

El Impacto Antrópico en el Desarrollo de los Suelos del Ex Lago de Texcoco The Anthropic Impact on the Development of the Soil the Former Texcoco

Sandra Monserrat Barragán-Maravilla¹ , Ma. del Carmen Gutiérrez-Castorena^{1‡} ,
Gabriel Alejandro Hernández-Vallecillo¹ , Carlos Alberto Ortiz-Solorio¹ ,
Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena² , Claudia Isabel Hidalgo-Moreno¹ y
Demetrio Salvador Fernández-Reynoso¹

¹ Colegio de Postgraduados. Carr. México-Texcoco, Col. Montecillo. 56264 Texcoco, Edo. México, México; (S.M.B.M.), (M.C.G.C.), (G.A.H.V.), (C.A.O.S.), (C.I.H.M.), (D.S.F.R.).

[‡] Autor para correspondencia: castor@colpos.mx

² Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Francisco Villa s/n, Col. Ex Hacienda el Canadá. 66050 General Escobedo, Nuevo León, México; (E.V.G.C.).

RESUMEN

El lago de Texcoco ha sido drenado e impactado por actividades humanas desde hace más de 100 años, por la construcción de drenes y más recientemente por la construcción de un proyecto aeroportuario. Esto ocasionó no solo la desecación de parte del lago, sino también la pérdida drástica de humedad de los sedimentos lacustres por lo que se desconoce si estos están formando suelos. Los objetivos de la presente investigación son analizar las características morfológicas, y propiedades químicas y físicas de los sedimentos/suelos lacustres del ex lago de Texcoco, determinar si hay formación de suelos y cuáles son los factores naturales o antrópicos con mayor impacto en su desarrollo, así como conocer su distribución geoespacial y la profundidad a la que se encuentran. Los datos que se analizaron se extrajeron de un levantamiento de suelos, escala semidetallada (1:20 000) en una superficie de 12 000 ha en la Zona Federal Lago de Texcoco. Se delimitaron 44 Series de Suelos y, para cada una se obtuvieron datos morfológicos, físicos y químicos, con los que se crearon mapas temáticos. La naturaleza salina del lago, su desecación artificial (diferencial) y la introducción de pastos halófilos han favorecido la formación de suelos a partir de los sedimentos lacustres. Lo cual se denota a partir del desarrollo de estructuras prismáticas y de bloques, el movimiento de partículas de arcilla y arena y en la presencia de condiciones redox. Lo anterior indica una morfología diversa en un área relativamente pequeña y la ocurrencia de procesos de formación del suelo. Las propiedades edáficas señalan una distribución geoespacial y vertical dentro del perfil del suelo muy heterogénea, que indican que los suelos del lago de Texcoco se encuentran en etapas tempranas de desarrollo, aunque no es posible determinar a qué profundidad ocurre su formación.

Palabras clave: distribución geoespacial, rasgos pedológicos, salinidad.

SUMMARY

Lake Texcoco has been drained and affected by human activities for more than 100 years through the construction of drainage canals and, more recently, by the development of an airport project. These actions have resulted not only in the desiccation of the lake but also in a drastic loss of moisture from the lacustrine sediments; therefore, it remains uncertain whether soil formation processes are occurring. The objectives of this research were to analyze the morphological characteristics and the chemical and physical properties of the sediments/soils of the former Lake Texcoco, to determine whether soil formation has taken place, to identify the natural or anthropogenic factors exerting the greatest influence on its development, and to assess its spatial distribution and depth of occurrence.



Cita recomendada:

Barragán-Maravilla, S. M., Gutiérrez-Castorena, M. C., Hernández-Vallecillo, G. A., Ortiz-Solorio, C. A., Gutiérrez-Castorena, E. V., Hidalgo-Moreno, C. I., & Fernández-Reynoso, D. S. (2025). El Impacto Antrópico en el Desarrollo de los Suelos del Ex Lago de Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-14. e2252. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2252>

Recibido: 28 de febrero de 2025.

Aceptado: 29 de agosto de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Diciembre de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Fidel Núñez-Ramírez

Editor Técnico:

Dr. Gerardo Cruz Flores



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

The analyzed data were obtained from a semi-detailed soil survey derived from a 1:20 000-scale soil study covering 12 000 ha of the Lago de Texcoco Federal Zone. Forty-four soil series were delineated, and morphological, physical, and chemical data were collected for each series and used to generate thematic maps. Lake salinity, artificial (differential) drying, and the introduction of halophytic grasses have favored soil formation from lacustrine sediments. These factors primarily modified the development of prismatic and blocky structures, the movement of clay and sand particles, and the occurrence of redoximorphic conditions. Overall, the results indicate a diverse soil morphology within a relatively small area and provide evidence of active soil-forming processes. Edaphic properties exhibit highly heterogeneous spatial and vertical distributions within the soil profile, indicating that the soils of Lake Texcoco are at early stages of development. However, it was not possible to determine the depth at which soil formation occurs.

Index words: *geospatial distribution, pedological features, salinity.*

INTRODUCCIÓN

Cuando el nivel del agua disminuye y los sedimentos lacustres quedan expuestos, comienza la formación del suelo (Kruczkowska *et al.*, 2021; Mendyk, Świtoniak, Bednarek y Falkowski, 2015). Los estudios que hay al respecto, generalmente se centran en sus propiedades químicas, físicas y mineralógicas (Sowiński, Smólczyński, Kalisz, Orzechowski y Bieniek, 2023; Gozukara, Zhang, Hartemink, Altunbas y Sari, 2021; Shamilishvili, Abakumov y Andersen, 2020). Para ambientes expuestos del ex lago de Texcoco, la formación de suelos a partir de sedimentos lacustres no está bien documentada. De acuerdo con la información oficial, para toda la zona se tienen Solonchaks (INEGI, 2024), probablemente debido a una escala de trabajo de 1:250 000, muy pequeña; sin embargo, en sitios aledaños se han registrado otros suelos cuyas propiedades físicas y químicas, además de la salinidad, indican la formación de horizontes Móllicos, Cállicos y Vérticos (Gutiérrez-Castorena y Ortiz-Solorio, 1999), que llevan a definir otros taxa de suelos.

El lago de Texcoco es un cuerpo de agua salobre que ha sufrido constantes modificaciones por actividades humanas desde hace más de un siglo (Carranza-Edwards, 2018); principalmente por obras de drenaje tanto superficial como subterráneo (Espinosa-Castillo, 2008) y a partir de la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales que propiciaron el afloramiento de sedimentos lacustres (Soto-Coloballes, 2019). En 2014, el secamiento se aceleró aún más debido a la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM), la cual favoreció el crecimiento urbano en tierras aledañas (Padilla-Romero y Hernández 2023). Cabe mencionar, que el lago ha sido drenado en tiempos y áreas diferentes.

La profundidad del lago de Texcoco fluctuaba de manera natural según las condiciones climáticas (Coras-Merino, 2006), pero se mantenía relativamente somero con una profundidad de 2.5 m, como se informó en 1629 (Parrot, Ramírez-Núñez y Mooser, 2017). En 1980, cuando el lago fue drenado artificialmente, el espejo de agua se redujo en casi 86% (Jazcilevich-Diamant *et al.*, 2015); mientras que el nivel freático se encontraba entre 0.5 y 1.0 m de la superficie del suelo (Coras-Merino, 2006), para el año 2021, se encontró entre 0.8 y 1.5 m (CONAHCYT-COLPOS, 2021).

Como el lago no se desecó por completo, todavía se conservan cuerpos de agua, como la Ciénega de San Juan (natural) hacia el norte y hacia el sur, el artificial Lago Nabor Carrillo, como el cuerpo de agua más grande de la zona (SEMARNAT-CONANP, 2024). En los lugares donde se ha drenado el agua, los sedimentos lacustres que han aflorado se conocen localmente como "jaboncillo". Son materiales arcillosos y limosos con sensación jabonosa por su alto contenido de humedad (con hasta 500%), que al secarse reduce drásticamente su volumen y genera grietas irreversibles (Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena, 2015). El secamiento del lago también favoreció un incremento en la concentración de sales, principalmente de sodio (Na⁺) (Santoyo-de la Cruz, Flores, Khalil, Mancilla y Rubiños, 2021; Jazcilevich-Diamant *et al.*, 2015). Asimismo, uno de los componentes de los sedimentos son los materiales amorfos de sílice (Gutiérrez-Castorena, Stoops, Ortiz-Solorio y López-Ávila, 2005) y carbonatos secundarios (Ortiz-Torres *et al.*, 2023; Gutiérrez-Castorena, Stoops y Ortiz-Solorio, 1998), que les confieren propiedades únicas en el mundo.

A partir de 1965, otra actividad que se llevó a cabo fue la introducción de especies halófilas como *Casuarina equisetifolia*, *Tamarix juniperina* Bunge, *Distichlis spicata* y *Khochia scoparia* (Jazcilevich-Diamant *et al.*, 2015; Anaya *et al.*, 2004; Luna-Guido *et al.*, 2000; Rzedowski, 1957), lo cual puede estar favoreciendo la formación de suelos; sin embargo, la vegetación se distribuye de manera irregular debido a las condiciones de alta salinidad.

El proyecto "Levantamiento de Suelos y Sedimentos: Contribución al proyecto prioritario rescate del lago de Texcoco", realizado en el año 2021, por el Colegio de Postgraduados (COLPOS) y financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (actual Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación) supone una oportunidad para analizar la información generada de los sedimentos/suelos, considerando la distribución geoespacial de sus propiedades físicas y químicas que influyen directamente en su formación.

La hipótesis planteada menciona que, las propiedades relacionadas con el inicio de la formación de suelos a partir de sedimentos lacustres son: estructura, color, retención de humedad, contenido de carbón orgánico y el carácter salino de la zona. Además, su distribución geoespacial heterogénea está relacionada con la alta salinidad y las actividades antrópicas que se han llevado a cabo en el lugar, como el secamiento y la introducción de vegetación halófila.

Los objetivos de la presente investigación son: analizar las características morfológicas y las propiedades químicas y físicas de los sedimentos/suelos lacustres del ex lago de Texcoco; determinar la formación de los suelos y los factores naturales o antrópicos que más han influido en su desarrollo; así como conocer su distribución geoespacial y la profundidad a la que se encuentran.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del Área de Estudio

El antiguo lago de Texcoco forma parte de la Zona Federal Lago de Texcoco ZFLT, ubicada en la Cuenca del Valle de México, cuyas coordenadas extremas son 19° 44' y 19° 47" N y 99° 04' y 98° 91' O, en una altitud promedio de 2336 m. La cuenca tiene un origen aluvial, volcánico y lacustre (Díaz-Rodríguez, 2006), con una geomorfología de cuenca endorreica (González-Torres, Morán, Mori y Martiny, 2015). El clima es semiárido BS KM (w) (i) (García, 2004). La temperatura media anual es de 15.3 °C, y la precipitación media anual es de 650.73 mm (Santoyo-de la Cruz *et al.*, 2021). La tasa de evaporación potencial es casi tres veces mayor que la precipitación (Dendooven *et al.*, 2010), lo que produce la formación de costras salinas en la superficie del suelo cuando no hay vegetación.

El Colegio de Postgraduados realizó un levantamiento de suelos en el año 2021 bajo el financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (actual Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación). Este proyecto se realizó a una escala 1:20 000 en 11 800 ha de la ZFLT y se delimitaron 44 Series de Suelo (SS). Según la clasificación realizada por Barragan-Maravilla, Gutiérrez, Hernandez, Ortiz y Gutiérrez (2025) corresponden a los Grupos de Suelo de Referencia Anthrosols, Technosols, Solonchaks, Solonetz, Fluvisols, Calcisols, Phaeozems y Regosols de acuerdo con la World Reference Base of Soil Resources WRB (IUSS Working Group, 2022). Los datos generados en este proyecto son la base de esta investigación y se encuentran disponibles en la página web del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías CONAHCYT (2025).

Muestreo y Caracterización de los Sedimentos/Suelos

En cada Serie de Suelo (SS) se excavó un pozo pedológico típico, con unas dimensiones promedio de 1.5 m (ancho) × 1.5 m (largo) × 1.5 m de profundidad, o hasta encontrar el nivel freático. La descripción de los perfiles del suelo se realizó siguiendo los manuales de descripción de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Science Division Staff, 2017) y de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2009). La localización y delimitación de cada Serie de Suelo, así como algunos de los paisajes presentes en el antiguo lago de Texcoco, pueden apreciarse en la Figura 1.

La formación de suelos implica el desarrollo de la estructura, el establecimiento de la vegetación y la ocurrencia de procesos de formación de suelos en los primeros 200 cm de la superficie de la tierra (IUSS Working Group, 2022; Soil Survey Staff, 2022). En este trabajo se analizan las propiedades y características de los sedimentos/suelos relacionados con zonas desecadas del lago que ayudan a entender su formación, la morfología (estructura y color, y rasgos pedológicos), las propiedades físicas (densidad aparente, clase textural, retención de humedad) y las propiedades químicas (pH y sales, sodio intercambiable y carbono orgánico).

La caracterización morfológica consistió en diferenciar las capas u horizontes del perfil del suelo, en los que se registró la siguiente información: profundidad, forma y claridad de la transición al siguiente horizonte; color; textura al tacto; tipo, tamaño y desarrollo de la estructura; cantidad y tamaño de raíces; tipo, tamaño y cantidad de poros; rasgos pedológicos y reacciones en el suelo para identificar la presencia de carbonatos (con HCl, al 10%), materia orgánica o manganeso (con H₂O₂, al 30%) y materiales amorfos (NaF + fenolftaleína).

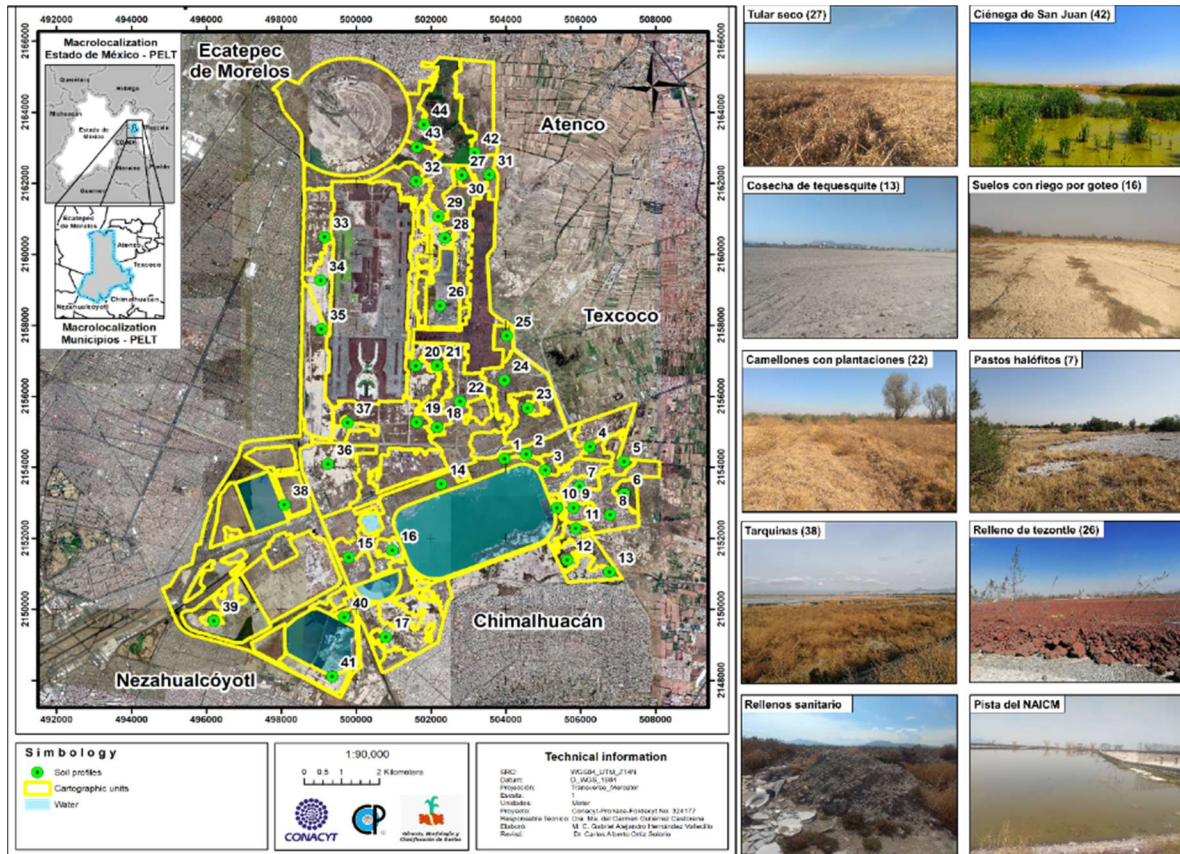


Figura 1. Localización de la zona de estudio, delimitación y distribución de las Series de Suelo, y algunos paisajes del ex lago de Texcoco (CONAHCYT -COLPOS, 2021).

Figure 1. Location of the study area, delineation, and distribution of Soil Series and some landscapes of the former Lake Texcoco (CONAHCYT -COLPOS, 2021).

De cada capa/horizonte se recolectaron dos kilogramos de muestra de sedimentos/suelos, que fueron secadas a temperatura ambiente bajo sombra y tamizadas para obtener la fracción de tierra fina (< 2 mm de diámetro), con la finalidad de realizar determinaciones químicas y físicas. En total, se recolectaron 245 muestras de sedimentos/suelos. Además, se recogieron muestras de suelo en un cilindro de cobre con volumen conocido para obtener los datos de densidad aparente y retención de humedad por gravimetría.

Análisis de Propiedades Químicas y Físicas

Las propiedades químicas fueron: pH (1:2.5, suelo: H₂O), conductividad eléctrica CE en dS m⁻¹ (en el extracto de pasta de saturación, ES) y carbono orgánico CO (Walkley y Black, 1934), con el cual se obtuvo el porcentaje de materia orgánica usando el factor de conversión 1.724. Las propiedades físicas que se determinaron fueron: textura (método de la pipeta americana), y el color en seco y en húmedo en las muestras molidas y tamizadas, comparando los colores con la carta de colores Munsell. Todos los procedimientos fueron extraídos del Manual de Procedimientos de Análisis de Suelos de Van Reeuwijk (2002).

Elaboración de Mapas Temáticos

La distribución geoespacial de los sedimentos/suelos se expresó en mapas temáticos. Con los datos de la capa/horizonte de cada Serie de Suelo se realizaron los siguientes mapas: 1) sedimentos lacustres, con la presencia o ausencia de sedimentos a < 50, 50 - 100 y > 100 cm de profundidad; 2) tipo de estructura de la superficie del suelo; 3) condiciones redox, con la presencia/ausencia de estos rasgos dentro del perfil del suelo; 4) conductividad eléctrica con valores < 4, entre 4 y 15 y > 15 dS m⁻¹, y 5) carbón orgánico (CO), se obtuvieron

cinco intervalos de porcentaje de CO y se relacionaron con la profundidad de sedimentos. Para el contenido de humedad se consideró el mapa del Proyecto de CONAHCYT -COLPOS (2021), porque se realizó con datos obtenidos en muestras superficiales de sedimentos/suelos recolectados cada 200 metros, lo cual permite observar con mayor precisión estas propiedades de sedimentos/suelos. Los mapas se elaboraron en el software QGIS.org (2024) v.3.10, creando *shapes file* para cada una de las propiedades evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Morfología

Profundidad de los sedimentos lacustres. Las SS del antiguo lago de Texcoco se caracterizan por presentar horizontes y capas de sedimentos y suelos. Los sedimentos lacustres (SL) que se encuentran en la superficie del suelo, se localizan cerca de Chimalhuacán y Atenco (SS 17, 12, 13, 32 y 29), donde, por la naturaleza salina del sitio, en época de estiaje se forman costras salinas, conocidas localmente como tequesquite; así como en áreas de desecación de aguas residuales (SS 33 y 34) y donde se construyeron tarquinas o cuerpos de agua artificiales que aún reciben aguas residuales (SS 38, 39, 41). Sin embargo, los SL que se encuentran entre los 50 y los 100 cm de profundidad de la superficie del suelo, están relacionados con los sitios fuertemente perturbados para la construcción de las pistas del NAICM, como se observa en el centro de la ZFLT (en las SS 18, 19, 20, 21, 22, 23 y 24). Los SL que se encuentran a más de 100 cm de profundidad se localizan en sitios que fueron drenados hace más de cuatro décadas (Soto-Colobaltes, 2019), como parte de la construcción del lago Nabor Carrillo (SS 8, 9, 11, 15). En la Figura 2a se puede observar la profundidad a la que se registraron los sedimentos lacustres, cuya distribución está relacionada con la actividad antrópica. Sin embargo, el carácter de sedimento sigue presente en todos las SS, aunque con diferente grado de desarrollo de los suelos.

Estructura. Se registraron estructuras: masivas, prismáticas o columnares y sueltas, así como bloques angulares y subangulares, y granulares (Figura 3) cuyo desarrollo está relacionado tanto con la pérdida de humedad como por el establecimiento de la vegetación (Figura 2b).

Si los SL están en la superficie (< 50 cm), se tienen estructuras sueltas y corresponden a sitios con mayor secamiento o a las antiguas playas del lago, cerca de Chimalhuacán (SS 5, 6, 8, 7, 9, 11, 12). Cuando están entre 50 y 100 cm de profundidad respecto a la superficie del suelo, se tienen estructuras de bloques subangulares y granulares, pero donde la vegetación halófila se ha establecido o en sitios poco perturbados cercanos a la Ciénega de San Juan (SS 42, 43, 27, 29 y 30) y en las reforestaciones ubicadas cerca del lago Nabor Carrillo (SS 1, 2, 4, 14 y 15). En ambos casos, como se observa en la Figura 4, debajo de estas estructuras es común la presencia de estructuras prismáticas, columnares o masivas, en relación con el grado de secamiento. Las estructuras laminares que se han registrado intercaladas entre capas/horizontes, corresponden a capas de cenizas volcánicas o al arrastre hídrico de los sedimentos.

Se ha mencionado que las estructuras masivas son características de materiales lacustres que, al secarse y bajo la influencia de la vegetación, forman estructuras de bloques subangulares (Gozukara *et al.*, 2021). Para los suelos del ex lago, esta condición podría estar relacionada con la pérdida de humedad y el establecimiento de la vegetación, que se introdujo hace más de 30 años como parte de las actividades del Proyecto Plan Lago de Texcoco (Espinosa-Castillo, 2008).

Color y condiciones redox. Los colores observados en los sedimentos/suelos que se registraron en campo son diversos. En los SL de la superficie, dominan los 10YR, mientras que después de los 50 cm de profundidad suelen ser 2.5Y y 5Y. En todos los casos, los value y los chromas suelen denotar colores 1) grisáceos: muy oscuros, claros, olivos y verdosos; 2) pardos: olivo claro, olivo oscuro, grisáceos, amarillentos oscuros y rojizos oscuros y 3) negros, blancos o la combinación de estos. Esta diversidad de colores es originada por la composición mineralógica de los sedimentos en estado de reducción y posterior oxidación producida por el secamiento y anegamiento de los sedimentos y las fluctuaciones del manto freático, que en ocasiones se puede confundir con policromía (Figura 5). Estos colores oscuros en la matriz del suelo son indicadores del estado reducido de los materiales, mientras que las motas y colores rojizos-anaranjados o brillantes denotan un estado de oxidación (Bedard-Haughn, 2011).

De acuerdo con Vepraskas(2001), las condiciones redox se expresan mediante empobrecimientos, concentraciones o una matriz reducida. En las SS del ex lago de Texcoco, se consideró que los sedimentos están reducidos cuando son de color negro y desprenden un fuerte olor a huevo podrido; las concentraciones oxidadas se expresan en forma de revestimientos de hierro (de color rojizo o naranja), y las condiciones redox se expresan mediante la combinación de estos colores.

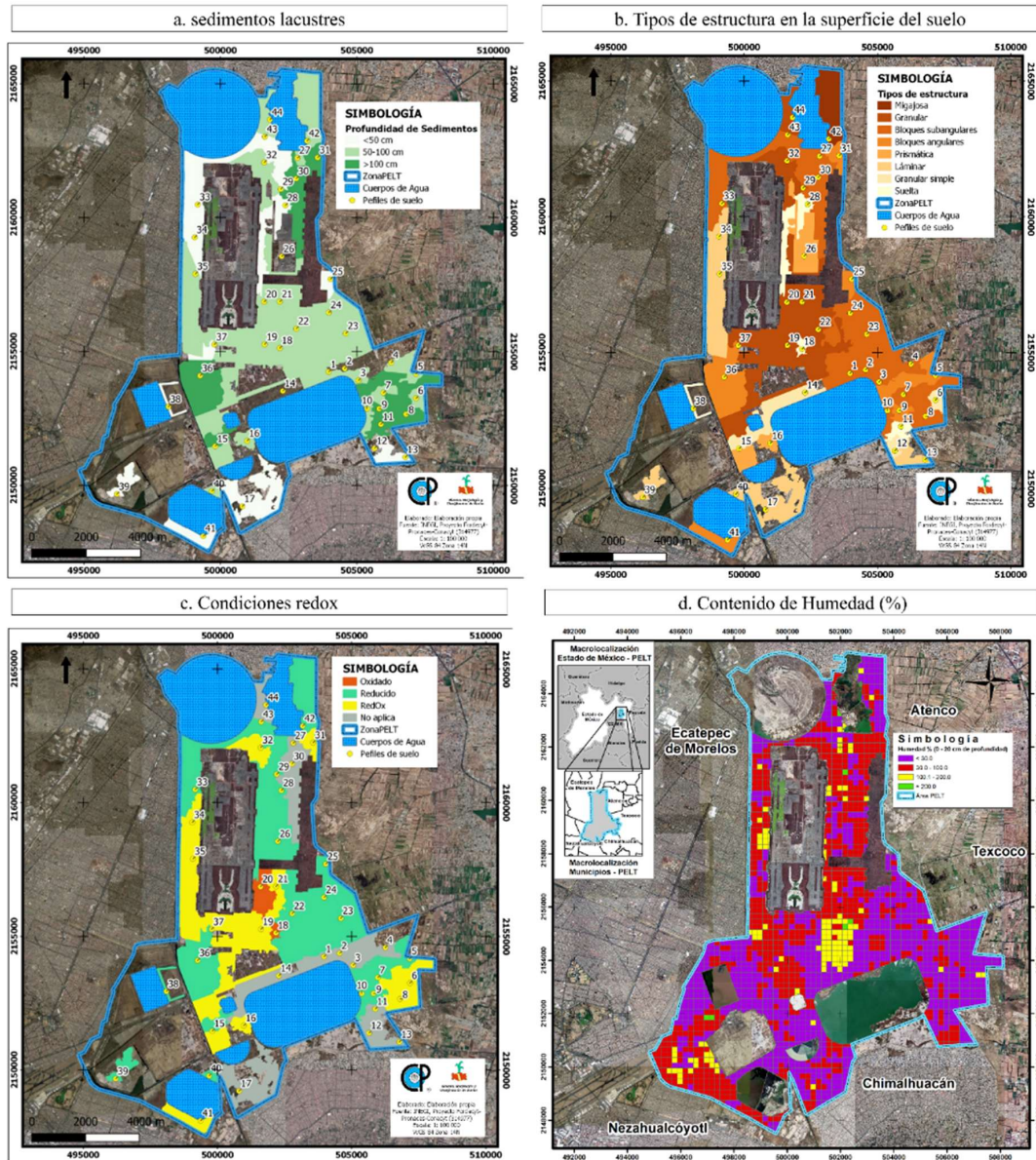


Figura 2. Distribución de a) Profundidad de sedimentos lacustres, b) Tipos de estructura, c) Condiciones redox y d) Contenido de humedad.

Figure 2. Distribution of a) Lacustrine sediment depth, b) Types of soil structure, c) Redox conditions, and d) Moisture content.

Debido a la diversidad morfológica de los sedimentos/suelos no se observa un patrón de distribución claro para las condiciones óxido-reducción (Figura 2c). La ocurrencia de dichos procesos puede deberse a las fluctuaciones del manto freático y a la entrada constante de aguas residuales y agua de lluvia, o bien a una serie de reacciones químicas que involucran, principalmente al hierro (Fe), al manganeso (Mn) y al azufre (S) (Nawaz, Bourrie y Gulf, 2014), que valdría la pena estudiar con mayor detalle.

Por otra parte, en suelos formados a partir del secamiento de materiales, se ha reportado que las condiciones redox dependen del nivel freático (Driese, Simpson y Eriksson, 1995) y composición química de las aguas de riego o mal drenaje (Pla-Sentís, 2014), tal como ocurre en los suelos del antiguo lago de Texcoco. Al igual que la estructura, los colores de los sedimentos/suelos varían con la profundidad y su distribución se atribuye a las condiciones de humedad en la ZFLT.

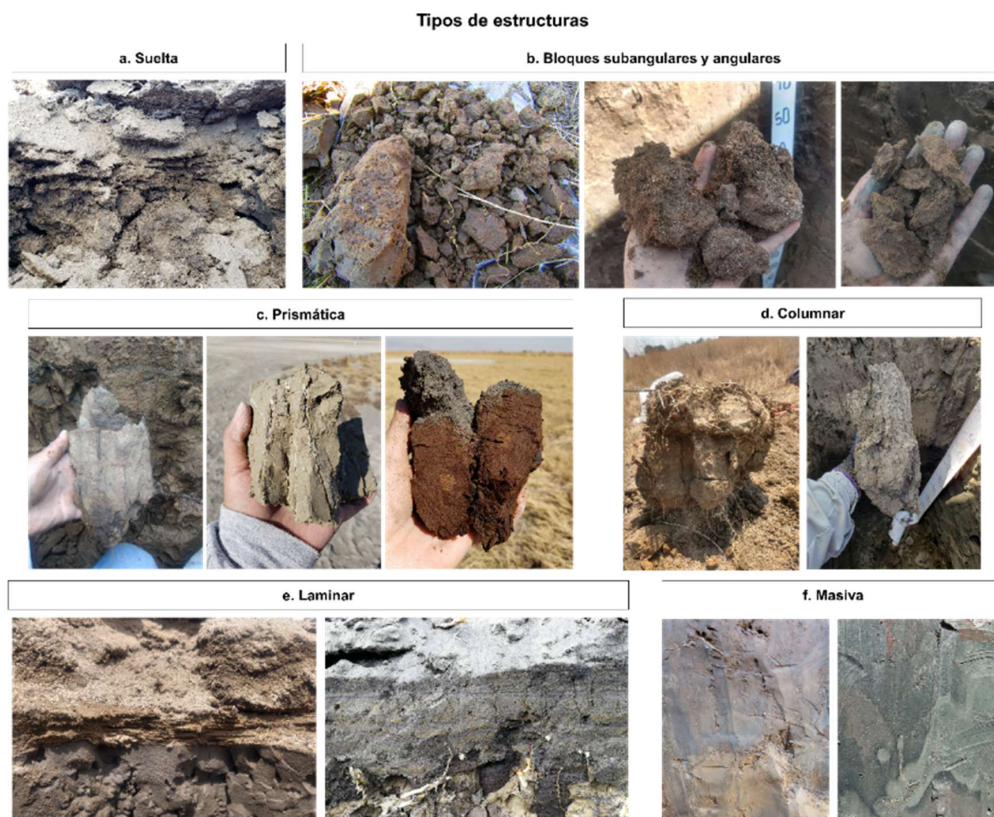


Figura 3. Tipos de estructuras en los suelos del ex lago de Texcoco.
Figure 3. Types of structures in the soils of the ancient Lake Texcoco.

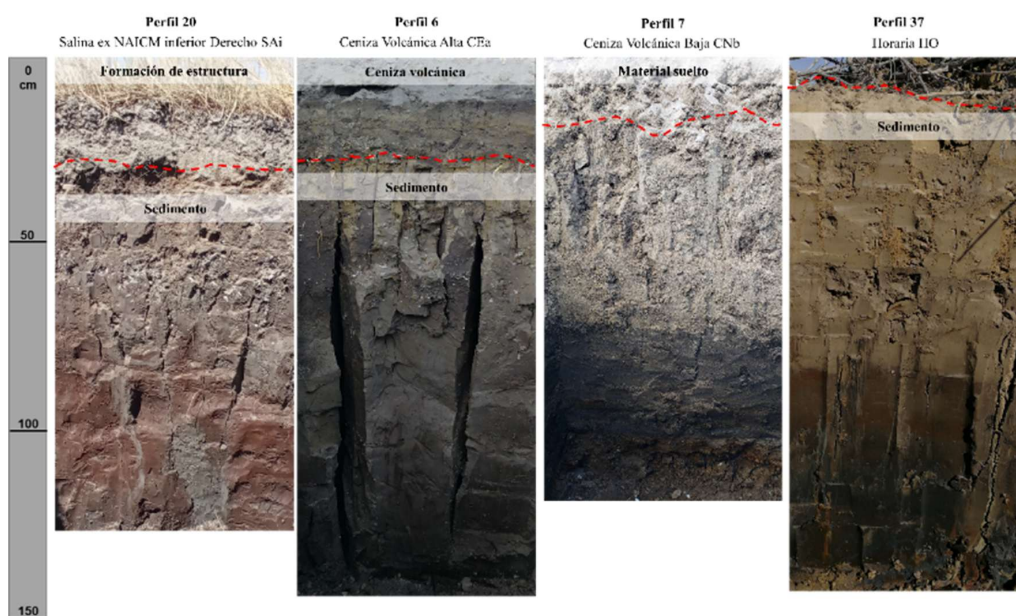


Figura 4. Desarrollo de estructuras en los sedimentos lacustres del ex lago de Texcoco.
Figure 4. Development of the structure of the lake sediments of the former Lake Texcoco.

Policromía y condiciones redox



Figura 5. Condiciones redox o policromía de los suelos del ex lago de Texcoco.
Figure 5. Redox conditions or polychromy of the soils of the former Lake Texcoco.

Rasgos pedológicos. De manera general, a partir de los 50 cm de profundidad de la superficie del suelo se registraron revestimientos de arcillas, rellenos de arenas, nódulos y concreciones de sílice, concreciones e hipo-revestimientos de hierro, y láminas delgadas de materiales finos, cada uno de estos rasgos se describen a continuación:

Revestimientos de arcilla. En los sedimentos/suelos del ex lago los revestimientos de arcillas tienen formas irregulares y una apariencia “seca” (si el sedimento ha perdido humedad o está en la superficie) o “cerosa” (si el sedimento está húmedo). Se localizan tanto en las caras verticales y horizontales de los bloques angulares y prismas, como entre las grietas que se forman a lo largo del perfil del suelo, e incluso en estructuras masivas (Figura 6a).

La formación de revestimientos de arcilla es el resultado de la translocación y deposición progresiva de partículas de arcilla de horizontes superiores a inferiores en el perfil (FitzPatrick, 1993), que da lugar al proceso de argiluvación. Este proceso, implica el movimiento de agua hacia abajo por infiltración a través del perfil del suelo, arrastrando consigo partículas de arcilla y, con el secado periódico del suelo, las arcillas se adhieren a una superficie vacía, y quedan retenidas dentro de los poros del suelo (Buurman, Jongmas y PiPujol, 1998; McKeague, Guertin, Page y Valentine, 1978). No obstante, en condiciones de inundación (es decir, ambientes reducidos) este proceso no está bien definido e indica que no solo se mueve arcilla, sino que también limos y humus por las grietas y poros (Bramer, 1971); o bien, que las arcillas en solución, bajo la influencia del manto freático, se acumulan por capilaridad (Bedard-Haughn, 2011).

En los sedimentos/suelo del ex lago de Texcoco, el proceso de argiluvación no está claro, debido a la dificultad para identificar el horizonte eluvial y por ende el movimiento de materiales arcillosos; además, las arcillas se localizan en las grietas formadas por el secamiento y no entre los poros y caras de los agregados. Según Bockheim y Hartemink (2013), para que la arcilla pase del horizonte eluvial al iluvial es necesaria una cantidad suficiente de agua, por lo que se sugiere el posterior estudio mineralógico y micromorfológico para corroborar el tipo y arreglo de las arcillas.

Rellenos de arena. En algunas SS del ex lago de Texcoco, los revestimientos de arena se pueden encontrar en las caras verticales y horizontales de los agregados, o como granos de arena mezclados entre la matriz del suelo a lo largo del perfil del suelo (Figura 6b). Estos rasgos se han registrado en zonas cercanas a la construcción de drenes, a los cuerpos de agua, y no solo en las orillas del lago. Estas arenas pueden ser oolitos de carbonato de calcio que se forman en las playas del lago y se precipitan entre las grietas debido a los cambios en la concentración de CO_2 , temperatura y evaporación (Gutiérrez-Castorena, Ortiz-Solorio y López, 2000). También hay cenizas volcánicas que se depositaron como resultado de diversos eventos volcánicos durante la formación de la Sierra de Chichinautzin y la formación endorreica de la Cuenca (Ochoa-Flores, 2021; Díaz-Rodríguez, 2006). En ambos casos, actualmente, las partículas se mueven entre las grietas de desecación en el ex lago, debido a los bajos niveles de agua y a la disminución de la humedad, así como al retraimiento del lago, tal como lo han relacionado en estudios arqueológicos realizados en este sitio (Córdova, Morett, Frederick y Gámez, 2022), por lo que es común encontrarlos en sedimentos/suelos donde también se mueven arcillas.

Nódulos y concreciones. Otros rasgos que se presentan con menor frecuencia son nódulos y concreciones de sílice o hierro (Figura 6c). Las acumulaciones de sílice tienen formas concéntricas, irregulares y laminares. Cuando se localizan en la parte superior del suelo, entre materiales secos su consistencia es dura, mientras que, si se encuentran en la parte inferior del suelo, en los sedimentos con mayor humedad, su consistencia es blanda. Geoespacialmente, estos rasgos se encuentran hacia el centro del lago, aunque no siguen un patrón de distribución homogéneo. Se ha mencionado que estas precipitaciones de sílice amorfa son de origen geológico, como resultado de las fluctuaciones en el pH del agua del lago, que ha pasado de ser muy alcalino a alcalino (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2000), influenciado por la precipitación pluvial o el drenado del lago.



Figura 6. Rasgos pedológicos presentes en los suelos del ex lago de Texcoco.
Figure 6. Pedological features present in the soils of the former Texcoco lake.

Hipo-revestimientos. Los óxidos de hierro ocurren entre las grietas, o bien, como manchas grandes dentro de la matriz del suelo. Esto puede estar relacionado con una fuerte reducción de los materiales, donde el Fe^{2+} se encuentra en estado soluble, pero, en presencia de oxígeno, se inmoviliza y se precipita como Fe^{3+} (Shaheen, Rinklebe, Frohen, Blanco y DeLaune, 2014; Oades, 1993). Estos rasgos son característicos de un proceso de gleyzación que ocurre en los sedimentos lacustres por influencia del manto freático (Yang *et al.*, 2019).

Láminas delgadas desprendibles. También se identificaron láminas delgadas que se desprenden de la superficie de los prismas cuando se secan al ser expuestos al aire (Figura 6d) constituidas principalmente por halita (NaCl), de acuerdo con el análisis en rayos X. En la literatura científica, este rasgo no ha sido reportado, pero se sabe que la halita es la sal más frecuente en suelos salinos (Mees y Tursina, 2018).

Propiedades Químicas y Físicas

Al igual que la morfología, el comportamiento de las propiedades químicas y físicas de los sedimentos/suelos muestran heterogeneidad a lo largo del perfil. Sin embargo, tienden a homogeneizar su distribución geoespacial dentro de la ZFLT en relación con el grado de perturbación del lugar.

pH y salinidad. En los horizontes superficiales y con presencia de vegetación, el pH promedio es 8.3; mientras que en capas/horizontes subsuperficiales es 10. La alcalinidad de estos suelos se debe a la presencia de sales solubles, con conductividades eléctricas que van desde 2 y hasta 90 dS m⁻¹. En la Figura 7a se puede apreciar que la concentración de sales > 15 dS m⁻¹ predomina en las áreas de desecación y construcción de las pistas del ex aeropuerto y las lagunas de regulación. Es común observar altas concentraciones de sales en lagos poco profundos y en los que se han formado suelos (Verrecchia, 2007; Ellis y Atherton, 2003), aunque no en concentraciones tan altas como las que ocurren en los suelos del antiguo lago de Texcoco.

Cabe mencionar que el ion dominante es el sodio (Na⁺) alcanzando valores de sodio intercambiable de 99.9% en la mayoría de los suelos de la ZFLT, ya sea en la superficie o a cualquier profundidad (CONAHCYT-COLPOS, 2021). El proceso de acumulación de sales puede estar relacionado con la evaporación (Verrecchia, 2007), un drenaje deficiente, y la escasez de agua en época de sequía, cuando las sales en solución ascienden por capilaridad a la superficie (Scherger, Lexow, Zanella y Carabajo, 2019; Segura-Castruita, Gutiérrez, Ortiz y Gómez, 2000).

Carbón orgánico. El carbón orgánico (CO) muestra un comportamiento irregular a lo largo del perfil del suelo y su distribución en la ZFLT depende de las actividades humanas que se han llevado a cabo y del proceso de sedimentación. Cuando los sedimentos están < 50 cm de profundidad y predominan las costras salinas (cosecha de tequesquite) y las áreas de desecación de aguas residuales, el contenido de CO oscila entre 1.5 y 2.8%. Con sedimentos de entre 50 y 100 cm, el contenido de CO es más variable, ya que hay vegetación de pastos halófilos, reforestaciones o cuerpos de agua (Figura 7b). Sin embargo, en los sitios con sedimentos a > 100 cm de profundidad, el contenido de CO oscila entre 4.1 y 5.4 por ciento.

Los altos contenidos de CO en horizontes subyacentes pueden deberse a la constante adición de aguas residuales o la introducción de pastos halófilos en el antiguo lago (Guzmán-Quintero, Palacios, Carrillo, Chávez y Nikolskii, 2007). Asimismo, la acumulación de microorganismos que habitaron en lago antes de su desecación, como se ha mencionado para otros sitios (Meyers y Ishiwatari, 1993); o bien, por cambios en la re-deposición de los sedimentos que se formaron en condiciones climáticas diferentes a las actuales (Meyers y Lallier, 1999).

Clase textural. Las clases texturales son muy heterogéneas, tan solo en los horizontes superficiales se tienen 11 clases diferentes; por ejemplo, franco arenosa, franco arcillo limosa o franco arcillosa. En la Figura 8, se muestra cómo las partículas finas tienden a incrementarse con la profundidad (en presencia de sedimentos lacustres), lo cual, también se ha observado en suelos aledaños al ex lago de Texcoco, en Atenco, Texcoco y Chiconcuac (Segura-Castruita *et al.*, 2000).

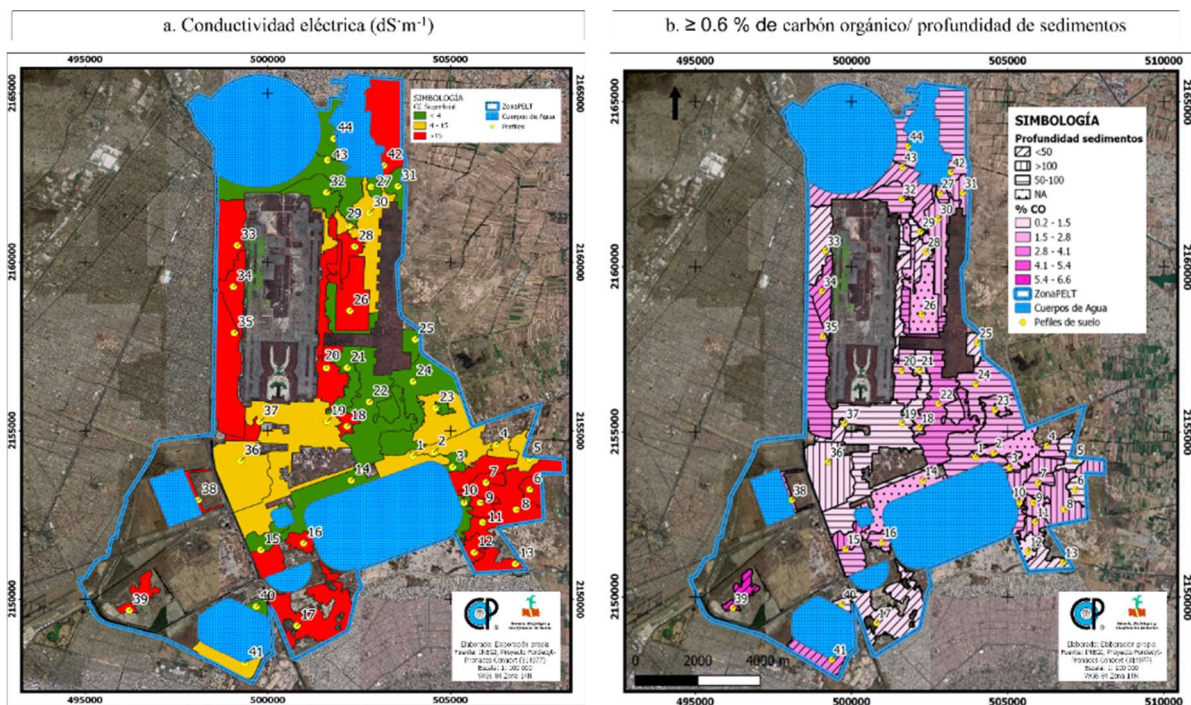


Figura 7. Distribución de la a) Conductividad eléctrica y b) carbón orgánico en relación con la profundidad de suelos/sedimentos del ex lago de Texcoco.

Figure 7. Distribution of the a) electrical conductivity and b) organic carbon content as a function of depth in the soils/sediments of the former Lake Texcoco.

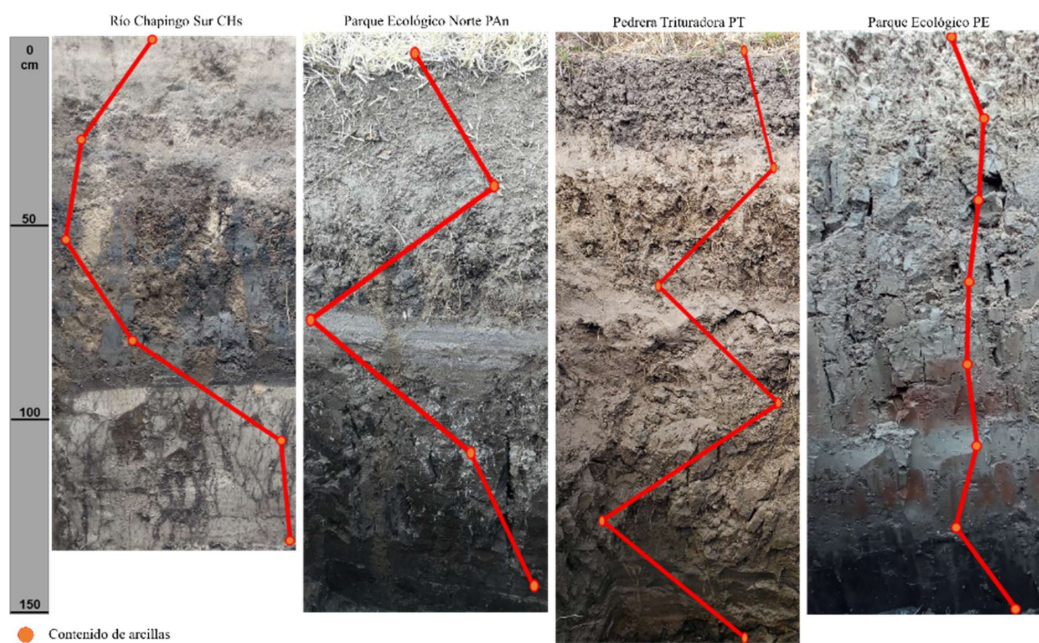


Figura 8. Incremento de arcillas en suelos/sedimentos del ex lago de Texcoco.
Figure 8. Increase in clay in soils/sediments of the former Texcoco lake.

Cabe mencionar que en un mismo perfil de suelo pueden llegar a existir al menos tres diferentes clases texturales entre las distintas capas y horizontes. Esto indica diferentes eventos de deposición de los sedimentos volcánicos y lacustres provenientes de los ríos (Carreón-Freyre, González, Cerca, Gutiérrez y Jiménez, 2011), así como de materiales eólicos como resultado de las tolvaneras que ocurren en el sitio (Moreno-Sánchez, 2018). En ambos casos, los materiales se mueven a través de las grietas formadas por la desecación del lago.

Densidad aparente. Esta propiedad presenta un comportamiento irregular dentro del perfil del suelo como resultado del establecimiento de vegetación, la intercalación de sedimentos eólicos, volcánicos o lacustres y otros factores. El valor promedio de la densidad aparente en las capas/horizontes situados a < 50 cm de profundidad es de 0.84 g cm^{-3} , mientras que entre 50 y 100 cm de profundidad es de 0.66 g cm^{-3} . Las densidades aparentes bajas en SL también han sido reportadas en sitios cercanos; los cuales están relacionadas con la disposición de partículas de arcilla o limo, la presencia de sílice opalina que tiene una gran cantidad de microporos (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2005) y la alta hidratación de estos.

Retención de humedad. En las capas/horizontes superficiales de los sitios que han estado influenciados por las actividades humanas, esta es baja (en promedio, 49.38% de humedad), aun cuando los SL están cerca de los cuerpos de agua. En los SL con una profundidad a > de 100 cm, el promedio es de 490% de humedad (Figura 2d). Esto también se puede relacionar con el grado de perturbación en el sitio, si los sedimentos han sido expuestos o bien, por la profundidad a la que se encuentra el manto freático. Ortiz-Solorio y Gutiérrez-Castorena (2015) informaron que una vez que los sedimentos pierden humedad, estos ya no la recuperan, aunque se intente hidratarlos, lo que favorece la formación de grietas irreversibles, que eventualmente conducirá a la formación de agregados (Verrecchia, 2007; Kodikara, Barbour y Fredlund, 1999; Oades, 1993).

Además, la pérdida de humedad incrementa la concentración de sodio, que actúa como dispersante de las partículas de arcillas (Bronick y Lal, 2005) y permite que otras partículas se muevan a través del perfil del suelo. Asimismo, influye en la dinámica del agua, lo que ocasiona procesos redox que deberían estudiarse con mayor detalle.

CONCLUSIONES

A pesar de que el antiguo lago de Texcoco ha sufrido un importante impacto antrópico, aún conserva su carácter lacustre. Sin embargo, la naturaleza salina del lago, su desecación artificial (diferencial) y la introducción de pastos halófilos han favorecido la formación de suelo a partir de los sedimentos lacustres. Estos factores influyen en el desarrollo de estructuras prismáticas y de bloques, la presencia de rasgos pedogenéticos (como el movimiento de partículas de arcilla y arena), así como en las condiciones redox (que dan lugar a una gran diversidad de colores). Todo ello denota una morfología diversa para un área relativamente pequeña y la ocurrencia de procesos de formación de suelo.

El contenido de carbono orgánico, la densidad aparente y la textura no señalan la formación de suelo, ya que son resultado de la entrada constante de aguas residuales y del origen fluvial y aluvial de los materiales.

La morfología de los suelos y sus propiedades físicas y químicas muestran una distribución geoespacial y vertical dentro del perfil del suelo muy heterogénea e indican que los suelos del lago de Texcoco se encuentran en etapas tempranas de desarrollo, aunque no es posible determinar a qué profundidad ocurre su formación.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos analizados durante el estudio actual están disponibles en el repositorio: Levantamiento de suelos y sedimentos. Contribución al proyecto prioritario rescate del lago de Texcoco, en el sitio web: <https://socioecologia.conacyt.mx/texcoco/diagnostico>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

El proyecto "Levantamiento de Suelos y Sedimentos. Proyecto prioritario Rescate Lago de Texcoco" fue financiado por la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (actual SECIHTI). Convocatoria M0037-2020-4. FORDECYT M0037. Proyecto 0314977.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Análisis formal, investigación, escritura y edición: S.M.B.M. Análisis formal, investigación, escritura, edición y adquisición de fondos: M.C.G.C. Metodología y revisión: C.A.O.S. Metodología, conceptualización y redacción: G.A.H.M. Redacción, revisión y edición: E.V.G.C., C.I.H.M. y D.S.F.R.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue parte de la Tesis de Doctorado en Ciencias de Sandra Monserrat Barragán Maravilla, quien fue apoyada con una beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (actual SECIHTI) del Gobierno Mexicano y fue dirigida por la Dra. Ma del Carmen Gutiérrez Castorena.

LITERATURA CITADA

- Anaya, M., Ojeda, R., Leyva, T., Sánchez, P., Uruzquieta, A., & Rivera, D. (2004). *Proyecto: Siembra aérea de Kochia scoparia en la Zona Federal del ex lago de Texcoco*. México: Colegio de Postgraduados-Comisión Nacional del Agua.
- Barragan-Maravilla, S. M., Gutiérrez-Castorena, M. C., Hernandez-Vallecillo, G. A., Ortiz-Solorio, C. A., & Gutiérrez-Castorena, E.V. (2025). Soils formed from non-organic limnic materials and the anthropic influence on their classification, Texcoco, Mexico. *Catena*, 255, 109041.
- Bedard-Haughn, A. (2011). Gleysolic soils of Canada: Genesis, distribution, and classification. *Canadian Journal Soil Sciences*, 91, 763-779. <https://doi.org/10.4141/cjss10030>
- Bockheim, J. G., & Hartemink, A. E. (2013). Distribution and classification of soils with clay-enriched horizons in the USA. *Geoderma*, 2013, 209-210. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.009>
- Bramer, H. (1971). Coatings in seasonally flooded soils. *Geoderma*, 6(1), 5-16. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(71\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(71)90047-4)
- Bronick, C.J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>
- Buurman, P., Jongmans, A. G., & PiPujol, M. D. (1998). Clay illuviation and mechanical clay infiltration-Is there a difference?. *Quaternary International*, 51, 66-69. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(98\)90225-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(98)90225-7)

- Carranza-Edwards, A. (2018). Correlación litológica del subsuelo del lago de Texcoco. *Hidrobiológica*, 28(1), 93-101. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n1/Carranza>
- Carreón-Freyre, D., González, M., Cerca, M., Gutiérrez, R., & Jiménez, A. (2011). Caracterización geomecánica de los suelos de Iztapalapa, México, para evaluar el fracturamiento causado por deformación diferencial. In *14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Toronto, Ontario, Canadá: Canadian Geotechnical Society (CGS)- Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
- CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías). (2025). Rescate del Lago de Texcoco: Diagnóstico. Consultado el 22 de abril, 2022, desde <https://socioecologia.conahcyt.mx/texcoco/diagnostico>
- CONAHCYT-COLPOS (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías - Colegio de Postgraduados). (2021). Levantamiento de suelos y sedimentos: contribución al proyecto prioritario rescate lago de Texcoco. Consultado el 22 de abril, 2022, desde <https://socioecologia.conahcyt.mx/texcoco/diagnostico>
- Coras-Merino, P. M. (2006). Elementos climáticos y su relación con la fluctuación del nivel freático. *Terra Latinoamericana*, 24(3), 375-382.
- Córdova, C., Morett-Alatorre, L., Frederick, C., & Gámez-Eternod, L. (2022). Lacustrine dynamics and Tlatel-type settlements from middle formative to late Aztec in the eastern part of Lake Texcoco, Mexico. *Ancient Mesoamerica*, 33(2), 211-226.
- Dendooven, L., Alcántara-Hernández, R. J., Valenzuela-Encinas, C., Luna-Guido, M., Perez-Guevara, F., & Marsch, R. (2010). Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(6), 865-877. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.014>
- Díaz-Rodríguez, J. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(2), 111-129.
- Driese, S., Simpson, E., & Eriksson, K. (1995). Redoximorphic paleosols in alluvial and lacustrine deposits, 1.8 GA Lochness Formation, Mount Isa, Australia: Pedogenic processes and implications for paleoclimate. *Journal Sedimentary Research*, 65(4), 675-689. <https://doi.org/10.1306/D4268199-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Ellis, S., & Atherton, J. K. (2003). Properties and development of soils on reclaimed alluvial sediments of the Humber estuary, Eastern England. *Catena*, 52(2), 129-147. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00179-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00179-0)
- Espinosa-Castillo, M. (2008). Procesos y actores en la conformación del suelo urbano en el ex lago de Texcoco. *Economía, Sociedad y Territorio*, 8(27), 769-798.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2009). Guía para la descripción de suelos. Cuarta edición. Roma, Italia: FAO.
- FitzPatrick, E. A. (1993). *Soil Microscopy and Micromorphology*, Chichester, England: John Wiley and Sons,
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Distrito Federal, México: Instituto de Geografía-UNAM.
- González-Torres, E. A., Morán-Zenteno, D. J., Mori, L., & Martiny, B. M. (2015). Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 285-297.
- Gozkara, G., Zhang, Y., Hartemink, A. E., Altunbas, S., & Sari, M. (2021). Soil chronosequence and biosequence on old lake sediments of the Burdur Lake in Turkey. *Pedosphere*, 31(6), 882-891. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60040-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60040-1)
- Gutiérrez-Castorena, C., & Ortiz-Solorio, C. (1999). Origen y Evolución de los suelos del ex lago de Texcoco, México. *Agrociencia*, 33(2), 199-208.
- Gutiérrez-Castorena, C., Ortiz-Solorio, C.A., & López, A. (2000). Caracterización de los estratos lacustres cementados en el ex lago de Texcoco. En L. Quintero, T. Reyna, L. Corlay, A. Ibáñez & N. García (Eds.). *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo I (pp. 108-125). Montecillo, México: Colegio de Postgraduados.
- Gutiérrez-Castorena, M. C., Stoops, G., Ortiz-Solorio, C. A., & López-Ávila, G. (2005). Amorphous silica materials in soils and sediments of the exlago de Texcoco, Mexico: An explanation for its subsidence. *Catena*, 60, 205-226.
- Gutiérrez-Castorena, M. C., Stoops, G., & Ortiz-Solorio, C. (1998). Carbonato de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 16(1), 11-19.
- Guzmán-Quintero, A., Palacios-Vélez, O. L., Carrillo-González, R., Chávez-Morales, J., & Nikolskii-Gavrilov, I. (2007). La contaminación del agua superficial en la cuenca del río Texcoco, México. *Agrociencia*, 41(4), 385-393.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2024). Edafología. Consultado el 11 de abril, 2024, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>, consulta 11/04/2024.
- IUSS Working Group (2022). International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. *International Union of Soil Sciences (IUSS)*, Vienna, Austria: World Reference Base for Soil Resources.
- Jazcilevich-Diamant, A., Siebe, C., Estrada, C., Aguillón, J., Rojas, A., Chávez-García, E., & Sheinbaum-Pardo, C. (2015). Retos y oportunidades para el aprovechamiento y manejo ambiental del ex lago de Texcoco. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 145-166.
- Kodikara, J., Barbour, S. L., & Fredlund, D. G. (1999). Changes in clay structure and behavior due to wetting and drying. En V. Nihal & R. Colman (Eds.). *The proceedings of the 8th Australia New Zealand Conference on Geomechanics*, (pp. 179-185). Tasmania, Australia: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Kruczkowska, B., Jonczak, J., Słowińska, S., Bartczak, A., Kramkowski, M., Uzarowicz, Ł., ... & Słowiński, M. (2021). Stages of soil development in the coastal zone of a disappearing lake-a case study from central Poland. *Journal of Soils and Sediments*, 21(3), 1420-1436.
- Luna-Guido, M. L., Beltrán-Hernández, R. I., Solís-Ceballos, N. A., Hernández-Chávez, N., Mercado-García, F., Catt, J. A., ... & Dendooven, L. (2000). Chemical and biological characteristics of alkaline saline soils from the former Lake Texcoco as affected by artificial drainage. *Biology and Fertility of Soils*, 32, 102-108.
- McKeague, J. A., Guertin, R. K., Page, F., & Valentine, K. W. G. (1978). Micromorphological evidence of illuvial clay in horizons designated Bt in the field. *Canadian Journal of Soil Science*, 58(2), 179-186.
- Mees, F., & Tursina, T. (2018). Salt Minerals in Saline Soils and Salt Crusts. En G. Stoops, V. Marcelino & F. Mees (Eds.). *Micromorphological Features of Soils and Regoliths* (pp. 289-321). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00011-5>
- Mendyk, Ł., Świtoniak, M., Bednarek, R., & Falkowski, A. (2015). Genesis and classification of the soils developed from the sediments of the former Oleszek mill pond basin (the Chełmińskie Lakeland, N Poland) / Geneza i pozycja systematyczna gleb wykształconych z osadów niecki dawnego stawu młyńskiego Oleszek (Pojezierze Chełmińskie). *Soil Science Annual*, 66(1), 29-35.
- Meyers, P., & Ishiwatari, R. (1993). The Early Diagenesis of Organic Matter in Lacustrine Sediments. En M. H. Engel & S. Macko (Eds.). *Organic Geochemistry Topics in Geobiology* (pp. 186-209). Cham Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2890-6_8
- Meyers, P., & Lallier-Vergés, E. (1999). Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates. *Journal of Paleolimnology*, 21, 345-372.

- Moreno-Sánchez, E. (2018). El nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México en el ex lago de Texcoco, Estado de México, problemática socioterritorial y ambiental. *CS*, 26, 203-235. <https://doi.org/10.18046/recs.i24.2396>
- Nawaz, M., Bourrie, G., & Gulf, S. (2014). Factors affecting redox reactions in hydromorphic soils. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 51(3), 517-523.
- Oades, J. M. (1993). The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. In *Soil structure/soil biota interrelationships* (pp. 377-400). Amsterdam, Netherlands: Elsevier. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90123-3)
- Ochoa-Flores, O. (2021). *Reconstruir las memorias del agua: resistencias al olvido en el Lago de Texcoco- 1ra. Ed.* Ciudad de México, México: ENAH-Casa Editorial Analéctica-Arkho Ediciones. ISBN: 978-987-88-2443-7
- Ortiz-Solorio, C. A., & Gutiérrez-Castorena, M. C. (2015). El Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México: Las limitaciones de los terrenos del ex lago de Texcoco. *Revista Artículos y Ensayos de Sociología Rural*, 10(19), 11-23.
- Ortiz-Torres, C., Gómez-Guerrero, A., Ortega-Escobar, H., López-Upton, J., Plascencia-Escalante, F., & Martínez-Trinidad, T. (2023). El desafío para establecer especies arbóreas en suelos salinos del ex lago de Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1593>
- Parrot, J. F., Ramírez-Núñez, C., & Mooser, F. (2017). Evaluación de la amenaza de inundación en la zona del ex lago de Texcoco y su impacto ambiental en el área de construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. En B. V. Carrasco-Gallegos (Ed.). *Megaproyectos urbanos y productivos. Impactos socio-territoriales* (pp. 283-292). México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Pla-Sentís, I. (2014). Nuevas experiencias en la evaluación y diagnóstico de procesos de salinización y sodificación de suelos en América Latina. *Suelos Ecuatorianos*, 44(2), 125-137.
- Padilla-Romero, A., & Hernández-Juárez, M. (2023). Cambio de uso de selo por la construcción del NAICM en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-15. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1608>
- QGIS.org (2024). *QGIS Geographic Information System. User's Guide. Version 3.18*. Grüt, Switzerland: QGIS Association.
- Rzedowski, J. (1957). Algunas asociaciones vegetales de los terrenos del lago de Texcoco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 21, 19-33.
- Santoyo-de la Cruz, M., Flores, H., Khalil, A., Mancilla, O., & Rubiños, J. (2021). Composición iónica y comparación de índices de salinidad de suelos agrícola de Texcoco, México. *Nova Scientia*, 13(3), 1-20.
- Scherger, L. E., Lexow, C., Zanello, V., & Carbajo-Gastoldi, M. (2019). Salinización de suelos de textura fina por ascendencia a partir del acuífero freático hipersalino somero (Bahía Blanca, Argentina). *Revista Aguas Subterráneas*, 33(2), 159-170. <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i2.29265>
- Segura-Castruita, M., Gutiérrez, C., Ortiz, C., & Gómez, D. (2000). Suelos arcillosos de la zona oriente del Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 18(1), 35-44.
- SEMARNAT-CONANP (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) (2024). *Programa de Manejo: Área de Protección de Recursos Naturales Lago de Texcoco*. Consultado el 20 de junio, 2024 desde <https://www.conanp.gob.mx/programademanejo/PMLagoDeTexcoco.pdf>
- Shaheen, S., Rinklebe, J., Frohen, T., Blanco, R., & DeLaune, R. (2014). Biogeochemical factors governing cobalt, nickel, selenium, and vanadium dynamics in periodically flooded Egyptian North Nile Delta rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, 72(3), 1065-1078. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.10.0441>
- Shamilishvili, G., Abakumov, E. V., & Andersen, D. (2020). Biogenic-Abiogenic Interactions and Soil Formation in Extreme Conditions of Untersee Oasis, Surroundings of Lake Untersee, Central Queen Maud Land, East Antarctica. En O. V. Frank-Kamenetskaya, D. Vlasov, E. Panova, & S. Lessovaia (Eds.). *Processes and Phenomena on the Boundary Between Biogenic and Abiogenic Nature. Lecture Notes in Earth System Sciences* (pp. 457-479). Cham, Switzerland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21614-6_25
- Soil Science Division Staff (2017). *Soil survey manual*. Washington, D.C., USA: United States Department of Agriculture-Government Printing Office.
- Soil Survey Staff (2022). *Keys to Soil Taxonomy* (13th ed.). Washington, D.C., USA: United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service.
- Soto-Colobaltes, N. (2019). Proyectos y obras para el uso de los terrenos desecados del antiguo lago de Texcoco, 1912-1998. *Estudios de Historia Moderna y Contemporánea de México*, 58, 259-288.
- Sowiński, P., Smólczyński, S., Kalisz, B., Orzechowski, M., & Bieniek, A. (2023). Variability of some physical properties of limnic rendzinas in the Mazurian Lakeland (NE Poland). *Polish Journal of Soil Science*, 56(1), 1-10.
- Van Reeuwijk, L. (2002) *Procedures for Soil Analysis*. 6th Edition, Wageningen, Netherlands: ISRIC-FAO.
- Vepraskas, M. J. (2001). Morphological features of seasonally reduced soils. En J. L. Richardson, M. J. Vepraskas & C. B. Craft (Eds.). *Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification* (1st ed.) (pp. 163-182). Boca Raton, FL, USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420026238>
- Verrecchia, E. (2007). Lacustrine and Palustrine Geochemical Sediments. En D. Nash & S. McLaren. (Eds.). *Geochemical Sediments and Landscapes* (pp 298-329). Garsington Road, Oxford, United Kingdom: Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470712917.ch9>
- Walkley, A. J., & Black, I. A. (1934). Estimación del carbono orgánico del suelo mediante el método de titulación con ácido crómico. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Yang, Y., Wang, Z., Xie, Y., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C. T., Luo, Q., ... & Wu, J. (2019). Impacts of groundwater depth on regional scale soil gleyization under changing climate in the Poyang Lake Basin, China. *Journal of Hydrology*, 568, 501-516. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.006>