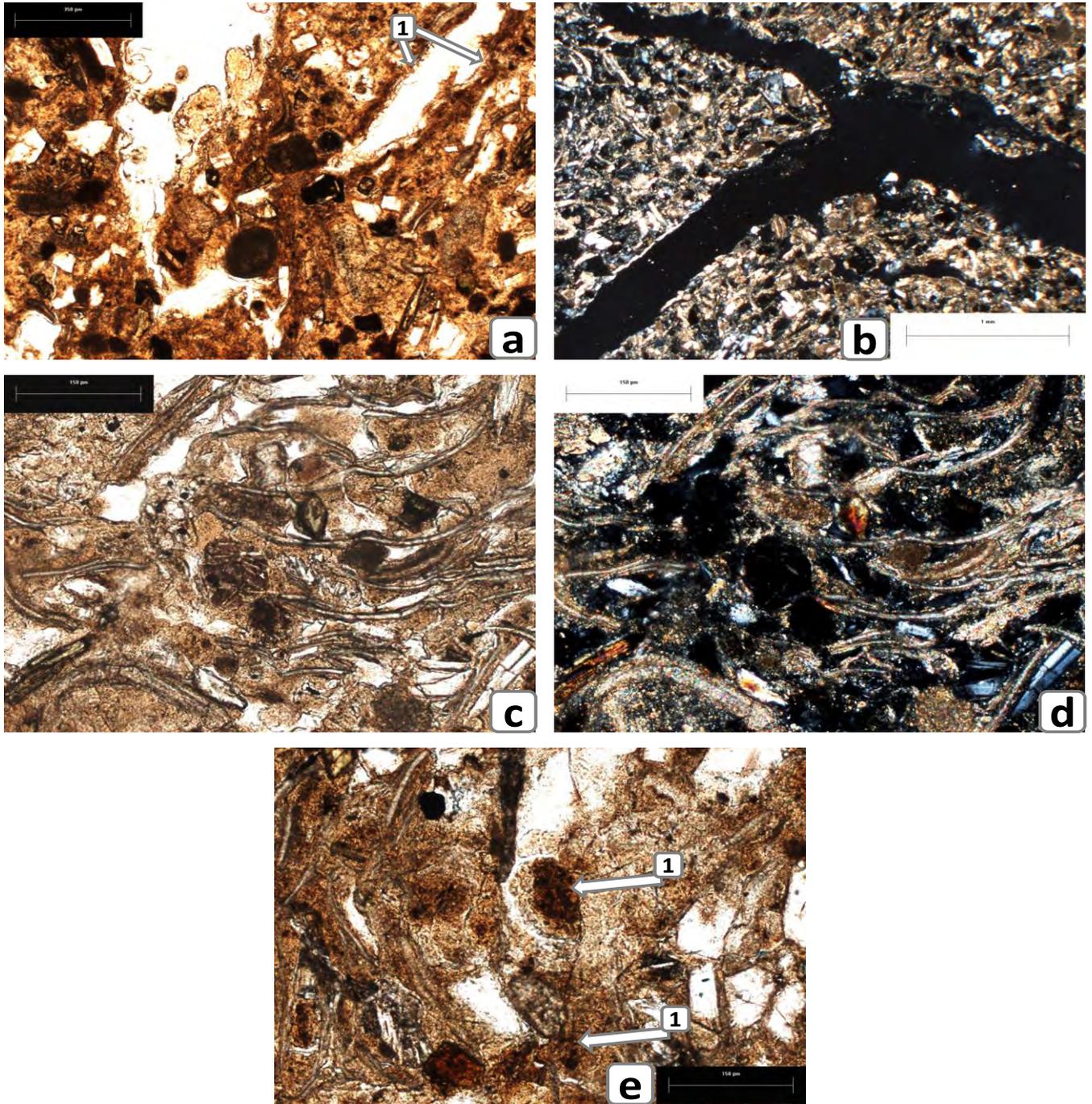
## **Perfil: P2.XalN01**

El sitio formó parte del antiguo lago de Xaltocan, en la parte norte del lago. Tiene un aproximado de 100 años de desecación. Fue parte de una playa lacustre, ya que el sitio se ubica en una pequeña elevación o pequeña isla que en tiempos pasados la llamaron Xacayohualco (fuente cronista de Nextlalpan, Estado de México). Los horizontes identificados fueron los siguientes: Ap, Ah, C1 y C2.

En todos los horizontes presentó una masa basal de suelo con gran cantidad de granos de arena mezclada con textura fina. Ap presenta grano simple. En Ah la textura fina aumenta lo que le otorga una microestructura subangular que rompe en grano simple. Para C1 la cantidad de partículas finas disminuye, pero aun así conserva una estructura subangular. Para C2 la microestructura ya es más compacta, masiva que rompe en subangular. En cuanto a la MO los dos primeros horizontes, Ap y Ah, presentan restos de tejidos vegetales, es decir MO con muy poca alteración, para el tercer y cuarto horizonte C1 y C2 ya no hay MO. Los horizontes presentan minerales fragmentados que en su mayoría son plagioclasas y cuarzos, los tres primeros horizontes, Ap, Ah, C1, contienen restos de material volcánico como pómez (figura 38). En todo el perfil hay una gran cantidad de concreciones de carbonato, también restos de organismos calcáreos en cantidad moderada, pero que se incrementan considerablemente en el último horizonte, C2, así como el carbonato micrítico en la masa basal de suelo, que también aumenta en este último horizonte. Este último horizonte presenta rasgos reductomórficos, ya que hay nódulos de Fe pequeños y un incipiente recubrimiento de Fe en las paredes de los agregados (figura 39), y una muy incipiente iluviación de arcilla (figura 58 del anexo).



**Figura 38. P2.XalN01.** Rasgos morfológicos y pedogenéticos de los horizontes Ap, Ah, C1 y C2 del perfil. a) (2x) masa basal de suelo granular del perfil, nótese la gran cantidad de granos de arena y la poca textura fina, (1) señala restos de organismos calcáreos. b) (4x) aumento de textura fina de suelo, mezclada con granos de arena, horizonte Ah, en los demás horizontes también aumentan las texturas finas. c) (4x) restos de tejidos vegetales frescos, presentes en los horizontes Ap y Ah. d) (10x) resto de pómez los cuales se encontraron en los 3 primeros horizontes. e) (2x) oolitos de carbonato presentes en todo el perfil, asimismo se observan minerales fragmentados. f) (4x) concreción de carbonato envolviendo a un mineral (plagioclase).



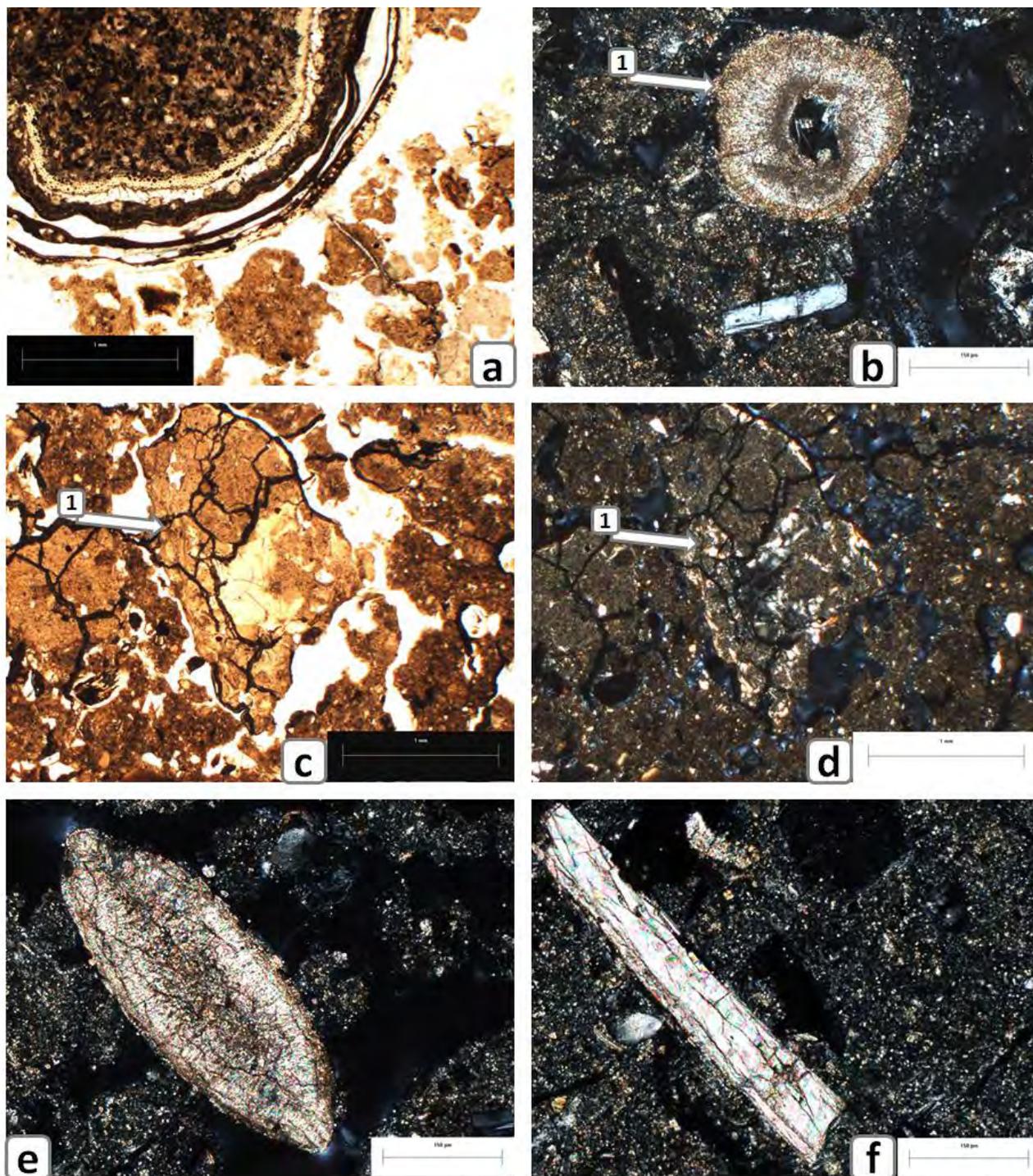
**Figura 39.** *P2.XalN01*. Rasgos morfológicos y pedogenéticos del horizonte C2. **a)** y **b)** (4x y 2x respectivamente) masa basal de suelo más compacta, masiva, en **a)** (1) señala hiporrecubrimiento en las paredes del canal, en **b)** se observa la masa basal con un gran contenido de carbonatos, además se observan granos de arena. **c)** y **d)** (10x) misma imagen, pero en luz normal y nx, esbozan la gran cantidad de restos de organismos calcáreos encontrados en ese horizonte. **e)** (4x) (1) señalan algunos nódulos de Fe incipientes encontrados en el horizonte.

### **Perfil: P3.XalN02**

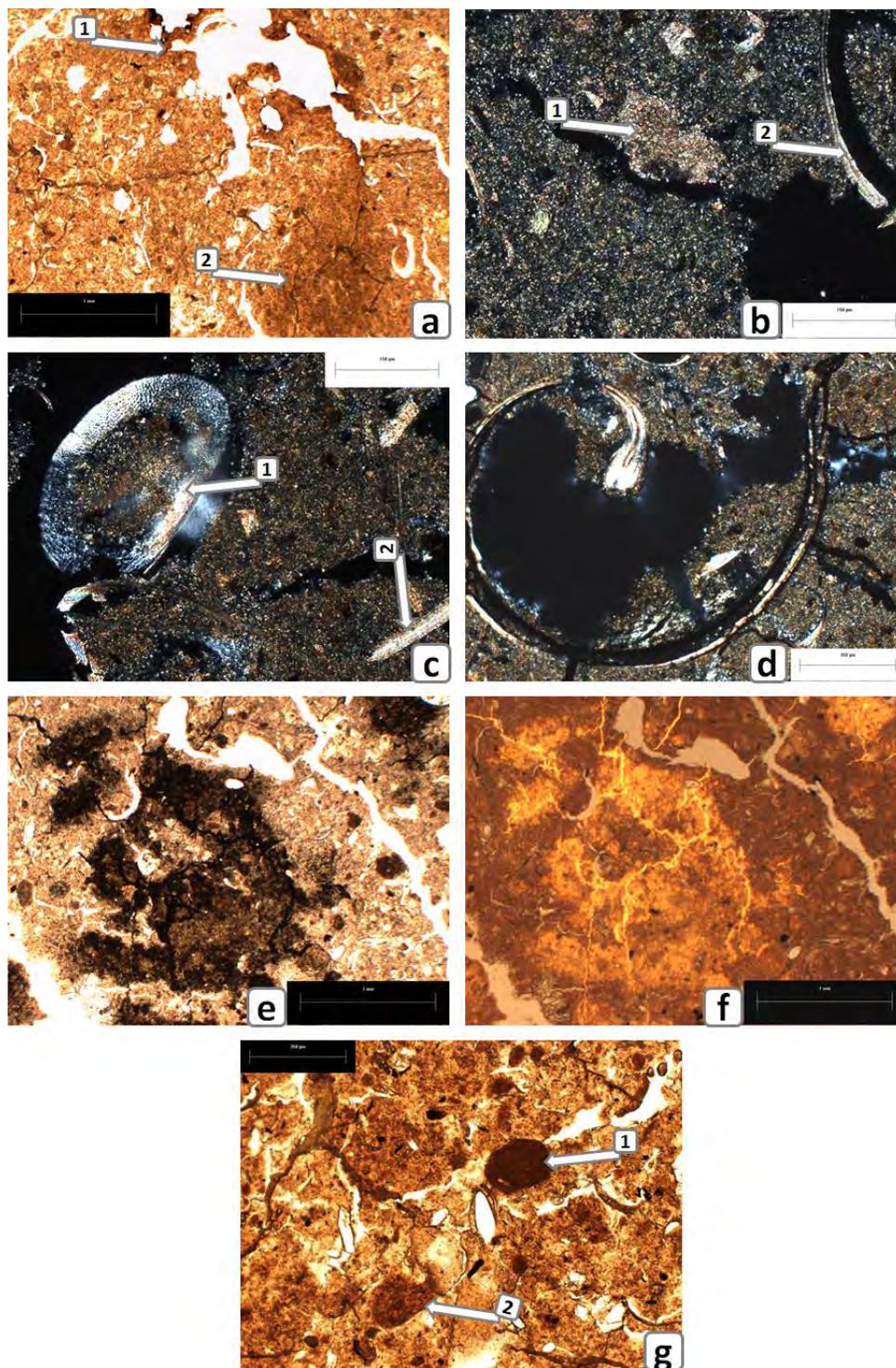
Esta zona perteneció al lago Xaltocan, se encontraba en la parte céntrica del lago. El terreno tiene un tiempo aproximado de 60 años de exposición a la intemperie. En dicho perfil se encontraron los siguientes horizontes: Ap1, Ap2, Bnt, BCwt, Cn1, Cn2.

En los horizontes Ap1, Ap2 y Bnt las características son muy similares, presenta una masa basal de suelo de material fino y removida, con microestructura de grano simple en la parte superior a subangular conforme incrementa la profundidad de los horizontes. Hay restos de tejido vegetal frescos, con degradación prácticamente nula, la MO tiene una presencia que va de buena a moderada. Hay muy poca presencia de minerales que presentan fragmentación, en su mayoría son cuarzos y plagioclasas. Hay pocos carbonatos primarios, que son los restos de organismos calcáreos ahí depositados y también hay carbonatos pedogenéticos, en forma de concreciones incipientes y una masa basal de suelo con carbonato micrítico. Hay presencia de fragmentos aislados de revestimientos de arcilla. Sin embargo, hay una incipiente iluviación (figura 40).

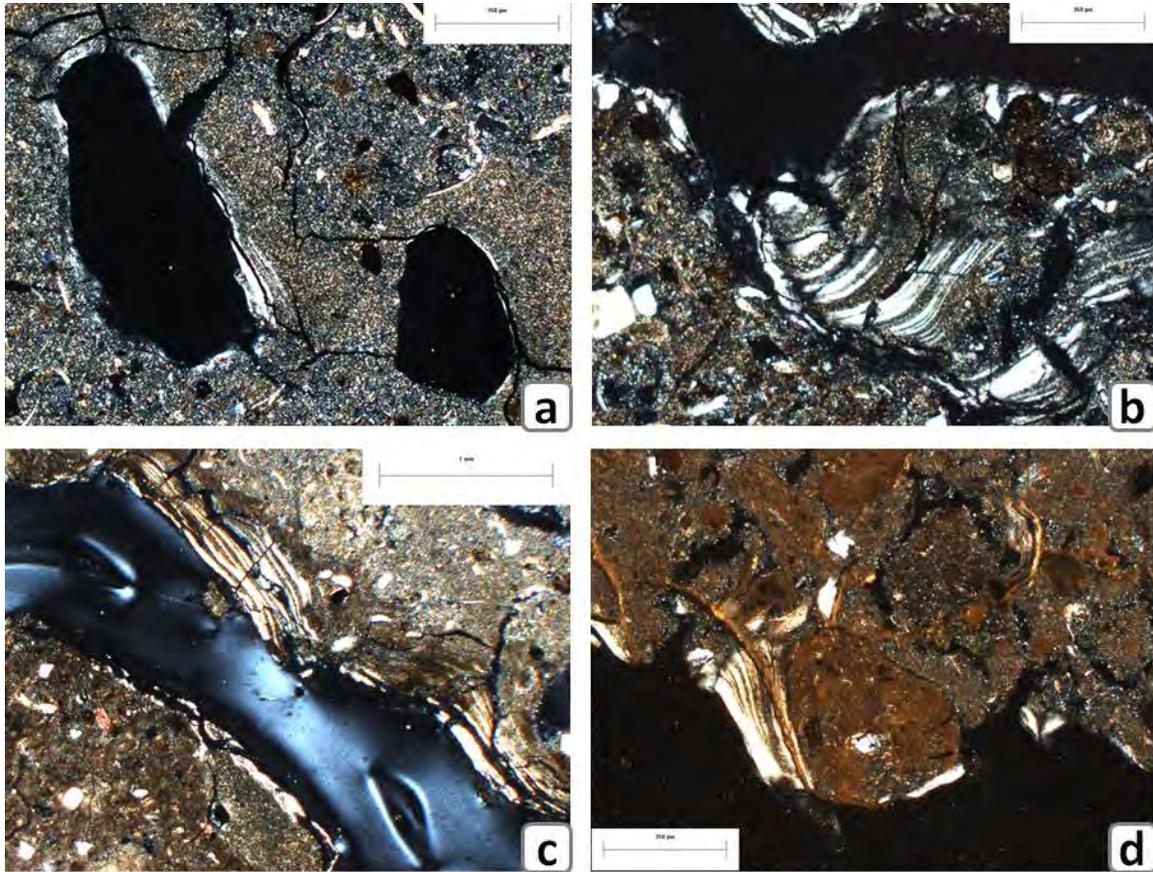
En los horizontes BCwt, Cn1 y Cn2 (figura 41), la masa basal de suelo es de textura fina, compacta, casi masiva rompiendo a una microestructura angular. La presencia de MO disminuye considerablemente. La presencia de minerales aún sigue siendo baja (similar a los anteriores horizontes). Los restos de los organismos calcáreos se incrementan en estos horizontes, y las concreciones siguen siendo incipientes, pero también aumentan ligeramente, sigue habiendo carbonato micrítico. Hay iluviación de arcillas, relleno de poros y en caras de agregados (figura 42), esta arcilla se ve con impurezas, mezclada con limos. Sin embargo, en algunos puntos se logran ver perfectamente las capas sobre puestas, que se fueron depositando durante el proceso de iluviación, este efecto de capas se presentó más en el horizonte C2. Hay rasgos reductomórficos en los horizontes ya que se distinguen nódulos de Fe de tamaño pequeño. También presentan un manchado oscuro que bajo luz reflejada se ven de color rojizo, justificado que son de manchas de Fe.



**Figura 40.** *P3.XalN02*. Rasgos morfológicos y pedogenéticos de los horizontes Ap1, Ap2 y Bnt. **a)** (2x) restos de tejido vegetal frescos sin alteración, además se nota una microestructura granular a su alrededor. **b)** (10x) en nx, concreción de carbonato presente en el suelo además se ve una masa basal de suelo con carbonato micrítico. **c)** y **d)** (2x) (d) en nx, fragmento de suelo con arcilla iluviada en el centro y alrededor de éste, en d) se observa la birrefringencia de las arcillas, además se observa una estructura subangular. **e)** y **f)** (10x) restos de organismos calcáreos presentes en los horizontes.



**Figura 41.** *P3.XalN02*. Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos de los horizontes BCwt, Cn1 y Cn2. **a)** (2x) estructura más compacta a los otros horizontes, (1 y 2) manchas de Fe en caras de agregados y en la masa basal de suelo. **b)** (10x) en nx, nódulo de carbonato, al lado se observan restos de organismos calcáreos, nótese una masa basal con carbonato micrítico. **c)** y **d)** (10x y 4x respectivamente) ambas en nx, restos de organismos calcáreos, con poca perturbación, en c) (2) se ve un fragmento. **e)** y **f)** (2x) e) luz normal y f) reflejada, muestran un nódulo amiboidal de Mn. **g)** (4x) (1 y 2) señalan nódulos de Fe.



**Figura 42.** *P3.XalN02*. Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos de los horizontes BCwt, Cn1 y Cn2. **a)** (4x) en nx, dos poros con revestimientos de arcilla. **b), c)** y **d)** (4x, 2x y 4x respectivamente) en nx, iluviación de arcillas que se fue depositando en capas, nótese que la arcilla está mezclada con material más grueso.

### **Perfil: P4.XalT03**

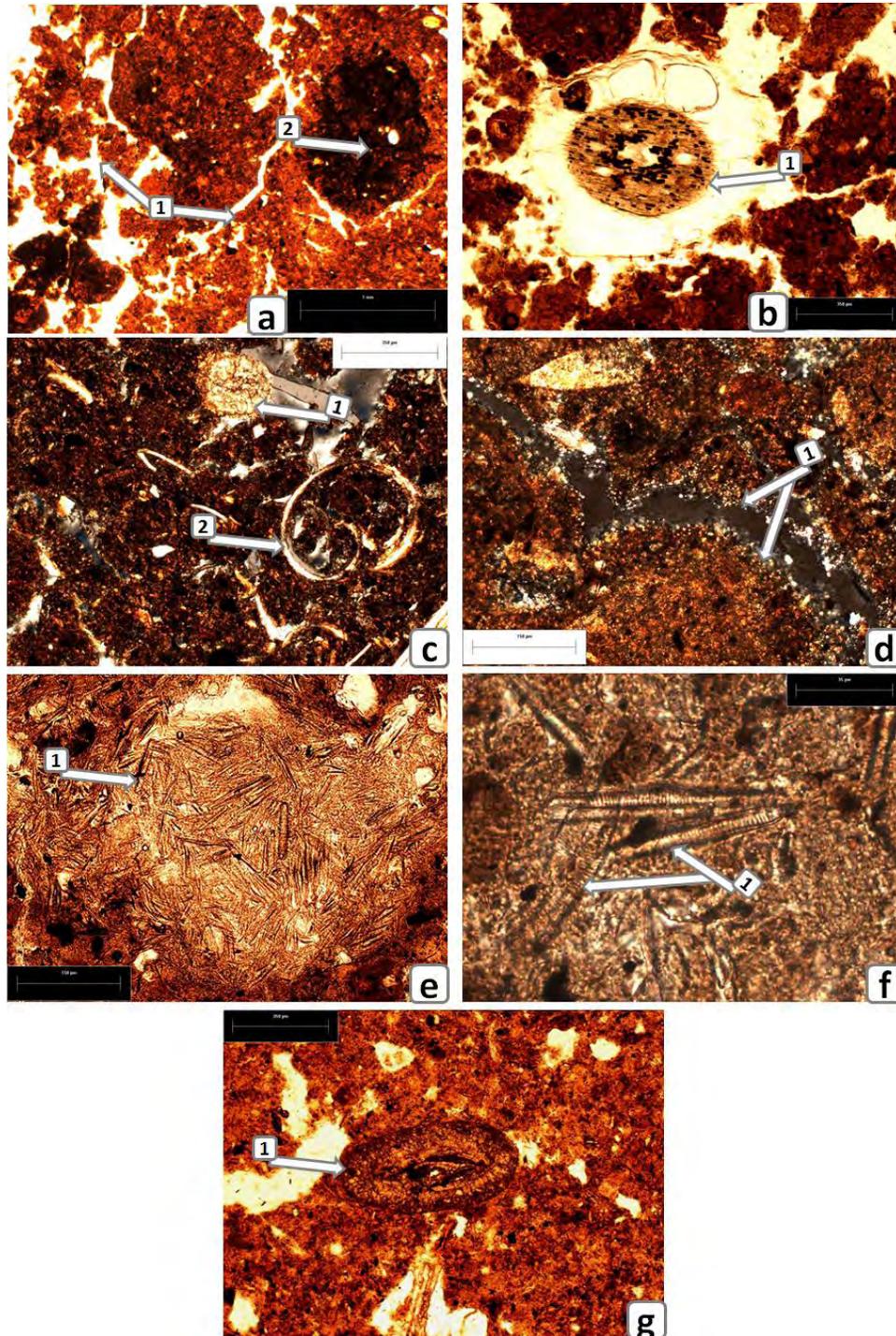
Este perfil de suelo formó parte del antiguo lago Xaltocan en su lado sur, cercano a la isla que se conoció como Tonanitla, hoy municipio. Hace 50 años aproximadamente se desecó el lago en esa parte. Presentó los siguientes siete horizontes: Ap1, Ap2, AB, 2C, 3Ah, 3AB y 3BC. Como vemos en la serie de horizontes se muestran dos diferentes secuencias.

En los horizontes Ap1, Ap2 (presenta la inclusión de bloques de material ajeno, también se analizó la micromorfológica a estos bloques) y AB, masa basal de suelo con textura fina con una microestructura que va de granular a subangular a angular; poca MO con escasa alteración ya que los restos de tejido vegetal aún se conservan; muy poca presencia de minerales (plagioclasas y cuarzos mayoritariamente); hay un gran número de restos de organismos calcáreos que probablemente habitaban el lago (carbonatos primarios) sobre todo en Ap2 y AB, los tres horizontes presentan algunas concreciones de carbonatos y hay carbonatos cubriendo las orillas de algunos poros; los tres horizontes exhiben nódulos de Fe pequeños (rasgos redox); el horizonte AB presenta una microestructura más angular a las demás (tendencia vertical), en los tres horizontes hay restos de diatomeas, hay una incipiente iluviación de arcilla relleno pequeños poros. En el horizonte Ap hay presencia de bloques de masa basal de suelo distintas y también se le hizo la micromorfológica resultando una estructura masiva que rompe a subangular en bloques, también hay restos de organismos carbonatados y concreciones, nódulos de Fe y muy poca MO (figura 43).

En 2C presenta una masa basal de suelo de material fino con estructura masiva a angular (tendencia vertical); hay poca MO; muy poca presencia de minerales; también muestra los restos de organismos calcáreos y carbonatos secundarios; pocos nódulos de Fe incipientes; hay slickensides también incipientes; poros pequeños rellenos de arcilla (pocos rasgos de iluviación); aparecen las diatomeas (figura 44).

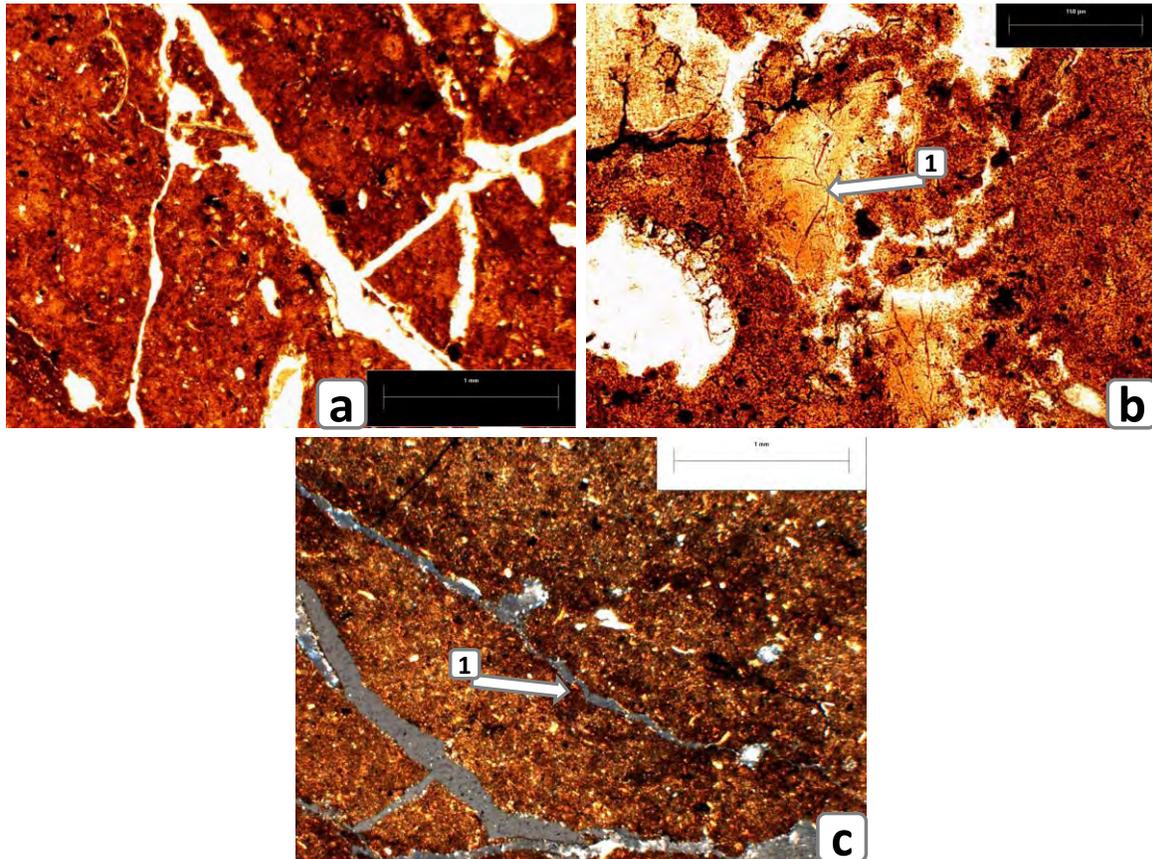
En la secuencia 3Ah, 3AB y 3BC (figura 45), la masa basal de suelo es de material fino con microestructura subangular a masiva; hay poca MO; muy poca presencia de minerales (plagioclasas y cuarzos); presenta restos de organismos calcáreos, la cantidad de éstos baja comparada con los horizontes anteriores; presenta carbonatos pedogenéticos en forma de concreciones y relleno poros; hay evidencia de arcilla iluviada con impurezas y en algunos casos relleno poros pequeños. Sin embargo, la presencia del proceso es mínima;

únicamente en 3Ah hay diátomeas, pero en puntos localizados; presentan rasgos reductomórficos evidenciados por la formación de nódulos de Fe. Exhibe coprolitos (heces de microorganismos) en el horizonte.

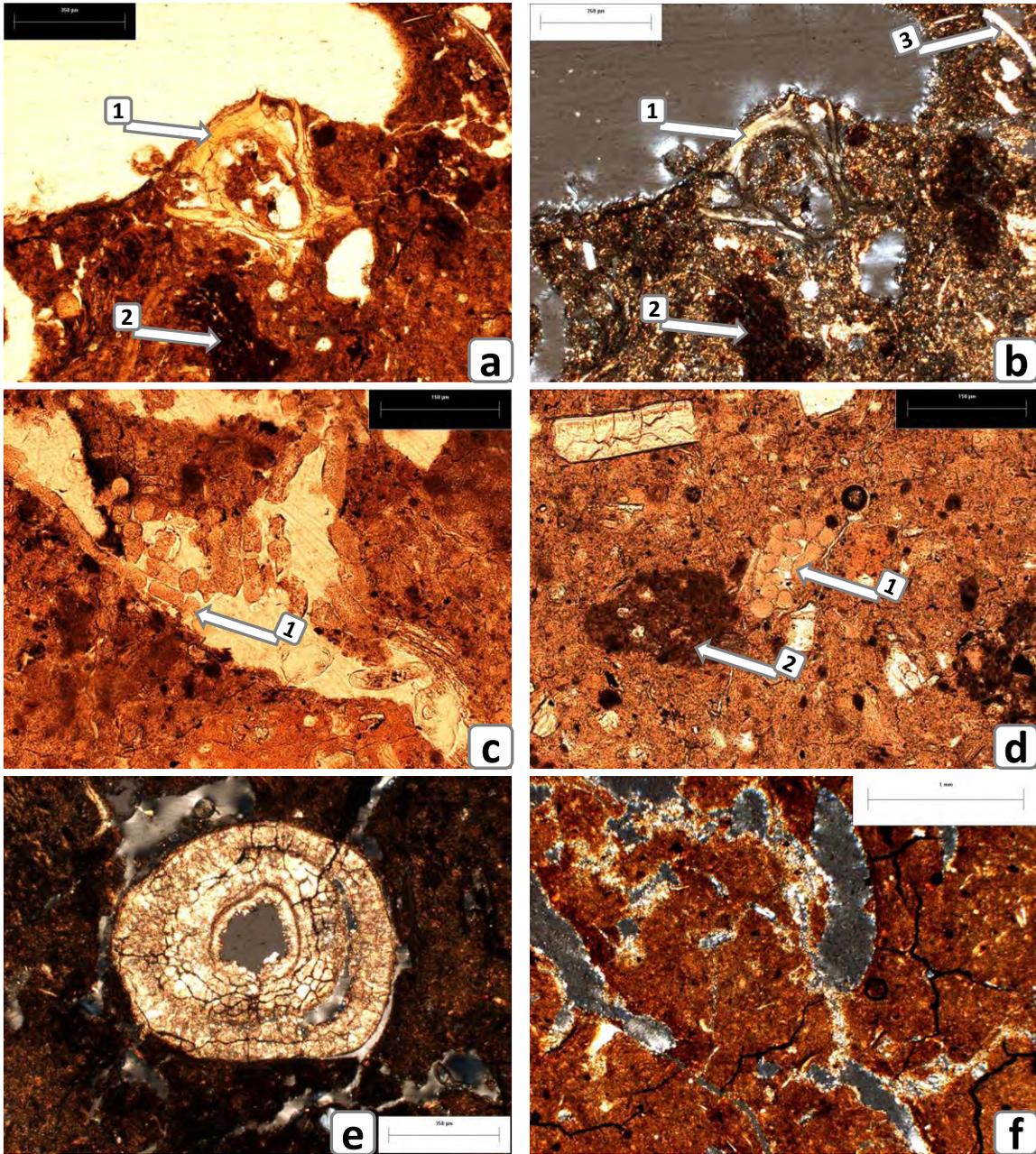


**Figura 43.** *P4.XalT03*. Rasgos morfológicos y pedogenéticos de los horizontes Ap1, Ap2 y AB. **a)** (2x) (1) microestructura granular a subangular, dominante en los horizontes, (2) procesos reductomórficos

evidenciados por nódulos de Fe. **b)** (4x) exhibe restos de tejido vegetal prácticamente sin alteración, además también se ve la estructura. **c)** en nx, (4x) (1) señala una concreción de carbonato, (2) restos de organismos calcáreos que aparecieron en todo el perfil. **d)** en nx, (4x) revestimientos de carbonatos pedogenéticos. **e)** y **f)** (10x y 40x respectivamente) restos de diatomeas que se encontraron en todo el perfil, nótese que están prácticamente sin alterar. **g)** (4x) lámina de los bloques de suelo encontrados en Ap2, se ve una estructura más masiva, (1) señala restos de organismos calcáreos.



**Figura 44. P4.XalT03.** Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos del horizonte 2C. **a)** (2x) muestra la estructura del horizonte, angular a masiva. **b)** (10x) (1) señala un poro relleno de arcilla con impurezas, a los lados hay otros poros rellenos (iluviación) este rasgo se presentó poco y únicamente en poros pequeños. **c)** en nx, (2x) (1) señala rasgos vérticos incipientes (slickensides).



**Figura 45. P4.XalT03.** Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos de los horizontes 3Ah, 3AB y 3BC. **a)** y **b)** luz normal y en nx (4x) (1) iluviación de arcilla y su birrefringencia en nx, (2) señala rasgos reductomórficos (nódulo de Fe), (3) parte de un organismo calcáreo (carbonato primario). **c)** y **d)** (4x) (1) presencia de coprolitos en 3Ah, (2) nódulo de Fe. **e)** (4x) concreción de carbonato, en nx. **f)** (2x) revestimientos de carbonatos en grietas y canales del suelo, en nx.

#### **Perfil: P5.XalT04**

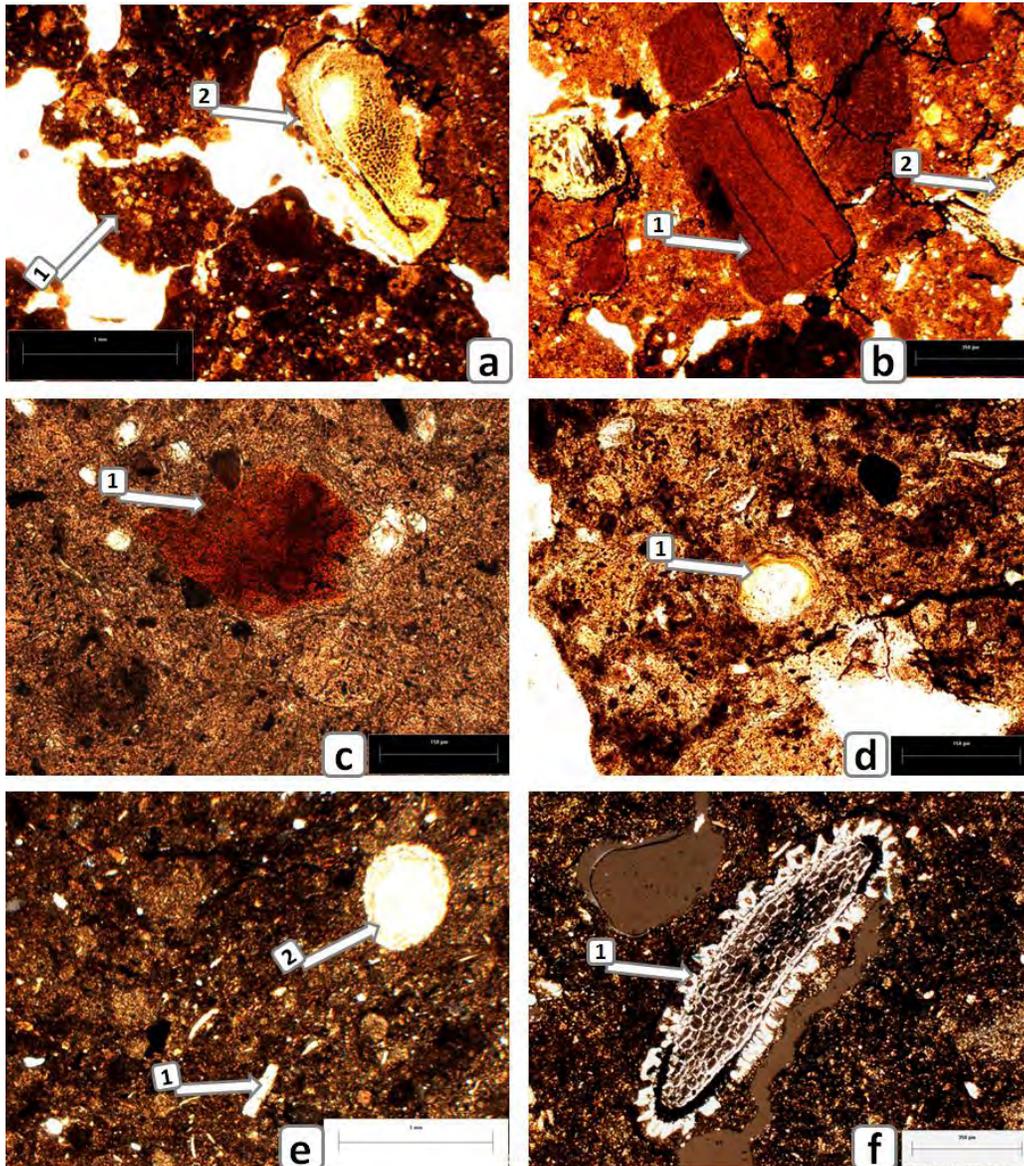
Este perfil también fue parte del antiguo lago de Xaltocan, muy cercano a la antigua isla Tonanitla, hoy municipio, y tiene un tiempo aproximado de 30 años que el lago se desecó en esa parte. Sin embargo, el sitio presenta una depresión del terreno y esto ha provocado inundaciones en el lugar. No obstante, las inundaciones no son duraderas. Cabe señalar que se encontró el manto freático a menos de 60 cm y que en la parte superior presentó una costra ocasionada por la salinidad del sitio. Este perfil mostró los siguientes horizontes: mAC, mAp1, Ap2, AB1, AB2 y 2Ah. Al horizonte mAC no se realizó lámina delgada debido al pequeño grosor que presentó.

Los horizontes mAp1 y Ap2 presentaron las siguientes características: una masa basal de suelo que en su parte superior está fragmentada; la textura es de material fino; presentan una microestructura subangular; hay restos de tejidos vegetales, que nos indican que la MO tiene poca alteración, la presencia de la MO es alta; escasa presencia de minerales; presentan gran cantidad de restos de organismos calcáreos (carbonatos primarios) y además hay concreciones de carbonatos pedogenéticos y carbonatos micríticos mezclados con la masa basal, éstos incrementan en Ap2; hay incipientes nódulos de Fe que demuestran procesos óxido-reductores; hay restos de diatomeas en ambos horizontes; en la parte superior presenta restos de revestimientos de arcilla y restos de material fino, que muy probable son fragmentos de otros suelos que fueron redepositados; en estos horizontes hay pequeños poros que se están rellenando con arcilla iluviada (figura 46).

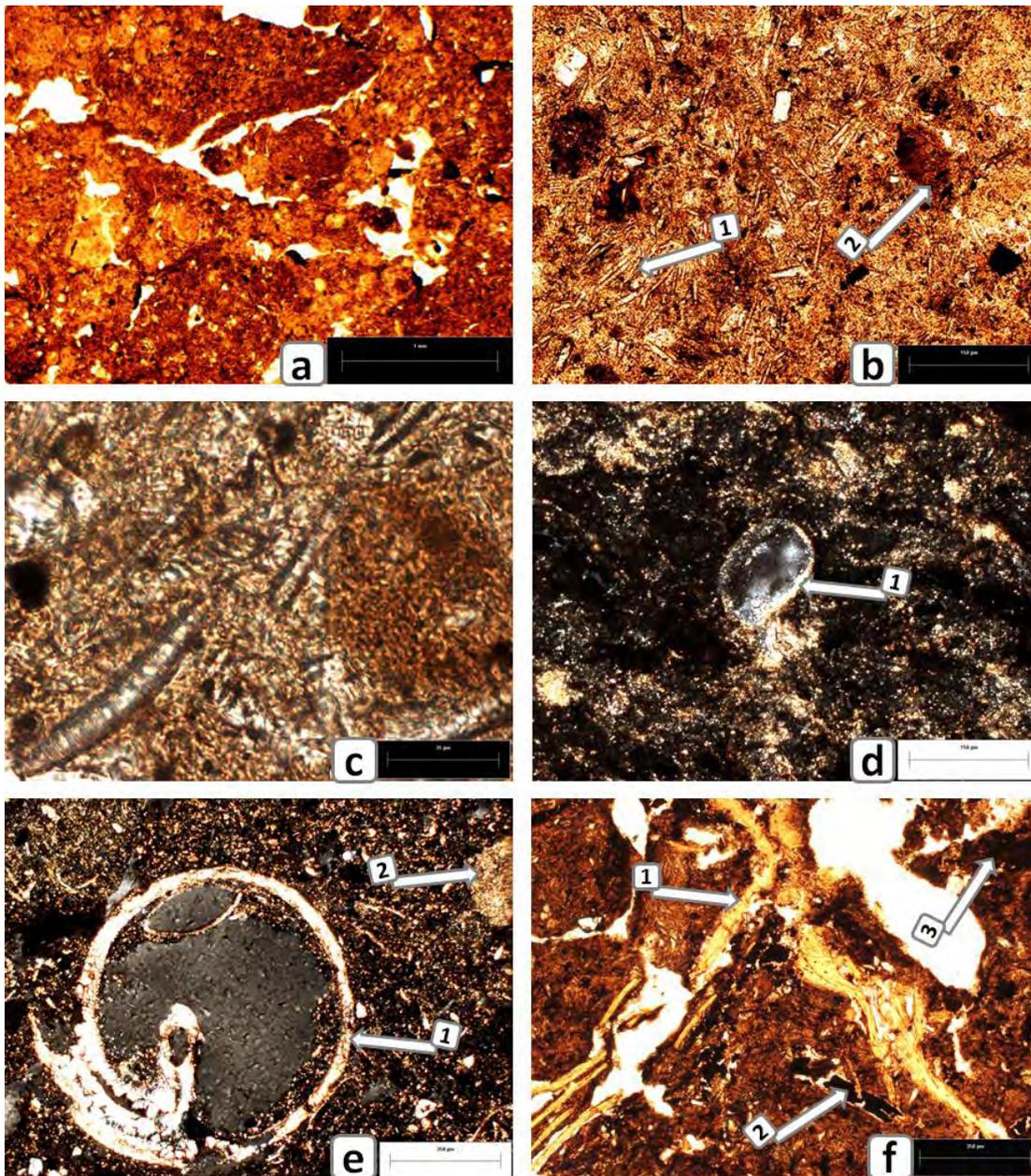
Los horizontes AB1 y AB2 presentan características similares a los anteriores, masa basal de suelo de material fino, hay restos de organismos calcáreos, concreciones de carbonatos, carbonatos micríticos. El contenido de carbonatos, primarios y secundarios bajo y vuelve a incrementar en AB2, un contenido de MO alto, escasa presencia de minerales, hay restos de diatomeas, pequeños nódulos de Fe. Una de las diferencias que presenta es que la estructura va de masiva a subangular y que hay poros cubiertos con carbonatos (figura 47).

El horizonte 2Ah también presenta una masa basal de suelo de material fino con microestructura subangular, concreciones de carbonatos y restos de organismos calcáreos

(aunque en menor cantidad a los anteriores), hay algunos poros que se están relleno con carbonatos pedogenéticos, pocos minerales, restos de diatomeas, una menor cantidad de nódulos de Fe y además incipientes, presentó una incipiente iluviación de arcilla, en un solo punto de la lámina y una mayor cantidad de MO (figura 47-f).



**Figura 46. P5.Xalt04.** Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos de los horizontes mAp1 y Ap2 **a)** (2x) (1) microestructura subangular, (2) resto de tejido vegetal en el subsuelo, nótese la masa basal de suelo de material fino. **b)** (4x) mezcla de materiales redepositados que componen el suelo superficial de ese perfil, (1) material muy fino evidentemente no perteneciente a la masa basal, (2) resto de tejido vegetal. **c)** (10x) (1) nódulo de Fe pequeño, la mayoría no presentó gran tamaño. **d)** (10x) (1) poro pequeño que se está relleno con arcilla (iluviación). **e)** (2x) (1) restos de organismos calcáreos, (2) concreción de carbonato. **f)** (4x) concha de organismo calcáreo, nótese que la masa basal contiene carbonato micrítico. Hay mayor moteado de Mn (hidromorfismo débil).



**Figura 47. P5.XalT04.** Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos de los horizontes AB1, AB2 y 2Ah. **a)** (2x) masa basal compacta, material fino, presenta grietas y pocos poros, y una microestructura más angular. **b)** (10x) (1) pequeños filamentos, diatomeas presentes en el perfil, (2) pequeño nódulo de Fe. **c)** (40x) acercamiento de las diatomeas presentes en el perfil. **d)** (10x) (1) poro que se está rellenando de carbonatos pedogenéticos, nótese la masa basal también con carbonatos. **e)** (4x) (1) resto de un organismo calcáreo, (2) concreción de carbonato. **f)** (4x) 2Ah, (1) arcilla iluviada, (2 y 3) MO en el horizonte.

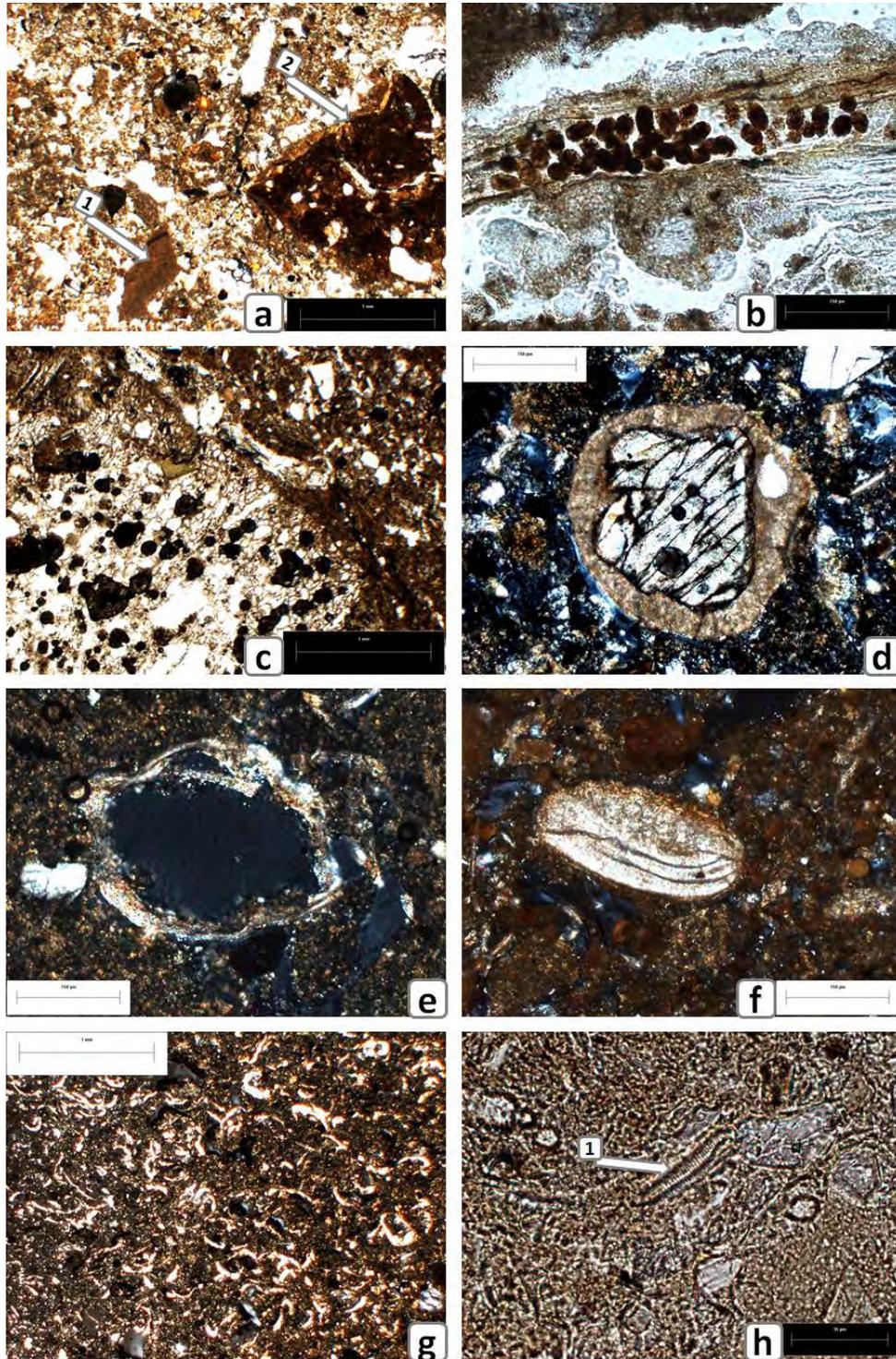
## **Perfil P6.XalT05**

Este perfil se realizó en los linderos del ex Lago Xaltocan, colindando con el antiguo lago de San Cristóbal (o también llamado lago Ecatepec). Tiene un tiempo aproximado de 100 años de desecación. Presentó los siguientes horizontes: Ah, ECw, Btn, CBtn, CB(t). Cabe señalar que únicamente se logró tomar muestras para realizar láminas de ECw, CBtn, CB(t) debido a que los otros horizontes faltantes fueron muy delgados.

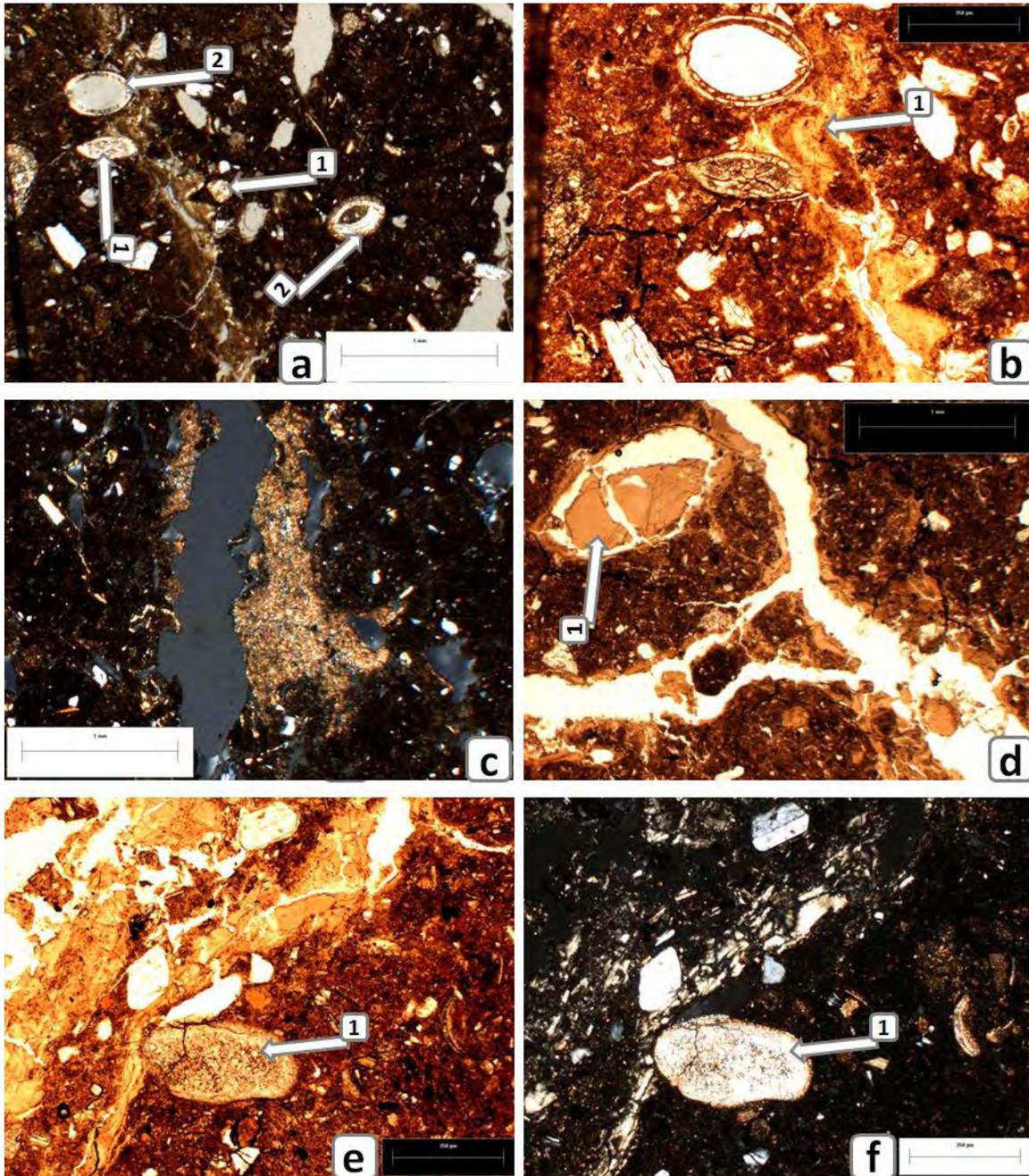
En el horizonte ECw (figura 48) se presenta una masa basal de suelo muy fragmentada y mezaclada, contiene fragmentos de suelos redepositados que contienen una masa basal más fina, cubiertos de revestimientos de arcillas fragmentados, fueron arrastrados y depositados (no tienen continuidad); su microestructura es subangular en bloques; el contenido de MO es moderado y hay presencia de coprolitos y restos de tejido vegetal; presenta pocos minerales que en su mayoría son plagioclasas y algunos restos volcánicos como pómez (no presentan rasgos de intemperismo, únicamente agrietamiento); hay una gran cantidad de restos de organismos calcáreos (conchas) y carbonatos micríticos relleno de poros y en la masa basal, además de concreciones de carbonatos. Hay presencia de diatomeas, aunque no en gran cantidad.

El horizonte CBtn (figura 49) presenta una masa basal de suelo más compacta, casi masiva de textura fina, ya no está fragmentada ni mezclada; tiene una microestructura subangular a masiva que rompe en angular; la cantidad de MO disminuye y también presenta coprolitos; la cantidad de minerales aumenta, pero no considerablemente y mayoritariamente son plagioclasas y cuarzos y no presentan rasgos de intemperismo, únicamente agrietamiento; también hay restos de conchas de organismos calcáreos (mejor conservadas) y carbonatos pedogenéticos (concreciones y micríticos); este horizonte presentó una gran cantidad de revestimientos de arcilla (iluviación), estos son continuos cubriendo grietas y/o relleno de poros. Sin embargo, presentan rasgos de arcilla mezclada con material más grueso como limos o MO, probablemente por causas de labranza o inundaciones rápidas.

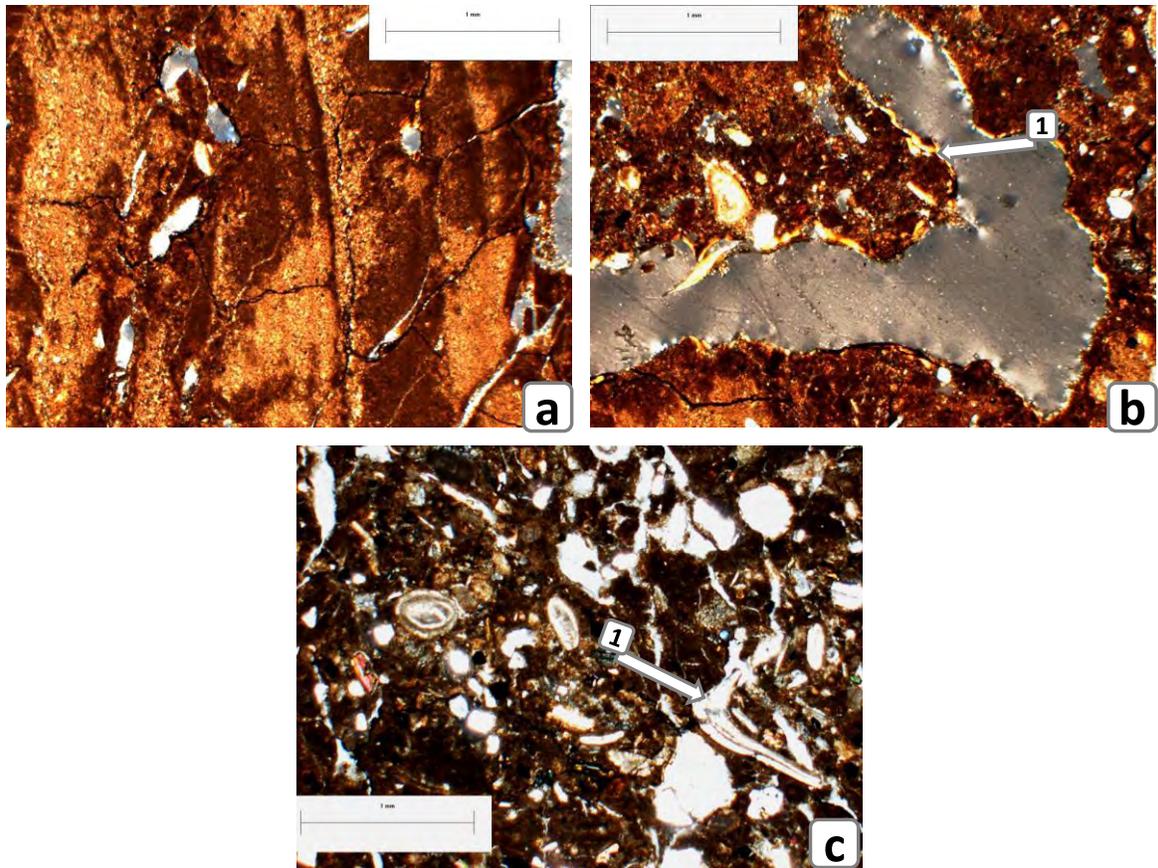
Para CB(t) (figura 50), las características son similares, la masa basal es compacta de material fino, con estructura subangular, no hay MO visible, moderada presencia de minerales, restos de organismos calcáreos, hay presencia de concreciones de carbonatos en un grado menor al anterior horizonte y la iluviación de arcilla es casi nula.



**Figura 48. P6.XalT05.** Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos del horizonte ECw. **a)** (2x) masa basal de suelo removida, (1 y 2) material de diferente origen, (2) fragmento de suelo con revestimiento de arcilla, nótese que este cután está fragmentado y no continuo. **b)** (10x) exhibe heces de mesofauna (coprolito) dentro de una raíz de planta. **c)** (2x) fragmento de pómez. **d)** (10x). **d)** (10x) mineral cubierto por carbonatos pedogenéticos. **e)** (10x) poro cubierto por carbonatos micríticos. **f)** y **g)** (10x y 2x respectivamente) esquematizan restos de organismos calcáreos, en g) hay un gran número de estos restos. **h)** (40x) diatomeas presentes en diferentes horizontes (materiales limnicos).



**Figura 49. P6.XalT05.** Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos del horizonte CBtn. **a)** (2x) (1's) concreciones de carbonato, (2's señalan restos de organismos calcáreos, nótese una masa basal más compacta. **b)** (4x) (1) arcilla iluviada que pasa por carbonatos primarios (resto de organismo calcáreo) y carbonatos secundarios, nótese una arcilla mezclada con impurezas. **c)** (2x) flujo de carbonatos secundarios cubriendo una grieta del suelo. **d)** (2x) (1) poro relleno de arcilla además se observan caras de agregados cubiertos por los revestimientos de arcilla. **e)** y **f)** (4x) (f en nx) (1) indica una concreción de carbonatos que está cubierta con arcilla iluviada.



**Figura 50. P6.XalT05.** Rasgos micromorfológicos y pedogenéticos del horizonte CB(t). **a)** (2x) fragmento de material fino sedimentado que forma parte del horizonte. **b)** (2x) (1) se observa que algunas de las caras de los agregados tienen un poco de arcilla que los cubre, (iluviación). **c)** (2x) parte de la masa basal del mismo horizonte, pero con una microestructura más subangular a granular, (1) señala fragmento de organismo calcáreo además se observan algunas concreciones de carbonato.

## 7. Discusión

### Constancia de los factores formadores

En una cronosecuencia los factores formadores deben ser constantes, el único factor que varía es el tiempo. La edad de los suelos debe ser conocida o estimada con un rango razonable, estas pueden variar de un sitio a otro (Jenny, 1941; Stevens y Walker, 1970; Huggett, 1998). Debe establecerse en sitios donde la superficie es expuesta a la intemperie de forma escalonada, como las terrazas, para analizar el nivel de pedogénesis entre los suelos de mayor tiempo expuestos a los de menor tiempo. La constancia de factores formadores es uno de los principales requisitos para que se logre ver un grado de avance de pedogénesis en un suelo. Por ejemplo, el material parental debe ser de la misma condición para ver los cambios y avances de la pedogénesis, la vegetación también debe ser similar y el clima en el que se desarrolla el suelo. El clima o el terreno pueden variar con el paso del tiempo (Stevens y Walker, 1970; Schaetzl y Anderson, 2005). En este estudio se procuró seleccionar sitios en los cuales los factores formadores material parental (sedimentos lacustres), relieve, clima (semiseco con lluvias en verano), uso de suelo (parcelas agrícolas), se mantuvieran constantes y solo variara el tiempo de desecación, para así poder observar el grado de avance de la pedogénesis. La zona lacustre muestra un ligero gradiente altitudinal de 12 metros, donde la zona norte está relativamente más alta que la zona a sur. Este gradiente altitudinal es responsable de que la desecación del lago ocurriese en tiempos distintos, desecándose primero las zonas altas. Por lo anterior, la secuencia de perfiles no representa solamente una cronosecuencia, también constituye una topo-cronosecuencia. Las implicaciones de esto en la cronosecuencia se discuten a mayor detalle abajo. Uno de los factores que variaron fue el grado de perturbación de los suelos, se complicó debido a que en la zona se intenta rescatar los terrenos (prácticas agrícolas y sitios de construcción) y fue complicado encontrar sitios con el menor grado de perturbación. El material parental no es homogéneo se tienen tanto sedimentos lacustres como aluviales.

**Tiempo de exposición** a la pedogénesis de los perfiles fue asignado con base en datos históricos obtenidos de mapas y de los cronistas de los municipios que indican cuándo se fueron desecando los lagos. Las edades van de los 200 años para el sitio que lleva mayor

tiempo expuesto a la pedogénesis, a los 30 años para el sitio con menor tiempo expuesto a la pedogénesis.

Una forma de corroborar la desecación gradual del lago fue tomar en cuenta la altitud del sitio. El agua de los lagos se fue desecando gradualmente, en la dirección en que fluía el agua de los lagos (Martínez de Vega, 1995; Burns *et al.*, 2009; SACMEX, 2012). El primer sitio en desecarse fue el del perfil P1.ZumS se le asignó un tiempo de desecación de 200 años. Después le sigue P2.XalN01 con tiempo de desecación de 100 años. Al perfil El perfil P6.XalT05 también se le asignaron 100 años de desecación. Estos dos últimos fueron parte de playas lacustres por lo que el agua se fue retrayendo hacia el centro del sitio. Cerca del centro de lo que fuera el lago de Xaltocan se ubicaron los sitios P3.XalN02 y P4.XalT03 a los que se les asignó una edad de 60 y 50 años de desecación respectiva mente. El perfil P5.XalT04 fue el único en considerarse con menor tiempo de desecación 30, esto debido a que se ubica en una hondonada que ha sufrido inundaciones continuas en época de lluvias, por lo que fue considerado para ser el sitio con menor tiempo de pedogénesis Las incertidumbres de las edades de los sitios estudiados se relacionan con variaciones en los datos históricos. Sin embargo, el margen de error es poco, con no más de 15 años. Para el perfil con menor tiempo (30 años) los reportes varían en uno o dos años como máximo. Toda la información se corrobora con los cronistas de los municipios.

La topocronosecuencia de este estudio tiene edades cortas, las edades de este tipo de estudios pueden variar y no ser estrictamente de cientos o miles de años, dependen del enfoque de la investigación y del sitio de investigación. Las cronosecuencias pueden abarcar cientos, miles e incluso millones de años (Vreeken, 1975; Calero, 2005; Schaetzel y Anderson, 2005). Por citar algunos ejemplos de edades cortas de cronosecuencia: Peña (2013) hace una cronosecuencia en el centro de la Faja Volcánica Transmexicana con edades de 1000-100,000 años antes del presente (AP). Barros *et al.*, (2014) realizan una cronosecuencia con edades 0, 3, 13, 29 y 40 años, basándose en el crecimiento de *Pinus radiata*, para determinar los cambios de la capa orgánica superficial del suelo en una región forestal del noreste de España (Lugo). Otro estudio de edades cortas es la realizada por Ramos y Siebe (2006) quienes, en un distrito minero en Guanajuato, México realizan 5 perfiles de suelo en jales mineros, con tiempos de abandono de 100, 75, 70, 16 años y

actual. Kalinina *et al.*, (2015) realiza dos cronosecuencias de suelos, una en calcisoles de edades de 1, 7, 12, 17 y 42 años y otra en solonetz de 1, 7, 12 y 42 años con la finalidad de determinar el desarrollo temporal de la vegetación y las propiedades del suelo, en la región de Cherny Yar, Rusia; identifica una restauración de las propiedades de los suelos y vegetación proporcional al tiempo; al igual a los resultados mostrados en este estudio, identifica horizontes con iluviación de arcilla en los solonetz a pesar de los tiempos cortos de la cronosecuencia.

**Material parental.** Los suelos se están desarrollando a partir de materiales limnicos, lacustres y aluviales, estos materiales han sido fragmentados por prácticas agrícolas, que en algún momento se intentaron hacer pero han sido abandonadas. El material parental de los perfiles estudiados consiste en una serie de depósitos de arcillas, limos y arenas, emplazados por las escorrentías que llegaban a recargar los lagos. Si bien el material parental son sedimentos lacustres, éstos no son homogéneos, como lo demuestra el estudio micromorfológico de los perfiles P6.XalT05, P5.XalT04, P4.XalT03 y P3.XalN02. Todos ubicados en el ex Lago de Xaltocan. Donde sus horizontes superficiales muestran una mezcla de materiales ajenos a los sedimentos lacustres; en las láminas delgadas se observaron inclusiones de fragmentos de suelos con texturas diferentes que probablemente fueron arrastrados por las escorrentías que recargaban al lago. Los perfiles P2.XalN01 y P1.ZumS no presentaron material ajeno a los sedimentos lacustres, pero sí una masa basal de suelo fragmentada en la parte superior. En los perfiles se observaron restos de organismos calcáreos (fragmentos de conchas) que habitaban el lago y diatomeas (materiales limnicos), evidencia de que los sitios estuvieron cubiertos agua en algún momento. Los perfiles P1.ZumS, P2.XalN01, P3.XalN02 y P4.XalT03 presentaron restos óseos pequeños como lo menciona Valadez y Rodríguez (2005) donde dice que en estos suelos es posible encontrar restos óseos de animales que habitaban los antiguos lagos.

La granulometría de los sedimentos varía según la posición de los sitios en el relieve, lo cual nos dice que los depósitos no fueron homogéneos. Las texturas finas son las que dominan en todos los perfiles, los limos son los que tienen mayor presencia. En la figura 24 se puede observar cómo en lo que fuera la parte central del ex Lago de Xaltocan (P5.XalT04, P4.XalT03 y P3.XalN02) hay un dominio de los sedimentos limosos y

arcillosos. Los perfiles P6.XalT05 y P2.XalN01 mostraron un ligero incremento en el contenido de arena, esto se atribuye a que estos sitios se ubicaron en lo que fueron playas lacustres del lago de Xaltocan (orillas sur y norte respectivamente), donde el constante oleaje incremento el porcentaje de las arenas. El sitio del perfil P2.XalN01 coincide con lo encontrado por Frederick *et al.*, (2005) quienes identifican montículos donde las texturas gruesas incrementan su porcentaje y lo describen como playa lacustre. El perfil P1.ZumS también presenta un incremento en el porcentaje de partículas gruesas, también probablemente relacionado con el oleaje, ya que este sitio también está en la orilla del ex Lago de Zumpango. El contenido de arcilla está más relacionado con el aporte de material suspendido en las escorrentías que a una neoformación, ya que, por los tiempos cortos de exposición de los sitios, la neoformación de arcillas es poco probable (Brady 1984; Porta *et al.*, 1999).

**Relieve.** A pesar de ser un lecho lacustre hay diferencias en el microrelieve entre sitios. La diferencia de altitud entre un sitio y otro es de tan solo unos metros. Sin embargo, hay hondonadas pequeñas, montículos y una leve inclinación, la altitud va descendiendo de Zumpango hacia el sur (figura 21). Hay un evidente movimiento de sales en el área de estudio. Los sitios de mayor altitud presentan un menor contenido de sales y en cambio los sitios más bajos tienen una acumulación notoria de sales. Los perfiles P6.XalT05, P5.XalT04 y P3.XalN02 son los de menor altitud (2244, 2241 y 2245 msm respectivamente) y presentan un mayor contenido de sodio (figura 52). El agua salada del ex lago fluía en dirección del perfil P6.XalT05 lo que provocó que las sales aquí tuvieran gran presencia. P5.XalT04 es el de menor altitud de todos y el que presenta mayor acumulación de sales, sobre todo en superficie. En este último perfil es probable que las sales estén en superficie por ascenso capilar del manto freático, el cual se encontró a los 60 cm. El perfil P3.XalN02, también tiene una gran acumulación de sales, este se ubica en una pequeña hondonada. Por el contrario, los perfiles P4.XalT03, P2.XalN01 y P1.ZumS tienen altitudes mayores (2246, 2247 y 2252 msm, respectivamente) y presentan un menor contenido de sodio. El movimiento de las sales evidencia el flujo del agua. Las sales de los sitios más elevados fueron lavadas, muy probablemente por eventos pluviales, principalmente. La desecación parcial del lago y el acumulo de agua en los sitios de menor altitud almacenaron las sales en estos lugares.

Debido a estos efectos del relieve de la secuencia de perfiles estudiada, será más correcto llamarla topo-cronosecuencia que cronosecuencia. Por ejemplo, en efectos ocasionados por el relieve Huseyin *et al.*, (2012) concluyen en su estudio de cronosecuencia en las terrazas del antiguo lago de Konya en Turquía que también uno de los principales factores que están actuando en la pedogénesis es el relieve, tanto por el lavado de sales como por el movimiento de arcilla, cabe mencionar que las terrazas datan de hace 17000 años y tienen una diferencia de 7 m entre una y otra. En otro estudio de catenas en laderas en Pinedale y el lago Bull en las montañas de Salmon, Idaho, (Berry, 1987) se concluye que la pendiente también tiene un efecto en las propiedades morfológicas del suelo; menciona que los suelos de las partes bajas tienen mayor desarrollo. Caso contrario al estudio de esta tesis donde el mayor desarrollo del suelo está en las partes con mayor altitud. Cabe mencionar que en la catena de este estudio en las partes bajas hay una acumulación de sales que está inhibiendo el desarrollo de algunas propiedades del suelo, como la vegetación, la formación y estabilidad de agregados, por mencionar lagunas.

**Clima.** El macroclima de la región es semiseco y subhúmedo (INEGI, 2016), donde la evaporación sobrepasa la precipitación (Castorena *et al.*, 1998), lo cual ayuda a la salinización de los suelos del sitio. El microclima, varía dependiendo del relieve. Por ejemplo el perfil P5.XalT04 está sometido a un mayor contenido de humedad en todo el perfil, ya que el manto freático está a los 60 cm, en cambio en los demás perfiles la humedad es menor. En su estudio Huseyin *et al.*, (2012) mencionan que el clima tiene efecto en la pedogénesis, pero que, a pesar de la edad, el intemperismo es mínimo, esto en el antiguo lago Konya en Turquía.

**Actividad de los organismos.** Cuando los suelos alcanzan un buen desarrollo con el tiempo sus condiciones mejoran (estabilidad de agregados, aireación, penetrabilidad de raíces, entre otras) por lo que es de esperar que la actividad de los organismos incremente. Sin embargo, para este estudio la acumulación de sales limita la presencia de los organismos. La presencia de sales solubles tiene efectos osmóticos, que conllevan a un estrés hídrico de plantas y microorganismos, las altas concentraciones de sodio y cloruro tienen efectos tóxicos. La salinidad reduce la presencia de plantas (Brady y Buckman, 1982; Tanji, 1996; Fernández, 2006) y también la actividad microbiológica (Porta *et al.*,

1999; Fernández, 2006; Brady y Weil, 2008). En el perfil P1.ZumS no se presentan rasgos de microorganismos, pero sí se observa una masa basal de suelo con estructura granular y restos vegetales en sus primeros horizontes lo que probablemente incita la presencia de organismos, en sus horizontes inferiores presenta poros tubulares que podrían estar relacionados con la actividad de estos organismos. En las láminas delgadas del perfil P2.XalN01 no se presentaron rasgos que indicaran una actividad de organismos además de tener una masa basal masiva, que podría limitar la presencia de estos, no obstante, en campo presento algunos organismos en sus horizontes superficiales; mientras que en los horizontes inferiores no habían estos rasgos, probablemente la actividad se vio afectada por la alta concentración de sales solubles. En el perfil P3.XalN02 tampoco hay rasgos de microorganismos, pero sí de restos vegetales sin degradar y una estructura granular en sus horizontes superficiales; en los horizontes inferiores hay poros tubulares que podrían indicar actividad de organismos, pero son pocos. En el perfil P4.XalT03 se identificó presencia de coprolitos (heces de microorganismos) sobre todo en sus horizontes inferiores; es uno de los perfiles con menor salinidad. El perfil P5.XalT04 presenta restos vegetales sin degradar, no hay evidencia en las láminas delgadas de restos de microorganismos y hay pocos poros tubulares en los horizontes inferiores, lo que podría estar relacionado con una presencia muy baja a nula de microorganismos. En el perfil P6.XalT05 hay presencia de coprolitos en los horizontes superiores, pero en los demás horizontes no. Éste es el único perfil con un alto contenido de salinidad que tiene evidencia de microorganismos en superficie. Podemos decir que para este estudio si incrementa un poco la actividad de los microorganismos en los perfiles con menor salinidad, pero esta no tiene relación con el tiempo de desecación.

El relieve tiene una influencia notable en algunos procesos que están ocurriendo en los suelos del área de estudio, como la acumulación de sal y que ésta a su vez afecta a la biota. Por lo que es más correcto decir que el estudio aquí presentado es de una topocronosecuencia.

### **Avance de la pedogénesis a lo largo de la topocronosecuencia**

En todos los perfiles se describieron horizontes Ap en las partes superficiales, excepto en el perfil P6.XalT05 cuyo horizonte superficial fue un Ah. En el perfil P5.XalT04 en la parte

superior había presencia de una costra salina. En todos los perfiles hubo presencia de carbonatos. Los perfiles P3.XalN02 y P2.XalN01 presentaron poco desarrollo, no tienen mucha variedad de horizontes van de Ap a horizontes con material limnico C. P1.ZumS presenta rasgos de slickensides en su parte media, P4.XalT03 presenta rasgos similares pero incipientes.

**Carbonatación:** En las láminas delgadas se logró comprobar que todos los horizontes, de los perfiles, tienen carbonatos tanto primarios como secundarios. Los carbonatos primarios prácticamente están compuestos por restos de organismos que habitaban el lago, fragmentos de conchas que aún están sin degradar. Además de estos restos de organismos en algunos casos hay restos de huesos de fauna, perfiles P1.ZumS, P2.XalN01, P3.XalN02 y P4.XalT03. Los restos de huesos aun no presentan mucha degradación por lo que se consideran aun recientes, poco trabajo de pedogénesis (ver parte de resultados: Micromorfología). En todos los perfiles hay presencia de concreciones de carbonatos (ver figura 52) sobre todo en los perfiles ubicados en las playas lacustres. Castorena *et al.*, (1998) mencionan que las concreciones de carbonatos son de origen lacustre (esto en el ex Lago de Texcoco). Los carbonatos secundarios se encuentran mezclados en la masa basal del suelo y/o recubriendo poros o canales/grietas, es posible que parte de estos carbonatos sea producto de la disolución de los primarios (carbonatos lacustres) y efectos de la evaporación como mencionan Castorena *et al.*, (1998).

**Formación de estructura:** en campo y con la ayuda de la micromorfología se identificaron los tipos de agregados y estructura de los perfiles de este estudio. Los perfiles mostraron una masa basal de suelo removida y mezclada con material arrastrado por las escorrentías, principalmente en superficie. En la tabla 19 del anexo se puede observar que todos los perfiles tienen en sus primeros horizontes una estructura subangular con grado moderado/débil. Posteriormente en las partes medias a profundas predominan las estructuras angulares, masivas y prismáticas (perfiles P4.XalT03 y P5.XalT04), lo que se puede interpretar como un bajo desarrollo del suelo; en los perfiles P2.XalN01 y P3.XalN02 en su parte superficial hay grano simple. En el perfil P5.XalT04 la estructura es masiva/angular/prismática de grado débil, tiene el menor tiempo de desarrollo y menor contenido de MO. El perfil P1.ZumS es el que presenta una estructura más desarrollada, en

su parte superior tiene una estructura de migajón, en su parte media presenta una estructura masiva que rompe a subangular y en su parte inferior hay una estructura masiva que rompe a subangular. Es uno de los perfiles con mayor tiempo de desarrollo y mayor contenido de MO acumulada, factores que ayudan a mejorar la estructura de un suelo; es uno de los perfiles con menor sodicidad, lo que propicia a que no tenga dispersión de agregados; aun así el grado va de moderado a débil. Por lo que podemos decir que para los suelos de este estudio la estructura esta poco desarrollada, los perfiles con mayor tiempo de desecación si presentan un poco de avance, aunque también tienen estructuras masivas, la sal está teniendo efecto en la estabilidad ya que en su mayoría es moderado a débil.

**Iluviación de arcillas.** Todos los perfiles mostraron iluviación de arcilla. Los perfiles P1.ZumS, P2.XalN01, P5.XalT04 y P6.XalT05 mostraron este proceso únicamente en su parte de media a profunda. Los perfiles P3.XalN02 y P4.XalT03 mostraron este proceso en casi todo el perfil. El perfil P3.XalN02 es el único que muestra una formación muy evidente de capas, en la parte profunda, estas capas de depositación se ven mezcladas con limos (figura 42) lo que probablemente fue provocado por un evento “rápido”. El perfil P6.XalT05 también presenta rasgos muy evidentes de la iluviación de arcilla, los revestimientos son gruesos; a diferencia de los demás perfiles en este caso el rasgo sí fue evidente en campo (horizontes Btn y CBtn).

Para que este rasgo aparezca en un suelo se requiere generalmente de un tiempo prolongado de pedogénesis, cerca de los 10,000 años (Targulian y Krasilnikov, 2007). Sin embargo, en el área de estudio los suelos son muy jóvenes. La iluviación que está ocurriendo en estos suelos tiene dos explicaciones: el sodio es un catión que dispersa las arcillas y debido a que estos suelos tienen una gran cantidad de sodio, la dispersión está ocurriendo formado los recubrimientos de arcilla. Por otro lado el pasado agrícola de los suelos (P1.ZumS, P3.XalN02, P4.XalT03 y P5.XalT04) es probable que haya tenido influencia en la presencia de este rasgo.

Además de tiempo, este tipo de rasgos requiere un clima húmedo que provoque la migración de arcillas. Sin embargo, el clima es semiseco en el área de estudio. Hay concreciones de carbonatos y en algunos casos el revestimiento de arcilla cubre estas concreciones (perfil P6.XalT05, figura 49-e y f). En primera instancia sería contradictorio

tener carbonatos y recubrimientos de arcilla en un sitio, ya que un clima húmedo disolvería los carbonatos y formaría los revestimientos y por el contrario un clima árido formaría los carbonatos, pero no habría iluviación. Una explicación para que en el sitio de estudio se tengan estos dos procesos en un mismo tiempo, es que la iluviación ocurrió por un evento “rápido”. Probablemente en momentos de inundaciones, provocada por lluvia u otros procesos, se produce la iluviación, ayudada por el exceso de sodio en el sitio que dispersa la arcilla. Al ser un evento relativamente rápido y con un exceso de sodio y una gran cantidad de arcilla en la masa basal del suelo, se provoca que se formen estas capas; al ser un evento rápido la arcilla va con mezcla de otras partículas que se infiltraron en la inundación. Al ocurrir esto en tiempos cortos, los carbonatos no se diluyen y quedan cubiertos por los revestimientos de arcilla. El pasado agrícola de algunos de los sitios también debió tener influencia en la formación de este rasgo.

La iluviación de arcilla en sitios como el de este estudio, con exceso de sodio, ha sido reportada por otros autores. Por ejemplo, Olivera *et al.*, (2017) encuentra rasgos similares a los de este estudio, analizan cinco perfiles de los suelos sódicos de el Pantanal, Brasil con el objetivo de identificar los procesos pedogenéticos que están ocurriendo, determinan que la iluviación de arcillas es el proceso dominante. Esta iluviación está provocada por los altos porcentajes de sodio intercambiable (alrededor de 20, 30 50 % en su mayoría), la arcilla también cubre carbonatos de calcio, por lo que menciona que es un proceso reciente, similar a lo presentado en esta tesis. Nascimento (2012) realiza un estudio en la misma zona, Pantanal, Brasil, de 6 perfiles de suelo, donde también identifica un alto contenido de sodio intercambiable que está provocando una iluviación de arcilla en los perfiles. Lebedeva y Gerasimova (2009) y Lebedeva *et al.*, (2009) hacen una descripción y análisis de horizontes de un complejo de un solonetz, en Dzhanybek, Kazajistán, donde determinan que las altas concentraciones de sales (sulfatos de sodio) en las partes medias y profundas del sitio están provocando recubrimientos de una mezcla de arcilla-MO y arcilla-hierro. Abdel e Ibrahim (2013) estudian diez perfiles de suelos afectados por la sal para identificar características micromorfológicas relacionadas con procesos de salinización en el área de la depresión de El-Fayoum, Egipto. Encuentran que en los suelos salino-sódicos está ocurriendo una iluviación de arcillas, originando horizontes Btz, con estructuras débiles y valores altos CE (que van de los 7-80 dS/m). Los resultados obtenidos para esta tesis se

asemejan a los de estos autores; ya que en los suelos hay una fuerte afectación por el sodio, que está ocasionando una iluviación de arcilla, prácticamente en todos los perfiles, además de tener efectos dispersantes en los agregados.

**Densidad aparente (DA).** Los perfiles con mayor tiempo de exposición, P1.ZumS y P2.XalN01, tienen una mayor DA (de 1.2-0.9 g/cm<sup>3</sup> y 1.2-1.1 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, valores de superficie a profundidad). Por el contrario, los perfiles P4.XalT03 y P5.XalT04 los cuales tienen un menor tiempo de exposición a la desecación, tienen los valores más bajos de DA (de 0.8-0.7 g/cm<sup>3</sup> y 0.8, 0.9-0.6 g/cm<sup>3</sup> respectivamente, valores de superficie a profundidad) (valores completos en tabla 9 del anexo). El perfil P6.XalT05 es uno de los que tiene mayor tiempo de exposición a la intemperie. Sin embargo, sólo se lograron muestrear tres intervalos (ver tabla 9 del anexo) sus valores están alrededor de 0.9 g/cm<sup>3</sup>. Los resultados de este estudio sugieren que los perfiles con mayor tiempo de exposición tienden a incrementar su DA, mientras que en los de menor tiempo de desecación la DA es menor. Esto podría deberse a que los de mayor tiempo de desecación han estado expuestos a una compactación antrópica.

### **Movilización de sales**

**Conductividad eléctrica** es un indicador de la movilización de sales. Los perfiles con mayor CE son P6.XalT05, P5.XalT04 y P3.XalN02 (valores de 1721-2565; 10130-1812 y 720-6080 mS cm<sup>-1</sup> respectivamente, ver tabla 12 del anexo), son los de menor altitud. Los perfiles con una menor CE son P1.ZumS, P2.XalN01 y P4.XalT03 (valores de 482-355; 467-1295 y 829-768 mS cm<sup>-1</sup> respectivamente, ver tabla 12 del anexo) son los perfiles con mayor altitud en la secuencia. Los resultados para la CE de este estudio demuestran que el relieve tiene influencia. Los perfiles con menor altitud presentan una CE elevada, lo que sugiere que hay una mayor presencia de sales y una probable acumulación de las sales lavadas de los sitios de mayor altitud lo que les confiere una menor CE. Sin embargo, a pesar de tener una CE baja, comparada con los otros perfiles, están por encima de lo que se considera suelos no afectados por la CE (según la Secretaria de Recursos Hidráulicos, en Barrera, 2000).

**Cationes y aniones solubles.** En el perfil **P1.ZumS** los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  son los que tienen mayor concentración (1.1 a 1.6, 4.83-0.99 y 3.06-0.95 meq/l respectivamente). Los aniones que tienen mayores concentraciones son  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  (7.84-0.41, 0.78-1.99 y 1.01-0.64 meq/l, respectivamente). Sin embargo, las concentraciones no son tan elevadas como en otros perfiles de este estudio. Es el perfil que presenta menores concentraciones casi en todos sus iones. Es uno de los perfiles con una altitud elevada (figura 22) es probable que esta característica haya ocasionado un la vado y que las sales migren a otros sitios, por ejemplo los de menor altitud. Por las concentraciones de los iones se infiere que las sales con mayor presencia en el sitio son:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)$  y  $\text{NaNO}_3$ , no hay una gran acumulación de éstas.

En el perfil **P2.XalN01** el  $\text{Na}^+$  tiene mayor concentración a profundidad (1.12--9 meq/l); los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se mantienen en bajas concentraciones, sobretodo en profundidad (1.60-0.28 y 0.72-0.20 meq/l respectivamente). El anión  $\text{HCO}_3^-$  está en mayor concentración con respecto a los demás aniones (2.9-6.6 meq/l),  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  son los otros aniones con mayor presencia en el perfil (0.52-0.88 y 0.40-1.68 meq/l respectivamente). Las concentraciones de los iones solubles no son tan elevadas como en otros perfiles de este estudio. Este perfil es uno de los de mayor altitud de este estudio (figura 22), por lo que se infiere que su posición en el relieve ocasione el flujo de las sales del sitio hacia los lugares con menor altitud. Considerando las concentraciones de los iones, se deduce que las sales con mayor presencia son  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}$ ,  $\text{MgCl}$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)$ .

En el perfil **P3.XalN02** se incrementan las concentraciones de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  (5.45-156.64 y 0.89-14.11 meq/l respectivamente) el  $\text{Na}^+$  incrementa abruptamente a profundidad. Los aniones con mayor presencia en este perfil son  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  (2.83-161.83, 2.43-10.14/6.08 y 0.39-13.34 meq/l respectivamente) nótese que  $\text{Cl}^-$  es el que incrementa abruptamente a profundidad. Este sitio baja un poco su altitud con respecto a los anteriores perfiles (figura 22), esto está ocasionando las sales se acumulen en este sitio, provenientes muy probablemente de los sitios aledaños. Considerando las concentraciones de los iones solubles, se infiere que las sales que tienen mayor presencia en el sitio son,  $\text{NaCl}$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , principalmente.

En el perfil **P4.Xalt03**  $\text{Na}^+$  tiene una mayor concentración en este perfil (4.56--9.18 meq/l), no tanta como en el anterior perfil, los cationes  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$  presentan un ligero incremento en su concentración (rangos de 3.65-1.01 y 2.85-1.13 meq/l respectivamente). Los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{-2}$  son los que tienen mayor presencia en el perfil (5.38/1.35-7.79, 2.86/4-1.70 y 2.86/1.3-3.69 meq/l, respectivamente). Considerando las concentraciones anteriores podemos inferir que las sales que tiene mayor presencia en este sitio son  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}$ ,  $\text{MgCl}$ ,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , es probable que también se forme  $\text{CaSO}_4$ . Sin embargo, esta sal tendría poca presencia en el sitio. Se infiere que no hay una acumulación de sales por dos cosas: 1) los iones no presentan una concentración alta, como en otros sitios; 2) es uno de los perfiles que se encuentra en una loma, de acuerdo con la geomorfología del sitio, uno o dos metros de diferencia comparado con los perfiles de sus lados (figura 22), esta pequeña elevación ocasiona que las sales más solubles se movilicen a los sitios de menor altitud.

En el perfil **P5.Xalt04** las concentraciones de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  incrementan abruptamente (132.5-25.23 y 4.73-1.3 meq/l respectivamente), sodio es el que tiene las concentraciones más elevadas en toda la secuencia. Los aniones con mayor presencia son el  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{-2}$  (62/140-16 y 54.87/123.72-7.91 meq/l respectivamente),  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{NO}_3$  incrementan un poco en este perfil (14.20-3.97 y 11.35/24.43-1.30 meq/l respectivamente). Nótese que las concentraciones de iones solubles para este perfil incrementan en superficie y no a profundidad como en otros perfiles. Una explicación para esto es que el manto freático está muy cerca, a 60 cm de profundidad, por lo que la capilaridad está ocasionando que los iones se concentren en la parte superior del perfil. Este perfil es el de menor altitud de la secuencia (figura 22), lo cual provoca que los iones del lugar y de zonas aledañas se acumulen incrementando sus concentraciones considerablemente. Tomando en cuenta las concentraciones de los iones, se infiere que las sales presentes en este perfil son:  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y  $\text{KNO}_3$ , las cuales son de las más solubles.

En el perfil **P6.Xalt05** los cationes con mayor presencia son el  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  (24-49.85, 1.75-2.33 y 1.71-1.34 meq/l respectivamente), siendo el sodio el que presenta las mayores concentraciones. Los aniones mayormente concentrados son  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^-$  y  $\text{Cl}^-$  (13.89-17, 8.44-21.21 y 7-13.28 meq/l respectivamente). Tomando en cuenta las concentraciones de

estos iones, se infiere que los tipos de sales que abundan en este perfil son: NaCl, CaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Ca(HCO<sub>3</sub>). Estas sales son de las más solubles que hay, sobre todo las que incluyen Cl, el flujo subsuperficial que proviene de las zonas con mayor altitud ha provocado una acumulación de sales en el sitio, que es uno de los de menor altitud (figura 22). La sal CaSO<sub>4</sub> también podría tener presencia, pero esta sería la menos soluble de todas.

Los perfiles **P3.XalN02**, **P5.XalT04** y **P6.XalT05** poseen las concentraciones más elevadas de iones solubles. En los perfiles **P1.ZumS**, **P2.XalN01** y **P4.XalT03** las concentraciones son bajas. Estos últimos perfiles, tienen una posición en el relieve más elevada. Aunque en algunos sitios solo es de unos metros de diferencia (figura 22). La altitudinal es suficiente para que ocurra un flujo subsuperficial y las sales migren hacia los lugares bajos. La acumulación de sales en estos sitios ha provocado un incremento abrupto de las concentraciones de los iones Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>, por lo que se infiere que la sal más presente en estos sitios es NaCl. En general los iones con mayor presencia en los perfiles son Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Ca<sup>2+</sup>, en cationes y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> en aniones.

**pH.** Los valores de pH son alcalinos en su mayoría. Los valores más elevados de pH los presentan los perfiles P6.XalT05, P5.XalT04 y P3.XalN02, son los perfiles que tienen una menor altitud en la cronosecuencia. Por el contrario los perfiles P1.ZumS y P4.XalT03 tiene un pH menos alcalino, esto coincide con que son los perfiles de mayor altitud y mayor edad. El perfil P2.XalN01 tienen un pH bajo en sus horizontes superficiales. Sin embargo, se incrementa considerablemente en su último horizonte. El incremento en el pH se debe a la presencia de sales de sodio. Por los resultados mostrados en esta tesis se infiere que los perfiles con mayor altitud son los que tienen menor pH y por el contrario los perfiles con menor altitud son los que tienen mayor pH.

**Saturación de sodio.** Los perfiles de suelo que obtuvieron una mayor saturación de sodio fueron P6.XalT05, P5.XalT04 y P3.XalN02, estos sobrepasan el rango en el que se considera un suelo afectado (15 %), tienen porcentajes de saturación que van del 30 al 50 %; estos perfiles de suelos son los de menor altitud en la secuencia. Los perfiles con mayor altitud, P1.ZumS, P4.XalT03 y P2.XalN01, resultaron ser los de menor porcentaje de saturación de sodio, se consideran ligeramente afectados, sus rangos van por debajo del 10 %. Los resultados de la saturación de sodio indican que la sal se está lavando de las partes

de mayor altitud y se está acumulando en las partes de menor altitud del relieve. El gran contenido de sodio en estos suelos está ocasionando un efecto de dispersión de arcillas y una estructura de grado moderado a débil. Una arcilla está formada por láminas de tetraedros de sílice y octaedros de aluminio acomodadas en triadas, éstas tienen cargas negativas ocasionando fuerzas de repulsión que generan espacio donde se adsorben cationes permitiendo que otras triadas se unan formando una estructura de micelas. Cuando en un suelo el porcentaje de sodio es elevado (más del 15 %) el sodio penetra en ese espacio de las láminas, incrementado las fuerzas de dispersión, separando las láminas (Brady y Buckman, 1982; Tanji, 1996; Porta *et al.*, 1999; Fernández, 2006). Aunque el porcentaje de sodio no alcance el 15 % pero esté cercano (como en los perfiles de mayor altitud), la dispersión también es promovida por fuerzas externas como la lluvia (Porta *et al.*, 1999; Fernández, 2006).

Apoyando la idea de la dispersión de arcillas por sodio, los análisis micromorfológicos mostraron rasgos de iluviación de arcillas en todos los perfiles. En algunos casos la iluviación es muy incipiente (P1.ZumS, P2.XalN01, P5.XalT04) y en otros muy evidente (P3.XalN02 y P4.XalT03, P6.XalT05). Los revestimientos de arcilla son gruesos y están mezclados con otras partículas como limos, lo que indica una iluviación rápida. La dispersión está afectando también los agregados de los suelos, ya que tienen un grado moderado a débil, en su mayoría, lo que muestra que los agregados no son muy estables y se disgregan rápidamente, haciendo que la estructura no se desarrolle por completo.

**Cationes intercambiables.** Calcio y sodio son los que tienen una mayor presencia en la secuencia ( $\text{Ca}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^+ > \text{K}^+$ ). En los perfiles P4.XalT03 y P1.ZumS tienen mayor presencia calcio y magnesio (figura 32). El  $\text{Ca}^+$  está prácticamente en altas concentraciones en todos los perfiles y tiene poca variación. Los perfiles con menor altitud P6.XalT05, P5.XalT04 y P3.XalN02 tienen las mayores concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  y por el contrario en los perfiles de mayor altitud las concentraciones de estos son menores disminuyen. El relieve está teniendo efecto en las concentraciones de estos cationes intercambiables, acumulando las mayores concentraciones en sitios de menor altitud.

### **Materia orgánica acumulada (Corg kg/m<sup>2</sup>).**

Se consideró la materia orgánica acumulada con el tiempo que llevan los suelos de desecación según la fórmula:

$$Corg (kg/m^2) = \%Corg * d.a. ((100 - \%pedras) / 100) * espesor \text{ (Siebe et al., 2006)}$$

Según lo obtenido con la acumulación, conforme avanza el tiempo de desarrollo de los suelos la MO tiende a aumentar (figura 29). Los perfiles con menor tiempo de exposición a la pedogénesis tienen un menor contenido de MO y los perfiles de mayor tiempo de exposición incrementan su contenido (P2.XalN01 y P1.ZumS). En el caso de los perfiles P4.XalT03 y P3.XalN02 los datos sugieren que P3.XalN02 tiene menor contenido de MO acumulada a pesar que tiene un poco más de tiempo de exposición a la pedogénesis, lo cual podría deberse a diferencias en el manejo (aplicación de enmiendas orgánicas, retiro de los residuos de cosecha, tipo de cultivos, técnicas y frecuencia de la labranza, etc...). El perfil P6.XalT05 a pesar de ser un perfil con mayor tiempo de exposición a la intemperie tiene un contenido de MO muy bajo. Es un sitio de playa lacustre que prácticamente ha estado abandonado por los ejidatarios del municipio de Tonanitla, no hay riego en esa zona, sumándole que es uno de los perfiles con mayor problemática de salinidad, por lo que esto está inhibiendo el crecimiento de plantas y la presencia de microorganismos. Por lo anterior no se tomó en cuenta este perfil al calcular la tasa de acumulación de MO. A esta tasa de acumulación se le ajustó una regresión lineal (ver figura 51), el incremento de Corg kg/m<sup>2</sup> es notorio con la línea de tendencia ascendente; los perfiles con mayor tiempo de exposición a la pedogénesis muestran una mayor acumulación de MO que los perfiles con menor tiempo. La tasa de acumulación por año fue estimada en 0.0046 kg/m<sup>2</sup> de Corg, la cual es poca para una zona que intenta ser agrícola. Debido a los problemas de salinidad la acumulación de MO, el crecimiento de plantas y la presencia de microorganismos se ven más restringida.

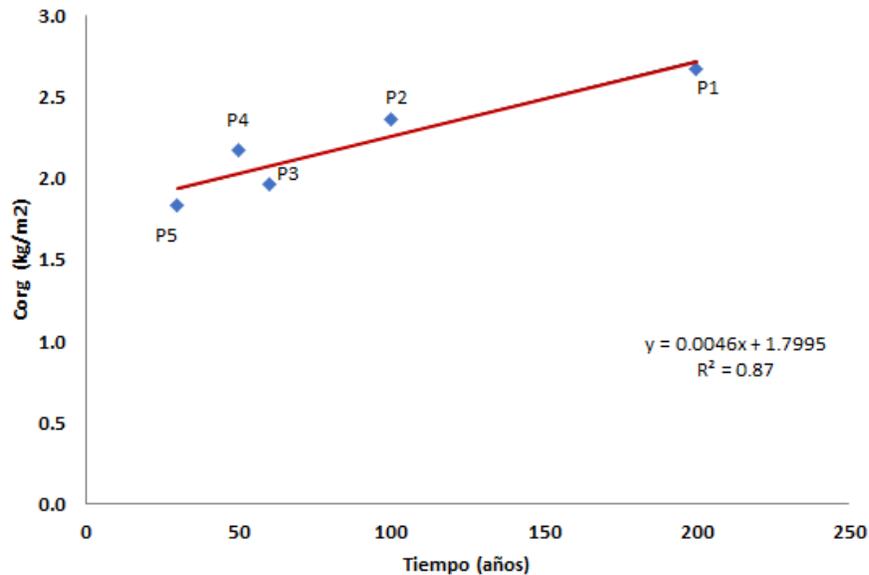


Figura 51. Regresión lineal del contenido de Corg ( $\text{kg/m}^2$ ) acumulada en años.

Hay estudios que reportan algo similar a lo encontrado en los resultados de esta tesis. Por ejemplo:

- En un estudio de restauración de suelos salinos y cálcicos de la zona esteparia seca de Rusia, cerca de la ciudad de Cherny Yar, Kalinina Olga *et al.*, (2015) encuentran una tendencia ascendente de la acumulación de Corg a pesar de la salinidad y de los tiempos cortos de las dos cronosecuencias realizadas (1, 7, 12, 17 y 42 años para los suelos cálcicos y de 1, 7, 12 y 42 años para los solonetz, tiempo sin ser perturbados). Mencionan que el incremento de Corg en los suelos cálcicos es de  $2 \text{ kg/m}^2$  en los suelos más jóvenes a  $3.5 \text{ kg/m}^2$  de Corg en los suelos con más tiempo de recuperación, y en los solonetz de  $1.7$  a  $3.1 \text{ kg/m}^2$  de Corg. Las tasas de acumulación fueron estimadas entre  $0.033$ - y  $0.035 \text{ kg C yr}^{-1}$  en  $0.5 \text{ m}$  superficiales durante los 42 años en ambas cronosecuencias. Después se calculó una tasa de acumulación para los primeros  $0.2 \text{ m}$  en los solonetz de  $0.018 \text{ kg C yr}^{-1}$  y para los suelos cálcicos de  $0.008 \text{ kg C yr}^{-1}$ .

En la topocronosecuencia de Zumpango-Xaltocan la tasa de acumulación es más lenta, probablemente debido a que los suelos están fuertemente afectados por la presencia de sal,

lo cual inhibe el crecimiento de vegetación. No obstante, la acumulación de MO está ocurriendo, dado que los perfiles con mayor edad de desecación así lo demuestran.

- Abdel e Ibrahim (2013) estudian diferentes características de suelos afectados por la sal en el área de la depresión de El-Fayoum, Egipto. No calculan una tasa de acumulación de MO. Sin embargo, determinan que la MO se acumula a pesar de las características del suelo. Esta acumulación está distribuida en manchones aleatorios dentro de la masa basal del suelo, principalmente en la parte superficial.

Por lo que podemos inferir que a pesar de los problemas de salinización en los suelos la acumulación de la MO se da. Sin embargo, la tasa de acumulación es lenta y puede estar mal distribuida en el perfil, lo que ocasiona que no se aproveche, tanto para la formación de agregados, como para una mejor distribución y aprovechamiento de nutrientes.

### **Neoformación de arcillas**

**Neoformación de arcillas/intemperismo.** Los perfiles de la secuencia muestran minerales con poca alteración que en su mayoría son plagioclasas y cuarzos. Los minerales se muestran fragmentados, pero con pocos rasgos de intemperismo, prácticamente nulos. La fragmentación posiblemente se deba más al transporte ocasionado por las escorrentías, ya que en algunos casos estos minerales están redondeados (ver resultados de micromorfología). Hay también restos de material volcánico como pómez (evidentes en P1.ZumS, P2.XalN01 y P6.XalT05), estos restos presenta poca alteración/intemperismo. Es muy probable que la arcilla contenida en los perfiles sea heredada por el acarreo de las escorrentías que llenaban los lagos y que se fueron depositando ahí.

Conociendo la CIC (cmol/kg de arcilla) de los perfiles, se estimó el tipo de arcilla de los suelos del área de estudio (ver tabla 18 en el anexo). La arcilla predominante es de tipo esméctica que está presente en todos los perfiles. En los perfiles P2.XalN01, P3.XalN02, P4.XalT03 y P5.XalT04 predomina las arcillas de tipo esmectita/vermiculita. El perfil P1.ZumS presenta una mayor variedad en el tipo de arcillas, en sus primeros horizontes tiene arcilla del tipo illita/esmectita, para su parte media tiene arcillas del tipo esmectitas/vermiculitas y para la parte profunda hay arcillas de tipo alófano, según lo estimado. El perfil P6.XalT05 presenta valores muy elevados de CIC tanto en su parte

superficial como profundidad, esto hace que no se tenga una clasificación coherente en su tipo de arcillas, según la CIC (cmol/kg de arcilla); en la parte superficial tiene arcillas de tipo alófono y en la parte media esmectita/vermiculita. La presencia de arcillas expandibles (vermiculitas-esmectita) coinciden con los rasgos encontrados tanto en campo como en las láminas delgadas: agrietamiento con estructuras subangulares a angulares (en todos los perfiles), rasgos de fricción o presión (slickensides) (P1.ZumS y P4.XalT03), y una alta CIC, características que están asociadas a este tipo de arcillas (Brady, 1982, 1984; Porta *et al.*, 1999).

### **Neoformación de óxidos de Fe y procesos de óxido-reducción:**

Para conocer el avance de la pedogénesis por medio de la neoformación de Fe, se extrajo el hierro con oxalato ( $Fe_o$ ) (Fe amorfo, formado en suelos jóvenes) y el hierro con ditionito ( $Fe_d$ ) (Fe cristalino, formado en suelos con mayor tiempo a pedogénesis). En la figura 34 se muestran los contenidos de ambos para cada perfil de la topocronosecuencia. Los perfiles P6.XalT05, P5.XalT04, P4.XalT03, P3.XalN02 y P2.XalN01 tienen un mayor contenido de  $Fe_o$  lo que nos indica que son suelos recién formados. El único perfil que presenta un mayor contenido de  $Fe_d$  es P1.ZumS; coincide en ser el perfil de mayor tiempo de exposición a la pedogénesis. Sin embargo, la diferencia con respecto al contenido de  $Fe_o$  no es mucha; incluso en su parte profunda aumenta el  $Fe_o$ , por lo que se considera un suelo joven. Es de llamar la atención que los perfiles marcados con menor tiempo de desecación (P5.XalT04, P4.XalT03, P3.XalN02) sí muestran un mayor contenido de hierro amorfo, recién formado ( $Fe_o$ ). En cambio, en los perfiles P6.XalT05 y P2.XalN01 con un mayor tiempo de exposición a la pedogénesis muestran un pequeño incremento en la neoformación de óxidos hierro producto de la pedogénesis. Sin embargo, toda la catena se consideraría con suelos jóvenes, con muy poco hierro producto de la pedogénesis. No se descarta la idea de que la neoformación de óxidos de hierro apenas esté teniendo lugar.

## Consideraciones finales

En la figura 52 se resumen algunos de los procesos que pudieron evidenciarse. Uno de ellos y el más evidente es la movilización de sales, que ocurre de los sitios de mayor altitud a los de menor altitud, generando la dispersión de las arcillas (por saturación de sodio) e inhibiendo el crecimiento de plantas y la presencia de microorganismos. Esto trae como consecuencia una baja acumulación de materia orgánica y poca estabilidad en la formación de agregados. La precipitación de carbonatos tiene una mayor acumulación en los sitios de menor altitud de la topocronosecuencia. Sin embargo, la presencia de carbonatos en toda la secuencia es alta. Es probable que haya una disolución de las concreciones de carbonatos que se formaron en el lago (Castorena *et al.*, 1998) y ahora se estén mezclando con la masa basal del suelo además de revestir poros y canales. La precipitación de carbonatos puede que tenga mayor presencia debido a que el sitio es semiseco y la evaporación alta, con un manto freático muy cercano a la superficie. La estructura con mejor desarrollo se observa en el perfil P1.ZumS, que es el de mayor tiempo expuesto, mayor MO y una menor acumulación de sal.

Los rasgos de óxido-reducción están presentes en toda la topocronosecuencia. Sin embargo, en varios perfiles los rasgos son incipientes. Los perfiles de suelo que presentan mayores rasgos de óxido-reducción son los suelos con menor edad de exposición, ubicados en la parte central de lo que fuera el lago de Xaltocan (P3.XalN02, P4.XalT03 y P5.XalT04). Los perfiles con menores rasgos de óxido-reducción son los perfiles ubicados en las orillas de los antiguos lagos, P1.ZumS, P2.XalN01 y P6.XalT05.

Se había planteado la hipótesis de que los suelos de las zonas con mayor tiempo de exposición a la intemperie tendrían un mayor grado de desarrollo. Esto no se cumplió del todo. Hay tres perfiles con un tiempo de exposición mayor: el primero es el perfil P1.ZumS con un aproximado de 200 años de exposición, es el único que cumple con la hipótesis propuesta, ya que presenta una mejor estructura, una mayor acumulación de MO, presencia de slickensides, además de una menor salinidad. Los otros dos perfiles con mayor tiempo de desarrollo son los perfiles P2.XalN01 y P6.XalT05 con un aproximado de 100 años de exposición a la intemperie, no presentan un buen desarrollo. P2.XalN01 tiene una mayor MO acumulada que P6.XalT05. Los perfiles más jóvenes P3.XalN02, P4.XalT03 y

P5.XalT04 tienen poco grado de desarrollo, poca acumulación de MO, pocos rasgos pedogenéticos.

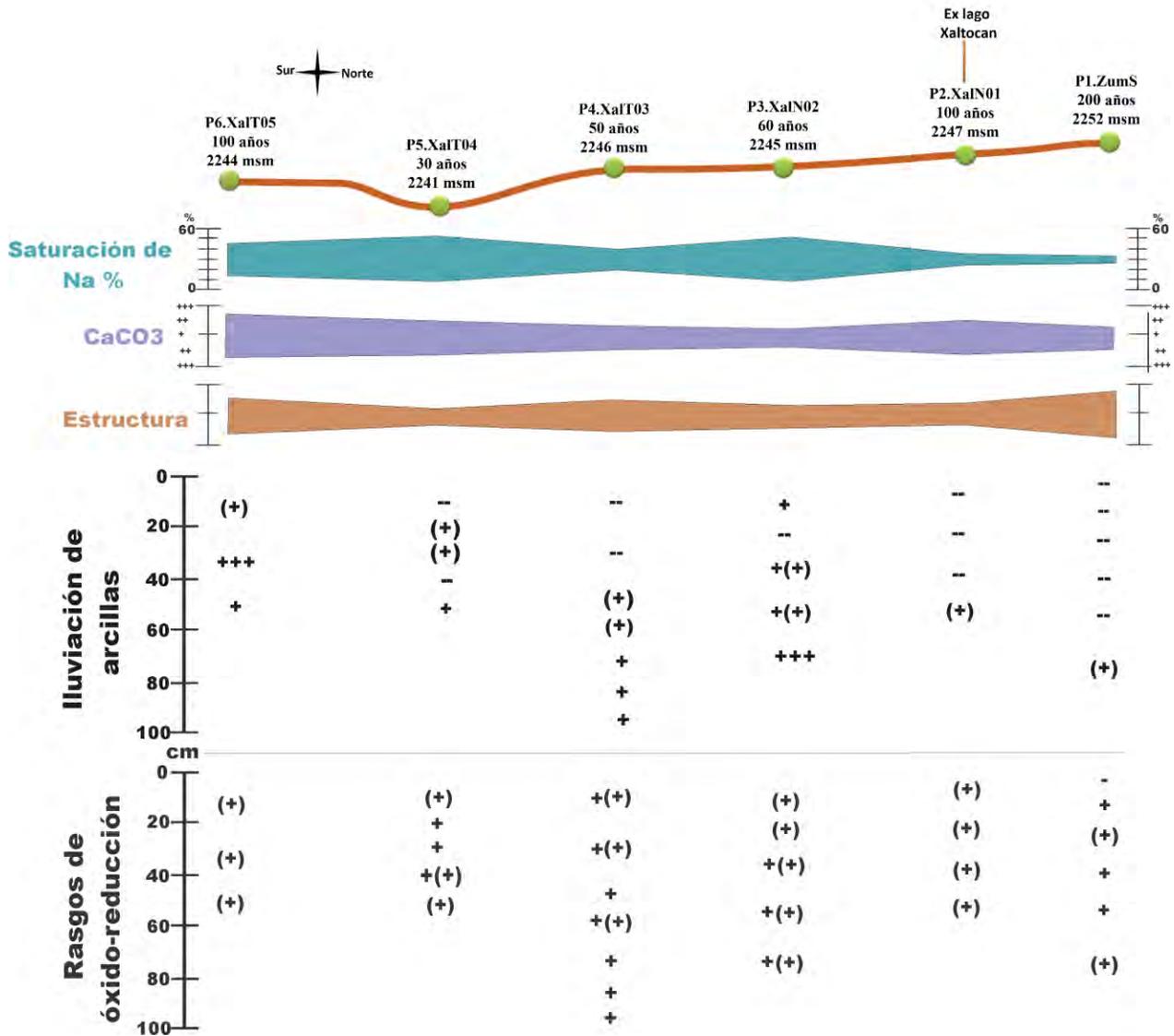


Figura 52. Resumen de los principales procesos pedogenéticos encontrados en la topocronosecuencia: movilización de sal, precipitación de carbonatos, desarrollo de estructura de los perfiles y presencia de rasgos de óxido-reducción, iluviación de arcillas a profundidad de cada perfil.

La lixiviación de sales, se cumple, en función de lo esperado. Con respecto a la altitud de los diferentes perfiles de suelo hechos en la catena, se observa una movilidad de sal de los sitios con mayor altitud hacia los sitios de menor altitud. En estos últimos está habiendo una gran acumulación de sal. Ya que los lagos eran salinos, el agua dejó una gran cantidad de sales solubles en los sedimentos, misma que ahora se está lavando y acumulando en

función del gradiente altitudinal. Se esperaba una precipitación de carbonatos debido al clima del sitio, este proceso está ocurriendo en todos los perfiles de suelo; en las playas lacustres del lago de Xaltocan hay una gran acumulación de estos carbonatos, también hay una posible migración hacia los sitios con menor altitud (por disolución). En cuanto a los rasgos de óxido-reducción también se esperaban tanto por las fluctuaciones del lago cuando existía y ahora por las vacilaciones del manto freático; por los resultados mostrados en la micromorfología podemos decir que hay una mayor presencia de estos rasgos en lo que fuera la parte central del lago Xaltocan y una menor en lo que fueran las playas lacustres. En cuanto a la neoformación de óxidos de hierro se esperaban más en las zonas de mayor tiempo de desecación. Sin embargo al ser suelos muy jóvenes no se puede determinar con exactitud; según las gráficas de extracción de hierro con ditionito y oxalato, en el perfil P1.ZumS si hay una mayor cantidad de hierro extraído con ditionito, pero la diferencia con el extraído con oxalato no es mucha. En todos los demás perfiles la cantidad de hierro extraído con ditionito es mínima, por lo que se infiera que estos suelos son jóvenes.

## 8. Conclusiones

De acuerdo a lo esperado, el perfil que presentó más desarrollo en su pedogénesis es P1.ZumS, es el perfil con mayor tiempo expuesto a la intemperie. Tiene mayores rasgos pedogenéticos y la sal de ese suelo se ha movilizadado a las partes con menor altitud. Los perfiles P2.XalN01 y P6.XalT05 que tienen un tiempo medio de exposición a la intemperie, presentan un avance de pedogénesis incipiente, el cual no es muy diferente al de los suelos más jóvenes (P3.XalN02, P4.XalT03 y P5.XalT04). Los suelos más jóvenes tienen menor grado de desarrollo, menor MO acumulada y una estructura aun no desarrollada en gran parte del perfil, los rasgos de pedogénesis son mínimos.

La sal es un factor que está influyendo en algunos de los procesos que están ocurriendo en el suelo de la zona de estudio. Por una parte, está actuando como un factor de dispersión tanto de agregados (ya que casi en todos los casos es de grado débil lo que está provocando un mal desarrollo de la estructura), como de arcilla. La iluviación de arcillas, está formando revestimientos de arcillas en caras de los agregados o bien esta rellenoando poros. Estos revestimientos son de formación rápida ya que los suelos son jóvenes y están junto a la precipitación de carbonatos. Se le atribuye este proceso de iluviación promovida por la dispersión, a momentos de inundaciones que hacen que la arcilla se iluvie y vaya mezclada con algunos limos y también a las prácticas agrícolas que tuvieron algunos sitios. La acumulación de sal está provocando un pobre crecimiento de plantas en los suelos y por ende una baja acumulación de MO, además de que el alto contenido de sales se refleja en una mínima o nula presencia de microorganismos en el suelo, todo esto trae como consecuencia un bajo desarrollo de la pedogénesis.

El relieve está influyendo en estos procesos. Hay una movilización de sales solubles hacia las partes bajas de la catena, donde la sal se está acumulando y ocasionado mayores problemáticas para la funcionalidad del suelo. También la precipitación de carbonatos presenta una relación en función del relieve. Debido a esto es más correcto decir que este estudio está hecho en una topo-cronosecuencia.

## Bibliografía

Abdel Aal T.S. e Ibrahim A.M. (2013). Studies on the micromorphology of salt-affected soils from El-Fayoum depression, Egypt. In: Shahid S., Taha F., Abdelfattah M. (eds) Developments in Soil Classification, Land Use Planning and Policy Implications. Ed. País. 373-392.

Arce J.L., Layer P.W., Lassiter J.C., Benowitz J.A., Macías J.L. y Ramírez-Espinosa J. (2013).  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, geochemistry, and isotopic analyses of the quaternary Chichinautzin volcanic field, south of Mexico City: implications for timing, eruption rate, and distribution of volcanism. *Bull Volcanol* 75:774, 3-25pp.

Barrera Franco M.G. (2000). Distribución espacio-temporal de la salinización y sodificación del suelo en la zona federal del ex Lago de Texcoco, Edo. de México. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM, México.

Barros Pena N., Merino Garcia A., Martin Pastor M., Pérez Cruzado C. y Hansen L. (2014). Changes in soil organic matter in a forestry chronosequence monitored by thermal analysis and calorimetry. *Spanish Journal of Soil Science*. Vol.4, 239-253pp.

Baver L.D, Gardner Walter H. y Gardner Wilford R. (1972) Física de suelos 4º edición, John Wiley y Sons, Nueva York. Primera impresión en español (1991), LIMUSA, País.

Berry Margaret E. (1987). Morphological and chemical characteristics of soil catenas on pinedale and bull lake moraine slopes in the Salmon River Mountains, Idaho. *Quaternary Research* 28, 210-225.

Blume H.P. y Schwertmann U. (1969). Genetic evolution of profile distribution of aluminium. Iron and manganese oxides. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc*, 33: 498-444.

Brady N.C. y Buckman Harry O. (1982). Naturaleza y propiedades de los suelos. UTEHA (Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, S.A. de C.V.).

Brady N.C. (1984). The nature and properties of soils. Ninth edition, MACMILLAN PUBLISHING. New York.

Brady N.C. y Weil, R.R. (2008). The nature and properties of soils, 14a. ed., Prentice Hall International Editions.

Bronick C.J. y Lal R. (2004). Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3-22.

Birkeland P.W. (1984). Soils and geomorphology. Oxford University. New York, 372pp.

Birkeland P.W. (1992). Quaternary soil chronosequences in various environments-extremely arid to humid tropical. In: Martini I.P., Chesworth, W. (eds) Weathering soils and paleosols developments in Earth surface processes, Elsevier, The Nether lands 261-281pp.

- Bockheim J.G., Gennadiyev A.N., Hammer R.D., Tandarich J.P. (2001). Historical development of key concepts in pedology. *Geoderma* 124(2005) 23-36pp.
- Bouwer, C.A., R.F. Reitmeier y R. Fireman. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci.* 73,251.
- Burns Elena y colaboradores. (2009). Repensar la cuenca. Gestión de los ciclos del agua en el Valle de México. UAM.
- Brumfiel Elizabeth M. (2005). La producción local y el poder en el Xaltocan Posclásico. INHA y Universidad de Pittsburgh.
- Brumfiel Elizabeth M. (2009). El estudio de la clase común: el asentamiento de Xaltocan durante el Posclásico en la cuenca de México. *Cuicuilco*, No. 47.
- Calero González J.A. (2005). Génesis de la fracción mineral y de la ultramicrofábrica en una cronosecuencia de suelos sobre terrazas el río Guadalquivir. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 743pp.
- Castellanos J.Z., Uvalle Bueno J.X y Aguilar Santelises A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2ª edición. Colección INCAPA. México.
- Comisión Nacional del Agua. (2012). Programa Hídrico Regional Visión 2030. Región hidrológico-administrativa XIII aguas del Valle de México.
- Comisión Nacional del Agua. (2014). El agua que mueve a México. XXV aniversario de la Comisión Nacional del Agua.
- Cruz Cruz, Tamara (2016). Geoarqueología y cambios ambientales del pleistoceno tardío-holoceno en el noroeste de México: un enfoque paleopedológico. Tesis doctoral, Instituto de Geología, UNAM, México.
- Cruz Cruz, Tamara (2011). Paleoambientes del cuaternario tardío en Sonora a partir del registro paleopedológico. Tesis de Maestría, Instituto de Geología, UNAM, México.
- Díaz-Rodríguez, J. A., Lozano-Santa Cruz, R., Dávila-Alcocer, V.M., Vallejo, E. y Girón, P. (1998). "Physical, chemical, and mineralogical properties of Mexico City: a geotechnical perspective", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 600-610.
- Díaz-Rodríguez J.A. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol.6(2)111.
- Ezcurra Exequiel (1990). De las chinampas a la megalópolis. El medio ambiente en la cuenca de México. Fondo de Cultura Económica. Ciudad de México. 85pp.
- Fernández Buces N. (2006). Variabilidad espacial de la salinidad y su efecto en la vegetación en el ex Lago de Texcoco: implicaciones para su monitoreo por percepción remota. Tesis doctoral, Instituto de Geología, UNAM, México.
- Flores D.L. y Alcalá M.J.R. (2010). –manual de procedimientos analíticos del laboratorio de física de suelos. Departamento de edafología. Instituto de Geología, UNAM.

Frederick, Charles D.; Winsborough Barbara; Popper Virginia S. (2005). Geoarchaeological investigations in the Northern Basin Mexico. INHA y Universidad de Pittsburgh.

Galina Macias J.A. (2010). Drenaje profundo en la Ciudad de México. Anuario 2010.

Gamble E.E. y Daniels R.B. (1972). Iron and Silica in water, acid ammonium Oxalate, and dithionite extracts of some North Carolina Coastal Plain Soils. Soil SCI. AMER. PROC., Vol. 36.

García-Cook, A. (1985). Historia de la tecnología agrícola en el altiplano central desde el principio de la agricultura hasta el siglo XIII: 7-75. In: Rojas-Rabiela, T. and W. T. Sanders: *Historia de la agricultura Época Prehispánica-siglo XVI*. Colección Biblioteca del INAH, Instituto Nacional de Antropología e Historia. México D.F., México.

González Silvia, David Huddart, Israde-Alcántara I, Domínguez-Vázquez G, James Bischoff, Nicholas Felstead. (2015). Paleoindian sites from the Basin of Mexico: Evidence from stratigraphy, tephrochronology and dating. *Quaternary International*, 363: 4-19.

González S., Jiménez-López J.C., Hedges R., Huddart D., Ohman J.C., Turner A., (2003). Earliest humans in the Americas: new evidence from Mexico. *Journal of Human Evolution* 44, 379e387.

González Morales L. Abraham. (2011). Enrico Martínez y el primer desagüe artificial en Nueva España. Tesis de Maestría, UNAM, México.

Gutiérrez-Castorena Ma de C. y Ortiz Solorio C.A., (1992). Caracterización de los suelos antropogenicos con problemas de labranza en el ex-lago de Texcoco. *Agrociencia serie Agua-Suelo-Clima*, Vol. 3, No. 2.

Gutiérrez-Castorena Ma de C. y Ortiz Solorio C.A., (1999). Origen y evolución de los suelos del ex lago de Texcoco, México. *Agrociencia*, Vol. 33, No. 2.

Gutiérrez-Castorena Ma de C, Stoops G. y Ortiz Solorio C.A., (1998). Carbonato de calcio en los suelos del ex Lago de Texcoco. *Terra*, Vol. 16 No. 1.

Harden J.W. (1982). A quantitative index of soil development from field descriptions: examples for a chronosequence in central California. *Geoderma* 28:1-28pp.

Hinojosa Espinoza Felix J.C. (2016). Cronosecuencia de suelos en los cordones litorales holocenicos del Bajo Grijalva, México. Tesis de Maestría, Instituto de Geología, UNAM, México.

Hodgson, J.M. (1978): Soils sampling and soil description. Monographs on soils survey. Oxford University Press.

Huang C.M., Retallack G.J. y Wang C.S. (2012). Early Cretaceous atmospheric pCO<sub>2</sub> levels recorded from pedogenic carbonates in China. *Cretaceous Research* 33: 42-49.

Huggett R.J. (1998). Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review. *Catena* 32, 155-172pp.

Huseyin Ozaytekin H., Huseyin Mutlu H. y Dedeoglu M. (2012). Soil formation on a calcic chronosequence of Ancient Lake Konya in Central Anatolia, Turkey. *Journal of African Earth Sciences*. 76, 66-74.

ISRIC, (1992). Procedures for soil analysis. Third Edition. Ed: L.P. van Reeuwijk. Technical Paper No.9, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen.

Jazcilevich Diamant A., Siebe C., Estrada C., Aguillón J., Rojas A., Chávez García E. y Sheinbaum Pardo C. (2015). Restos y oportunidades para el aprovechamiento y manejo ambiental del ex Lago de Texcoco. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V.67, No.2, 145-166pp.

Jenny H. (1941). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. New York. McGraw-Hill. Foreword by Ronald Amundson, 1994, in the University of California, Berkeley.

Johnson B.G., Layzell A.I. y Eppes M.C. (2015). Chronosequence development and soil variability from a variety of sub-alpine, post-glacial landforms and deposits in the southeastern San Juan Mountains of Colorado. *Catena* 127, 222-239.

Juárez M., Auvinet G., Hernández F. y Méndez E. (2011). Contribución a la caracterización geotécnica de la zona norte de la cuenca de México. *Geotechnical Conference. Pan-Am CGS*.

Jurinak J.J. (1996). The chemistry of salt affected soils and waters. In Tanji, Kenneth K., ed. *Agricultural Salinity Assessment and Management*, American Society of Civil Engineers, Nueva York, 42-63 pp.

Kalinina Olga, Barmin A.N., Chertov O., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V., Lyuri D.I., Luise Giani (2015). Self-restoration of post-agrogenic soils of Calcisol–Solonetz complex: Soil development, carbon stock dynamics of carbon pools, *Geoderma*, Volumes 237–238, 117-128pp.

Krasilnikov Pavel, Jiménez Nava F.J., Reyna Trujillo T. y García Calderón N.E. (2011). *Geografía de suelos de México*. Facultad de Ciencias, UNAM, México.

Kraus M.J. (1992). Alluvial response to differential subsidence: sedimentological analysis aided by remote sensing, Willwood Formation, Eocene, Bighorn Basin, Wyoming. *Sedimentology* 37, 455-470pp.

Kraus M.J. (1997). Lower Eocene alluvial paleosols: pedogenic development, stratigraphic relationships and paleosol-landscape associations. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 129, 387-406pp.

Kraus M.J. y Aslan A. (1999). Paleosol sequence in flood plain environments: a hierarchical approach. In: *Palaeoweathering, Palaeosurfaces and continental deposits*, ed M. Thiry y R. Simon-Coin Con, International Association for Sedimentology, Special Publication 27, 303-371pp.

Lal R. y Shukla M.K. (2004). *Principles of soil physics*. CRC Press. New York, USA.

Lara O. (1988). El agua en la Ciudad de México, *Gaceta UNAM*, 45(15), 20-22pp.

Lebedeva-Verba M.P. y Gerasimova M.I. (2009). Macro- and micromorphological features of genetic horizons in a Solonchic soil complex at the Dzhanibek research station. *Euroasian Soil Science*. Vol. 42, No. 3, 237-250pp.

Lebedeva-Verba M.P., Gerasimova M.I. y Konyushkova M. (2009). Micromorphology of Solonchic horizons as related to environmental events in the Caspian Lowland. *J.Mt. Sci.* 6:132-138.

Loaiza J.C., Stoops G., Poch R.M. y Casamitjana M. (2015). Manual de la micromorfología de suelos y técnicas complementarias. Fondo editorial Pascual Bravo, Medellín, Colombia, 384pp.

Manual de operación del analizador CNHS Perkin Elmer 2400 series II.

Martínez de Vega M. Elisa. (1995). La laguna y el problema del desagüe 1600-1635. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, núm. 14.

Mehra, O.P. y Jackson M.L. (1960). Iron oxide removal from soils and clays by a ditionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate buffer. *Clays and Clay Miner.* Vol.7, 317-327.

Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal, Tomo I. (1975). Secretaría de Obras y Servicios del Departamento del Distrito Federal. México. "Hidráulica Urbana". Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Gobierno del Distrito Federal. No. 1-5.

Método de Olsen *et al.* reportado en: *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological properties* (1965). C.A. Black, editor in Chief. Number 9 in the series *Agronomy: American Society of Agronomy, Inc., Publisher. Madison, Wisconsin, USA.* pp. 1045-1046.

Mille W.R. y Donahue L.R. (1995). *Soils in our Environment*. Prentice Hall. Nueva York, 320 pp.

Millhauser J.K. (2013). La sal y la vida diaria en San Bartolomé Salinas, Estado de México. Informe final presentado al consejo de arqueología del Instituto Nacional de Antropología e Historia para su aprobación. 320pp.

Miller A. (2009). *Water Mountain: A GIS Analysis of Xaltocan's Integration into the Aztec Empire*, Tesis de licenciatura en Antropología, Evanston, Northwestern University.

Mooser F., Montiel A. y Zuñiga A. (1996). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla, Comisión Federal de Electricidad, México.

Mosser F. (1987). Geología, Garza, G. (comp.), *Atlas de la Ciudad de México*, Departamento del Distrito Federal y El Colegio de México, México, 23-29pp.

Munsell Color (1990). *Munsell soil colors charts*. Macbeth Division of Koll Morgan Corporation Baltimore Maryland.

Nascimento A.F. do (2012). *Relações pedologia-geomorfologia-sedimentologia no Pantanal Norte*. Tesis doctoral. Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

Ochando Luis E. y Amigó Josep M. (2012). Geología I química del cosmos I de la Tierra. Servei de publications, Universitat de valencia, España, 2001, 408-409pp.

Oliveira Junior J.C. de, Chiapini M., Nascimento A.F. do, Couto E.G., Beirigo R.M., y Vidal-Torrado P. (2017). Genesis and classification of sodic soils in the Northern Pantanal. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 41:e0170015.

Parsons J.R. (1976). Settlement and population history of the Basin of México, en E. R. Wolf (comp.), The Valley of México: Studies in Prehispanic Ecology and Society, University of New México Press, Albuquerque, 69-100pp.

Peña Ramirez V.M. (2013). Dinámica de la calidad de sitio a través de una cronosecuencia volcánica y sus implicaciones para la productividad forestal. Tesis de doctorado, Instituto de Geología, UNAM, México.

Peña Santana P. y Levi E. (1989). Historia de la hidráulica en México: Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el Porfiriato. Instituto Mexicano de Tecnología del agua, Comision Nacional del Agua. No. 25.

Porta Casanellas J., López-Acevedo Reguerín M. y Roquero de Laburu C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Segunda edición, Mundi-Prensa, España. 849pp.

Procedures for soil analysis. (1992). Edited by L.P. van Reeuwijk. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen 9-6 – 9-8.

Reséndiz-Paz Ma de la L.; Gutiérrez-Castorena Ma de C.; Gutiérrez-Castorena E.V.; Ortiz-Solorio C.A.; Cajuste-Bonotemps L. and Sánchez-Guzmán. (2013). Local soil knowledge and management of Anthrosols: A case study in Teoloyucan, Mexico. Geoderma 193-194, 41-51pp.

Ramos Arroyo Y.R. y Siebe Grabach C.D. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 23, No. 1, 54-74pp.

Retallack G.J. (1994). The environmental factor approach to the interpretation of paleosols. In: Factors in soil formation: a Fiftyeth Anniversary Retrospective. ed R. Amundson, J. Harden y M. Singer, Soil Science Society of America Special Publication 33, 31-64pp.

Retallack G.J. (2001). Soils of the past. An introduction to paleopedology. Second Edition. Blackwell Science. USA.

Richards L.A., Alison L.E., Brow J.W., Hayward L.A. (1973). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. ed Limusa, Ciudad de México, 172pp.

Rodríguez-Alegría E. (2008). De la edad de piedra a la edad de más de piedra. Cuadernos de Arqueología Mediterránea, Vol. 17.

Rojas Rabiela T. (1974). Aspectos tecnológicos de las obras hidráulicas coloniales. En Nuevas noticias sobre las obras hidráulicas prehispánicas y coloniales en el valle de México, México Centro de Investigaciones Superiores-Instituto Nacional de Antropología e Historia. 115pp.

SACMEX (2012). El gran reto del agua en la Ciudad de México. Pasado, presente y perspectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. 192pp.

SACMEX (2013). El gran reto del agua en la Ciudad de México, pasado, presente y perspectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. 192pp.

Schaetzl R. y Anderson S. (2005). Soil: Genesis and geomorphology. Cambridge University press. New York. 817pp.

Schaetzl R.J. y Thompson M.L. (2015). Soils: génesis and geomorphology. 2° edition. Cambridge University press. 777pp.

Schlichting E., Blume H.P., Stahr K (1995). Bodenkundliches Praktikum. 2° ausgabe, Pareys studentexte 81, Blachwell Wissenschaft, Berlin.

Schlichting, E. y Blume H.P. (1966). Bodenkundliches Praktikum, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

Schwertmann, U. (1964) Differenzierung der Eisenoxide des Bodens Durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung Z.Pflanzenemälhr Düng, Bodenk, 105, 194-202.

Sauer D. Finke P. Sørensen R., Sperstand R., Schüllli-Maurer I., Høeg H. y Stahr K. (2012). Testing a soil development model against southern Norway soil chronosequences. Quaternary International, 265, 18-31pp.

Scarciglia F., Pulice I., Robustelli G. y Vecchio G. (2006). Soil chronosequences on Quaternary marine terraces along the northwestern coast of Calabria. Quaternary International, 156-157, 133-155pp.

Siebe Ch., R. Jahn y K. Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación de suelos en el campo. Publicaciones Especiales no.4. Sociedad Mexicana de la ciencia del Suelo, Chapingo, México

Siebe, C., Jahn, R. y Stahr, K., (2006). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. 2da Ed. UNAM.

Soils survey manual (1993). Soil Survey Division Staff. United States Department of Agriculture Handbook No.18, United States Department of Agriculture, Washintong, DC, USA.

Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed. US Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.

- Stevens P.R. y Walker T.W. (1970). The chronosequence concept and soil formation. *The Quarterly Review of Biology*. Vol. 45. No. 4, 333-350pp.
- Stoops G. (1986). The future of micropedogy. *Pedologie, Bulletin de la Société Belge de Pédologie*. XXXVI-3, p. 225-233, Ghent.
- Stoops G. (2013). A micromorphological evaluation of pedogenesis on Isla Santa Cruz (Galápagos). *SJSS*. Vol. 3, No. 2.
- Tamm O. (1922). Eine Methode zur Bestimmung der anorganischen Komponenten des Gelkomplexes im Boden. *Medd. Statens Skogsförsöksanstalt* 10, 385-404.
- Tanji, K.k. (1996). Agricultural salinity assessment and management. American Society of Civil Engineers. New York, N.Y. 569 pp.
- Targulian V.O. y Krasilnikov P.V. (2007). Soil system and pedogenic processes: self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena* 71:373-38 Huseyin 1pp.
- Tsai C.C., Chen Z.S., Kao C.I., Ottner F., Kao S.J., y Zehetner F. (2010). Pedogenic development of volcanic ash soils along a climosequence in Northern Taiwan. *Geoderma*, 156, 48-59pp.
- Valadez Azúa R. y Rodriguez Galicia B. (2005). Restos de fauna en Xaltocan. En Brumfiel E. Mc (coord.). *La producción local y el poder en el Xaltocan Posclásico, México y Pittsburh*, INAH/The University of Pittsburgh, 234-246pp.
- Valencia G.J. (2007). Contribución a la zonificación geotécnica de la zona norte del Valle de México, Tesis de Maestría, ESIA Zacatenco, IPN, México.
- Vidic N.J. (1998). Soil-age relations and correlations: comparison of chronosequences in the Ljubljana Basin, Slovenia and USA. *Catena* 34, 113-129pp.
- Vreeken W.J. (1975). Principal kinds of chronosequences and their significance in soil history. *J. Soil Sci.* 26:378-394pp.
- Zhang Gan-Lin, Ji-Hua Pan, Cheng-Min Huang y Zi-Tong Gong (2007). Geochemical features of a soil chronosequence developed on basalt in Hainan Island, China. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 24(2), 261-269pp.

## Mapas consultados

Almaraz Ramón, Francisco Díaz Covarrubias, Iglesias Miguel, José Antonio de la Peña, Mariano Santa María (1862). Carta hidrográfica del Valle de México levantada de orden de misterio de fomento. Varilla: OYBPAR72501. Colección Mapoteca Manuel Orozco y Berra.

E. Manero (1875). Plano como no he visto otro semejante en que se compare la superficie ocupada en El Valle de México en diversas épocas, por las aguas de los lagos. Varilla: OYBPAR72501 (B y C). Colección Mapoteca Manuel Orozco y Berra.

Espinoza L. (1879). Plano general del sistema de desagüe de los lagos de: Texcoco, San Cristobal, Xaltocan y Zumpango. En:  
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/353/A4.pdf?sequence=4>

Garay Francisco De (1856). Plano General de La Mesa del Valle de México. Varilla: CGVM02. Mapoteca Manuel Orozco y Berra, Colección General.

Garay Francisco De (1856). Plano General de La Mesa del Valle de México con indicación de los canales de desagüe, navegación y riego. Varilla: CGVM01. Mapoteca Manuel Orozco y Berra, Colección General.

Google (s.f.). Mapa de las zonas de Zumpango, Nextlalpan y Tonanitla. Revisado en el 2016 de:  
<https://www.google.com.mx/maps/@19.7042101,-99.0635762,12.5z>

INEGI. Carta Edafológica (2016). Texcoco E14B21.

INEGI. Carta Edafológica (2016). Tizayuca E14B11.

Lagreto (1871). Perfil Longitudinal de la línea aprobada para el desagüe del Valle de México. Varilla: CGMEX11. Mapoteca Manuel Orozco y Berra, Colección General.

Mauricio (Redujo) (1856). Plano General de La Mesa del Valle de México con indicaciones de los canales de desagüe, navegación y riego. Varilla: OYBPAR72502. Colección Mapoteca Manuel Orozco y Berra.

Sagredo E.M. (1865). Plano de terreno estudiado por Zumpango para el desagüe del Valle de México. Varilla: CGMEX06. Mapoteca Manuel Orozco y Berra, Colección General.

Sandoval Rosendo (1898). Trazo de la línea desagüe del Valle de México. Varilla: CGVM02. Mapoteca Manuel Orozco y Berra, Colección General.

Secretaria de Comunicaciones y Obras Públicas. Comisión Hidrográfica del Valle de México. Varilla: CGVM02. Mapoteca Manuel Orozco y Berra, Colección General.

Secretaria de Recursos Hidráulicos (1958). Texcoco 14Q-h(2). Estudio Cartográfico Hispanoamericano. Instituto de Geografía, UNAM.

## **Comunicación personal en campo**

Begines Juárez, Juan Manuel (2016). Cronista del municipio de Nextlalpan.

Camacho, Emilio (2016). Comisario ejidal de Tonanitla.

Flores Rodríguez, Felipe (2016). Cronista del municipio Tonanitla.

Granillo, Néstor (2016). Cronista del Municipio de Tecámac.

González Enríquez, Margarita (2016). Delegada de Nextlalpan.

Martínez García, Arturo. (2016). Habitante del municipio de Nextlalpan.

Martínez Soto, Ilario (2016). Habitante de Tonanitla.

Moreno matinez, Jorge (2016) Habitante de Tonanitla.

Ortiz Rodríguez, Eladio (2016). Habitante de Tonanitla.

Rodríguez Ramo, Cleto (2016). Secretario del comisario ejidal.

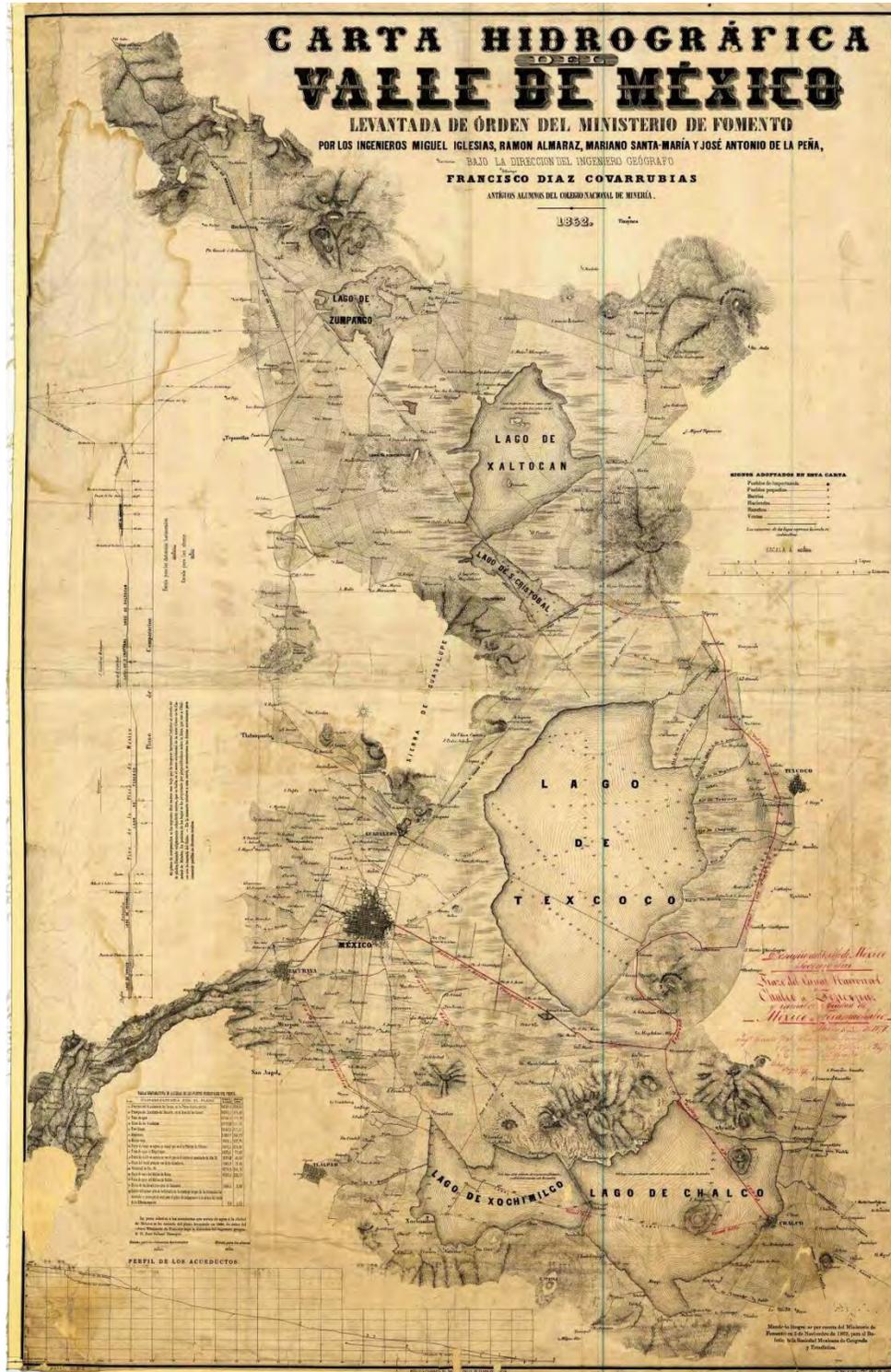
Romo López, Efrén (2016). Habitante de Tonanitla.

Sanchez, Ranulfo (2016). Habitante de Tonanitla.

Sr. León (2016). Habitante de Tonanitla.

Anexo

Figura 53. Carta hidrográfica del Valle de México. Levantada de orden de ministerio de fomento”, por Francisco Díaz Covarrubias y colaboradores, en el año 1862. Línea roja representa la ruta del desagüe de los lagos.



## Descripciones de perfiles

Descripciones de características físicas y químicas *in situ* de los perfiles de suelo que conforman la cronosecuencia realizada en los antiguos lagos de Zumpango y Xaltocan, en el Estado de México. Cabe mencionar que la nomenclatura de los horizontes es la descrita en campo, posteriormente, gracias a la Micromorfología, se observó que la gran mayoría de los horizontes contenían carbonatos pedogenéticos por lo que en resultados se colocó el sufijo “k (figura 22). En esta descripción de perfiles únicamente se presenta lo descrito en campo.

### P1.ZumS



#### 1) Información acerca de la localidad

- Número de perfil: 1
- Antigüedad: 200 años
- Nombre del sitio: Rancho Venecia, parte sur del antiguo lago de Zumpango.
- Clasificación de suelo (WRB, 2014): Haplic **Kastanozem** (Aric, Clayic, Loamic, Pachic, Raptic, Protovertic).
- Fecha de descripción: 28-05-2016
- Autor: José Manuel Bautista Guzmán, Dra. Christina Siebe G.
- Localización: San Bartolo Tlaxihuicalco, Edo. de México, tomando la carretera México 35, coordenadas 19°44'6080''N, 99°9'3.74''O.
- Altitud: 2252 msm

- Forma del terreno: valle.
- Pendiente: inclinación 0°
- Uso del suelo/vegetación: parcela que se sembró alfalfa 3-4 años.
- Clima: CW templado subhúmedo (según la clasificación de INEGI, 2016).

## 2) Información general acerca del suelo.

- Material parental: el suelo se desarrolla en lo que fue un lindero lacustre (depósitos lacustres y aluviales).
- Drenaje natural: medio a bajo.
- Condiciones de humedad en el perfil: fresco en todos los horizontes y en el último de fresco a seco.
- Profundidad al manto freático: desconocido.
- Presencia de rocas superficiales: no hay presencia.
- Evidencia de erosión: no presenta.
- Presencia de sales o soda: si muy poca, ya que fue un lago salino.
- Influencia humana: sembrado durante 3-4 años con alfalfa.

## 3) Descripción del perfil.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-4	El horizonte presentó una textura CR (franca arcillosa), con 0% de pedregosidad, color 10YR 2.5/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 0.5%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo migajón a granular con grado moderado y una estabilidad de agregados media; con muchos poros tubulares e intersticiales, y una densidad aparente de 1, la densidad de raíces alta y un límite claro uniforme.
mAp	4-17	El horizonte presentó una textura CR-R (franca arcillosa-arcillosa), con 1% de pedregosidad, color 10YR 2.5/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 0.5%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo masivo a subangular con grado débil y una estabilidad de agregados alta. Porosidad comunes tubulares e intersticiales, y una densidad aparente de 1.2, la densidad de raíces alta y un límite claro.
Ah	17-36	El horizonte presentó una textura R (arcillosa), con 1% de pedregosidad. Color 10YR 2.5/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 1-2%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo subangular a angular con grado moderado y una estabilidad de agregados alta. Con muchos poros vesiculares y tubulares. Una densidad aparente de 1.3, la densidad de raíces muy alta y un límite gradual. Presentan pocos recubrimientos oscuros en poros, caras de agregados y canales.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
ABss	36-48	El horizonte presentó una textura CR-(CRA) (franca arcillosa (franca arcillosa arenosa)), con 0% de pedregosidad. Color 10YR 2.5/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 2-10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo subangular a angular con grado moderado y una estabilidad de agregados media. Con poros comunes vesiculares y tubulares. Una densidad aparente de 1.2, la densidad de raíces alta y un límite gradual. Hay rasgos de slickensides. Presentan pocos recubrimientos oscuros en poros, caras de agregados y canales.
B(ss)	48-60	El horizonte presentó una textura C-CRAR (franca a franca arcillosa arenosa), con 0% de pedregosidad. Color 10YR 2.5/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 2-10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo subangular a angular con grado débil y una estabilidad de agregados alta. Con poros comunes vesiculares y tubulares. Una densidad aparente de 1.3, la densidad de raíces muy alta y un límite gradual. Aun presenta rasgos de slickensides pero en menor cantidad. Presentan pocos recubrimientos oscuros en poros, caras de agregados y canales.
C	60-75	El horizonte presentó una textura CRA-RA (franca arcillosa arenosa – arcillo arenosa). Con 1% de pedregosidad. Color 2.5Y 6/2 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 2-10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo masiva a subangular con grado débil y una estabilidad de agregados media. Con poros comunes tubulares. Una densidad aparente de 1.6, la densidad de raíces alta y un límite claro.

**4) Interpretación de las características del suelo:** el material parental del suelo está constituido por depósitos lacustres y aluviales, esta parte fue parte de un límite del antiguo lago de Zumpango, por lo que no fue del todo depósitos de sedimento fino. Tiene alrededor de 200 años de desecación. Presenta un pH neutro. Casi todo el perfil presenta un buen contenido de materia orgánica. Tiene características alcalinas y un ligero contenido de sal debido a las características del lago. En los primeros dos horizontes presenta características de labrado. Las texturas son arcillosas en casi todo el perfil. Sin embargo, del horizonte 4 hacia el más profundo presenta texturas arenosas probablemente por el choque del agua en las orillas. En los horizontes ABss y B(ss) hay presencia de slickensides, probablemente hay arcillas 2:1. A partir del horizonte 3 (Ah) presenta recubrimientos oscuros, en poros y caras de agregados, que probablemente sean de arcillas con materia orgánica. La densidad es alta en casi todo el perfil, la densidad de raíces también es alta lo que

ayuda a que se formen los agregados. En la parte final del perfil presenta una estructura masiva de color muy claro, tipo caliche, y en la parte superior predominan las características verticas.

- 5) **Características ecológicas:** presenta bajas condiciones de salinidad lo que ayudara a un buen desarrollo de las plantas. La estructura de los primeros horizontes es buena para un buen manejo de la agricultura. Esto se puede observar en una buena densidad de raíces. En general presenta condiciones medianas a bajas de drenaje. Esto hace que el riego o aportación de agua debe controlarse ya que es probable que tenga problemas de inundación por el tipo de arcillas. Además de inconvenientes por las grietas formadas. Se debe cuidar los productos agregados al plantío o suelo, debido a la filtración de lixiviados. No se recomienda trabajarlo en épocas de lluvias, ya que sus condiciones serán adhesivas y su secado provocara endurecimiento.

## P2.XalN01



### 1) Información acerca de la localidad

- Número de perfil: 2
- Antigüedad: 100 años.
- Nombre del sitio: San Francisco Molonco, municipio Nextlalpan, antigua isla llamada Xacayohualco.
- Clasificación de suelo (WRB, 2014): Calcic **Kastanozem** (Aric, Loamic, Raptic, Katosodic).
- Fecha de descripción: 29-06-2016
- Autor: José Manuel Bautista Guzmán, Dra. Lucy Mora.
- Localización: San Francisco Molonco, Nextlalpan, Edo. de México, Av. Victoria, coordenadas 19°44'44.86''N, 99°3'25.04''O.
- Altitud: 2247 msm
- Forma del terreno: llano, con pequeña elevación.
- Pendiente: inclinación 0°
- Uso del suelo/vegetación: ninguna, en el futuro será panteón.
- Clima: BS1 semiseco (según la clasificación de INEGI, 2016).

## 2) Información general acerca del suelo.

- Material parental: el suelo se desarrolla en lo que fue un lindero lacustre (depósitos lacustres y aluviales).
- Drenaje natural: bueno.
- Condiciones de humedad en el perfil: seco en el primer horizonte a fresco en el resto y en el último de fresco a seco.
- Profundidad al manto freático: desconocido.
- Presencia de rocas superficiales: no hay presencia.
- Evidencia de erosión: no presenta.
- Presencia de sales o soda: si, ya que fue parte del lago de condiciones salinas.
- Influencia humana: ninguna.

## 3) Descripción del perfil.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap	0-4	El horizonte presentó una textura C (franca), con 0% de pedregosidad, color 2.5Y 2.5/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10 %. Humedad de tipo seca. Su estructura fue tipo granular. Con muchos poros esféricos, y una densidad aparente de 1, la densidad de raíces mediana y un límite difuso.
Ah	4-33	El horizonte presentó una textura C (franca). Con 0% de pedregosidad, color 2.5Y 2.5/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10%. Humedad de tipo fresca. Su estructura fue tipo subangular con grado medio y una estabilidad de agregados mediana. Porosidad pocos comunes tubulares y vesiculares, y una densidad aparente de 1.5, la densidad de raíces baja y un límite claro.
C1	33-47	El horizonte presentó una textura CRA (franco arcillosa arenosa), con 0% de pedregosidad. Color 10YR 3/2 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo subangular con grado medio/débil y una estabilidad de agregados baja. Poros comunes tubulares y vesiculares. Una densidad aparente de 1.4, la densidad de raíces muy baja y un límite claro.
C2	47- ...	El horizonte presentó una textura C (franca), con 0% de pedregosidad. Color 10YR 1/2 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 2%. Humedad seca a fresca. Su estructura fue tipo prismática a subangular con grado fuerte y una estabilidad de agregados alta. Poros comunes tubulares y vesiculares. Una densidad aparente de 1.6, la densidad de raíces muy baja. Hay pocos recubrimientos oscuros en canales y caras de agregados.

4) Interpretación de las características del suelo: el material parental está constituido por depósitos lacustres/aluviales. Tiene un tiempo de desecación aproximado de 100 años. Presento únicamente 4 horizontes, el pH fue neutro. Las

texturas casi todas fueron francas, excepto el penúltimo horizonte (C1) que tuvo un mayor contenido de arcillas y de arenas gruesas. Presenta un mayor contenido de sales y carbonatos. la filtración se ve obstaculizada por la arcilla que contiene. Hay unos ligeros recubrimientos oscuros en la última parte del perfil. Hay agrietamiento también en la última parte similar a una estructura prismática. La densidad de raíces es baja en todo el perfil. Y la tendencia del perfil es alcalino.

- 5) Características ecológicas:** el suelo presenta una textura gruesa lo que le ayuda a tener un buen drenaje, no así en penúltimo horizonte que es más arcilloso. Debido esto deben cuidarse los lixiviados que podrían presentarse dependiendo el uso. Presenta una baja densidad de raíces, tal vez se deba al mayor contenido de sales y carbonatos que hay en el sitio. Se necesitaría trabajar el suelo si lo que se quiere es tener cultivos, ya que estas condiciones no serían idóneas para el desarrollo de las plantas.

### P3.XalN02



#### 1) Información acerca de la localidad

- Número de perfil: 3
- Antigüedad: 60 años.
- Nombre del sitio: Nextlalpan.
- Clasificación de suelo (WRB, 2014): Katocalcic, Mollic **Solonetz** (Cutanic, Humic, Loamic, Hypernatric, Katoprotosalic).
- Fecha de descripción: 29-06-2016
- Autor: José Manuel Bautista Guzmán, Dra. Lucy Mora.
- Localización: municipio de Nextlalpan, cerca de San Miguel Jaltocan, tomando la carretera Teoloyucan – Jaltocan, coordenadas 19°43'47.66''N, 99°3'25.19''O.
- Altitud: 2245 msm.
- Forma del terreno: planicie.
- Pendiente: inclinación 0°
- Uso del suelo/vegetación: actualmente parcela comunitaria sin uso, se sembró maíz por poco tiempo.
- Clima: BS1 semiseco (según la clasificación de INEGI, 2016).

## 2) Información general acerca del suelo.

- Material parental: depósitos lacustres.
- Drenaje natural: medio a bajo.
- Condiciones de humedad en el perfil: fresco en todos los horizontes.
- Profundidad al manto freático: desconocido.
- Presencia de rocas superficiales: no hay presencia.
- Evidencia de erosión: poca.
- Presencia de sales o soda: sí.
- Influencia humana: se sembró maíz.

## 3) Descripción del perfil.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap1	0-4	El horizonte presentó una textura CR (franca arcillosa), con 0% de pedregosidad, color 10YR 3/1 en húmedo. Un pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo granular. Con muchos poros esféricos. Densidad aparente de 1, la densidad de raíces media y un límite difuso.
Ap2	4-10	El horizonte presentó una textura R (arcillosa), con 0% de pedregosidad, color 10YR 3/1 en húmedo. pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo subangular con grado fuerte y una estabilidad de agregados baja. Poros comunes (inped)* vesiculares e intersticiales. Densidad aparente de 1.4, la densidad de raíces media y un límite difuso.
Bnt	10-28	El horizonte presentó una textura R (arcillosa), con 0% de pedregosidad, color 10YR 3/2 en húmedo. pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo subangular con grado media y una estabilidad de agregados baja a media. Pocos poros (inped) vesiculares. Densidad aparente de 1.3, la densidad de raíces media y un límite claro. Hay muchas manchas y recubrimientos en poros y grietas. Hay evidencia de iluviación de arcilla.
BCwt	28-34	El horizonte presentó una textura R (arcillosa), con 0% de pedregosidad, color 2.5Y 3/2 en húmedo. pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo angular con grado fuerte y una estabilidad de agregados baja a media. Pocos poros (inped) vesiculares. Densidad aparente de 1.6, la densidad de raíces baja y un límite difuso. Hay pocas manchas y recubrimientos en poros y grietas. Hay evidencia de iluviación de arcilla.
Cn1	34-60	El horizonte presentó una textura R (arcillosa), con 0% de pedregosidad, color 10YR 3/2 en húmedo. pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo angular con grado fuerte y una estabilidad de agregados alta. Pocos poros (inped) vesiculares. Densidad aparente de

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
		1.6, la densidad de raíces baja y un límite difuso. Hay pocas manchas y recubrimientos en poros y grietas.
Cn2	60-75	El horizonte presentó una textura CRL (franca arcillo limosa), con 0% de pedregosidad, color 10YR 4/2 en húmedo. pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ). La presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 10%. Humedad fresca. Su estructura fue tipo angular con grado fuerte y una estabilidad de agregados alta. Pocos poros (inped) vesiculares e intersticiales. Densidad aparente de 1.6, la densidad de raíces nula. Hay pocas manchas y recubrimientos en poros y grietas.

**4) Interpretación de las características del suelo:** el material parental donde se desarrolla el suelo está constituido por sedimentos lacustres y aluviales. Tiene un tiempo de desecación aproximado de 60 años. Los pH del perfil son altos (8), por lo que tiene características alcalinas. Hay presencia de sal, por las características del antiguo lago. En general las texturas son arcillosas, no presenta pedregosidad y la densidad aparente es elevada, lo que habla de compactación. La densidad de raíces es muy baja. A pesar de las texturas no presenta rasgos de expansión. Hay presencia de manchas y motas, oscuras, a partir del tercer horizonte (Bnt) en poros y grietas.

**5) Características ecológicas:** tiene elevado contenido de sal, además presenta pH altos, un grado alto de compactación y texturas muy finas. Todo esto se traduce en una limitante para prácticas agrícolas ya que hay baja infiltración (con riesgo de inundación), un bajo desarrollo de las raíces de plantas y problemas de salinidad. No es muy propenso para el desarrollo de cultivos. Tiene que tener diferentes métodos, tanto de arado como de lavado de sales si lo que se quiere es cultivar.

\*Inped: poros dentro de los agregados.

## P4.XalT03



### 1) Información acerca de la localidad

- Número de perfil: 4
- Antigüedad: 50 años.
- Nombre del sitio: municipio Tonanitla, parte alta del sitio “El Charco”.
- Clasificación de suelo (WRB, 2014): Calcic **Kastanozem** (Aric, Clayic, Amphiraptic).
- Fecha de descripción: 20-04-2016
- Autor: José Manuel Bautista Guzmán, Dra. Christina Siebe G.
- Localización: municipio Tonanitla, Edo. de México, Calle 14 de febrero sitio denominado como “El Charco” perfil en la parte alta, UTMx 494935, UTM y 2175291.
- Altitud: 2246 msm
- Forma del terreno: llano, planicie lacustre. Microrelieve parte alta de una depresión que presenta el sitio.
- Pendiente: inclinación 0°
- Uso del suelo/vegetación: parcela que se dejó de sembrar hace 2 años (antes se sembraba calabaza y maíz), actualmente presenta pastizal y halófitas.
- Clima: BS1, semiseco y CW templado subhúmedo (según la clasificación de INEGI, 2016).

## 2) Información general acerca del suelo.

- Material parental: el suelo se desarrolla en lo que fue un lecho lacustre (depósitos lacustres).
- Drenaje natural: bueno.
- Condiciones de humedad en el perfil: de seco en los primeros dos horizontes a fresca en casi todo el perfil.
- Profundidad al manto freático: desconocido.
- Presencia de rocas superficiales: no hay presencia.
- Evidencia de erosión: no presenta.
- Presencia de sales o soda: si, ya que fue un lago salino.
- Influencia humana: labrado, en algún tiempo.

## 3) Descripción del perfil.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ap1	0-8/12	El horizonte presentó una textura CR (franca arcillosa), con 0% de pedregosidad pero presenta algunos bloques de suelo en un 30%, color de 2.5Y 2.5/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó entre 2-10% Su estructura fue tipo subangular en bloques con grado moderado y una estabilidad de agregados baja; con muchos y comunes en poros intersticiales y tubulares, y una densidad aparente de 1.1, la densidad de raíces alta y un límite claro e irregular.
Ap2	8/12-34	El horizonte presentó una textura CR (franca arcillosa), con 0% de pedregosidad y también presento los bloques mencionados en el perfil de arriba en un 20%, color de 2.5Y 3/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2-10% Su estructura fue tipo subangular en bloques de grado moderado y una estabilidad de agregados baja; con muchos poros tubulares y una densidad aparente de 1.2, la densidad de raíces alta y un límite gradual.
AB	34-49	El horizonte presentó una textura CR (franca arcillosa), con 0% de pedregosidad, color de 2.5Y 3/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2-10% Su estructura fue tipo subangular de grado moderado y una estabilidad de agregados baja; con comunes y pocos poros tubulares/intersticiales y una densidad aparente de 1.25, la densidad de raíces alta y un límite claro y uniforme.
2C	49-53/54	El horizonte presentó una textura CRL-CLf (franca arcillo limosa a franco limosa fina), con 0% de pedregosidad, color de 2.5Y 3/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2-10% Su estructura fue tipo masiva que rompe en subangular de grado débil y una estabilidad de agregados alta; con pocos poros tubulares y una densidad aparente de 1.25, la densidad de raíces baja y un límite claro y uniforme.
3Ah	53/54-74	El horizonte presentó una textura CR-R (franca arcillosa a arcillosa), con 0% de pedregosidad, color de 10YR 2/1 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2-10% Su estructura fue tipo prismática de grado moderado/fuerte y una estabilidad de

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
		agregados muy alta; con muchos/comunes poros intersticiales/tubulares y una densidad aparente de 1.15, la densidad de raíces mediana y un límite gradual. Hay lo que parece rasgos de slickensides pero incipientes.
3AB	74-87	El horizonte presentó una textura CRL-RL (franca arcillo limosa a arcillosa limosa), con 0% de pedregosidad, color de 10YR 3/2 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2% Su estructura fue tipo prismática que rompe a subangular de grado moderado y una estabilidad de agregados muy alta; con muchos/comunes poros intersticiales/tubulares y una densidad aparente de 1.25, la densidad de raíces mediana y un límite gradual.
3BC	87-100	El horizonte presentó una textura RL (arcillo limosa), con 0% de pedregosidad, color de 10YR 4/2 en húmedo, un pH de 7 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2-10% Su estructura fue tipo masiva que rompe a subangular en bloques de grado débil y una estabilidad de agregados muy alta; con comunes en poros tubulares y una densidad aparente de 1.3, la densidad de raíces mediana. Hay revestimientos oscuros en caras de agregados y grietas.

**4) Interpretación de las características del suelo:** el material parental es depósito lacustre y aluvial y en este caso la exposición a la intemperie es de 50 años. El nivel del lago incrementaba su nivel en épocas de lluvia y en épocas de secas se reducía. El pH varía de 7-8, esto tal vez se deba a su posición en el micro relieve del lugar. Presenta horizontes enterrados casi a la mitad del perfil (3Ah, 3AB y 3BC). En el último hay lo que parece revestimientos de arcilla y MO en las caras de los agregados. Hay mayor presencia de materia orgánica en el perfil y la densidad es menor lo que permite que se desarrollen más las plantas. La textura casi en todo el perfil va de franca a arcilla a limo.

**5) Características ecológicas:** el sitio presenta mejores condiciones, la salinidad es menor lo que provoca un mejor efecto en la fertilidad y productividad de cultivos, lo cual se ve reflejado en una mejor densidad de raíces que va de alta a mediana y la densidad aparente también lo permite ya que es menor, y esto se traduce en un mejor desarrollo de las plantas. La conductividad hidráulica parece ser buena lo que permitiría que se mejore el lavado de las sales que aún quedan.

## P5.XalT04



### 1) Información acerca de la localidad

- Número de perfil: 5
- Antigüedad: 30 años.
- Nombre del sitio: municipio Tonanitla, parte baja del sitio “El Charco”.
- Clasificación de suelo (WRB, 2014): Calcaric Reductigleyic Mollic **Gleysol** (Alkalic, Protocalcic, Clayic, Humic, Protosalic, Sodic).
- Fecha de descripción: 20-04-2016
- Autor: José Manuel Bautista Guzmán, Dra. Christina Siebe G.
- Localización: municipio Tonanitla, Edo. de México, Calle 1 de octubre sitio denominado como “El Charco” UTMx 494354, UTM y 2174847.
- Altitud: 2241 msm
- Forma del terreno: llano, planicie lacustre. Microrelieve: parte baja que presenta el sitio.
- Pendiente: inclinación 0°
- Uso del suelo/vegetación: parcela que actualmente está sin sembrar. Presenta pastizal y plantas halófitas (*suaeda*).
- Clima: BS1, semiseco y CW templado subhúmedo (según la clasificación de INEGI, 2016).

## 2) Información general acerca del suelo.

- Material parental: depósitos lacustres.
- Drenaje natural: moderado.
- Condiciones de humedad en el perfil: de muy seca a fresca/seca en la parte superior a fresca/húmeda en la parte media a inferior.
- Profundidad al manto freático: a 56 cm aproximadamente.
- Presencia de rocas superficiales: no hay presencia.
- Evidencia de erosión: no presenta.
- Presencia de sales o soda: si, ya que fue un lago salino.
- Influencia humana: en algún momento se practicó agricultura.

## 3) Descripción del perfil.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
mAC (costra)	0-0.5	El horizonte presentó una textura CR-CRL (franca arcillosa a franca arcillo limosa), con 0% de pedregosidad, color de 10YR 2/1 en húmedo, un pH de 10 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2% Su estructura fue tipo laminar y una estabilidad de agregados muy baja; con pocos poros intersticiales, límite abrupto.
mAp1	0.5-7	El horizonte presentó una textura R (arcillosa), con un 0% de pedregosidad, color 10YR 2/1 en húmedo, un pH de 10 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2% Su estructura fue tipo masiva que rompe en angular de grado débil y una estabilidad de agregados moderada; con pocos poros intersticiales/tubulares y una densidad aparente de 1.3, un límite claro. Hay revestimientos de material oscuro en caras y de agregados y grietas.
Ap2	7-20	El horizonte presentó una textura R+ (arcillosa), con un 0% de pedregosidad, color 10YR 2/1 en húmedo, un pH de 9 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2-10% Su estructura fue tipo masiva que rompe en angular de grado moderado/débil y una estabilidad de agregados mediana; con muchos/pocos poros intersticiales/tubulares y una densidad aparente de 1.2, un límite muy claro. Hay revestimientos de material oscuro en caras y de agregados y grietas. Hay presencia de pocas manchas en caras de agregados.
AB1	20-32	El horizonte presentó una textura CRL (franca arcillo limosa), con un 0% de pedregosidad, color 2.5Y 2.5/1 en húmedo, un pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2-10% Su estructura de tipo subangular que rompe en angular de grado débil y una estabilidad de agregados media; con muy pocos poros tubulares y una densidad aparente de 1.2, un límite difuso. Hay revestimientos de material oscuro en caras y de agregados y grietas. Hay presencia de pocas manchas en caras de agregados.
AB2	32-40	El horizonte presentó una textura CRL (franca arcillo limosa), con un 0% de pedregosidad, color 2.5Y 2.5/1 en húmedo, un pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2-10% Su estructura de tipo masiva que rompe en angular de grado débil y una estabilidad de agregados media; con muy pocos poros tubulares y una densidad

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
		aparente de 1.2, un límite claro. Hay revestimientos de material oscuro en caras y de agregados y grietas. Hay presencia de pocas manchas en caras de agregados.
2Ah	40-56	El horizonte presentó una textura CRL-RL (franca arcillo limosa-arcillo limosa), con un 0% de pedregosidad, color 10YR 2/1 en húmedo, un pH de 8 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2% Su estructura de tipo prismática que rompe en angular de grado moderado a fuerte y una estabilidad de agregados media; con muchos/comunes poros intersticiales/tubulares y una densidad aparente de 1. Hay revestimientos de material oscuro en caras y de agregados y grietas.

**4) Interpretación de las características del suelo:** el material parental son depósitos lacustres lleva en exposición aproximadamente 30 años, aunque ha estado en inundación en intervalos de tiempo, la última inundación que tuvo en gran medida fue hace 20 años, aproximadamente. Presenta valores elevados de pH, van de 9.9 a 8.8. Los valores de CE son elevados en la parte superior y bajos en la parte inferior, esto es probable que se deba a la cercanía con el manto freático que hace que disminuyan estas condiciones, no así, para la parte superior. Es un perfil donde todos los horizontes son A, debido a los valores elevados de pH y CE las condiciones para la agricultura no son las apropiadas ya que no permitiría la absorción de nutrientes. Presenta características de estructura masiva, y esto hace que sean horizontes compactados donde la raíz no penetra tan fácil. Desde el segundo horizonte presenta revestimientos de material oscuro en algunas caras de los agregados, en el tercer horizonte, son más incipientes, y lo mismo para el cuarto y quinto, pero con algunas manchas oscuras de 1 mm de diámetro.

**5) Características ecológicas:** las condiciones de pH elevado están causando efectos negativos en el suelo. Por un lado, las plantas prácticamente habitan este sitio son las halófitas, son la que toleran estas condiciones. También la estructura del suelo se ve afectada ya que en varios horizontes es de tipo masiva a prismática y esto no deja que se desarrolle bien la planta. En este caso debido al nivel freático tan cercano a la superficie no es recomendable las prácticas con abonos químicos y fertilizantes. Se

recomendaría la labranza, o bien el emparejamiento de las tierras y/o el sembradío con surcos.

### P6.XalT05



#### 1) Información acerca de la localidad

- Número de perfil: 6
- Antigüedad: 100 años.
- Nombre del sitio: límites del municipio Tonanitla (antiguo límite del lago Xaltocan con el lago de San Cristóbal)
- Clasificación de suelo (WRB, 2014): Calcic Abruptic **Solonetz** (Cutanic, Differentic, Ochric, Hypernatric, Raptic).
- Fecha de descripción: 14-04-2016
- Autor: José Manuel Bautista Guzmán, Dra. Christina Siebe G.
- Localización: municipio Tonanitla, Edo. de México, Carretera Tonanitla entronque Circuito Exterior Mexiquense, UTMx 494479 UTM<sub>y</sub> 2171852.
- Altitud: 2244 msm
- Forma del terreno: llano, planicie lacustre, no presenta microrelieve.
- Pendiente: inclinación 0°
- Uso del suelo/vegetación: Tierras comunales junto a una parcela de maíz (ciclo pausado), pastizal.

- Clima: BS1, semiseco y CW templado subhúmedo (según la clasificación de INEGI, 2016).

## 2) Información general acerca del suelo.

- Material parental: el suelo se desarrolla en lo que fue un lecho lacustre (depósitos lacustres), hay cascajo y basura alrededor del perfil.
- Drenaje natural: bueno
- Condiciones de humedad en el perfil: de seco a fresca en los horizontes de mayor profundidad.
- Profundidad al manto freático: desconocido
- Presencia de rocas superficiales: no hay presencia
- Evidencia de erosión: depósitos de cascajo y basura, además de labrado
- Presencia de sales o soda: si, fue un lago salino.
- Influencia humana: labrado

## 3) Descripción del perfil.

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
Ah	0-2/5	El horizonte presentó una textura CLf (franca limosa fina), con 0% de pedregosidad, color de 2.5Y 3/1 en húmedo, un pH de 9 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 10% Su estructura fue tipo subangular a laminar de grado débil y una estabilidad de agregados muy baja; con muchos poros intersticiales y una densidad aparente de <1, la densidad de raíces baja y un límite claro.
ECw	2/5-23	El horizonte presentó una textura CRf-CRL (franca-arcillosa fina a franco-arcillo-limosa), con un 2% de pedregosidad, color de 10 YR 3/1 en húmedo, un pH de 9 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2% Su estructura fue tipo masiva que rompe en subangular en bloques de grado débil y una estabilidad de agregados muy baja; con pocos poros intersticiales-tubulares y una densidad aparente de 1.35, la densidad de raíces mediana y un límite muy claro y ondulado. Hay recubrimientos y manchas de color oscuro en caras de agregados y grietas en cantidad media.
Btn	23-26	El horizonte presentó una textura CRf-CRL (franca-arcillosa fina a franco-arcillo-limosa), con un 0% de pedregosidad, color de 10YR 3/1 en húmedo, un pH de 8.5 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2% Su estructura fue tipo subangular que rompe a angular de grado moderado y una estabilidad de agregados mediana; con poros comunes intersticiales-tubulares y una densidad aparente de 1.2, la densidad de raíces alta y un límite muy gradual. Hay pocos recubrimientos y manchas de color oscuro en caras de agregados y grietas. Hay presencia de recubrimientos de arcilla.
CBtn	26-42	El horizonte presentó una textura C (franca), con un 0% de pedregosidad, color de 10YR 3/2 en húmedo, un pH de 8.5 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 10% Su estructura fue tipo subangular de grado moderado y una estabilidad de agregados alta; con muy pocos poros tubulares y una densidad aparente de 1.25, la densidad

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
		de raíces mediana y un límite difuso. Hay pocos recubrimientos y manchas de color oscuro en caras de agregados y grietas. Hay presencia de recubrimientos de arcilla.
CB(t)	42-60	El horizonte presentó una textura CA (franca-arenosa), con un 0% de pedregosidad, color de 10YR 3/2 en húmedo, un pH de 8.5 (en CaCl <sub>2</sub> ); la presencia de CaCO <sub>3</sub> se estimó en 2%. Su estructura fue tipo masiva que rompe a subangular de grado débil y una estabilidad de agregados muy alta; con muy pocos poros tubulares y una densidad aparente de 1.3, la densidad de raíces baja. Hay incipientes recubrimientos y manchas de color oscuro en caras de agregados y grietas. Pocos recubrimientos de arcilla.

**4) Interpretación de las características del suelo:** el material parental está constituido por depósitos lacustres/aluviales que llevan en exposición cerca de 100 años, el lago presentaba características salinas, por lo que los suelos presentan problemas de salinidad. Presenta horizontes con materia orgánica. Hay una capa delgada de 3 cm. Tiene densidad en general media. Sin embargo, presenta una densidad de raíces no muy buena. La salinidad provoca que tenga un pH elevado y por ende una conductividad eléctrica alta, esto afecta al crecimiento de plantas y a los microorganismos. Además, la movilidad de algunos nutrientes como (azufre, fósforo, calcio, potasio) y de elementos como zinc, hierro y magnesio su movilidad sería baja. Esto puede inferir en que el suelo no tenga un buen desarrollo, como en estructura. Presenta recubrimientos de color oscuro en algunas caras de los agregados y poros a partir del segundo horizonte, en el quinto horizonte ya son más incipientes. En el horizonte 4 presenta iluviación de arcillas.

**5) Características ecológicas:** el sitio presenta condiciones salinas lo que provoca un efecto negativo en la fertilidad y productividad, además de esto provoca desequilibrios en la nutrición de la planta. La conductividad hidráulica parece ser buena lo que permitiría que si hay riego ayudaría a lavar las sales del sitio. Así mismo, se recomendaría sembrar plantas que toleren la salinidad y apostar por cultivos de este tipo. También por la formación de surcos para que en la sima crezcan las plantas y el lavado de sales se dé en la parte inferior. Entre otras.

**Tabla 9.** Muestra los valores de la densidad aparente, cabe recordar que algunos horizontes no se pudieron muestrear por lo que el dato no aparece.

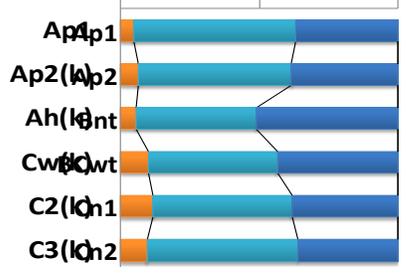
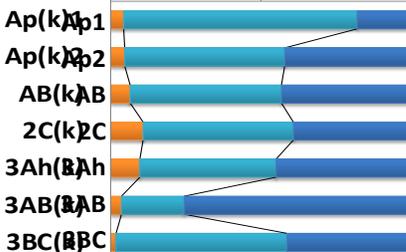
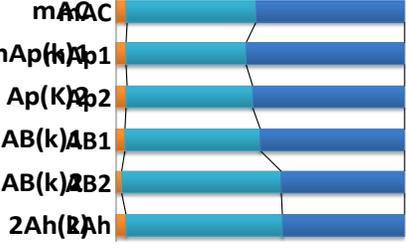
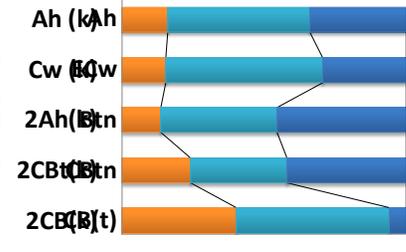
**Tabla 9. se muestran los valores de DA (g/cm<sup>3</sup>)**

Profundidad cm	P1.ZumS 200 años	P2.XalN01 100 años	P3.XalN02 60 años	P4.XalT03 50 años	P5.XalT04 30 años	P6.XalT05 100 años
10	1.2	1.2		0.8		
20	1.0	1.3	0.9	0.8	0.8	0.9
40	1.0	1.4	0.9	0.8	0.9	
60	0.8	1.1	0.8	0.7	0.9	0.8
80	0.8		0.8	0.7	0.7	0.9
100	0.9		0.8	0.7	0.6	
				0.7		

**Tabla 10 texturas**

**Tabla 10.** Muestra las gráficas de textura de cada uno de los perfiles de la cronosecuencia.

Gráfica de textura del perfil de suelo en %	Clave, años de desecación del perfil y Textura por horizonte
<p style="text-align: center;"><b>0%      50%      100%</b></p> <p style="text-align: right;"> <span style="color: orange;">■</span> Arenas %  <span style="color: cyan;">■</span> Limos %  <span style="color: blue;">■</span> Arcillas %         </p>	<p>P1.ZumS 200 años</p> <p>-Arcilloso</p> <p>-Arcillo limoso</p> <p>-Arcillo Limoso</p>
<p style="text-align: center;"><b>0%      50%      100%</b></p>	<p>P2.XalN01 100 años</p> <p>-Franco arcillo arenoso</p> <p>-Franco arcillo arenoso</p> <p>-Franco arenoso</p> <p>-Franco arcillo arenoso</p>

<p style="text-align: center;">0%      50%      100%</p>  <p>Ap1 Ap2 Ah Cwt C2 C3</p>	<p style="text-align: center;">P3.XalN02 60 años</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Franco arcillo limoso</li> <li>-Franco arcillo limoso</li> <li>-Arcilla limosa</li> <li>-Arcilla limosa</li> <li>-Franco arcillo limoso</li> <li>-Franco arcillo limoso</li> </ul>
<p style="text-align: center;">0%      50%      100%</p>  <p>Ap1 Ap2 AB 2C 3Ah 3AB 3BC</p>	<p style="text-align: center;">P4.XalT03 50 años</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Franco limosa</li> <li>-Arcilla limosa</li> <li>-Arcilla limosa</li> <li>- Franco arcillo limosa</li> <li>-Arcilla limosa</li> <li>-Arcillosa</li> <li>-Arcilla limosa</li> </ul>
<p style="text-align: center;">0%      50%      100%</p>  <p>mAC mAp1 Ap2 AB1 AB2 2Ah</p>	<p style="text-align: center;">P5.XalT04 30 años</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Arcilla limosa</li> <li>- Arcilla limosa</li> </ul>
<p style="text-align: center;">0%      50%      100%</p>  <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Horizons</p> <p>Ah Cw 2Ah 2CBt 2CB</p>	<p style="text-align: center;">P6.XalT05 100 años</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Franco arcillo limosa</li> <li>-Franco arcillo limosa</li> <li>-Arcillo limosa</li> <li>-Arcillosa</li> <li>-Franco limosa</li> </ul>

**Tabla 11 valores de pH**

**Tabla 11: Valores de pH**

<i>Profundidad</i> <i>cm</i>	<i>P1.ZumS</i> <i>200 años</i>	<i>P2.XalNo1</i> <i>100 años</i>	<i>P3.XalNo2</i> <i>60 años</i>	<i>P4.XalTo3</i> <i>50 años</i>	<i>P5.XalTo4</i> <i>30 años</i>	<i>P6.XalTo5</i> <i>100 años</i>
10	6.7	7.2	8.4	7.6	9.8	8.9
20	6.9	8.2	8.7	8.0	9.9	9.4
40	7.2	8.7	9.0	8.3	9.3	9.6
60	7.8	9.3	9.0	8.2	9.0	9.8
80	8.0		9.6	8.4	8.8	9.9
100				8.3		

**Tabla 12 valores de conductividad eléctrica (CE mS cm<sup>-1</sup>)**

**Tabla 12: Valores de la CE mS cm<sup>-1</sup>**

<i>Profundidad</i> <i>cm</i>	<i>P1.ZumS</i>	<i>P2.XalNo1</i>	<i>P3.XalNo2</i>	<i>P4.XalTo3</i>	<i>P5.XalTo4</i>	<i>P6.XalTo5</i>
10	0.482	0.467	0.720	0.829	5.505	1.721
20	0.475	0.230	0.854	0.466	10.130	1.348
40	0.486	0.217	1.954	0.543	2.500	1.884
60	0.367	1.295	3.625	0.644	2.150	2.415
80	0.372		4.86	0.692	1.726	2.565
100	0.355		6.08	0.733	1.812	
				0.768		

**Tabla 13 porcentajes de la saturación de sodio**

**Tabla 13. % de Saturación de Na.**

<i>Profundidad</i> <i>cm</i>	<i>P1.ZumS</i>	<i>P2.XalNo1</i>	<i>P3.XalNo2</i>	<i>P4.XalTo3</i>	<i>P5.XalTo4</i>	<i>P6.XalTo5</i>
10	3	0	12	8	52	31
20	3	1	19	6	57	33
40	3	1	33	6	39	39
60	2	29	36	6	33	38
80	2		43	8	23	38
100	2		45	9	26	
				8		

Tabla 14. Porcentaje de materia orgánica a profundidad

**Tabla 14. % de MO**

Profundidad cm	P1.ZumS	P2.XalN01	P3.XalN02	P4.XalT03	P5.XalT04	P6.XalT05
10	4.8	5.5	4.8	7.1	3.4	2.5
20	3.9	2.0	2.9	6.4	3.8	1.8
40	3.5	0.8	3.9	5.2	4.0	1.5
60	2.0	0.8	2.8	4.0	3.9	1.0
80	1.7		4.4	3.5	4.3	0.7
100	1.0		4.2	3.3	3.9	
				3.2		

Tabla 15. Concentración de cationes solubles (meq/l).

Perfil	Horizontes	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
<b>P1.ZumS</b>	Ap	1.10	0.07	1.23	4.83	3.06
	mAp	1.16	0.07	0.38	2.95	1.78
	Ah	1.16	0.09	0.45	2.19	1.34
	ABss	1.50	0.03	0.37	1.33	1.08
	B(ss)	1.40	0.03	0.36	1.01	0.92
	C	1.61	0.04	0.48	0.99	0.95
<b>P2.XalN01</b>	Ap	1.12	0.14	0.66	1.60	0.72
	Ah	0.43	0.17	0.65	2.79	0.59
	C1	2.36	0.06	0.54	0.78	0.56
	C2	9.00	0.04	0.52	0.28	0.20
<b>P3.XalN02</b>	Ap1	5.45	0.08	0.89	0.56	0.32
	Ap2	8.04	0.07	0.79	0.64	0.35
	Bnt	21.27	0.03	1.68	0.67	0.43
	BCwt	67.06	0.02	6.33	0.52	0.45
	Cn1	111.09	0.00	9.68	0.30	0.17
	Cn2	156.64	0.00	14.11	0.26	0.14
<b>P4.XalT03</b>	Ap1	4.56	0.12	1.24	3.65	2.85
	Ap2	4.21	0.00	0.29	1.69	0.99
	AB	4.76	0.04	0.26	0.85	0.68
	2C	6.63	0.00	0.39	1.38	1.03
	3Ah	7.91	0.00	0.57	1.20	1.18
	3AB	7.78	0.00	0.55	1.08	1.03
	3BC	9.18	0.00	0.64	1.01	1.13
	mAC	132.50	0.00	4.73	0.84	0.21
<b>P5.XalT04</b>	mAp1	257.22	0.00	9.23	0.47	0.14
	Ap2	39.84	0.00	1.98	0.70	0.44
	AB1	29.95	0.00	1.55	0.84	0.66
	AB2	27.19	0.00	1.59	0.65	0.75
	2Ah	25.23	0.00	1.30	0.71	0.65
	Ah	24.05	0.36	1.75	1.71	0.62
<b>P6.XalT05</b>	ECw	20.69	0.02	1.35	1.35	0.44
	Btn	25.73	0.02	1.51	3.22	0.60
	CBtn	38.75	0.00	2.02	2.46	0.43
	CB(t)	49.85	0.05	2.33	1.34	0.30

Tabla 16. Concentración de aniones solubles (meq/l).

Perfil	Horizontes	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
P1.ZumS	Ap	0.00	0.78	0.49	0.54	7.84	0.31	1.01
	mAp	0.00	1.49	0.25	0.98	1.78	0.40	1.35
	Ah	0.00	0.82	0.22	0.07	2.46	0.67	1.02
	ABss	0.00	1.43	0.42	0.10	0.65	0.65	0.71
	B(ss)	0.00	1.23	0.43	0.12	0.38	0.88	0.67
	C	0.00	1.99	0.48	0.03	0.41	0.28	0.64
P2.XalN01	Ap	0.00	2.90	0.40	0.00	0.00	0.00	0.52
	Ah	0.00	3.70	0.27	0.00	0.00	0.00	0.27
	C1	0.00	3.26	0.39	0.00	0.00	0.00	0.66
	C2	0.00	6.60	1.68	0.00	0.27	0.00	0.88
P3.XalN02	Ap1	0.00	2.43	2.83	0.00	0.26	0.77	0.39
	Ap2	0.00	4.16	2.74	0.00	0.38	1.58	0.52
	Bnt	0.00	3.65	17.79	0.00	0.35	0.66	1.28
	BCwt	0.00	6.59	75.00	0.00	1.01	0.00	3.08
	Cn1	0.00	10.14	116.99	0.00	0.47	0.00	5.98
	Cn2	11.15	6.08	161.83	0.00	0.25	0.40	13.34
P4.XalT03	Ap1	0.00	2.86	5.38	0.00	2.19	0.00	2.86
	Ap2	0.00	4.03	1.35	0.00	0.05	0.58	1.30
	AB	0.00	2.34	1.73	0.00	0.22	0.27	2.48
	2C	0.00	3.70	2.78	0.00	0.00	0.09	3.53
	3Ah	0.00	1.66	6.12	0.00	0.07	0.00	4.18
	3AB	0.00	1.88	6.23	0.00	0.05	0.00	3.40
	3BC	0.00	1.70	7.79	0.00	0.08	0.00	3.69
P5.XalT04	mAC	10.14	14.20	62.17	0.00	11.35	1.36	54.87
	mAp1	12.17	13.18	140.13	0.00	24.43	0.00	123.72
	Ap2	0.00	8.80	20.93	0.00	4.35	0.00	12.36
	AB1	0.00	6.98	17.35	0.73	2.02	0.43	9.06
	AB2	0.00	2.16	21.09	0.00	1.63	0.12	8.81
	2Ah	0.00	3.97	16.02	0.47	1.30	0.19	7.91
P6.XalT05	Ah	0.00	13.89	7.04	0.00	0.15	0.28	8.44
	ECw	0.00	13.72	4.03	0.00	0.00	0.23	6.44
	Btn	0.00	14.27	5.81	0.00	0.00	0.17	8.11
	CBtn	0.00	17.74	9.88	0.00	0.00	0.11	13.02
	CB(t)	0.00	17.06	13.28	0.00	0.00	0.21	21.21

**Tabla 17. % de saturación de bases  
(cationes intercambiables).**

<b>Perfil</b>	<b>Ca+</b>	<b>Mg+</b>	<b>K+</b>	<b>Na+</b>
<b>P1.ZumS</b>	62.06	25.31	9.66	2.97
	65.14	25.59	5.98	3.28
	65.03	25.09	6.97	2.91
	63.45	29.60	5.22	1.73
	58.72	32.89	6.18	2.21
	67.61	25.51	5.38	1.50
<b>P2.XalNo1</b>	84.97	8.30	6.33	0.40
	80.71	11.59	6.93	0.76
	82.30	10.26	6.37	1.07
	50.59	12.49	8.14	28.78
<b>P3.XalNo2</b>	55.48	15.94	16.27	12.31
	50.31	14.32	16.05	19.32
	38.31	12.09	16.34	33.25
	37.98	9.96	15.62	36.44
	34.98	7.35	14.36	43.31
	35.29	5.87	13.63	45.20
<b>P4.XalTo3</b>	71.10	14.07	7.08	7.75
	64.40	25.30	4.52	5.78
	63.38	26.04	4.40	6.18
	62.64	26.57	4.46	6.32
	62.05	25.05	4.92	7.97
	59.83	26.61	4.57	8.99
	59.60	28.52	3.57	8.31
<b>P5.XalTo4</b>	31.49	4.55	12.18	51.78
	27.89	4.27	10.99	56.85
	37.43	11.52	11.64	39.40
	39.64	15.74	11.90	32.72
	48.82	18.26	9.47	23.44
	45.86	18.55	9.56	26.02
<b>P6.XalTo5</b>	25.92	3.91	9.49	17.81
	44.13	5.32	17.27	33.27
	39.49	5.45	16.27	38.79
	42.45	6.36	13.05	38.14
	43.26	6.40	12.43	37.91

Tabla 18. Tipos de arcilla según su CIC (cmol/kg) para cada horizonte de los perfiles de suelo

Perfil	Horizontes	Profundidad cm	CIC (cmol/kg de arcilla)	Tipo de arcilla
<b>P1.ZumS</b>	Ap	0 - 4	45.97	Illita/Esmectita
	mAp	4 - 17	47.62	Illita/Esmectita
	Ah	17 - 36	49.02	Illita/Esmectita
	ABss	36 - 48	123.64	Esmectita/Vermiculita
	B(ss)	48 - 60	107.59	Esmectita/Vermiculita
	C	60 - 75	255.80	Alófono
<b>P2.XalN01</b>	Ap	0 - 4	131.47	Esmectita/Vermiculita
	Ah	4 - 33	154.01	Esmectita/Vermiculita
	C1	33 - 47	310.21	-----
	C2	>47	149.39	Esmectita/Vermiculita
<b>P3.XalN02</b>	Ap1	0 - 4	151.52	Esmectita/Vermiculita
	Ap2	4 - 10	163.34	Esmectita/Vermiculita
	Bnt	10 - 28	133.47	Esmectita/Vermiculita
	BCwt	28 - 34	147.88	Esmectita/Vermiculita
	Cn1	34 - 60	158.03	Esmectita/Vermiculita
	Cn2	60 - 75	155.21	Esmectita/Vermiculita
<b>P4.XalT03</b>	Ap1	0 - 8/12	211.16	Esmectita/Vermiculita
	Ap2	8/12 - 34	110.97	Esmectita/Vermiculita
	AB	34 - 49	110.70	Esmectita/Vermiculita
	2C	49 - 53/54	115.81	Esmectita/Vermiculita
	3Ah	53/54 - 74	126.37	Esmectita/Vermiculita
	3AB	74 - 87	113.41	Esmectita/Vermiculita
	3BC	87 - 100	60.13	Esmectita/Vermiculita
<b>P5.XalT04</b>	mAC	0 - 0.5	145.90	Esmectita/Vermiculita
	mAp1	0.5 - 7	142.65	Esmectita/Vermiculita
	Ap2	7 - 20	128.10	Esmectita/Vermiculita
	AB1	20 - 32	132.48	Esmectita/Vermiculita
	AB2	32 - 40	117.62	Esmectita/Vermiculita
	2Ah	40 - 56	134.27	Esmectita/Vermiculita
<b>P6.XalT05</b>	Ah	0 - 2/5	345.74	-----
	ECw	2/5 - 23	218.41	Alófono
	Btn	23 - 26	151.78	Esmectita/Vermiculita
	CBtn	26 - 42	164.25	Esmectita/Vermiculita
	CB(t)	42 - 60	1117.06	-----

Tabla 19. Desarrollo de la estructura de los perfiles de suelos

Perfil/tiempo de exposición	Tipo de agregados por horizonte	Estabilidad por horizonte
<b>P1.ZumS</b> (200 años)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Ap</b> Migajón a granular grado moderado</li> <li>2. <b>mAp</b> masivo a subangular a granular con grado débil</li> <li>3. <b>Ah</b> subangular con grado moderado</li> <li>4. <b>ABss</b> subangular con grado moderado</li> <li>5. <b>B(ss)</b> subangular a angular con grado débil</li> <li>6. <b>C</b> masiva a subangular con grado débil</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Media</li> <li>2. Alta</li> <li>3. Alta</li> <li>4. Media</li> <li>5. Alta</li> <li>6. Media</li> </ol>
<b>P2.XalN01</b> (100 años)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Ap</b> grano simple</li> <li>2. <b>Ah</b> subangular a granular con grado medio</li> <li>3. <b>C1</b> subangular con grado medio/débil</li> <li>4. <b>C2</b> masiva/prismática a subangular con grado fuerte</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. --</li> <li>2. Media</li> <li>3. Baja</li> <li>4. Alta</li> </ol>
<b>P3.XalN02</b> (60 años)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Ap1</b> grano simple</li> <li>2. <b>Ap2</b> subangular con grado fuerte</li> <li>3. <b>Bnt</b> subangular con grado medio</li> <li>4. <b>BCwt</b> Masiva/angular con grado fuerte</li> <li>5. <b>Cn1</b> Masiva/angular con grado fuerte</li> <li>6. <b>Cn2</b> Masiva/angular con grado fuerte</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. --</li> <li>2. baja</li> <li>3. Media/Baja</li> <li>4. Baja</li> <li>5. Alta</li> <li>6. Alta</li> </ol>
<b>P4.XalT03</b> (50 años)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Ap1</b> Subangular/granular en bloques con grado moderado</li> <li>2. <b>Ap2</b> subangular en bloques de grado moderado</li> <li>3. <b>AB</b> angular/subangular en bloques de grado moderado</li> <li>4. <b>2C</b> masiva a angular/subangular en bloques de grado débil</li> <li>5. <b>3Ah</b> prismática/subangular de grado moderado/fuerte</li> <li>6. <b>3AB</b> prismática/subangular de grado moderado/fuerte</li> <li>7. <b>3BC</b> masiva que rompe a subangular en bloques de grado débil</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baja</li> <li>2. Baja</li> <li>3. Baja</li> <li>4. Alta</li> <li>5. Alta</li> <li>6. Muy alta</li> <li>7. Muy alta</li> </ol>
<b>P5.XalT04</b> (30 años)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>mAC</b> Laminar</li> <li>2. <b>mAp1</b> masiva a angular/subangular de grado débil</li> <li>3. <b>Ap2</b> masiva a angular/subangular de grado moderado/débil</li> <li>4. <b>AB1</b> subangular a angular de grado débil</li> <li>5. <b>AB2</b> masiva a angular/subangular de grado débil</li> <li>6. <b>2Ah</b> prismática que rompe en angular/subangular de grado moderado a fuerte</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Muy baja</li> <li>2. Moderada</li> <li>3. Media</li> <li>4. Media</li> <li>5. Media</li> <li>6. Media</li> </ol>
<b>P6.XalT05</b> (100 años)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. <b>Ah</b> subangular a laminar de grado débil</li> <li>2. <b>ECw</b> masiva a subangular en bloques de grado débil</li> <li>3. <b>Btn</b> subangular a angular de grado moderado</li> <li>4. <b>CBtn</b> masiva/subangular de grado moderado</li> <li>5. <b>CB(t)</b> masiva a subangular de grado débil</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Muy baja</li> <li>2. Muy baja</li> <li>3. Media</li> <li>4. Alta</li> <li>5. Muy alta</li> </ol>

# Representación de la desecación de los lagos

Figura 54. Forma original de los lagos, época de la prehispánica.

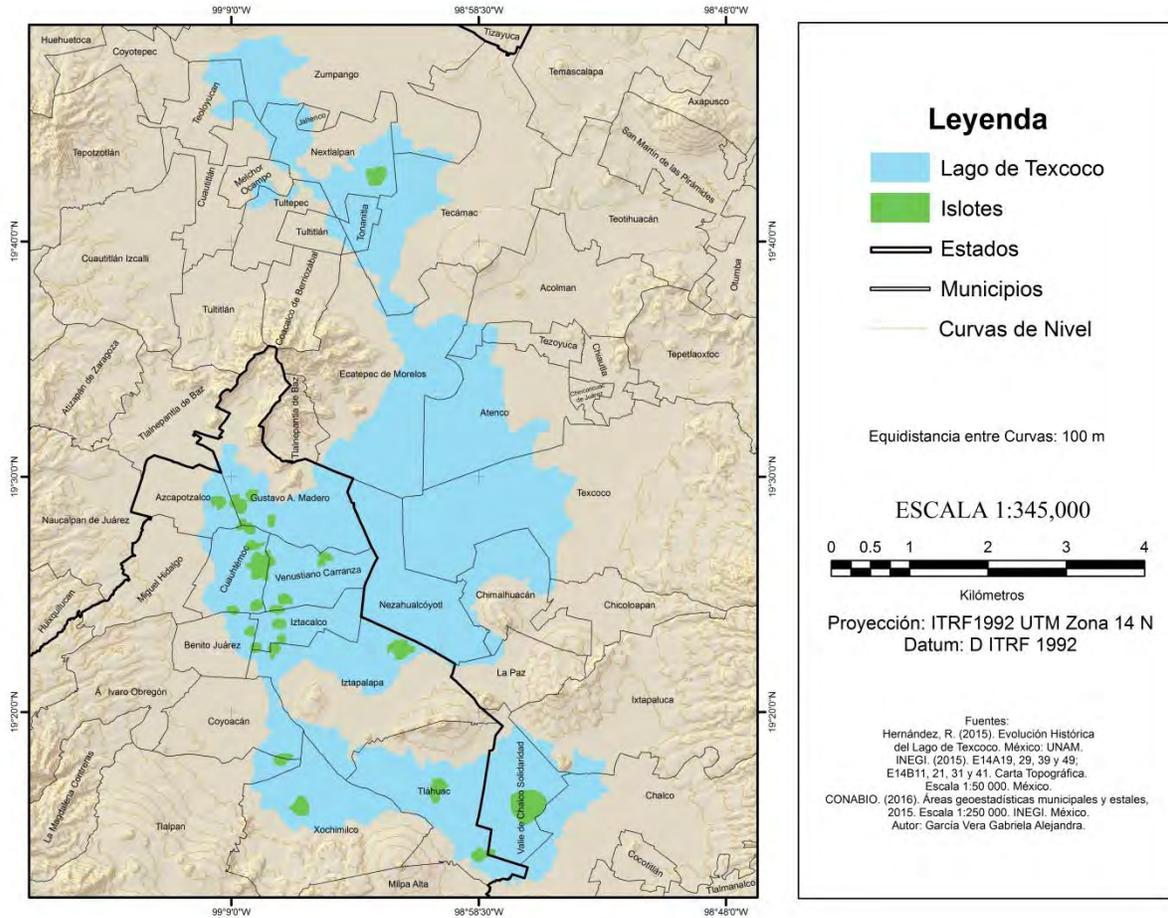
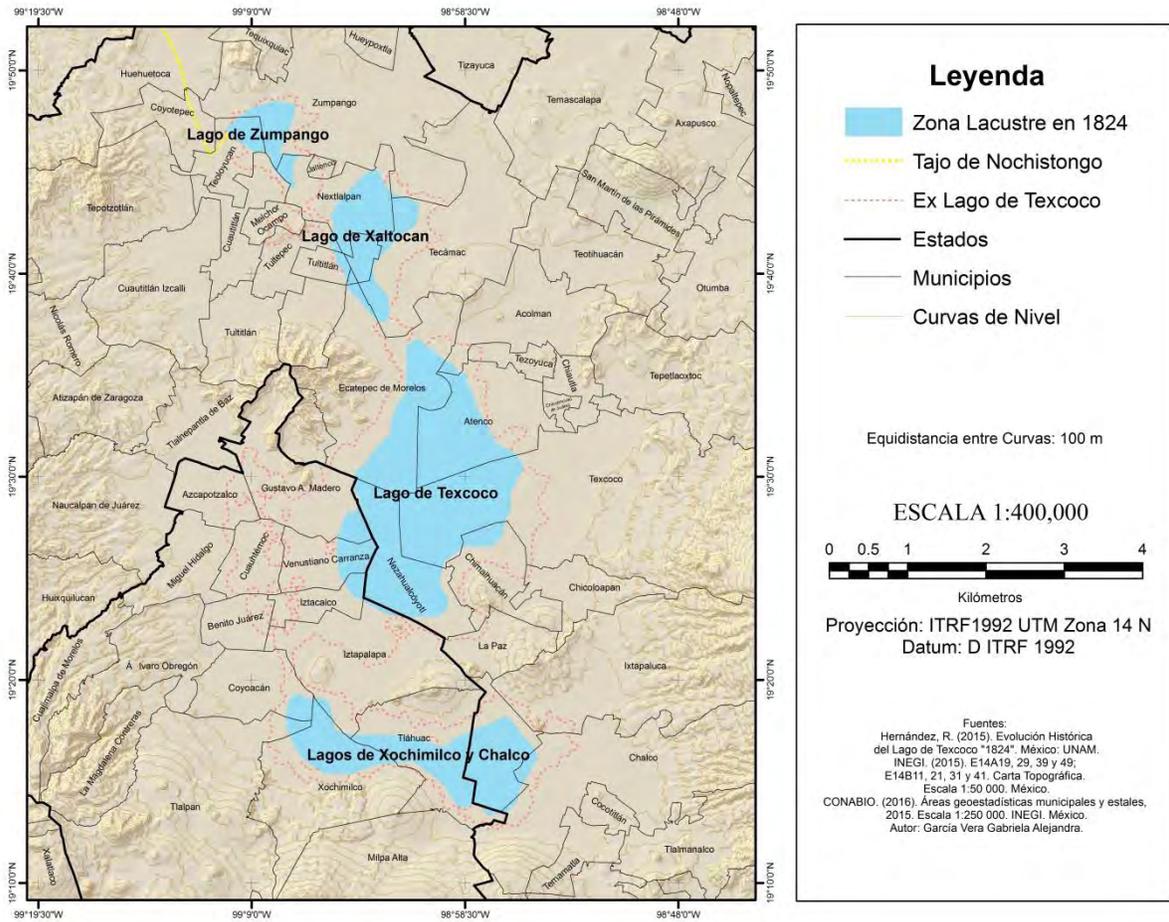
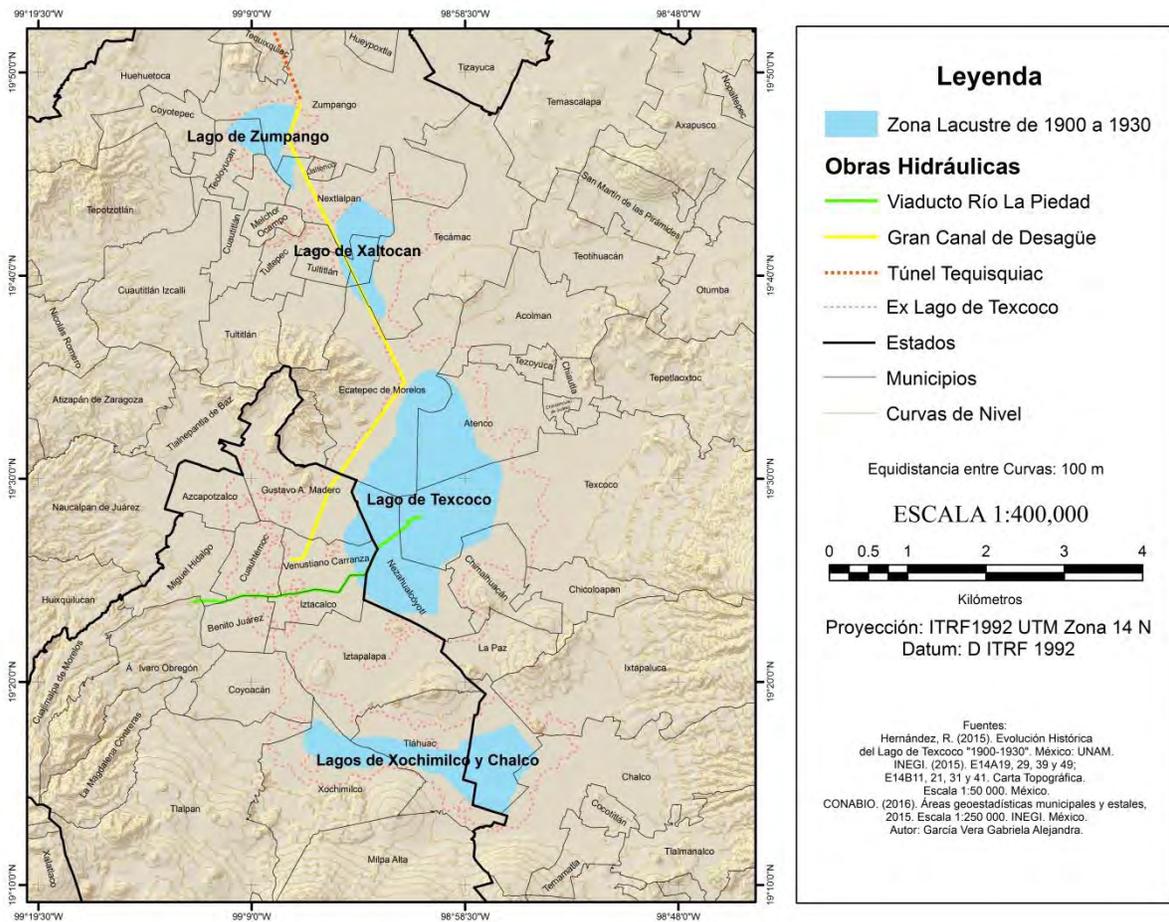


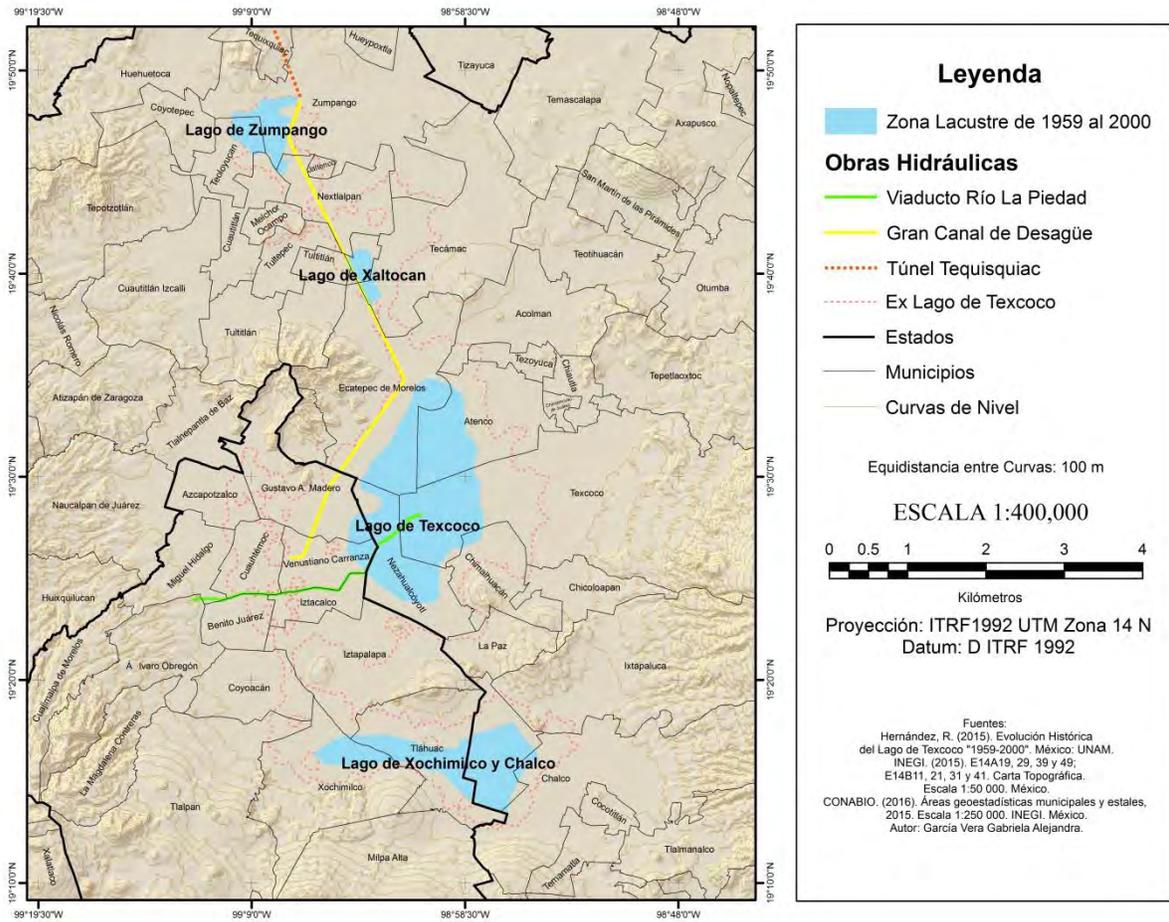
Figura 55. Forma de los lagos después de las primeras obras de drenaje.



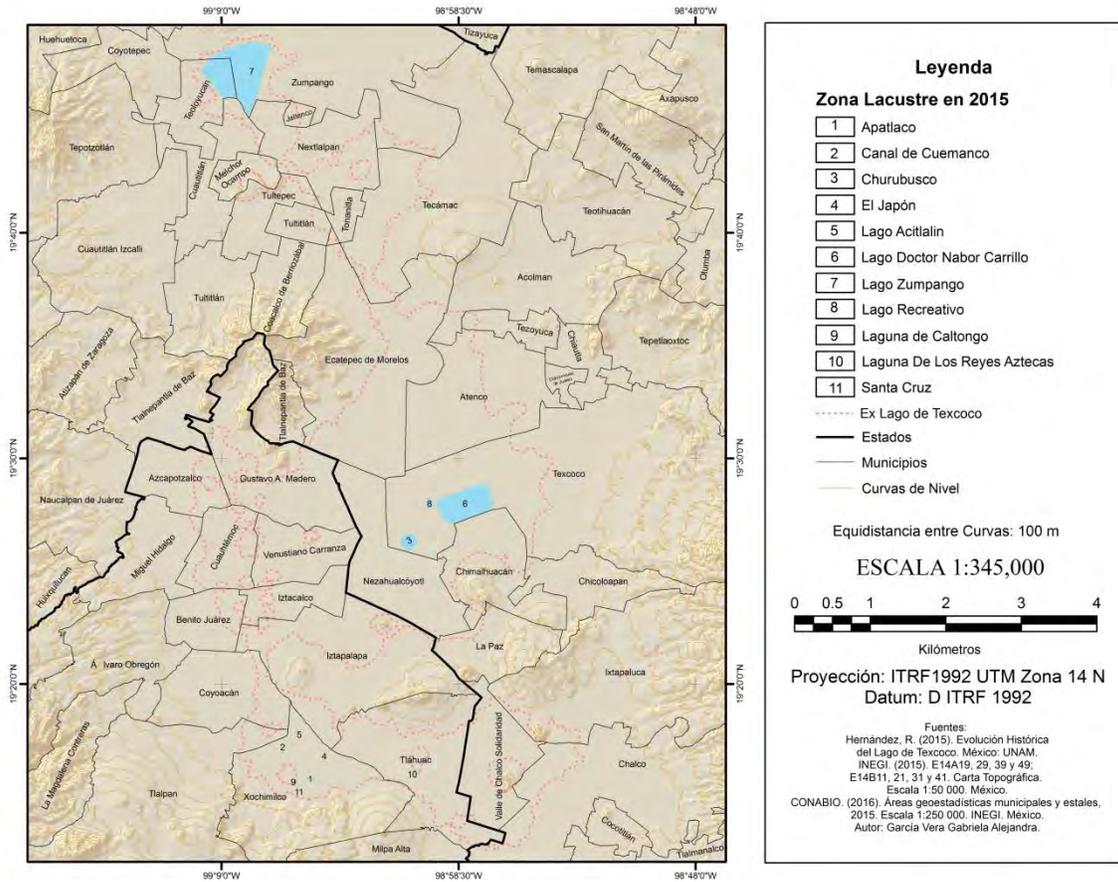
**Figura 56. Forma de los lagos en el siglo XX, las obras de drenaje aún continuaban.**



**Figura 57. Forma de los lagos para la última mitad del siglo XX.**



**Figura 58.** Vista actual de las áreas que abarcaban los lagos.



**Figura 59.** Micromorfológica del horizonte C(t)(k)2 del perfil P2.XaIN01, se muestra la iluviación de arcilla en nx cubriendo las paredes de un canal.

