



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA**

**PALEOSUELOS ALUVIALES DEL CUATERNARIO TARDÍO EN  
EL ALTIPLANO CENTRAL DE MÉXICO.**  
Un ensayo geoarqueológico del escenario paleoclimático del  
poblamiento temprano.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

*P R E S E N T A*

**CESAR ANTONIO SALCIDO BERKOVICH**

*JURADO EXAMINADOR*

DIRECTOR DE TESIS: DR. SERGEY SEDOV  
PRESIDENTE: DRA. MARÍA DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA  
VOCAL: DR. ALEJANDRO TERRAZAS MATA  
SUPLENTE: DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO  
SUPLENTE: DR. JOSÉ RAMÓN HERNÁNDEZ SANTANA



MÉXICO, D.F., ENERO DE 2012.





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**INSTITUTO DE GEOLOGÍA**

**PALEOSUELOS ALUVIALES DEL CUATERNARIO TARDÍO EN  
EL ALTIPLANO CENTRAL DE MÉXICO.**  
Un ensayo geoarqueológico del escenario paleoclimático del  
poblamiento temprano.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

*P R E S E N T A*

**CESAR ANTONIO SALCIDO BERKOVICH**

*JURADO EXAMINADOR*

DIRECTOR DE TESIS: DR. SERGEY SEDOV  
PRESIDENTE: DRA. MARÍA DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA  
VOCAL: DR. ALEJANDRO TERRAZAS MATA  
SUPLENTE: DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO  
SUPLENTE: DR. JOSÉ RAMÓN HERNÁNDEZ SANTANA



MÉXICO, D.F., ENERO DE 2012.



*JURADO*

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Sergey Sedov

PRESIDENTE: Dra. María del Socorro Lozano García

VOCAL: Dr. Alejandro Terrazas Mata

SUPLENTE: Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo

SUPLENTE: Dr. José Ramón Hernández Santana



## PRÓLOGO

La arqueología, en su intento por reconstruir los hechos de los grupos humanos del pasado ha transitado por muchos y muy variados de los llamados “enfoques teóricos”. El presente estudio intenta ajustarse a un modelo explicativo multidisciplinario a partir de la contribución de las Ciencias de la Tierra. Este modelo considera que, históricamente, *las pautas de adaptación cultural a los ecosistemas están altamente vinculadas a la división clasista de la sociedad implicando una sistemática elección y distribución preferenciales de los nichos ecológicos entre los miembros de la comunidad*. De ahí la importancia de asociar datos paleoecológicos con arqueológicos pues ello conduce a análisis integrales entre la historia natural y cultura material, esto posibilita diferenciar e interpretar tanto las variaciones de carácter natural, las transformaciones humanas e, incluso, las mutuas interacciones sobre el paisaje a través del tiempo.

Tal paradigma es retomado aquí para diseñar una estrategia y articular los elementos vinculados a la relación del hombre con su entorno natural en el centro de México durante el Cuaternario Tardío. Los primeros pobladores en esta región y su relación con el cambio ambiental en este periodo apuntan a maniobras adaptativas muy complejas en las cuales actuaron recíprocamente con su ecosistema en tramas espaciales y temporales que se reflejan en el sistema social.

En contraste, son insuficientes los estudios que intentan complementarse mediante ambos enfoques para precisar el modo, la extensión y duración de los efectos ecológicos que provocaron las sociedades prehistóricas y, recíprocamente, la influencia de la naturaleza en el orden social. Sin embargo, aún está el reto de conjuntar eficazmente la información aportada por los estudios arqueológicos y los de carácter ambiental para entender la dinámica de tales procesos, procedimientos que son la base para documentar los criterios de cambio en los ecosistemas durante en poblamiento temprano.

Debido a que el registro arqueológico en sitios prehistóricos del área es muy limitado y demanda más información, el modelo planteado se realiza parcialmente. La propuesta se queda en una reconstrucción paleoclimática de algunos ecosistemas para distintas etapas (desde el Pleistoceno Final hasta el Holoceno Medio) sin integrar, totalmente, rasgos culturales.



# DEDICATORIA

*A los expulsados que tuvieron que hacer la forzada odisea de navegar la antiguamente  
nombrada Mar del Sur.*

*Al “Coronel A.B.”, miembro de esa expedición, y a toda su estirpe.*

*A Norma, el gran amor de mi vida, que es, ha sido y será mi más anhelado y  
materializado sueño.*



## AGRADECIMIENTOS

*Expreso aquí mi agradecimiento y una perspectiva distinta del quehacer científico explorada de la mano de personas de gran valía y estima.*

*Aunque suene muy retórico, agradezco primero que nada al pueblo de México que, mediante sus contribuciones fiscales, hicieron posible que el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología así como el Instituto de Geología de la UNAM desviaran el apoyo económico para la realización de estos estudios de posgrado, lo cual precisa alguna forma de retribución.*

*A los proyectos PAPIIT IN110107 Y IN117709*

*Al proyecto CONACYT 90220*

*Al Instituto de Geología por las facilidades y el apoyo económico para la realización de este documento.*

*A la Coordinación de Estudios de Posgrado por todo el apoyo recibido.*

*A la Coordinación de Posgrado en Ciencias de la Tierra por todo su apoyo y dedicación.*

*Agradezco al Dr. Sergey Sedov por su constante apoyo, paciencia, dirección y por ser ese gran científico y humano que es. БОЛЬШОЕ СПАСИБО ТОВАРИЩ !*

*Agradezco la calidad humana de mi asesora, la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo (y a su muy apreciable familia), por su disposición a enseñar y formar a otras generaciones para el quehacer científico, por su compromiso y dedicación en cada una de las fases de esta investigación y durante la evaluación y dirección de esta tesis.*

*Gracias al jurado para el examen de grado: Dr. Sergey Sedov, Dra. Elizabeth Solleiro, Dr. Alejandro Terrazas, Dra. Socorro Lozano y Dr. José Ramón Hernández por sus innumerables consejos y sugerencias para la culminación de la presente tesis.*

*Al Dr. Jorge Gama Castro por mostrar tantos ánimos y cordialidad hacia los arqueólogos que “invaden” los ámbitos de ciencias de la tierra. Tanto su amistad y asistencia como los de la Dra. Carolina Jasso han sido invaluableles durante la realización de esta investigación.*

*Gracias Dra. Anne Soler y Dr. Avto Gogichaishvili por su amistad, por introducir y conducir a través del “mundo del magnetismo”; por apoyar, alentar y brindar su confianza al aplicar el estudio de esas “fuerzas enigmáticas y extrañas” en los paleosuelos.*

*A la Dra. Socorro Lozano y a la M. en C. Susana Sosa por su entrega y paciencia al abordar los estudios palinológicos.*

*Gracias a la Dra. Margarita Caballero por su tiempo y dedicación al mostrar el mundo de la microbiota (diatomeas).*

*Al Dr. Aleksander Borejsza y la Arqueóloga Isabel Rodríguez López quienes brindaron su apoyo durante la fase de reconocimiento en campo y toma de muestras.*

*A la Dra. Ernestina Vallejo (QEPD) por su amistad y el auxilio inicial del análisis textural.*

*Al Dr. Héctor Cabadas por su amistad y soporte en el análisis micromorfológico.*

*Al M. en C. Jorge Rivas Ortiz por su aporte en la realización de los análisis paleomagnéticos, así como por su amistad y comprensión.*

*A la M. en C. Kumiko Shimada y la Dra. Lucy Mora Palomino por el apoyo en los análisis de carbono orgánico total.*

*Al M. en C. Pedro Morales Puente, a la M. en C. Edith Cienfuegos Alvarado y el Laboratorio de Isótopos Estables del Instituto de Geología por la elaboración de los análisis de isotopía estable del carbono.*

*A la M. en C. Elena Lounejeva Baturina por sus comentarios y aporte en la realización de esta tesis.*

*Al M. en C. Jaime Díaz Ortega por sus comentarios y ayuda en la fase de análisis de esta investigación.*

*A esa gran persona que es el Sr. Eligio Jiménez, el “maestro de maestros” en la elaboración de láminas delgadas.*

*Al Mtro. Jorge René Alcalá por su apoyo en la fase de análisis.*

*A Maricela Coronado, Guadalupe y Aurelia Maturano por ser unas eficientes luchadoras, por proporcionarme su amistad y cariño.*

*A Rosario Flores Ramos y Francisco Montaña Coahuilaz por su disposición en el área de cómputo.*

*Gracias al Servicio Geológico por proporcionarme información geográfica del Bloque Tlaxcala, en especial a Adriana Galván por su tiempo y dedicación.*

*A mis maestros y amigos: Ingeniero Miguel Vera y M. en C. Juan Manuel Medina por revelar los fundamentos de la geología.*

*Al Dr. Dante Morán y al Mtro. Luis Espinoza por mostrar los enigmas de la geología.*

*A todos y cada uno de ellos por brindar su amistad, confianza y los buenos momentos durante nuestra convivencia en esta institución: Alfredo “Alfred ley” González, Federico Landa, Haydar Martínez, Fabián Durán, Sandra Briseño, Iriliana López, Anaid, Juan Manuel, Adriana Galván, Claudia Serrano, Esperanza Torres, Yazmín Rivera, Verónica López, Maricarmen Salazar, Serafín Sánchez, Tamara Cruz, Keiko Teranishi, Becket Lailson y Roberto Galindo.*

*M. en C. Berenice Solis: ¡MUCHAS GRACIAS! Por tu amistad, compañía, sinceridad y lealtad que, como buena chichimeca (por adopción), también gusta de la buena carne asada*

*(aunque cueste trabajo su digestión). Sin tu perseverante ayuda esto que se presenta aquí no hubiera podido ser.*

*¡GRACIAS! a los que forman parte -y a mucha honra- del Clan Homo ursus.*

*Gracias a la familia Cruz-Sosa Vázquez por todo lo que han aportado a mi vida.*

*Un gran agradecimiento a Daniel y Amalia, Sara y “Lalo” y los Kachiriski por los muy buenos tiempos en la mítica Calida Fornax.*

*Jorge Cabrera y “Marigel” García por brindarme su amistad, ayuda y más, por darme la “bienvenida” en San Juan de Letrán a este extraño mundo al que pertenece la arqueología.*

*Mención de agradecimiento especial merecen los Reséndiz y Machón por considerarme, al igual que lo hago yo, parte de su hermandad, con todo y lo que ello significa.*

*Clara Aguilar, “Memo” Ríos y la “Chío”, nunca encontraré las palabras más justas de mostrar mi gratitud hacia ustedes.*

*¡GRACIAS! al linaje del “Coronel A.B.” cuya cepa sí tuvo una segunda oportunidad, pero en estas fabulosas tierras.*

*Y, precisamente, en estas heredades extraordinarias hube encontrado mi corazón, eso que llaman el alma, lo que día a día da sentido a la vida, mi amor, a ti Norma Silva. Aunque no existan las palabras apropiadas que expresen mi mayor gratitud: ¡MUSHAS, MUSHÍSIMAS GRACIAS! por ser la parte más inherente de mi vida, por estar dotada de un corazón y corazón, belleza externa e interna, perseverancia y lealtad de buscarme y encontrarme, cariño y amor, todo ello también extraordinarios.*

*Reconozco a todos aquellos que por distracción no agradecí o no agradecí adecuadamente, mil disculpas.*

# **CONTENIDO**



# CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| Prólogo .....   | i         |
| Dedicatoria .....   | iii       |
| Agradecimientos .....   | v         |
| <b>RESUMEN</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>7</b>  |
| JUSTIFICACIÓN .....   | 12        |
| HIPÓTESIS .....   | 13        |
| OBJETIVOS .....   | 14        |
| <b>Capítulo 1. MARCO TEÓRICO</b> .....  | <b>15</b> |
| 1.1. MARCO CONCEPTUAL .....   | 17        |
| 1.1.1. LA INFORMACIÓN REGISTRADA EN LOS SISTEMAS ALUVIALES .....                  | 17        |
| 1.1.2. PALEOSUELOS ALUVIALES .....  | 19        |
| 1.1.3. PALEOSUELOS, CLIMAS Y TIEMPO .....   | 21        |
| 1.1.3.1. Horizontes cálcicos (k) .....  | 22        |
| 1.1.3.2. Horizontes argílicos (t) .....   | 23        |
| 1.1.3.3. Horizontes hísticos (h) .....  | 24        |
| 1.2. ANTECEDENTES .....   | 26        |
| 1.2.1. INVESTIGACIONES SOBRE VARIABILIDAD PALEOAMBIENTAL EN LA REGIÓN .....       | 26        |
| 1.2.2. EL REGISTRO LACUSTRE .....   | 27        |
| 1.2.3. EL REGISTRO GLACIAR DE ALTA MONTAÑA .....                                  | 33        |
| 1.2.4. ESTUDIOS PALEOPEDOLÓGICOS .....  | 37        |
| 1.2.5. PALEONTOLOGÍA .....  | 42        |
| 1.2.6. EVIDENCIAS PALEOPEDOLÓGICAS Y SUS IMPLICACIONES<br>EN LA PREHISTORIA ..... | 43        |
| 1.2.6.1. México y el hombre temprano .....  | 46        |
| <b>Capítulo 2. METODOLOGÍA</b> .....  | <b>49</b> |
| 2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA .....  | 51        |
| 2.2. COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN .....   | 51        |
| 2.3. TRABAJO DE CAMPO .....   | 52        |
| 2.3.1. RECONOCIMIENTO PRELIMINAR DEL ÁREA DE ESTUDIO .....                        | 52        |
| 2.3.2. SELECCIÓN DE LAS SECCIONES EDÁFICAS .....                                  | 53        |
| 2.3.3. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y CLASIFICACIÓN DE PALEOSUELOS .....           | 53        |
| 2.3.4. MUESTREO DE SUELOS Y PALEOSUELOS .....                                     | 54        |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.4. ANÁLISIS EN EL LABORATORIO .....   | 55        |
| 2.4.1. ANÁLISIS MICROMORFOLÓGICO .....  | 55        |
| Preparación de láminas delgadas .....   | 55        |
| Análisis de la muestra .....  | 56        |
| 2.4.2. ANÁLISIS FÍSICOS .....   | 56        |
| 2.4.2.1. Color .....  | 56        |
| 2.4.2.2. Separación textural .....  | 57        |
| Procesamiento de la muestra .....   | 57        |
| Análisis de la muestra .....  | 58        |
| 2.4.2.3. Susceptibilidad magnética .....  | 59        |
| Procesamiento de la muestra .....   | 59        |
| Análisis de la muestra .....  | 59        |
| 2.4.3. ANÁLISIS QUÍMICOS .....  | 59        |
| 2.4.3.1. Fechamientos .....   | 59        |
| 2.4.3.2. Determinación del Carbono Orgánico Total (COT) .....                                 | 60        |
| 2.4.3.3. Isótopos estables del carbono en la materia orgánica ( $\delta^{13}\text{C}$ ) ..... | 60        |
| 2.4.4. ANÁLISIS PALEOMICROBOTÁNICOS .....   | 61        |
| 2.4.4.1. Fitolitos .....  | 61        |
| 2.4.4.2. Polen .....  | 61        |
| 2.4.4.3. Diatomeas .....  | 62        |
| <b>Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....</b>                                      | <b>63</b> |
| 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS SECCIONES PALEOPEDOLÓGICAS .....                             | 65        |
| 3.2. LA REGIÓN PUEBLA-TLAXCALA .....  | 70        |
| 3.2.1. CLIMA .....  | 70        |
| 3.2.2. VEGETACIÓN .....   | 70        |
| 3.2.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA .....   | 71        |
| 3.2.4. SUELOS .....   | 72        |
| 3.2.5. PALEOSUELOS .....  | 72        |
| 3.3. LA REGIÓN NORORIENTAL DE LA CUENCA DE MÉXICO .....                                       | 73        |
| 3.3.1. CLIMA .....  | 73        |
| 3.3.2. VEGETACIÓN .....   | 74        |
| 3.3.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA .....   | 75        |
| 3.3.4. SUELOS .....   | 77        |
| 3.3.5. PALEOSUELOS .....  | 78        |
| <b>Capítulo 4. RESULTADOS .....</b>   | <b>79</b> |
| 4.1. PERFIL BARRANCA <i>TENEXAC A</i> .....   | 81        |
| 4.1.1. RASGOS MORFOLÓGICOS .....  | 81        |
| 4.1.2. CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS .....  | 85        |
| 4.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS .....  | 88        |
| 4.1.3.1. Granulometría .....  | 88        |
| 4.1.3.2. Susceptibilidad magnética .....  | 88        |
| 4.1.4. PROPIEDADES QUÍMICAS .....   | 89        |
| 4.1.4.1. Carbono Orgánico Total (COT) .....   | 89        |
| 4.1.4.2. Isótopos Estables de Carbono .....   | 90        |
| Valores $\delta^{13}\text{C}$ de la sección paleopedológica .....                             | 90        |

|  |     |
|--|-----|
| 4.1.5. CONTENIDO PALEOMICROBOTÁNICO .....  | 90  |
| 4.1.5.1. Fitolitos .....   | 90  |
| 4.1.5.2. Diatomeas .....   | 91  |
| 4.2. PERFIL BARRANCA <i>HUEXOYUCAN</i> .....   | 93  |
| 4.2.1. RASGOS MORFOLÓGICOS .....   | 93  |
| 4.2.2. CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS .....   | 100 |
| 4.2.3. PROPIEDADES FÍSICAS .....   | 103 |
| 4.2.3.1. Granulometría .....   | 103 |
| 4.2.3.2. Susceptibilidad magnética .....   | 106 |
| 4.2.4. PROPIEDADES QUÍMICAS .....  | 107 |
| 4.2.4.1. Carbono Orgánico Total (COT) .....  | 107 |
| 4.2.4.2. Isótopos Estables de Carbono .....  | 109 |
| Valores $\delta^{13}\text{C}$ de la sección paleopedológica .....  | 109 |
| 4.2.5. CONTENIDO PALEOMICROBOTÁNICO .....  | 109 |
| 4.2.5.1. Fitolitos .....   | 109 |
| 4.2.5.2. Polen .....   | 111 |
| 4.2.5.3. Diatomeas .....   | 113 |
| 4.3. PERFIL RIO <i>SAN PABLO</i> .....   | 115 |
| 4.3.1. RASGOS MORFOLÓGICOS .....   | 115 |
| 4.3.2. CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS .....   | 118 |
| 4.3.3. PROPIEDADES FÍSICAS .....   | 120 |
| 4.3.3.1. Granulometría .....   | 120 |
| 4.3.3.2. Susceptibilidad magnética .....   | 123 |
| 4.3.4. PROPIEDADES QUÍMICAS .....  | 124 |
| 4.3.4.1. Carbono Orgánico Total (COT) .....  | 124 |
| 4.3.4.2. Isótopos Estables de Carbono .....  | 125 |
| Valores $\delta^{13}\text{C}$ de la sección paleopedológica .....  | 125 |
| 4.3.5. CONTENIDO PALEOMICROBOTÁNICO .....  | 125 |
| 4.3.5.1. Fitolitos .....   | 125 |
| 4.3.5.2. Diatomeas .....   | 127 |
| 4.4. FECHAMIENTOS Y CORRELACIÓN EDAFOESTRATIGRÁFICA .....  | 127 |
| 4.4.1. FECHAMIENTOS .....  | 127 |
| 4.4.2. COMPARACIÓN REGIONAL DE LOS VALORES DE $\delta^{13}\text{C}$ .....                                    | 130 |
| <b>Capítulo 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....   | 137 |
| 5.1. INTERPRETACIÓN Y CORRELACIÓN PALEOCLIMÁTICA Y<br>MEMORIA EDÁFICA .....                                  | 139 |
| 5.1.1. ETAPA ISOTÓPICA DEL OXÍGENO 3 ( <i>EIOM 3</i> ) .....   | 139 |
| 5.1.2. ETAPA ISOTÓPICA DEL OXÍGENO 2 ( <i>EIOM 2</i> ) .....   | 143 |
| 5.1.2.1. Último Máximo Glacial ( <i>UMG</i> ) .....  | 143 |
| 5.1.2.2. Última Deglaciación ( <i>UD</i> ), Glacial Tardío ( <i>GT</i> ) y Younger Dryas ( <i>YD</i> ) ..... | 146 |
| 5.1.3. ETAPA ISOTÓPICA DEL OXÍGENO 1 ( <i>EIOM 1</i> ) .....   | 149 |
| 5.1.3.1. Holoceno Temprano .....   | 149 |
| 5.1.3.2. Holoceno Medio .....  | 152 |
| 5.2. ETAPAS DE PEDOGÉNESIS / SEDIMENTACIÓN:<br>Estabilidad vs. inestabilidad .....                           | 153 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Capítulo 6. CONCLUSIONES</b> .....    | 157 |
| 6.1. SOBRE LOS PALEOSUELOS .....         | 159 |
| 6.2. SOBRE LA PALEOVEGETACIÓN .....      | 160 |
| 6.3. SOBRE EL POBLAMIENTO TEMPRANO ..... | 162 |
| <br>                                     |     |
| <b>LITERATURA CITADA</b> .....           | 163 |

**LISTA DE FIGURAS**

|  |    |
|--|----|
| <b>FIGURA 1.</b> Avance de glaciares en el centro de México, fechamientos de $^{14}\text{C}$ no calibrados (Vázquez y Heine, 2004) .....   | 35 |
| <b>FIGURA 2.</b> Variaciones climáticas durante el Cuaternario Tardío (Lauer, 1979) .....  | 36 |
| <b>FIGURA 3.</b> a) Caracterización tectónica de México y la Faja Volcánica Transmexicana (modificado de Siebe y Macías, 2004). b) Ubicación de las secciones paleopedológicas estudiadas y el sistema hídrico de la región (digitalización basada en las cartas topográficas 1:250 000 del INEGI: Ciudad de México E14-2, Veracruz E14-3, Cuernavaca E14-5 y Orizaba E14-6, cuyo datum es NAD 27 para México) .....   | 66 |
| <b>FIGURA 4.</b> Vista particular de la zona donde se ubica el perfil paleopedológico <i>Barranca Tenexac A</i> mostrando el sistema hídrico de la región (digitalización basada en las cartas topográficas 1:250 000 del INEGI: Ciudad de México E14-2 y Veracruz E14-3, cuyo datum es NAD 27 para México) .....  | 67 |
| <b>FIGURA 5.</b> Vista particular de la zona donde se ubica el perfil paleopedológico <i>Barranca Huexoyucan</i> mostrando el sistema hídrico de la región (digitalización basada en las cartas topográficas 1:250 000 del INEGI: Ciudad de México E14-2, cuyo datum es NAD 27 para México) .....  | 68 |
| <b>FIGURA 6.</b> Vista particular de la zona donde se ubica el perfil paleopedológico <i>Rio San Pablo</i> mostrando el sistema hídrico de la región (digitalización basada en las cartas topográficas 1:250 000 del INEGI: Ciudad de México E14-2, cuyo datum es NAD 27 para México) .....  | 69 |
| <b>FIGURA 7.</b> Procesos pedogenéticos que caracterizan la morfología del perfil <i>Barranca Tenexac A</i> . a) Estructura y porosidad biogénica; b) Iluviación de arcilla y humus; c) Acumulación de humus oscuro y; d) Gleyzación .....   | 81 |
| <b>FIGURA 8.</b> Sección edáfica <i>Barranca Tenexac A</i> .....   | 82 |
| <b>FIGURA 9.</b> Modelo gráfico representativo de la pedostratigrafía del perfil <i>Barranca Tenexac A</i> donde se muestra la distribución de los paleosuelos (PS) que lo constituyen. * Zonas estudiadas por Borejsza (2006) no analizadas en el presente estudio .....  | 83 |
| <b>FIGURA 10.</b> <i>Tenexac A</i> . a) Horizonte 3Bg donde se muestra la iluviación de arcilla y los halos ferrígenos. b) Horizonte 5BC. Bioporos y cutanes de materia orgánica y arcilla recubriendo la estructura columnar de la matriz de color amarillenta .....  | 84 |
| <b>FIGURA 11.</b> <i>Tenexac A</i> . Micromorfología. a) 3Ag. Tejido orgánico. b) 3Ag. Microestructura de los agregados. c) 3Bg. Microestructura de los agregados. d) 3Bg. Cutanes y rellenos de arcilla. e) 3Bg. Concreciones. f) 4A. Desechos microexcretales y materia orgánica. h) 4A. Minerales frescos relleno de poros. k) 4A. Bioporos rellenos de arcilla y óxidos de hierro. m) 4ABg. Poros rellenos de minerales poco meteorizados. n) 5BC. Minerales, agregados y recubrimientos ..... | 87 |
| <b>FIGURA 12.</b> <i>Tenexac A</i> . Granulometría .....   | 88 |
| <b>FIGURA 13.</b> <i>Tenexac A</i> . Susceptibilidad magnética .....   | 89 |
| <b>FIGURA 14.</b> <i>Tenexac A</i> . Carbono Orgánico Total (COT) .....  | 90 |
| <b>FIGURA 15.</b> Isótopos estables de carbono: Valores de $\delta^{13}\text{C}$ de las secciones edáficas estudiadas .....  | 91 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>FIGURA 16.</b> <i>Tenexac A.</i> Porcentaje de fitolitos .....  | 92  |
| <b>FIGURA 17.</b> <i>Tenexac A.</i> Porcentaje de fitolitos por tipos .....  | 92  |
| <b>FIGURA 18.</b> <i>Tenexac A.</i> Porcentaje de diatomeas .....  | 93  |
| <b>FIGURA 19.</b> Procesos pedogenéticos que caracterizan la morfología del perfil <i>Barranca Huexoyucan</i> . <i>a)</i> Estructura y porosidad biogénica; <i>b)</i> Iluviación de arcilla y humus; <i>c)</i> Acumulación de humus oscuro y; <i>d)</i> Gleyzación .....   | 94  |
| <b>FIGURA 20.</b> Sección edáfica <i>Barranca Huexoyucan</i> .....   | 95  |
| <b>FIGURA 21.</b> Modelo gráfico representativo de la pedostratigrafía del perfil <i>Barranca Huexoyucan</i> donde se muestra la distribución de los paleosuelos (PS) que lo constituyen .....   | 96  |
| <b>FIGURA 22.</b> <i>Huexoyucan</i> , horizonte 2AB. <i>a)</i> Estructura y porosidad biogénica. <i>b)</i> Cutanes de materia orgánica y arcilla .....   | 98  |
| <b>FIGURA 23.</b> <i>Huexoyucan</i> . <i>a)</i> Acumulación de materia orgánica en 3AC y 3BC. <i>b)</i> Iluviación de materia orgánica y arcilla en 3BC. <i>c)</i> Bioporos y halos ferrígenos en 3BC .....  | 98  |
| <b>FIGURA 24.</b> <i>Huexoyucan</i> , horizonte 4Bg. <i>a)</i> y <i>b)</i> Rasgos reductomórficos .....  | 98  |
| <b>FIGURA 25.</b> <i>Huexoyucan</i> . <i>a)</i> Vista general del Paleosuelo 4. <i>b)</i> Rasgos reductomórficos y acumulación de materia orgánica en 5Ag. <i>c)</i> Horizonte 5C .....  | 99  |
| <b>FIGURA 26.</b> <i>Huexoyucan</i> . <i>a)</i> Vista general del Paleosuelo 5. <i>b)</i> Rasgos reductomórficos y acumulación de humus en 6Ag. <i>c)</i> Acumulación de materia orgánica no humificada en 6ACo .....  | 99  |
| <b>FIGURA 27.</b> <i>Huexoyucan</i> . <i>a)</i> Vista general del Paleosuelo 6. <i>b)</i> Mayor cantidad de materia orgánica en 7AC y FeO bandeado en 7BC .....  | 99  |
| <b>FIGURA 28.</b> <i>Huexoyucan</i> . Micromorfología. Suelo moderno: <i>a)</i> tejido vegetal, <i>b)</i> concreciones de hierro, <i>c)</i> minerales poco meteorizados. PS1: <i>d)</i> tejido, <i>e)</i> revestimientos de arcilla, <i>f)</i> diatomea, <i>h)</i> cutanes de arcilla. PS2: <i>k)</i> tejido, <i>m)</i> pápulas y diatomeas, <i>n)</i> minerales, <i>p)</i> relleno de bioporos, <i>r)</i> microestructuras laminares fisuradas. PS3: <i>t)</i> recubrimientos sobre minerales. PS5: <i>u)</i> materia orgánica en la matriz, <i>v)</i> . <i>w)</i> 6ACo. Microestructura. <i>x)</i> 6BC. Moteados de hierro ..... | 104 |
| <b>FIGURA 29.</b> <i>Huexoyucan</i> . Granulometría .....  | 105 |
| <b>FIGURA 30.</b> <i>Huexoyucan</i> . Susceptibilidad magnética .....  | 107 |
| <b>FIGURA 31.</b> <i>Huexoyucan</i> . Carbono Orgánico Total (COT) .....   | 108 |
| <b>FIGURA 32.</b> <i>Huexoyucan</i> . Porcentaje de fitolitos .....  | 110 |
| <b>FIGURA 33.</b> <i>Huexoyucan</i> . Porcentaje de fitolitos por tipos .....  | 110 |
| <b>FIGURA 34.</b> <i>Huexoyucan</i> . Plantas identificadas por medio de polen y sus concentraciones en los horizontes más orgánicos: 6Ag y 6ACo (superior e inferior) .....   | 112 |
| <b>FIGURA 35.</b> <i>Huexoyucan</i> . Porcentaje de diatomeas .....  | 113 |
| <b>FIGURA 36.</b> <i>Huexoyucan</i> . Porcentajes de especies de diatomeas identificadas en los horizontes más orgánicos: 6Ag y 6ACo superior e inferior .....   | 114 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>FIGURA 37.</b> Procesos pedogenéticos que caracterizan la morfología del perfil <i>Río San Pablo</i> . <i>a)</i> Estructura y porosidad biogénica; <i>b)</i> Iluviación de arcilla y humus; <i>c)</i> Acumulación de humus oscuro; <i>d)</i> Gleyzación y; <i>e)</i> Acumulación de carbonatos .....   | 115 |
| <b>FIGURA 38.</b> Sección edáfica <i>Río San Pablo</i> .....  | 116 |
| <b>FIGURA 39.</b> Modelo gráfico representativo de la pedostratigrafía del perfil <i>Río San Pablo</i> donde se muestra la distribución de las unidades (SP) y los paleosuelos (PS) que lo constituyen .....  | 117 |
| <b>FIGURA 40.</b> <i>San Pablo</i> . Micromorfología. SP4: <i>a)</i> recubrimientos limosos de bioporos, <i>b)</i> Horizonte 8Bt, birrefringencia de cutanes, <i>c)</i> microestructura <i>d)</i> cutanes de estrés y carbonatos neoformados, <i>e)</i> Birrefringencia. SP3: <i>f)</i> iluviación de arcilla. SP2: <i>h)</i> Calcita secundaria (micrita), <i>k)</i> iluviación de arcilla ..... | 121 |
| <b>FIGURA 41.</b> <i>San Pablo</i> . Granulometría .....  | 122 |
| <b>FIGURA 42.</b> <i>San Pablo</i> . Susceptibilidad magnética .....  | 123 |
| <b>FIGURA 43.</b> <i>San Pablo</i> . Carbono Orgánico Total (COT) .....   | 125 |
| <b>FIGURA 44.</b> <i>San Pablo</i> . Porcentaje de fitolitos .....  | 126 |
| <b>FIGURA 45.</b> <i>San Pablo</i> . Porcentaje de fitolitos por tipos .....  | 126 |
| <b>FIGURA 46.</b> <i>San Pablo</i> . Porcentaje de diatomeas .....  | 127 |
| <b>FIGURA 47.</b> Correlación edafoestratigráfica, cronológica y firmas de $\delta^{13}\text{C}$ de los perfiles estudiados. Los fechamientos de Tenexac A fueron tomados de Borejsza (2006); mientras que los de San Pablo de Solleiro <i>et al.</i> (2011) .....  | 129 |
| <b>FIGURA 48.</b> Procesos pedogenéticos que caracterizan la morfología de los perfiles. 1) Tenexac A, 2) Huexoyucan y 3) San Pablo. <i>a)</i> Estructura y porosidad biogénica; <i>b)</i> Iluviación de arcilla y humus; <i>c)</i> Acumulación de humus oscuro; <i>d)</i> Gleyzación y; <i>e)</i> Acumulación de carbonatos ....   | 131 |
| <b>FIGURA 49.</b> Fracciones granulométricas: <i>a)</i> Tenexac A, <i>b)</i> Huexoyucan y <i>c)</i> San Pablo .....   | 132 |
| <b>FIGURA 50.</b> Susceptibilidad magnética: <i>a)</i> Tenexac A, <i>b)</i> Huexoyucan y <i>c)</i> San Pablo .....  | 133 |
| <b>FIGURA 51.</b> Carbono Orgánico Total (TOC): <i>a)</i> Tenexac A, <i>b)</i> Huexoyucan y <i>c)</i> San Pablo .....   | 134 |
| <b>FIGURA 52.</b> Tenexac A: <i>a)</i> Porcentaje de fitolitos; <i>b)</i> Porcentaje de fitolitos por tipos. Huexoyucan: <i>c)</i> Porcentaje de fitolitos; <i>d)</i> Porcentaje de fitolitos por tipos. San Pablo: <i>e)</i> Porcentaje de fitolitos; <i>f)</i> Porcentaje de fitolitos por tipos .....  | 135 |
| <b>FIGURA 53.</b> Diatomeas: <i>a)</i> Tenexac A, <i>b)</i> Huexoyucan y <i>c)</i> San Pablo .....  | 136 |
| <b>FIGURA 54.</b> Correlación paleoclimática .....  | 140 |



# **RESUMEN**



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.



## RESUMEN

### “PALEOSUELOS ALUVIALES DEL CUATERNARIO TARDÍO EN EL ALTIPLANO CENTRAL DE MÉXICO.

#### Un ensayo geoarqueológico del escenario paleoclimático del poblamiento temprano”

El presente escrito trata sobre secuencias paleopedológicas de origen aluvial ubicadas en el área centro-norte de la Faja Volcánica Transmexicana, específicamente, al norte de la Cuenca Puebla-Tlaxcala y en el extremo nororiental de la Cuenca de México.

La información obtenida de los paleosuelos ha resultado ser un medio eficaz para la reconstrucción paleoambiental y de la historia de los cambios climáticos del pasado.

Partiendo del concepto de “memoria del suelo” se pretende: 1) Caracterizar los rasgos y procesos pedogenéticos impresos en dicha memoria, 2) reconocer las etapas de estabilidad e inestabilidad mediante el grado de desarrollo edáfico y con ello determinar las oscilaciones climáticas, 3) esbozar los tipos, distribución y características de los ambientes a nivel local y su correlación, desde la Etapa Isotópica del Oxígeno Marino 3 (*EIOM 3*) hasta el Holoceno Tardío y, 4) insinuar los escenarios ambientales en los que se llevó a cabo el poblamiento temprano en el centro de México.

Se realizaron estudios de morfología de suelos, físicos (textura y susceptibilidad magnética), químicos (carbono orgánico total e isótopos estables de carbono) y paleomicrobotánicos (diatomeas, fitolitos y polen) en cada una de las secciones pedostratigráficas.

Los resultados obtenidos evidencian cuatro períodos climáticos que, integrados con los fechamientos de  $^{14}\text{C}$  en paleosuelos, permitieron sugerir modelos de reconstrucción ambiental los cuales corresponden a dos etapas isotópicas del oxígeno marino (*EIOM 3* y *EIOM 2*) y al Holoceno Temprano.

Los paleosuelos de la primera etapa (*EIOM 3*) se caracterizan por presentar gran cantidad de humus obscuro acumulado, iluviación de arcilla y bastante desarrollo en su estructura y porosidad biogénica; además, evidencian condiciones frías y húmedas con marcada estacionalidad en el momento de su formación. En la *EIOM 2* se suceden dos periodos de pedogénesis; el primero (Último Máximo

Glacial) se caracteriza por procesos muy uniformizados entre sí, tales como la gleyzación, iluviación de arcilla y acumulación de humus moderadas mientras que; en el segundo (Glacial Tardío), son predominantemente hidromórficos; en ambos casos los suelos se formaron bajo un régimen de clima frío y húmedo constante, disminuyendo drásticamente la temperatura al final de este periodo. Los registros paleopedológicos para el Holoceno Temprano muestran rasgos relacionados con procesos de acumulación e iluviación, se relacionan con un ambiente húmedo y frío, bosque de pino-encino y grandes pastizales.

Las geoformas y la diversidad geológica que caracterizan al Altiplano Central son algunos de los elementos que interaccionan para determinar la gran variedad climática (a niveles meso y micro) y; por lo tanto, es necesario realizar estudios adicionales en conjunto con otras disciplinas para reconstruir la historia paleoambiental del centro de México.

## ABSTRACT

**“LATE QUATERNARY ALLUVIAL PALEOSOLS AT CENTRAL MEXICO PLATEAU.  
A geoarchaeological essay about paleoclimatic landscape of early peopling.”**

This work deals with paleopedological sequences of alluvial origin located at central-north area of Transmexican Volcanic Belt, specifically, the northern part of Puebla-Tlaxcala Basin and the north-eastern end of the Basin of Mexico.

The paleosols obtained data has turned out an effective tool for paleoenvironmental reconstruction and for the history of the climatic changes of the past.

Considering the “soil memory” concept it is trying: 1) to determine the characteristics and pedogenic processes recorded in that memory, 2) to recognize the stability and instability stages by the edafic development degree and then to determine the climatic oscillations, 3) to outline the environment types, its characteristics, distribution and correlation at local level, from the Marine Oxygen Isotope Stage 3 (*MIS3*) to the Late Holocene, and 4) to insinuate the environmental scenes in which the early peopling in Central Mexico was carried out.

In this study were made soil morphology, physical (texture and magnetic susceptibility), chemical (total organic carbon and stable carbon isotopes) and paleomicrobotanical (diatoms, phytoliths and pollen) analysis in each one of the pedostratigraphic sections.

The obtained results (including paleosols  $^{14}\text{C}$  dating) suggest four climatic periods that allowed the environmental reconstruction models which correspond to the two last marine oxygen isotope stages (*MIS3* and *MIS2*) of the Late Pleistocene and to the Early Holocene.

The paleosols of the first stage (*MIS3*) are characterized by great amount of accumulated dark humus, illuvial clay and enough development in their structure and biogenic porosity; that demonstrate humid temperate conditions with noticeable seasonality at the time of it formation. There are two pedogenic periods in *MIS2*; the first one (Last Glacial Maximum) characterized by very homogenous processes such as gleysation, illuviation of clay and a moderate accumulation of humus; whereas in the second one (Late Glacial), they are predominantly hydromorphic; in both cases the

soils were formed under a constant cold and humid climate regime, falling drastically the temperature at the end of this period. The paleopedological record for the Early Holocene are related to accumulation and illuviation processes, associated to a humid and cold environment, large grassland and pine-oak forest.

The geomorphological and geological diversity that characterizes the Central Plateau are some of the elements that interact to determine the climatic variety (in meso and micro categories); therefore, it is necessary to carry out additional studies with other disciplines to reconstruct the Central Mexico paleoenvironmental history.

# **INTRODUCCIÓN**



## INTRODUCCIÓN

La relevancia del estudio de los *paleosuelos* radica en que contribuye, a la par de otros tipos de registros, a documentar la historia geológica y ambiental de la Tierra (Retallack, 1990). Una secuencia de paleosuelos -a través de una mirada analítica- se identifica como “aparentes” discordancias que proyectan los distintos tiempos y condiciones climáticas en que se formaron, quedándose grabada en sus rasgos y propiedades, es decir, en la “memoria edáfica” (Targulian y Goryachkin, 2004; 2008).

El *Capítulo 1* de esta investigación trata del marco teórico desde el punto de vista conceptual. Se muestran los tipos de registros paleoambientales y las formas de interpretarlos para la región del centro de México durante el Cuaternario Tardío: a) el desarrollo de las aportaciones de los estudios lacustres, b) de los argumentos sobre los datos de glaciares de alta montaña, c) el punto de vista desde la paleopedología y d) sus implicaciones en la prehistoria humana y su poblamiento temprano en la región.

En el siguiente apartado (*Capítulo 2*) se despliega la forma en que se llevó a cabo el presente estudio partiendo desde la localización y ubicación geográficas de las secciones paleopedológicas y la compilación de la información existente sobre la temática. Seguido de dos apartados: 1) Trabajo de campo: a) reconocimiento y selección de las unidades edáficas para su estudio, b) caracterización morfológica y clasificación de paleosuelos, c) toma de los distintos tipos de muestras y; 2) Análisis en el laboratorio: a) micromorfología de suelos, b) físicos (color, textura, susceptibilidad magnética), c) químicos (fechamientos, determinación

de carbono orgánico total, isótopos estables de carbono en materia orgánica) y d) análisis paleobotánicos (fitolitos, polen y diatomeas).

La descripción geográfica de las áreas seleccionadas para el presente trabajo está detallada en el *Capítulo 3*. Aquí se hace referencia a dos grandes zonas que definen la demarcación: por un lado el extremo noreste de la Cuenca de México y; por el otro, el norte de la Cuenca Puebla-Tlaxcala. Para ambos casos se hace una relación del cuadro climático, botánico, geológico, geomorfológico, de la cubierta edáfica y de los perfiles de paleosuelos ya caracterizados en la región.

Los resultados (*Capítulo 4*) se desglosan para cada una de las tres secciones paleopedológicas consideradas para esta investigación tomando en cuenta los siguientes aspectos: a) caracterización morfológica (macro y micro), b) propiedades físicas (textura y susceptibilidad magnética), c) propiedades químicas y fechamientos (isotopía estable del carbono y carbono orgánico total) y, d) contenido paleobotánico de nivel microscópico (diatomeas, polen y fitolitos).

Mediante la caracterización de las propiedades de los paleosuelos de estas secciones del Cuaternario Tardío en el centro de México, propiedades obtenidas por medio del estudio de sus rasgos y procesos pedogenéticos, se pueden inferir no solamente su tipo de formación y denominación sino el grado de desarrollo alcanzado bajo determinadas condiciones ambientales (Sedov *et al.*, 2009 y 2010). Los análisis macro y micromorfológicos, apoyados en los datos de laboratorio, nos muestran tipos contrastantes de pedogénesis en las distintas

unidades de paleosuelos. Por tanto, la discusión de los resultados (*Capítulo 5*) gira en torno a tres puntos: a) mostrar las etapas edafogenéticas basándose en la alternancia de los periodos de estabilidad e inestabilidad climática infiriéndolas del grado de desarrollo de un suelo, b) los rasgos y procesos indicarán que propiedades quedaron registradas en la memoria del suelo y, c) consiste en proporcionar una reconstrucción histórica de los distintos paleoclimas con sus respectivos paleopaisajes hipotéticos con los datos obtenidos de las tres secciones edáficas estudiadas.

Finalmente, el *Capítulo 6* muestra -a manera de *síntesis* - los puntos concluyentes de esta investigación considerando una evaluación analítica de todos y cada uno de los parámetros y criterios expuestos en los anteriores capítulos.

## **JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

El preámbulo hasta aquí expuesto permite esbozar el *corpus* del presente trabajo tal y como se especifica en los apartados que a continuación se plantean.

### **JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad existen pocos estudios -relativamente- sobre la génesis de suelos del pasado en planicies aluviales que estuvieron sujetos a inundaciones periódicas. Su análisis y caracterización constituyen parámetros morfopedológicos cruciales para entender, inicialmente, la dinámica de los sistemas fluviales y, por ende, sugerir una de tantas posibles perspectivas explicativas de los cambios ambientales sucedidos durante el Cuaternario Tardío. Sin embargo, para obtener un enfoque menos parcial de la problemática es fundamental considerar los siguientes argumentos:

- 1) Una de las principales relevancias de investigar paleosuelos de origen aluvial radica en que los nichos que se forman en ambientes rivereños han sido *atractores* para el ser humano a través de todas las épocas y lugares, sencillamente, porque en ellos se desarrollan los recursos para su subsistencia.
  
- 2) Los estudios sobre el Cuaternario Tardío en el centro de México referentes a la dinámica de sistemas fluviales (ríos y cañadas asociados con los lacustres) han sido abordados desde las perspectivas de la geomorfología y la sedimentología. Sin embargo, por medio de la detección de procesos edafogénicos en planicies y terrazas aluviales se puede contribuir con información relevante sobre la evolución de las condiciones climáticas asociadas con esos

ambientes. Por tanto, mediante el estudio de paleosuelos desarrollados en estos sistemas es posible establecer, incluso, la relación entre las variaciones en el régimen hidrológico, es decir, la frecuencia y magnitud de los periodos de inundación.

3) Finalmente, es digno de considerar que este tipo de estudios aportan información alterna, complementaria y necesaria a investigaciones enfocadas en registros glaciares y lacustres o aquellos de carácter paleopedológicos enfocados en otras temáticas.

### HIPÓTESIS

Los suelos de origen aluvial -por definición- se forman bajo regímenes pluvio-fluviales muy dinámicos y en condiciones ambientales específicas. La información que se extrae de sus propiedades permite establecer un registro de procesos pedológicos y sedimentarios más detallados al tener una mejor resolución espacial y temporal. Por tanto, **el conocimiento sobre el cambio climático del Cuaternario Tardío (específicamente del periodo relacionado con el establecimiento de las sociedades tempranas) en el Altiplano Central de México se verá enriquecido mediante el estudio de paleosuelos aluviales ya que, a través de ellos podrá determinarse -en forma más concreta- una parte de los elementos que conformaban el escenario ambiental. Es decir, se incrementará la precisión espacio-temporal al deducirse las pulsaciones del clima en sistemas fluviales de los cuales los paleosuelos forman parte.**

Es importante mencionar que, paradigmáticamente, las investigaciones arqueológicas sobre los primeros pobladores también debieran centrarse en ambientes aluviales por encontrarse dentro de los principales y más comunes entornos de apropiación de recursos demandados por los grupos humanos.

**OBJETIVOS**

- 1) Caracterizar tres secuencias paleopedológicas del Cuaternario ubicadas en zonas aluviales distintas del centro de México que, a su vez, muestren rasgos morfopedológicos contrastantes ligados al régimen fluvial en que se originaron; tales variantes deberán ser también -al menos hipotéticamente- indicadores de cambios ambientales para este periodo.
  
- 2) A partir de análisis físicos, químicos y micromorfológicos, identificar los cambios en el clima relacionados con la edad, grado y tiempo de desarrollo de paleosuelos de origen aluvial; tales oscilaciones, además, deberán verse reflejadas en una alternancia de interrupciones en las secuencias edafogenéticas.
  
- 3) Proporcionar inferencias con carácter explicativo sobre la recreación de entornos climáticos del Cuaternario Tardío, específicamente durante el establecimiento de las primeras poblaciones en el altiplano central mexicano.

# **Capítulo 1**

## **MARCO TEÓRICO**



## Capítulo 1.

# MARCO TEÓRICO

En este apartado se hace una relación del *marco conceptual* sobre el que versa la presente investigación, es decir, trata de una manera expositiva acerca del vocabulario, ideas y criterios necesarios para plantear el tema y las principales problemáticas que surgen del mismo para, posteriormente (mediante los otros capítulos), intentar las soluciones o -al menos- proponer explicaciones. Se pretende también presentar los planteamientos y propuestas de trabajos anteriores a manera de sustento del aquí sugerido.

## 1.1. MARCO CONCEPTUAL

### 1.1.1. LA INFORMACIÓN REGISTRADA EN LOS SISTEMAS ALUVIALES

Un sistema fluvial puede encontrarse tanto en regiones húmedas como áridas, frías, templadas o cálidas y distribuirse latitudinal, longitudinal y altitudinalmente en cualquier espacio geográfico. Incluso, los grandes afluentes pueden cruzar -en el mejor de los casos- diferentes zonas climáticas, es decir, originarse en un área con determinados índices de humedad y temperatura antes de desembocar en un territorio totalmente contrastante. Entonces, los sistemas fluviales están fuertemente influidos por factores tales como: el clima, geología,

**C.S. Berkovich**

---

cubierta vegetal y la topografía de una región. Por ello, el estudio de dichos regímenes genera gran interés por hallarse en diferentes ambientes y mostrar una amplia diversidad de geoformas.

Cuando el canal de un afluente secciona los sedimentos previamente depositados en un valle se forman los denominados *ambientes aluviales* (Charlton, 2008). Existen tres órdenes sistémicos principales en un ambiente aluvial: el morfológico, el de flujo (estrictamente se refiere al flujo del líquidos y sedimentos) y la capacidad de respuesta del sistema. Esta última, describe la interacción de sus variables internas (drenaje, tipo de suelo, descarga del flujo, el patrón de canales y su profundidad) con la morfología.

Un sistema fluvial puede ser modificado por cambios en el clima, por tectonismo y por la actividad humana; la presencia y grado de combinación de tales eventos produce un reordenamiento en el régimen. Los reajustes del sistema llevan a condiciones de inestabilidad pero, cuando se alcanza cierto equilibrio en el ambiente, esta estabilidad tiende a mantenerse.

La alternancia entre los periodos de estabilidad e inestabilidad quedan registrados en los ambientes aluviales con una clara escala temporal y espacial.

Es importante señalar que para explicar la dinámica actual de un sistema fluvial es necesario establecer la interacción de los procesos de erosión, transporte y sedimentación en el pasado.

### 1.1.2. PALEOSUELOS ALUVIALES

En la ciencia del suelo, el prefijo *paleo* tiene una connotación temporal: se refiere a un suelo formado y desarrollado en un paisaje del pasado bajo condiciones ambientales distintas a las actuales de modo tal que, al determinar sus rasgos y propiedades, se observa que no reflejan (incluso pueden llegar a contrastar con) las presentes circunstancias en ese lugar (Ruhe y Scholtes, 1956; Ruhe, 1965; Yaalon, 1971 y 1975; Catt, 1986 y 1990).

Los *paleosuelos aluviales* se definen como suelos que se generaron y evolucionaron en áreas de inundación y abanicos fluviales. La característica principal de dichos suelos es que deben mostrar los rasgos y propiedades tanto del transporte y depositación como su tipo de pedogénesis (Waters, 1992).

Tales propiedades se definen en términos de textura, mineralogía y grado de meteorización de los materiales transportados (Gerrard, 1987). También reflejan la naturaleza geológica y geomorfológica del drenaje de la cuenca y las condiciones de aluviación, especialmente la velocidad de sedimentación (Retallack, 1990).

Dentro de toda esta dinámica, los paleosuelos indican un período de estabilidad geomorfológica, es decir, los procesos de erosión, transporte y depositación no estuvieron activos en un lapso o, al menos, no de una manera significativa. Es la razón por la cual dichos suelos son excelentes indicadores de cambios climáticos que tuvieron lugar en el pasado (Retallack, 1990). Por el contrario, durante los periodos de inestabilidad se desarrollan

**C.S. Berkovich**

---

terrazas, incisiones por canales activos y modificación en la morfología del cauce (Morrison, 1978).

Los sistemas aluviales del Cuaternario son una herramienta eficaz para establecer una estratigrafía más completa. Kraus (2002) asocia la escala temporal con los eventos de estabilidad e inestabilidad, ya que el desarrollo del suelo se ve favorecido por la duración de los intervalos sin sedimentación; asimismo, la superposición de paleosuelos implica etapas de prolongada agradación o acumulación.

Los paleosuelos en estos sistemas se pueden clasificar de acuerdo con el balance entre los sedimentos acumulados y la tasa de pedogénesis. Si la sedimentación es rápida y discontinua y no median etapas erosivas significativas se forman paleosuelos compuestos, pobremente desarrollados. Verticalmente, estos perfiles están separados por sedimentos modificados levemente por pedogénesis. En contraste, si la sedimentación es continua y paulatina se forman suelos cumúlicos gruesos. Al analizar estos sistemas fluviales se pueden observar, por ejemplo, depósitos en canales mostrando evidencias sutiles de pedogénesis o contener suelos compuestos cuando la sedimentación es muy rápida (Kraus y Aslan, 1999).

La depositación en la planicie de inundación se produce con tasas de sedimentación bajas, comúnmente en el orden de 1/10 mm/año. Dichos depósitos tienden a ser de textura fina cuyo grano decrece a medida que nos alejamos del canal activo. Como resultado, se forman suelos poco desarrollados cerca del canal mientras que los perfiles cumúlicos se desarrollan en la planicie de inundación, en las áreas más alejadas del canal activo.

Retallack (1983, 1984) ha intentado realizar un análisis cuantitativo de las tasas de acumulación estimando los tiempos de desarrollo de diferentes tipos de paleosuelos haciendo una analogía con suelos modernos; sin embargo, el usar paleosuelos para estimar en forma cuantitativa las tasas de acumulación tiene sus limitaciones. Asimismo, asume que los tiempos de formación de los suelos siempre han sido los mismos considerando semejantes los suelos modernos y los antiguos. Otros problemas son la erosión y las bajas tasas de sedimentación que generan suelos compuestos. Con respecto a la erosión, la tasa de acumulación puede ser subestimada y, con relación a los suelos compuestos, puede ser sobrestimada.

### **1.1.3. PALEOSUELOS, CLIMAS Y TIEMPO**

Un régimen climático antiguo puede ser inferido a través del estudio de paleosuelos haciendo uso de analogías con los modernos que indiquen condiciones climáticas específicas.

La estimación de las edades mínimas de una secuencia aluvial se interpretaría como los intervalos de formación de un suelo en una escala estacional, mientras que la estimación de edades de rango más amplio, es decir, el rango de edad total permite obtener la duración de eventos geomorfológicos. La profundidad de una secuencia de este tipo dividida entre el tiempo estimado indica acumulación de sedimento; tal índice de acumulación calculado permite una comparación con otros indicadores paleoambientales en un rango temporal más amplio.

**C.S. Berkovich**

---

El registro de periodos proporcionado por un paleosuelo está limitado por la incorporación constante de material durante su desarrollo y, por lo tanto, su edad puede ser subestimada constantemente si las características usadas alcanzaron una estabilidad durante el desarrollo. Estas dificultades son inherentes cuando se estudian las cronosecuencias para interpretar los periodos en los cuales se formaron. Sin embargo, las áreas aluviales son sepultadas continuamente debido a los cambios inherentes a su dinámica y, por tal motivo, la escala temporal está relacionada con las características morfológicas del suelo; es decir, cuantificar en tiempo el desarrollo de los rasgos característicos de un paleosuelo.

Para la región de estudio seleccionada existen tres horizontes que se pueden considerar, dependiendo de las circunstancias, como “diagnósticos” debido a que se relacionan de forma directa con el tiempo y los ambientes de acumulación que se llevan a cabo en las áreas aluviales: los horizontes *cálcicos* (k) de la sección Río San Pablo, los *argílicos* (t) de Barranca Tenexac A y los *hísticos* (h) de Barranca Huexoyucan.

#### **1.1.3.1. Horizontes cálcicos** (*especificados con la letra k*)

En climas secos, el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es liberado por la meteorización de minerales acumulándose en el suelo. La escasa precipitación impide o limita la movilidad de tal sustancia contribuyendo así a su constante acopio. En suelos desarrollados a partir de materiales arenosos y cenagosos, el carbonato se observa como concreciones o estructuras tubulares (bioporos rellenos) y que, con el tiempo, dan lugar a la formación de nódulos e incluso horizontes calcáreos débilmente desarrollados. En láminas delgadas de suelo, el crecimiento del carbonato se observa substituyendo los granos finos de la matriz, los nódulos

llegan a ser más grandes y se unen eventualmente para formar un horizonte sólido. Esta capa sólida puede formar una barrera a la filtración de agua adicional, que se confina así para fluir lateral u horizontalmente sobre la zona cementada para formar una capa agudamente truncada y laminada; estos rasgos se observan en suelos donde la erosión y las raíces grandes han roto la corteza. Se han documentado ampliamente etapas similares del desarrollo en suelos aluviales donde el carbonato de calcio forma incrustaciones en las partes interiores de la estructura a manera de clastos.

En la interpretación de paleosuelos también existen problemas en ejemplares muy antiguos (más allá del Oligoceno); sin embargo, hay modelos matemáticos disponibles para estimar la acumulación del carbonato en suelos. Algunos de éstos se pueden modificar y hacer estimaciones más exactas, para ello es necesario documentar desde el tiempo de formación de horizontes calcáreos en paleosuelos antiguos hasta rasgos en paleosuelos más jóvenes.

#### **1.1.3.2. Horizontes argílicos** (*especificados con la letra t*)

Como en la formación de horizontes calcáreos, la acumulación de arcilla en horizontes sub-superficiales también tarda tiempo. La arcilla está formada por la erosión del material parental y es transportada hacia horizontes más profundos. Se han documentado varias etapas morfológicas de horizontes arcillosos las cuales se aprecian en los suelos formados en áreas aluviales. Con el tiempo, el suelo se agrieta formando peds, algunos de éstos son recubiertos por arcilla que se transporta en el perfil por sus superficies. Los recubrimientos de arcilla al principio siguen las porosidades del suelo; en la etapa siguiente (desarrollo moderado), los recubrimientos de arcilla y los peds son más definidos y, finalmente, se incrementa totalmente

**C.S. Berkovich**

---

el enriquecimiento de arcilla caracterizando un horizonte argílico. En esta etapa, algunos rastros de otras fracciones pueden permanecer dentro del ped, pero solamente se observa en variaciones sutiles en la granulometría oscurecidas por los especímenes disponibles del enriquecimiento de la arcilla. Con un desarrollo adicional (fuerte desarrollo), la cantidad total de arcilla y los recubrimientos aumenta de modo que, el horizonte sub-superficial arcilloso se distingue por su espesor y no contiene ninguna evidencia de otras fracciones.

Si hay aún más desarrollo (muy fuerte), el espesor de los horizontes arcillosos sub-superficiales se incrementa, ya que los horizontes superficiales son perdidos por la erosión; se trata de suelos y paleosuelos de paisajes muy viejos con características geológicas importantes.

Estas etapas de desarrollo se pueden observar también en las láminas delgadas como un punto de partida para cuantificar la acumulación de arcilla por volumen y después convertido a peso con la información de la densidad del paleosuelo. La arcilla que se transporta por las grietas se deposita en orientaciones preferenciales, aparecen bajo luz polarizada con birrefringencia, los planos son característicos de los horizontes sub-superficiales arcillosos.

### **1.1.3.3. Horizontes hísticos** (*especificados con la letra h*)

La formación de horizontes hísticos superficiales turbosos implica un proceso de mayor acumulación en comparación con horizontes sub-superficiales calcáreos y gleycos. El índice de acumulación de turba depende de un equilibrio entre la fuente de materia orgánica y su destrucción por decaimiento anaerobio. En suelos bien drenados, la turba no se acumula porque la materia orgánica nunca se sumerge en agua estancada y es destruida por decaimiento

aerobio en índices mayores que su producción.

En pantanos, las acumulaciones de turba no son ilimitadas porque su formación no se puede desarrollar a grandes profundidades, las etapas de acumulación se relacionan con el espesor del horizonte. Mientras menor es el espesor, indica que tiene poco tiempo de formación y, por el contrario, a mayor espesor sugiere más tiempo y grado de desarrollo. Aunque este es un esquema simplista se puede considerar necesario para estimar las correcciones derivadas de la compactación en su aplicación a los paleosuelos.

En resumen, los paleosuelos de origen aluvial y/o coluvial exhiben tanto características sedimentarias como edáficas derivadas, precisamente, de su formación en dichos ambientes dinámicos es, además, una de las razones por las que poseen alta resolución temporal. El decodificar tal registro permite obtener elementos contundentes para interpretar la dinámica de cambio ambiental en diferentes escalas de tiempo.

En cuanto a la estabilidad e inestabilidad del paisaje puede decirse que están intrínsecamente relacionadas con los cambios climáticos y/o antrópicos. Particularmente, en los sistemas aluviales, los suelos son el resultado de lapsos de equilibrio (estabilidad) ambiental; mientras que, la presencia de sedimentos reflejará etapas de inestabilidad. En conclusión, el grado de estabilidad e inestabilidad se verá más claramente reflejado en la frecuencia y tipo de sedimentación intercalada con periodos de formación y desarrollo de suelo.

Un paleosuelo conserva las condiciones ambientales en su memoria (reflejada a través de sus

---

**C.S. Berkovich**

---

propiedades) cuya configuración se establece durante los intervalos de estabilidad en el paisaje. Además, cuando el ambiente es modificado antrópicamente, la memoria del suelo almacena tanto los mecanismos como las características ecológicas de dicha transformación, permitiendo reconocer, con ello, los cambios inducidos en el ambiente.

En resumen, los paleosuelos de origen aluvial y/o coluvial exhiben tanto características sedimentarias como edáficas derivadas, precisamente, de su formación en dichos ambientes dinámicos es, además, una de las razones de poseer alta resolución temporal. El decodificar tal registro permite obtener elementos contundentes para interpretar la dinámica de cambio ambiental en diferentes escalas de tiempo.

## **1.2. ANTECEDENTES**

### **1.2.1. INVESTIGACIONES SOBRE VARIABILIDAD PALEOAMBIENTAL EN LA REGIÓN**

La documentación y registro de las fluctuaciones paleoclimáticas tanto en su escala temporal como espacial son el resultado de un sinnúmero de investigaciones multidisciplinarias con el objetivo común de reconstruir las condiciones ambientales del Cuaternario Tardío en el centro de México.

La reconstrucción de las condiciones ambientales se ha llevado a cabo a partir de varias

---

perspectivas de estudio dentro de las que destacan la paleolimnología, paleopalinología, geomorfología, paleontología y paleopedología. Cabe mencionar que el área de estudio en cuestión está influenciada por un dinamismo volcánico al formar parte de la Faja Volcánica Transmexicana, cuya actividad es continua, lo cual ha provocado cambios ambientales regionales a través del tiempo dificultando, con ello, la reconstrucción de la historia climática del Altiplano Central.

Los registros paleoecológicos del centro de México son evidencia enfocada, preferentemente, a los cambios durante el Holoceno ya que, hay pocas secuencias que están relativamente bien fechadas para el Pleistoceno Tardío (Metcalf *et al.*, 2000).

### **1.2.2. EL REGISTRO LACUSTRE**

La Cuenca de México ha sido objeto de una serie de investigaciones paleoclimáticas desde 1955; en el Boletín de la Sociedad Geológica Americana se publicaron los estudios polínicos de Paul B. Sears, F. Foreman y K.H. Clisby, los cuales mencionan la dificultad de correlacionar los resultados con la estratigrafía local ya que, los rasgos climáticos no coinciden con las capas estratigráficas de la cuenca (Lorenzo, 1958).

Estas contradicciones son retomadas en los trabajos realizados posteriormente por Bradbury (1971), Ohngemach (1973), Covich y Stuiver (1974) y Heine (1975) cuyo objetivo era recrear, detalladamente, los cambios del clima en el Pleistoceno Tardío-Holoceno y correlacionar los

**C.S. Berkovich**

---

registros en un área más amplia; sin embargo, nuevamente las limitaciones estratigráficas, así como la larga historia de disturbio y ocupación humana, dificultaron dicha reconstrucción (Metcalf *et al.*, 2000).

El papel preponderante que han jugado los lagos de Texcoco y Chalco se debe al gran alcance en cuanto a la antigüedad de su registro y a su asociación con las ocupaciones humanas más tempranas de la cuenca (Niederberger, 1969). En las paleoplayas lacustres formadas en las localidades de Tepexpan, Santa Isabel Iztapan y Peñón de los Baños se han descubierto restos de fauna extinta, herramientas y osamentas humanas pertenecientes al mismo periodo (Cornwall, 1970). Otra de las localidades de depósitos lacustres en los cuales se hallaron asentamientos de este primer periodo es Tlapacoya ubicada en el norte del lago de Chalco (Lorenzo, 1958). Terra (1947 y 1948) fue el primero en señalar una serie de playas fósiles a las que él atribuía una seriación cronológica; su objetivo era el estudio de la cronología cuaternaria así como la evidencia del hombre prehistórico en México; describió cinco etapas lacustres interrumpidas por paleosuelos en las localidades de Totolcingo y Tepexpan. Investigaciones posteriores caracterizan el Lago de Texcoco con varios periodos de desecamiento (Mooser, 1956).

Investigaciones recientes enumeran una serie de problemáticas de interpretación y correlación entre varios de los registros lacustres de la cuenca; los procedimientos de interpretación de los diagramas de polen del Cuaternario no son exactos puesto que, hasta ahora, no es posible distinguir entre las diferentes especies. Así mismo, la división desde el punto de vista altitudinal de la taxa resulta difícil ya que varias pueden localizarse al mismo nivel. Es así que,

se ha optado por considerar la presencia de un taxón no común y de baja frecuencia, pues ha ayudado a validar la interpretación basada en la taxa dominante (Lozano *et al.*, 1996, 1997).

La identificación del clima basada en los datos palinológicos depende de los estudios de lluvia de polen; sin embargo, los espectros actuales están modificados debido a la larga historia de ocupación de la cuenca por lo cual ha sido necesario complementar estos datos con estudios paleomagnéticos, geoquímicos y tefracronológicos y poder distinguir un cambio climático específico de otros cambios ambientales (Lozano *et al.*, 1996, 1997).

Tales investigaciones multidisciplinarias han permitido una correlación entre los registros lacustres de Chalco, Texcoco y Tecocomulco dividiendo la historia climática en cuatro periodos (Lozano y Ortega, 1994 y 1998; Metcalfe *et al.*, 2000):

*Un periodo húmedo.* Documentado desde 34,000 hasta 23,000 años A.P., caracterizado por una alta concentración de *Isöetes* y algas conjuntamente con taxa de humedal. A nivel regional, los sedimentos del Lago Chignahuapan muestran que tanto la comunidad vegetal como los niveles del lago registran una variabilidad climática compleja en la cuenca del alto Lerma durante este periodo (Lozano y Vázquez, 2005). Hace 42,000 a.A.P. el lago de Tecocomulco evidencia un clima *húmedo y templado* con vegetación predominantemente acuática, con una superficie más extensa que en la actualidad (Caballero *et al.*, 1999).

Durante el Último Máximo Glacial (20,000 a 18,000 años A.P.) se reporta el desarrollo de comunidades boscosas abiertas con presencia importante de pastos y arbustos. En las

**C.S. Berkovich**

---

secuencias polínicas de Chalco y Texcoco se encuentran plantas de climas fríos como *Picea* y *Podocarpus*. También en la zona de Chalco hay polen de *Mimosa biuncifera*; actualmente, esta planta se desarrolla en el norte de la Cuenca de México, donde la precipitación media anual es de 600 mm. Durante este periodo los niveles en los lagos disminuyeron indicando una disminución importante de la precipitación (Lozano y Ortega, 1998).

A partir de los 14,400 hasta los 6,000 años A.P., la tendencia a condiciones más secas impidió un aumento en el índice de sedimentación en el lago de Texcoco constituyendo un *hiatus* en su registro (Lozano y Ortega, 1998).

Los registros para el Holoceno Temprano y Medio muestran un incremento en la precipitación aunque no prevalece un clima húmedo, esto queda evidenciado a través de la baja concentración de las taxa de humedal y algas. Durante este periodo la Cuenca de México queda representada por dos secuencias palinológicas del Lago de Chalco ubicadas en la vertiente oeste del Iztaccíhuatl (Valle El Marrano) mostrando cambios en el paisaje.

Los registros del Holoceno Temprano (10,000 a 7,000 a.A.P.) se localizan en Chalco, los cuales muestran un desarrollo de bosques mixtos de pino y encino. Entre los 10,000 y 8,000 años A.P. el polen de oyamel es abundante en la secuencia de Chalco, sugiriendo climas húmedos y templados (Lozano y Vázquez, 2005).

La reconstrucción de la historia climática a partir de los estudios paleolimnológicos está truncada debido a la falta de información en su registro pues existe un *hiatus* entre los 14,400

y 6,000 años A.P. Es así como la integración de datos ambientales documentados por la paleopedología ha permitido completar la estratigrafía climática de la Cuenca de México.

Por ejemplo, en la localidad de Tepexpan Sedov *et al.* (2010) estudiaron una secuencia constituida por cuatro paleosuelos desarrollados sobre sedimentos lacustres; la base lacustre de la secuencia cubre un lapso de 30,000 hasta 10,000 años A.P.

Los paleosuelos que conforman la historia climática desde la transición Pleistoceno-Holoceno hasta la actualidad son: el más antiguo ( $10,070 \pm 40$  a.A.P.) un Fluvisol Téfrico; el segundo, un Cambisol Flúvico con edades de  $5,600 \pm 40$  a.A.P.; la secuencia continúa con un paleosuelo con edad de  $4,650 \pm 40$  a.A.P. y; finalmente, el pedocomplejo constituido por un paleosuelo y el suelo moderno. Estos paleosuelos poseen carbonatos que evidencian el cambio de condiciones húmedas a secas hace aproximadamente 5,000 años.

Es así que, para el hiatus paleolimnológico en la Cuenca de México los estudios paleopedológicos demuestran que durante el inicio del Holoceno es evidente una fase relativamente húmeda mientras que, en el Holoceno Medio y Tardío, indican una tendencia hacia un clima más seco.

El estudio de los registros paleoambientales de la zona oriental de la Faja Volcánica Transmexicana inician en la década de los 70 con el proyecto denominado “Puebla-Tlaxcala” llevado a cabo por la Fundación Alemana para la Investigación Científica. Ohngemach y Straka (1978) realizaron análisis palinológicos en secuencias de las localidades de

Jalapasquillo, Zacatepec, el cráter Tlaloqua del volcán La Malinche y Acuitlapilco.

Sin embargo, la carencia de un control cronológico confiable, así como de datos del Holoceno no permiten una correlación con otros registros lacustres en la región (Caballero *et al.*, 2001). En posteriores investigaciones en Alchichica se estudiaron núcleos de sedimentos aplicando análisis de diatomeas y fechamientos por radiocarbono obteniendo una secuencia correspondiente a 2,300 años, los datos indican un lago salino y oligo-mesotrófico asociado a condiciones de aridez (Caballero *et al.*, 2001; Rodríguez, 2002).

En el lago La Preciosa los análisis realizados indican un registro de los últimos 5,000 años, sus características sedimentarias no permiten registrar los cambios climáticos de baja intensidad por la homogeneidad del registro; sin embargo, las condiciones someras y de mayor salinidad están relacionadas con un aumento en la aridez en la zona (Rodríguez, 2002).

Un registro más amplio en la región se localiza en San Juan Raya indicando una acumulación de sedimentos desde el Cuaternario Tardío. Los resultados revelan que esta zona, que actualmente soporta una vegetación xerófila, cambió sus características ambientales durante tres fases climáticas: en el Último Máximo Glacial las condiciones fueron más frías y húmedas; durante la glaciación aumentó la humedad y; después de la deglaciación, la tendencia húmeda continúa. Esta sucesión climática es una posible vía de explicación de la diversidad de vegetación árida-semiárida de la región (Canul, 2008).

### **1.2.3. EL REGISTRO GLACIAR DE ALTA MONTAÑA**

Para el estudio sobre las etapas glaciares se debe tomar en cuenta, por un lado, el movimiento de las morrenas y sus ubicaciones, su morfología y erosión post-glacial, la secuencia de sedimentos volcánicos sobre aquellas que muestren características muy particulares y, por el otro, las sucesiones de depósitos de lavas en relación con la erosión glacial y su deposición, el grado de desarrollo de un perfil de suelo vinculada con la morrena y, finalmente, las fechamientos relativos y absolutos (White, 1962).

Los cambios y movimientos de los glaciares son un registro de los cambios climáticos en escala de tiempo que va de cientos a miles de años, pero en latitudes intertropicales la formación de glaciares durante el Cuaternario Tardío estuvo limitada a montañas de más de 3,800 msnm (Vázquez, 2005).

Por ejemplo, en el volcán La Malinche (4,461 msnm) se distinguen cuatro avances glaciares que se pueden caracterizar por medio de morrenas, rocas estriadas y depósitos periglaciales así como por crioturbaciones. Los sedimentos de los diferentes avances de los glaciares están separados por brechas volcánicas, capas de cenizas y pómez, guijarros fluviales, depósitos eólicos semejantes al loess, lahares y diversos suelos fósiles. La estratigrafía de los glaciales y periglaciales es el resultado de las observaciones tefracronológicas y paleoedafológicas (Heine, 1973).

En investigaciones recientes en el Valle El Marrano, ubicado al noroeste del volcán

---

**C.S. Berkovich**

---

Iztaccíhuatl, se llevó a cabo un análisis polínico que se correlacionó con la cronología glacial y la tefracronología documentando un cambio de vegetación anterior al avance de los glaciales Milpulco I (12,000-10,500 a.A.P.) y Milpulco II (8,300-7,300 a.A.P.). Esto coincide con otros registros paleoecológicos del centro de México sugiriendo que, durante el Holoceno, la línea de bosque fluctúa como respuesta a cambios de temperatura y precipitación (Lozano y Vázquez, 2005).

El registro glacial en México (FIGURA 1) apoya el marcado enfriamiento en los trópicos americanos durante el Máximo Glacial Global (6-9°C). Incluye, asimismo, un avance vinculado probablemente con el episodio frío del Atlántico Norte conocido como *Younger Dryas* que ocurrió entre los 12-10 mil años A.P. (Vázquez, 2005). Los avances durante el Holoceno Temprano y Tardío son notablemente extensos y muestran un patrón regional diferente en comparación con sus correspondientes en Rocky Mountains y los Andes en Sudamérica (Heine, 1994).

Los posteriores estudios geomorfológicos, polínicos y climatológicos permitieron conocer que en los últimos 40,000 años se alternaron fases frías con cálidas, húmedas con secas y que formaron diversas combinaciones entre ellas. Como resultado de estos estudios se logró caracterizar una secuencia climática (FIGURA 2) con relación al clima actual y elaborar curvas de la variación climática (Lauer, 1979).

El periodo de 35,000-32,000 años A.P. está caracterizado por un avance glacial (Milpulco I) de la última glaciación, una mayor precipitación y temperaturas bajas. La altiplanicie de Puebla-Tlaxcala estuvo cubierta por un bosque de *Abies* y *Piceas* (*Pinus hartwegii*), con

1.2. ANTECEDENTES  
1.2.3. El registro glaciar de alta montaña

| K a | ETAPA ISOTÓPICA | DIVISIONES CRONOESTRATIGRÁFIAS | NEVADO DE TOLUCA | IZTACCIHUATL | LA MALINCHE      | AJUSCO                     |                 |
|-----|-----------------|--------------------------------|------------------|--------------|------------------|----------------------------|-----------------|
| 1   | I               | HOLOCENO                       | MV               | Ayoloco      | MV               | Neoglaciación I-II         |                 |
| 2   |                 |                                | MIV              |              | MIV              |                            |                 |
| 3   |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 4   |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 5   |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 6   |                 |                                |                  |              |                  | MIII-3                     |                 |
| 7   |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 8   |                 |                                |                  |              | MIII-3           | Milpulco-2                 |                 |
| 9   |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 10  |                 |                                |                  |              | MIII<br>MI y MII | Milpulco-1<br>Hueyatlaco-2 | MIII-1 y MIII-2 |
| 11  | II              | WISCONSIN TARDIO               |                  |              |                  |                            |                 |
| 12  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 13  |                 |                                |                  |              |                  | MIII                       | Albergue        |
| 14  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 15  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 16  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 17  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 18  |                 |                                |                  |              |                  | Hueyatlaco-1               |                 |
| 19  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 20  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 21  | III             | WISCONSIN MEDIO                |                  |              |                  |                            |                 |
| 22  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 23  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 24  |                 |                                |                  |              |                  |                            | Sto. Tomás      |
| 25  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 26  |                 |                                |                  |              |                  |                            | Marqués         |
| 27  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 28  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 29  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 30  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 31  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 32  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 33  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 34  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 35  |                 |                                |                  |              | MI               |                            |                 |
| 36  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 37  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 38  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 39  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |
| 40  |                 |                                |                  |              |                  |                            |                 |

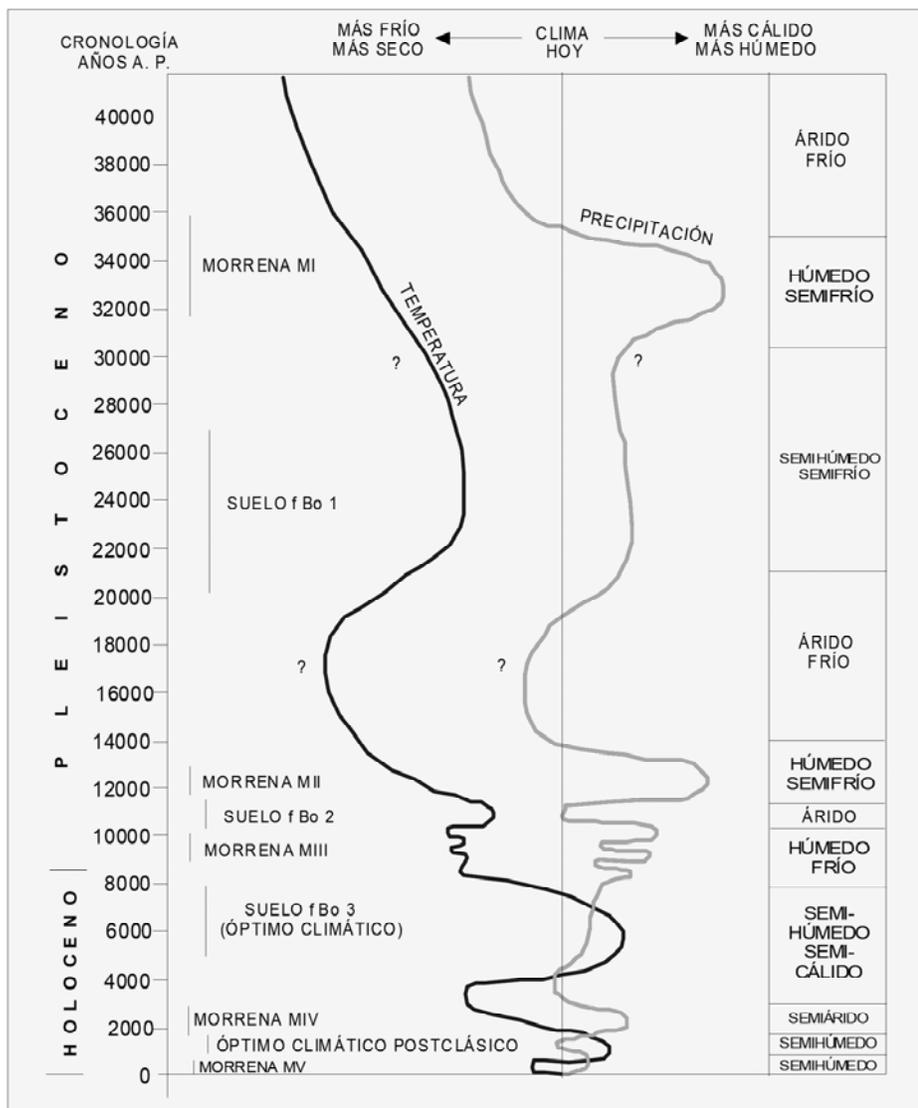
FIGURA 1. Avance de glaciares en el centro de México, fechamientos de <sup>14</sup>C no calibrados (Tomado de Vázquez y Heine, 2004).

abundantes zacatonales y una alta concentración de *Quercus*, el límite del bosque de la Sierra Nevada se localizaba entre los 2,500 y 2,600 msnm.

Un clima extremadamente frío y seco entre 21,000 y 13,000 años. Durante este período el límite del bosque descendió por lo menos 1,000 ó 1,300 metros. Asimismo, se registra la formación amplia y extensa del suelo fBo1 (Heine, 1973).

Un segundo avance glaciar se llevo a cabo alrededor de los 12,000 años AP (Milpulco II). Posteriormente, se registró un nuevo periodo frío, bajas temperaturas y alta precipitación hace 10,000 años. Esta fase indica el final del período Glacial Tardío de características secas y

húmedas y el inicio del Holoceno (desde 8,000 a 5,000 años AP). La vegetación estaba dominada por selvas mixtas *Pinus* y *Quercus* mezclado con bosque boreal caducifolio.



**FIGURA 2.** Variaciones climáticas durante el Cuaternario Tardío (Lauer, 1979).

En el Holoceno, el límite de los glaciares y del bosque asciende entre 200 y 300 metros en volcanes como La Malinche y Cofre de Perote los cuales estuvieron libres de glaciares, sólo el Pico de Orizaba y el Popocatepetl contaban con pequeños glaciares.

Después de los 4,000 años AP el clima vuelve a ser más húmedo desarrollando un nuevo avance glaciario (Milpulco IV). El último avance glaciario se registra en los siglos XVI-XIX (Milpulco V), cuando el límite del glaciario y el bosque descienden 300 metros.

#### **1.2.4. ESTUDIOS PALEOPEDOLÓGICOS**

A partir del hallazgo en 1947 en las inmediaciones del pueblo de Tepexpan de un esqueleto humano fosilizado e incompleto (Terra, 1947); el entonces Departamento de Prehistoria del INAH comienza los trabajos para encontrar la evidencia del hombre más antiguo en la cuenca. Varios hallazgos son los que presentan la suficiente solidez de la presencia del hombre temprano: Tlapacoya, El Peñón de los Baños, Chimalhuacán, Santa Isabel Iztapan (Lorenzo, 1958). Estos hallazgos dan pie al estudio de los paleosuelos en México (Bryan, 1948; Terra, 1948; Arellano 1953a). Dichos paleosuelos presentan huellas más o menos características de épocas de sequía o humedad. Bryan (1948, 1953) estableció la estratigrafía climática a partir de las características de suelos fósiles: suelos con carbonatos (caliches), suelos con arcilla y óxidos de hierro. A partir de ello estableció seis eventos climáticos definidos como: 1) Totoltsingo (3,000-4,700 a.A.P.) con clima más húmedo y frío; 2) Caliche III o Barrilaco (4,700-7,500 a.A.P.) que se caracteriza como seco y cálido; 3) Becerra Superior (7,500-11,500 a.A.P.), más húmedo y frío que los anteriores; 4) Caliche II (11,500-13,000 a.A.P.) con un clima más seco y cálido; 5) Becerra Inferior (13,000-27,000 a.A.P.) como una etapa más húmeda y fría y; finalmente, 6) Caliche I o Morales (27,000 a.A.P.) trata de un periodo seco y cálido (Bryan, 1953; Arellano, 1953b).

**C.S. Berkovich**

---

Posteriormente, los suelos fósiles fueron correlacionados con capas de ceniza volcánica para ubicar con precisión los hallazgos arqueológicos, pues las capas de ceniza o pómez se depositan en un lapso muy corto. Los eventos que se relacionaron con el desarrollo de los paleosuelos fueron de pómez de pequeños volcanes basálticos como el Xitle. Este marcador constituye parte de la estratigrafía de los sitios tempranos en la Cuenca de México (Mooser y González, 1961).

Los sitios del hombre fósil del Peñón de los Baños y Tepexpan, así como los sitios en los que se hallaron los mamutes de Santa Gertrudis y Santa Isabel, se correlacionaron directamente, por primera vez, con la estratigrafía de tefra y paleosuelos marcando los comienzos de la presencia humana en la Cuenca de México. El marcador estratigráfico definido como la *Pómez Fina Superior* permitió correlacionar la contemporaneidad de los hallazgos de fauna pleistocénica; este marcador también fue hallado en los sitios del Hombre III del Peñón y Tepexpan mostrando, con ello, la relación entre la fauna del Pleistoceno y el hombre temprano de la cuenca (Mooser y González, 1961).

Investigaciones posteriores en el Valle de Teotihuacán permitieron diferenciar varios estadios paleoclimáticos de escala milenaria, así como la variabilidad de los ecosistemas en el paisaje (Solleiro *et al.*, 2006). El primero se refiere al Pleistoceno Tardío, sugiriendo para este periodo un ecosistema forestal que ocupó las posiciones altas del relieve, bien drenadas dando lugar a la iluviación de arcilla en los suelos. En las cuevas bajas hay bosques mas húmedos proveyendo una combinación específica de menor iluviación de arcilla con superficies gleyicas típicas de condiciones hidromórficas (Solleiro *et al.*, 2011). La transición Pleistoceno-

Holoceno está marcada por la presencia de depósitos aluviales en forma de canales que cortan la secuencia evidenciando una fuerte inestabilidad del paisaje (Solleiro *et al.*, 2011). El Holoceno se caracteriza por una tendencia hacia condiciones climáticas más secas, ya que se observa la acumulación de carbonatos y valores altos de  $\delta^{13}\text{C}$  del humus, que puntualizan la presencia de plantas tipo C4 y CAM reflejando condiciones climáticas semiáridas y vegetación xerófita en las cuestas y la parte inferior más baja del valle. Algunos bosques pueden persistir en las cuestas y cumbres más altas como en Cerro Gordo que crece sobre un Phaeozem lixiviado de carbonatos con valores  $\delta^{13}\text{C}$  bajos indicando un humus de plantas C3.

Aunque no forme parte de la Cuenca de México, pero por su cercanía con la región de estudio, se considera importante mencionar que en el estado de Morelos se evidencia un cambio en las condiciones ambientales registrado en un Paleo-Albeluvisol (fechado en 12,600 aAP), sugiriendo un clima húmedo y frío durante el Pleistoceno Tardío (Solleiro *et al.*, 2003). Asimismo, en el Nevado de Toluca se localizan los registros paleopedológicos que contienen una amplia historia climática en los paleosuelos que cubren un intervalo desde 100,000 aAP hasta 10,000 aAP. Estos paleosuelos fueron clasificados como luvisoles y andosoles, los cuales se relacionan con condiciones húmedas; sin embargo, los valores  $\delta^{13}\text{C}$  evidencian oscilaciones con climas secos (Sedov *et al.*, 2003).

En 1970 Cornwall realizó una correlación estratigráfica entre las cuencas de Puebla-Tlaxcala y la de México, las características que se consideraron fueron: tipo y distribución de los depósitos volcánicos de acuerdo con la altura, posición y orientación del cono volcánico, así como la fuerza de la erupción y la dirección del viento; en consecuencia, se identificaron y

---

**C.S. Berkovich**

---

correlacionaron depósitos de pómez y ceniza por métodos estratigráficos y mineralógicos.

Asimismo, se considera el desarrollo de suelos fósiles como un marcador estratigráfico. Cornwall define un suelo marcador denominado “Ehecanexpa” con coloraciones rojizas perteneciente a un clima tropical. Este suelo es seguido por una superficie de erosión de ceniza andesítica causada por soliflucción debido a las condiciones periglaciales del volcán Iztaccíhuatl; este marcador hacía la localidad de Río Frío desaparece mientras que hacia el estado de Puebla nuevamente se presenta. Sin embargo, la edad que se le atribuye corresponde de 30,000 a 40,000 años por su relación con los depósitos paleontológicos de Hueyatlaco.

Los estudios paleopedológicos más recientes en el área han contribuido con la historia climática de la región a partir de la decodificación de la memoria del suelo, es decir, interpretando la pedogénesis y el paleoambiente que determinaron el desarrollo de los suelos fósiles.

La estratigrafía climática reconstruida a partir del estudio de los paleosuelos se llevó a cabo en el estado de Tlaxcala, en la geoforma denominada “Bloque Tlaxcala”. La columna estratigráfica está conformada por tres unidades principales: Unidad Gris (UG), Unidad Parda (UP) y Unidad Roja (UR), las cuales cubren un periodo a partir del Pleistoceno Medio hasta la actualidad (Sedov *et al.*, 2009).

La Unidad Gris, que es la más joven abarcando del Pleistoceno Tardío hasta el Reciente, presenta diferencias en la pedogénesis permitiendo ser dividida en cinco periodos principales:

el primero (suelo actual) referente a las condiciones climáticas semiáridas actuales; el segundo (TX1) muestra las condiciones húmedas durante el Holoceno Temprano, los paleosuelos TX1a y TX1b cubren la época del Último Máximo Glacial (UMG); la morfología del paleosuelo TX1a corresponde a condiciones climáticas de frío severo predominantes en la última parte de la etapa isotópica dos del oxígeno (*EIOM 2*), mientras que el paleosuelo TX1b evidencia condiciones húmedas constantes durante la mayor parte del UMG (Solis, 2010).

El desarrollo de un paleosuelo (TX2) durante el Pleistoceno Tardío-Holoceno Temprano y que se correlaciona con la etapa isotópica tres del oxígeno (*EIOM 3*) sugiere un clima seco con variaciones estacionales marcadas por su alta precipitación, estas condiciones son evidenciadas por los procesos vérticos presentes en el paleosuelo que se relacionan con procesos de alteración por fases secas (Sedov *et al.*, 2009; Solis, 2010).

Otros registros del centro de México, como el del Nevado de Toluca, comparten las mismas características: suelos bien desarrollados en ambientes predominantemente húmedos pero con fases secas reflejadas en la mineralogía de arcilla y la composición de isótopos estables del carbono (Sedov *et al.*, 2003). En la historia local se relaciona temporalmente con el avance glacial (MI) del volcán la Malinche (Heine, 1973).

Durante la etapa isotópica dos del oxígeno (*EIOM 2*) la humedad es más constante en el Último Máximo Glacial, el suelo (TX1b) desarrollado bajo estas condiciones climáticas no presenta características vérticas pero la meteorización e iluviación de arcilla aumenta en comparación con el período anterior (Sedov *et al.*, 2009). En La Malinche, en altitudes

**C.S. Berkovich**

---

similares, se registra una pedogénesis similar así como en la cuesta, este paleosuelo es denominado por Heine (1973) como fBo1 con edades de radiocarbono entre 18,000 y 20,000 años AP (Heine, 1994). Este periodo también está representado en las secuencias del Nevado de Toluca en el nivel definido como PT1 (Solleiro *et al.*, 2004); asimismo, en el área de Teotihuacán se relacionan temporalmente con los luvisoles desarrollados en la altiplanicie y también son indicativos de ecosistemas de bosque húmedo (Solleiro *et al.*, 2006).

Las características del siguiente paleosuelo (TX1a) reflejan las condiciones ambientales del Glacial Tardío, poco desarrollo con fuertes procesos de gleyzación y acumulación de humus, lo cual sugiere periodos cortos de estabilidad en el paisaje; una segunda evidencia de esta inestabilidad es la inversión de las edades radiocarbónicas (Sedov *et al.*, 2009).

El desarrollo de un último paleosuelo más tardío (TX1) de tipo Luvisol, sugiere características ambientales de humedad permanente como consecuencia de condiciones de frío severo semejantes a una pedogénesis en bosques de coníferas o bosque mixto con un clima templado con inviernos fríos, veranos cortos y frescos (Cabadas, 2007).

### **1.2.5. PALEONTOLOGÍA**

En el Bloque Tlaxcala se ha registrado fauna pleistocénica que consiste de molares, defensas y huesos planos de mastodontes, placas de gliptodonte, molares y dientes de caballo, así como restos de bisonte. Por la similitud de la fauna de esta localidad con la de otras regiones se le

puede asignar una edad *Rancholabreana* de alrededor de 0.4 a 0.02 Ma (Martínez *et al.*, 2005).

También, dentro la región Puebla-Tlaxcala se han encontrado restos de vertebrados del Pleistoceno en los sedimentos jóvenes de este período; específicamente en Valsequillo se han documentado restos de fósiles distribuidos en la superficie, descubriendo algunos en su posición original; una parte de los huesos están redondeados y otros con formas de agujas, lo cual permitió establecer: 1) que los hallazgos fueron sepultados en ambientes húmedos de antiguos lagos o en la parte baja de las corrientes; 2) parte de los fósiles que provienen de la misma época se localizan en su posición original (Valsequillo) y; 3) los restos de fauna aparentemente más antigua se localizan en posiciones de remoción (Guenther y Bunde, 1973; Castillo *et al.*, 2005).

Los fósiles identificados en el área son: *Mammuthus columbi falconer*, *Mammuthus imperator leidy*, *Mammuthus primigenius* (variación mexicana documentada en Tepexpan), *Mammuthus primigenius (primigenius-trogontherii*, variación mexicana); *Equus esperohippus*, *Hibbard equus* (Guenther y Bunde, 1973; Castillo *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2005).

### **1.2.6. EVIDENCIAS PALEOPEDOLÓGICAS Y SUS IMPLICACIONES EN LA PREHISTORIA**

La arqueología ha reconocido que el ambiente es dinámico y que las comunidades de vegetación y fauna cambian con el tiempo, por lo que la comprensión de estos cambios

---

**C.S. Berkovich**

---

durante el Cuaternario Tardío lleva a reconstrucciones más sofisticadas de las interacciones humanas del pasado y su ambiente biológico (Waters, 1992).

El estudio de los paleosuelos en arqueología tiene tres objetivos principales: establecer la estratigrafía, descifrar los procesos de formación del sitio y la reconstrucción del paisaje. Su aplicación más amplia ha sido para el Cuaternario Tardío ya que la prehistoria del continente americano ha enfocado sus investigaciones en conceptos y métodos geoarqueológicos para entender la dinámica de la conducta humana y las razones de su cambio (Dincauze, 2000; Butzer, 1982; Waters, 1992).

Los sitios más tempranos registrados en el continente son del periodo Paleoindio, en el cual se incluyen la Cultura Pre-Clovis y Clovis (Carbonell, 2005). Hasta el momento, la antigüedad de estas culturas continúa en discusión, para lo cual ha sido necesario conocer la estratigrafía detallada de cada sitio, así como las características ambientales que posiblemente determinaron sus asentamientos y su desplazamiento por los diferentes ecosistemas del continente durante el Pleistoceno Final-Holoceno Temprano.

En el Suroeste de los Estados Unidos se construyó una cronología detallada basada en unidades pedogenéticas y sedimentarias. El periodo más antiguo, de  $13,055 \pm 1155$ , sugiere que del Pleistoceno Final al Holoceno Temprano fue relativamente húmedo, con una vegetación de pastizal con piñones y juníperos, pero a una elevación mayor a los 1800 msnm había una vegetación mixta de pastizales y coníferas (Smith y McFaul, 1997). En la parte central de Virginia se estudiaron veinte secciones de un sitio Pre-Clovis, la estratigrafía se

definió a partir del análisis micromorfológico de los paleosuelos, así como la identificación de dos periodos ocupacionales (Pre-Clovis y Clovis) separadas por unidades sedimentológicas (Macphail y McAvoy, 2008).

En el área del sitio Dietz Basin, en Lake County, Oregon, se estudió una secuencia estratigráfica en la cual se documentó un paleosuelo fechado para el evento climático *Younger Dryas*, mostrando un régimen de mayor precipitación que provocó un cambio en el paisaje que fue de uno de áreas abiertas con pastos durante el Pleistoceno Final a un lago de agua dulce. Esta investigación permitió conocer la función del sitio: los asentamientos se generaron debido a la cercanía con los recursos de obsidiana de Horse Mountain (Pinson, 2008).

En los sitios Clovis se ha identificado un nivel estratigráfico común en todos ellos denominado “black mat”, que manifiesta el clima del evento *Younger Dryas* e indica un aumento en la tasa de precipitación, aparentemente, por efecto de una recarga más efectiva como resultado de un clima más frío. Este nivel estratigráfico (black mat) cubre los paisajes de edad Clovis en los cuales se encuentran los restos de megafauna del Rancholabreano. Este contacto estratigráfico representa: 1) El fin de un periodo más cálido y el abrupto inicio del evento *Younger Dryas*; 2) La precipitada extinción de la fauna del Rancholabreano y; 3) La evidencia más antigua de la Cultura Clovis. Esta superficie está conformada por paleosuelos móllicos con edades de radiocarbono de 10,900 a 9,800 aAP (Haynes, 2008).

Aunque Quade *et al.* (1998) realizaron el análisis del nivel *black mat* con base en columnas estratigráficas a escala local (Great Basin), sin asociarlo de forma regional, documentan un

**C.S. Berkovich**

---

rango de formación más amplio, desde 11,800 a 6,300 años de radiocarbono. Asimismo, también asocian esta formación con el desarrollo de paleosuelos móllicos debido a la recarga del Último Máximo Glacial.

Hacia fases mas tardías (Holoceno Temprano-Medio), el desarrollo de la Cultura Folsom fue sobre un paleosuelo (Carbonell, 2005), identificado en las secuencias estratigráficas. Morfológicamente, es un suelo con un alto contenido de materia orgánica y con propiedades gléicas, desarrollado a partir de los sedimentos de un pantano; el suelo es granuloso, bien drenado y débilmente calcáreo en el fondo del valle, reflejando el inicio de la pedogénesis con fechas de radiocarbono entre 11,000 y 8500 años exhibe, también, un perfil A-C. El suelo del Holoceno Temprano presenta menor contenido de materia orgánica y horizontes petrocálcicos con edades de 6,500 años de radiocarbono. Estos datos indican un cambio en el clima regional hacia condiciones en las cuales se incrementa la actividad eólica, se reduce la humedad y las temperaturas son más cálidas (Holliday, 1985).

#### **1.2.6.1. México y el hombre temprano**

Los primeros periodos de ocupación humana en nuestro territorio se conocen a partir de la evidencia arqueológica de dos áreas principales: la *Cuenca de México* y la zona norte del país. El nombrado *Norte de México* es la región con los hallazgos culturales de grupos nomádicos de mayor antigüedad; sin embargo, los escasos sitios y los materiales procedentes de excavaciones estratificadas con fechamientos radiométricos pertenecientes al Pleistoceno

Tardío y Holoceno Temprano contrastan con los hallazgos aislados vinculados a la misma temporalidad (Acosta, 2008).

Por otra parte, la prehistoria de la *Cuenca de México* se subdivide en cuatro periodos: *Arqueolítico*, *Cenolítico Inferior*, *Cenolítico Superior* y *Protoneolítico*, aplicables a toda la cuenca (García, 2007). Los sitios pertenecientes al *Arqueolítico* están localizados en el Estado de México, en la base área militar de Santa Lucía, donde se encontraron asociados a los restos óseos de un mamut, una lasca de obsidiana y dos de andesita con fechamientos de 21,950 y 24,350 años. *Tlapacoya I*, ubicado sobre una antigua playa del lago (Lorenzo, 1956), es el sitio perteneciente a este periodo que ofrece la mayor parte de información ya que se localizaron tres hogares, con fechas de radiocarbono de 22,000 años AC, asociados a animales extintos. Desafortunadamente, la forma de registro de este sitio aún está en especulación ya que la concentración de huesos de fauna extinta se asoció, posteriormente, a procesos naturales o que los materiales intruyeron las capas inferiores por bioperturbación o procesos edáficos (Acosta, 2008).

Es importante mencionar que esta especulación también es el resultado de la discrepancia con el registro para Norteamérica, ya que los sitios más tempranos para esta región tienen edades menores a 11,500 años y son los mejor documentados (para algunos autores, el rango cronológico de los primeros habitantes de América va desde 11.5 hasta 10.9 ka). Aunque los hallazgos de restos humanos del centro de México pertenecientes al Pleistoceno así como los sitios en Sudamérica, específicamente en *Monte Verde*, Chile, han evidenciado un poblamiento más antiguo (Carbonell, 2005).

**C.S. Berkovich**

---

El siguiente periodo, *Cenolítico Inferior*, está representado por el sitio de Santa Isabel Iztapan I donde se localizaron tres puntas de proyectil asociadas directamente a restos de mamut. Así mismo, en el sitio de Tocuila, cerca del lago de Texcoco, se localizaron cinco esqueletos de mamut con huellas de percusión, el depósito se fechó por  $^{14}\text{C}$  en 9,250 años AC. Este período coincide con la transición del Pleistoceno Superior al Holoceno durante el cual, los grandes herbívoros se extinguieron. En el *Cenolítico Superior* (7,000-5,500 AC) la subsistencia se basó en la recolección de plantas y la caza menor. En el sitio de *Tlapacoya III* se localizó, en este nivel de ocupación, una punta de proyectil. Para el *Protoneolítico* (5,500-2,000 AC), en el sitio *Tlapacoya IV*, hay evidencias del inicio de la agricultura en la Cuenca de México, objetos y figurillas de barro cocido con fechas de radiocarbono de 2,300 AC (Lorenzo, 1956).

Las evidencias arqueológicas de restos humanos hallados en los sitios como *El Peñón III* ( $10,755 \pm 75$ ), *Tlapacoya I* ( $10,200 \pm 65$ ), *San Vicente Chicoloapan* ( $4410 \pm 50$ ), *Tepexpan* (6,600) y la *Cueva de Texcal* ( $7480 \pm 55$ ), en Valsequillo (González *et al.*, 2003) confirman la presencia, en el centro de México, de sociedades desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno Medio.

## **Capítulo 2**

# **METODOLOGÍA**



## **Capítulo 2.**

# **METODOLOGÍA**

### **2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA**

La selección de la región de estudio se hizo de acuerdo con los proyectos de investigación que por parte del Instituto de Geología se llevan a cabo en el país. La doctora Elizabeth Solleiro y el doctor Sergey Sedov, como investigadores en el Departamento de Edafología de esta institución y dedicados al estudio de paleosuelos incluyeron, dentro de sus proyectos en el Centro de México, la presente investigación. Una de las secciones paleopedológicas de origen aluvial elegidas se localiza en la cuenca alta del Bloque Tlaxcala; otra, en el área nororiental de la subcuenca de Apizaco y; una más está en la región noreste de la Cuenca de México (FIGURA 3). Para su ubicación se utilizó un GPS tomando como referencia específica el datum NAD 27 para México.

### **2.2. COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN**

Previo a realizar cualquier otra actividad del proyecto, se inició una búsqueda exhaustiva de la literatura existente sobre la temática de investigación. Primero, sobre estudios genéricos relacionados con ciencias de la tierra y arqueología “ambiental” llevados a cabo en la región;

---

**C.S. Berkovich**

---

después, restringiéndolo a estudios edafológicos y secuencias coluvio-aluviales y; por último, al tema de paleosuelos que se generaron a partir de procesos de aluviamiento. Entre los principales trabajos que han abordado la problemática en las áreas de interés están: desde la década de los 70 el *Proyecto Puebla-Tlaxcala*, de la *Fundación Alemana para la Investigación Científica* a través de su órgano de divulgación: *Comunicaciones*, Lozano *et al.* (1993, 1994, 1996, 1997, 1998 y 2005), Urrutia *et al.* (1994 y 1995), Caballero (1997), Córdova y Parsons (1997), Ortega y Urrutia (1997), Caballero y Ortega (1998), Ortega y Newton (1998), Ortega *et al.* (2000, 2004), McClung *et al.* (2003), Rivas *et al.* (2004), Borejsza (2005), Sedov *et al.* (2005, 2006, 2009 y 2010), Solleiro *et al.* (2005, 2006 y 2011), Lounejeva *et al.* (2006 y 2007), Cabadas (2007), Pérez (2007), Rivera *et al.* (2007), Borejsza *et al.* (2008), Rivera (2009), Solis (2010).

## **2.3. TRABAJO DE CAMPO**

El trabajo de campo comprendió las siguientes fases metodológicas:

### **2.3.1. RECONOCIMIENTO PRELIMINAR DEL ÁREA DE ESTUDIO**

Se realizaron recorridos en barrancas de las cercanías de los poblados San Mateo Huexoyucan, San Tadeo Huiloapan y Santiago Tlalpan (Bloque Tlaxcala), en el área del poblado Lázaro Cárdenas (al noreste de Apizaco) y en el arroyo San Pablo (al norte de la zona arqueológica de Teotihuacán). Los objetivos en esta fase del trabajo fueron: a) identificar los elementos geomorfológicos del paisaje; b) determinar y delimitar las secuencias estratigráficas acorde

con la variabilidad espacial de las propiedades de los paleosuelos y; c) con base en los procesos erosivos y de acumulación que caracterizan el área, interpretar la dinámica del paisaje.

### **2.3.2. SELECCIÓN DE LAS SECCIONES EDÁFICAS**

Se eligieron tres sitios: el conocido como perfil *Río San Pablo* en el Valle de Teotihuacán que, *sensu strictu*, no se trata de un río sino de un arroyo intermitente pero es así como se le encuentra en la literatura; la secciones *Barranca Huexoyucan* y *Barranca Tenexac A* en el estado de Tlaxcala. Estos perfiles de suelo fueron escogidos para su descripción morfológica, muestreo y análisis tomando en consideración estudios previos —excepto Huexoyucan o, por lo menos, no explícitamente— que caracterizan paleosuelos en áreas de descarga de sedimento en antiguas cuencas de captación (Borejsza *et al.*, 2008; Sedov *et al.*, 2009 y 2010; Solleiro *et al.*, 2011).

### **2.3.3. CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA Y CLASIFICACIÓN DE PALEOSUELOS**

La descripción de las rasgos morfopedológicos de cada uno de los perfiles se elaboró siguiendo, analógicamente para este caso, lo establecido por Siebe *et al.* (1996) y consistió en: a) primordialmente, delimitar los *horizontes*, pues a partir de ello se derivan los siguientes incisos; b) catalogar el *color* [de acuerdo con la Munsell Soil Color Charts (2000)] y determinar *textura* al tacto, *estructura* y —dentro de lo posible— la composición de origen *orgánico y/o litológico*; c) establecer presencia/ausencia de *cutanes*, *concreciones* y *nódulos*, sus tipos y particularidades; d) precisar la variedad de improntas de *bioporos* y *madrigueras*, en caso de contenerlos y; finalmente, e) nombrar cada uno de los horizontes e identificar los

**C.S. Berkovich**

---

catalogados como *diagnósticos*, delimitar los distintos paleosuelos e inferir sus *propiedades*, *procesos pedogenéticos* y *grado de desarrollo*.

Ahora bien, una vez obtenido lo anterior se pasa a la clasificación basada en los criterios establecidos por la World Reference Base for Soil Resources (WRB) (2006). Pero, según estos cánones y otros del pasado, los apelativos sólo son aplicables a suelos actuales y no para los paleosuelos bajo el “argumento” de que, generalmente, éstos pueden carecer de uno o más horizontes (habitualmente los de tipo A) y; por lo tanto, sólo puede lograrse una “aproximación”. Sin embargo, al analizar suelos antiguos se puede percatar de que existen más pruebas a favor que nulifican la ausencia de tales horizontes puesto que se cuenta con otros elementos diagnósticos que hacen válida tal deducción. Actualmente, la comunidad de especialistas ha hecho cotidiano el uso de esta clasificación y, en consecuencia, el presente estudio se basa en una comparación de componentes morfológicamente análogos entre suelos modernos y paleosuelos para disponerlos en tal sistematización. Por último, se emplea el prefijo *paleo* o, en su defecto, se pospone la palabra *antiguo* como distintivo nominal entre unos y otros.

#### **2.3.4. MUESTREO DE SUELOS Y PALEOSUELOS**

Para llevar a cabo tal actividad se utilizaron las disposiciones del Manual no. 18 del *United States Department of Agriculture* (USDA) (1993). La extracción de muestras se hace de forma individualizada para cada horizonte y se establecen tres categorías por cada uno dependiendo de los tipos de estudios a realizarse: a) muestras para *análisis de rutina* y/o *selectos* (físicos: color, textura, mesomorfología, etcétera; químicos: isotopía, mineralogía,

etcétera); b) muestras de horizontes enriquecidos con materia orgánica para *fechamiento* y; c) muestras para *análisis micromorfológico*, que consiste en obtener bloques inalterados del suelo y orientados de acuerdo con su posición en el perfil.

## 2.4. ANÁLISIS EN EL LABORATORIO

### 2.4.1. ANÁLISIS MICROMORFOLÓGICO

*Preparación de láminas delgadas.* Cada bloque colectado en campo fue procesado por el técnico Eligio Jiménez del Taller de Laminación de Suelos del Instituto de Geología de la UNAM (IG-UNAM). Una vez seco (a temperatura ambiente) se impregna con una resina conocida como “*PP Cristal*” (cuyo índice de refracción es de 1.65) a la que se le agrega *monómero de estireno y peróxido de metil-etil-cetona* (como catalizador), colocada en una cámara de vacío con una presión de 22 atmósferas durante aproximadamente 3 horas y reposando en ella por 12 horas, tiempo calculado para la impregnación total de la muestra.

El secado y endurecimiento de la muestra tiene una duración de dos semanas a temperatura ambiente. Ya en estado pétreo, se cortan fragmentos (de 6.5 x 4.5 x 2.5 cm con una sierra con filo de diamante) que se adhieren a un portaobjetos (75 x 53 x 1 mm), luego se desbastan y pulen (en una pulidora Puehler Metacer 2000 y con una secuencia de lijas números 80, 120, 400) hasta alcanzar los 40-50  $\mu\text{m}$ , después se bruñen manualmente (con abrasivos de alúmina del 600 y 1000) y; finalmente, es adherido un cubreobjetos para su protección.

Análisis de la muestra. La descripción micromorfológica se realizó utilizando el microscopio petrográfico (Olympus BX50) siguiendo el esquema y terminología propuestos por Bullock *et al.* (1985) considerando cuatro grupos de elementos a observar: 1) Componentes básicos. Aquellos de origen tanto mineral como orgánico, 2) Rasgos pedológicos. Reconocimiento de la concentración de los componentes del suelo que permiten la inferencia de propiedades y procesos pedogenéticos, 3) Matriz. Material de textura gruesa y fina que constituye la base del suelo pero que no es parte de los rasgos pedológicos, 4) Fábrica del suelo. Se refiere a la organización del suelo expresada como un arreglo espacial de sus elementos, sus formas, tamaño y abundancia; asimismo, es considerada funcional y genética.

## **2.4.2. ANÁLISIS FÍSICOS**

### **2.4.2.1. Color**

La determinación de color de cada horizonte, tanto en húmedo como en seco, se hizo con la Munsell Soil Color Charts (2000) y considerando los criterios de la WRB (2006). El color del suelo es un rasgo propenso a variar—inclusive, de modo muy significativo— dependiendo de la intensidad con que interactúen sus componentes. La diferencia con los paleosuelos radica en que estos, además, pueden verse afectados por procesos diagenéticos; sin embargo, para este caso particular se considera atinado su reconocimiento ya que, los paleosuelos aquí estudiados se caracterizan por poseer un buen estado de conservación y poca modificación posterior a su sepultamiento manteniendo un color cercano al de su origen (Sedov *et al.*, 2009).

**2.4.2.2. Separación textural** [Cuantificación de las fracciones *arena* ( $> 53 \mu\text{m}$ ), *limo* (2-53  $\mu\text{m}$ ) y *arcilla* ( $< 2 \mu\text{m}$ )] (según la USDA)

Posterior al sepultamiento de un suelo, el porcentaje, distribución y composición de los diferentes fragmentos texturales de su matriz son características que perduran, es decir, no se modifican por causas de la diagénesis o por procesos mecánicos como el “*lessivage*” (Retallack, 1990). La cuantificación y distribución de partículas según su tamaño permite determinar o inferir otros rasgos, propiedades y/o procesos tales como: a) grado y tipo de horizontalización del perfil; b) discontinuidades texturales ocasionadas por eventos de erosión-depositación o por diferentes ciclos pedogenéticos; c) grado de meteorización y desarrollo relativo del perfil y; d) índices de eluviación e iluviación de arcillas (Fanning y Fanning, 1989; Birkeland, 1990).

Procesamiento de la muestra. La primera etapa consiste en tomar 30 gramos de muestra por cada uno de los horizontes y destruir los agentes cementantes tales como: carbonatos, materia orgánica y óxidos de hierro cuya función es aglomerar las diversas partículas del suelo pero, al desintegrarlos se evita una incorrecta cuantificación. Primero se destruye la materia orgánica con peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) al 10% y calentando en baño maría para acelerar el proceso pero, se puede seguir agregando  $\text{H}_2\text{O}_2$  paulatinamente (para no sobrecalentar) hasta que deje de efervescer, esta etapa puede tardar hasta varios días dependiendo que tan orgánico sea el horizonte; la técnica finaliza al “lavar” la muestra agregando agua destilada y centrifugando (para apresurar la decantación) tantas veces sea necesario. El procedimiento para eliminar los carbonatos es similar al anterior hasta el “lavado”, pero este se hace con ácido clorhídrico

**C.S. Berkovich**

---

(HCl) al 10%. Por último, los óxidos de hierro libre se extraen, generalmente, en un solo paso y en cuestión de minutos al agregar ditionito-citrato-bicarbonato culminando con el “lavado” de la muestra (Mehra y Jackson, 1960).

La separación de las fracciones se hace con los lineamientos propuestos por Schlichting y Blume (1966): 1) a la muestra se le agrega calgón (hexametáfosfato de sodio) y suficiente agua destilada para limpiar cualquier impureza que haya quedado de la destrucción de cementantes, dicha mezcla se pasa a través de un tamiz número 270 (con apertura de 53  $\mu\text{m}$ ) y, de esta forma puramente mecánica, es extraída la arena; 2) los limos y arcillas, debido al tamaño y diferencia de densidades, se separan por suspensión-decantación, es decir, el resto de la muestra se prepara con agua destilada hasta completar 1 litro vertiéndola en una probeta de 1000 ml dejándola reposar durante 24 horas; 3) se succiona hasta la marca de los 750 ml (10 cm) la cual contiene solamente arcilla en suspensión; 4) lo anterior se coloca en un recipiente distinto para su decantación final y, una vez concluida ésta, se quita el excedente de agua; 5) la probeta se vuelve a rellenar con agua destilada y 3 ml de cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}$ ) como dispersante, se mezcla y agita dejándola reposar 24 horas; 6) se repiten los pasos 3,4 y 5 tantas veces sea necesario hasta que ya no se observen partículas suspendidas arriba de los 750 ml; 7) se colocan las muestras en crisoles y se meten a un horno a una temperatura de 100°C para acelerar el secado. Es importante aclarar que este método de separación de las fracciones texturales puede tardar varias semanas pero ello depende de la cantidad de arcilla que pueda contener cada muestra.

Análisis de la muestra. La cuantificación consiste en pesar cada una de las fracciones y

calcular la proporción con respecto al peso inicial de toda la muestra. Con los datos obtenidos se elaboran gráficas para visualizar con eficiencia su distribución en el perfil; además, como se menciona en párrafos anteriores, este análisis es de gran utilidad desde el momento en que se pueden identificar discontinuidades, grados y tipos de meteorización, procesos de erosión-depositación, pedogénesis y tasa de eluviación e iluviación de arcillas, entre otros.

#### **2.4.2.3. Susceptibilidad magnética**

*Procesamiento de la muestra.* La técnica consiste en llenar cubos de 8 cm<sup>3</sup> con las muestras de cada tipo de horizonte para medir la susceptibilidad de baja frecuencia, para ello se empleó un susceptibilímetro Bartington modelo MS2 y un sensor dual tipo MS2B del Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica-UNAM.

*Análisis de la muestra.* Los datos resultantes de las mediciones de la susceptibilidad se dividieron entre la masa total de la muestra; con ellos se prepararon gráficas para comprender su comportamiento a lo largo del perfil y; posteriormente, se cotejaron con los valores de los trabajos de Ortega *et al.* (2004) y Rivas *et al.* (2006) y, de este modo, respaldar las inferencias argumentadas a partir de los resultados de otros análisis.

#### **2.4.3. ANÁLISIS QUÍMICOS**

##### **2.4.3.1. Fechamientos**

---

Para datación absoluta se seleccionaron horizontes que potencialmente hubieron acumulado mayor o suficiente cantidad de materia orgánica. Las muestras fueron fechadas por AMS en los laboratorios *Beta Analytic Inc.*, (Miami, Florida, USA). Los resultados se reportan como edades calibradas de acuerdo con el método usado por este laboratorio.

#### **2.4.3.2. Determinación del Carbono Orgánico Total (COT)**

La cantidad de carbono presente en el suelo es muy propensa a variar debido a cambios en el régimen climático y a la diagénesis; sin embargo, la determinación del porcentaje del tipo de origen orgánico es un factor importante en la interpretación de paleosuelos pues ayuda a recrear sus procesos y características morfogénicas.

Procesamiento de la muestra. Las extracciones y cálculos del COT fueron realizados siguiendo el *Método Lichterfelder* descrito por Schlichting y Blume (1966).

#### **2.4.3.3. Isótopos estables del carbono en la materia orgánica ( $\delta^{13}\text{C}$ )**

Los isótopos estables de carbono en la materia orgánica del suelo son un registro complementario que muestra evidencias de la paleovegetación y el paleoclima. Los resultados permiten adquirir más piezas en la reconstrucción del ambiente basándonos en: que las estructuras isotópicas son heredadas al humus formado por la descomposición de restos vegetales; tampoco presentan cambios significativos posteriores al sepultamiento del suelo (Retallack, 1990) y, los criterios fisioecológicos de las plantas C3 y C4 (Schaetzl y Anderson, 2005).

La aplicación de la técnica se realizó en horizontes con un mayor contenido de materia orgánica y su cuantificación fue determinada en el Laboratorio de Espectrometría de Masas de Isótopos Estables del IG-UNAM. Se tomaron los lineamientos de O'Leary (1988) para definir vegetación C3/C4 y para el centro de México, en específico, los establecidos por Lounejeva (2006).

#### **2.4.4. ANÁLISIS PALEOMICROBOTÁNICOS**

##### **2.4.4.1. Fitolitos**

La identificación de los fitolitos se basó en un análisis óptico por microscopía (microscopio Olympus BX50) y fueron cuantificados aquellos presentes en la fracción limo utilizando un conteo de 1000 granos. Para distinguir entre fitolitos y vidrio volcánico (ambos isotrópicos), las muestras se prepararon en inmersión de glicerina para identificar la línea de Becke. La estimación se hizo con base en el índice de refracción de la glicerina (1.48), que es más alto que el de los fitolitos (1.47) pero, más bajo que el mínimo asignado para el vidrio volcánico (1.49) (Sedov *et al.*, 2003).

##### **2.4.4.2. Polen**

La extracción polínica se realizó en el Laboratorio de Palinología del IG-UNAM. La búsqueda de palinomorfos (polen, esporas, algas) se realizó en un microscopio Olympus BX50, primero reconociendo el tipo y número de aberturas, ornamentación, tamaño y forma del grano de polen; después, las estructuras de otros (Sáenz, 1978).

#### **2.4.4.3. Diatomeas**

Se utilizó el microscopio Olympus BX50 para identificar los géneros y/o especies descritas en los manuales de Gasse (1980), Kramer y Lange (1991) y Patrick y Reimer (1966).

## **Capítulo 3**

# **ÁREA DE ESTUDIO**



## Capítulo 3

### DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS SECCIONES PALEOPEDOLÓGICAS

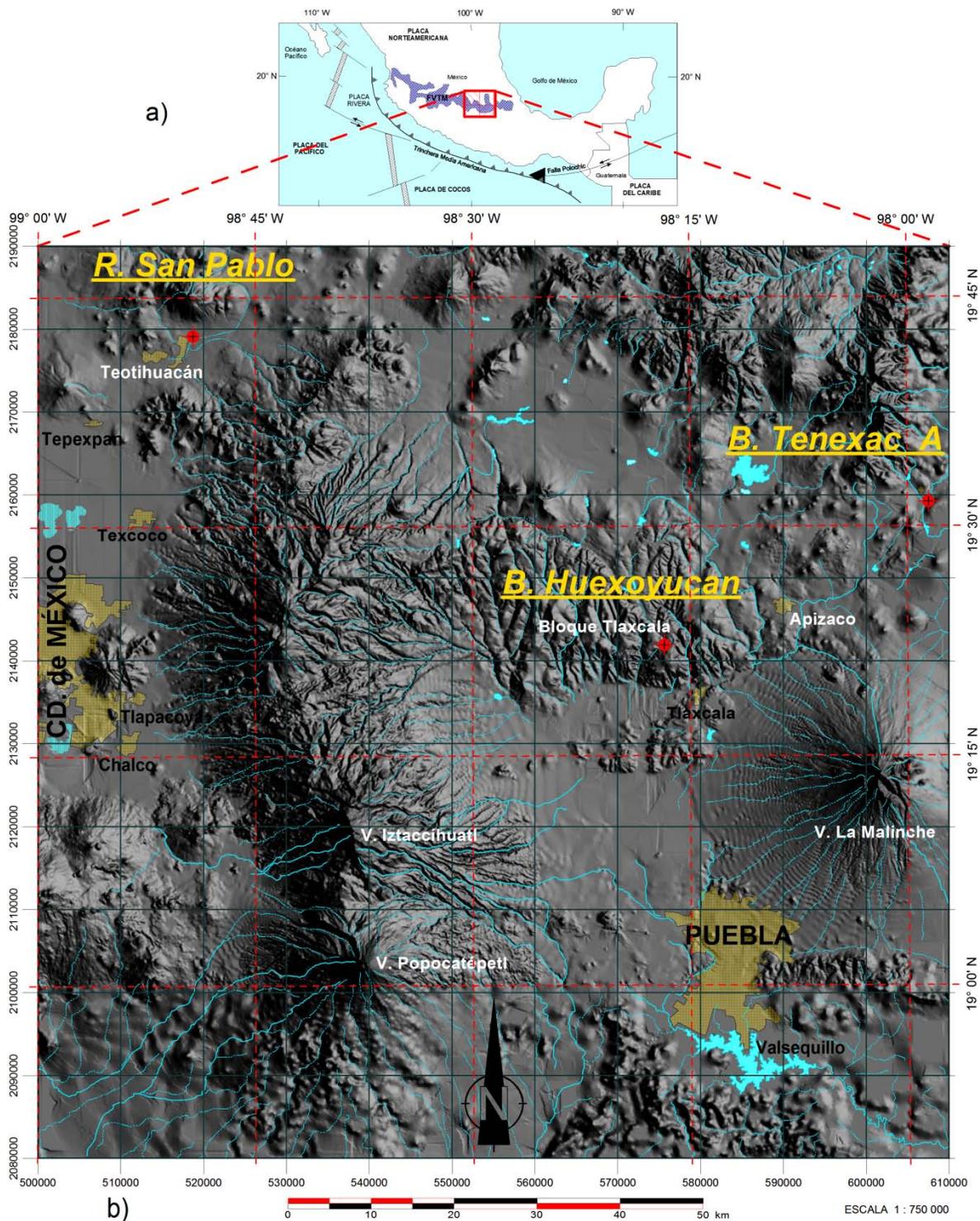
Las secuencias aluviales objeto de este estudio se localizan en tres grandes regiones: una en el extremo noreste de la subcuenca de Apizaco; otra en el Bloque Tlaxcala y; la tercera, en el extremo noreste de la Cuenca de México (específicamente en el Valle de Teotihuacán) (Figura 3). La información ambiental (clima y vegetación), geológica, fisiográfica, edafológica y paleopedológica se presenta en los párrafos siguientes.

Dentro de estas dos regiones fueron seleccionadas tres secciones edáficas ubicadas por medio de un GPS y considerando el datum WGS 84:

Perfil Barranca Tenexac A, estudiada por Borejsza y Frederick (2008) y localizado en el extremo norte de la subcuenca de Apizaco. Sus coordenadas geográficas son: 19° 31' 36.1" N, 97° 58' 32.2" W (UTM: 2 159 299 mN - 607 479 mE), 2 488 msnm (FIGURA 4)

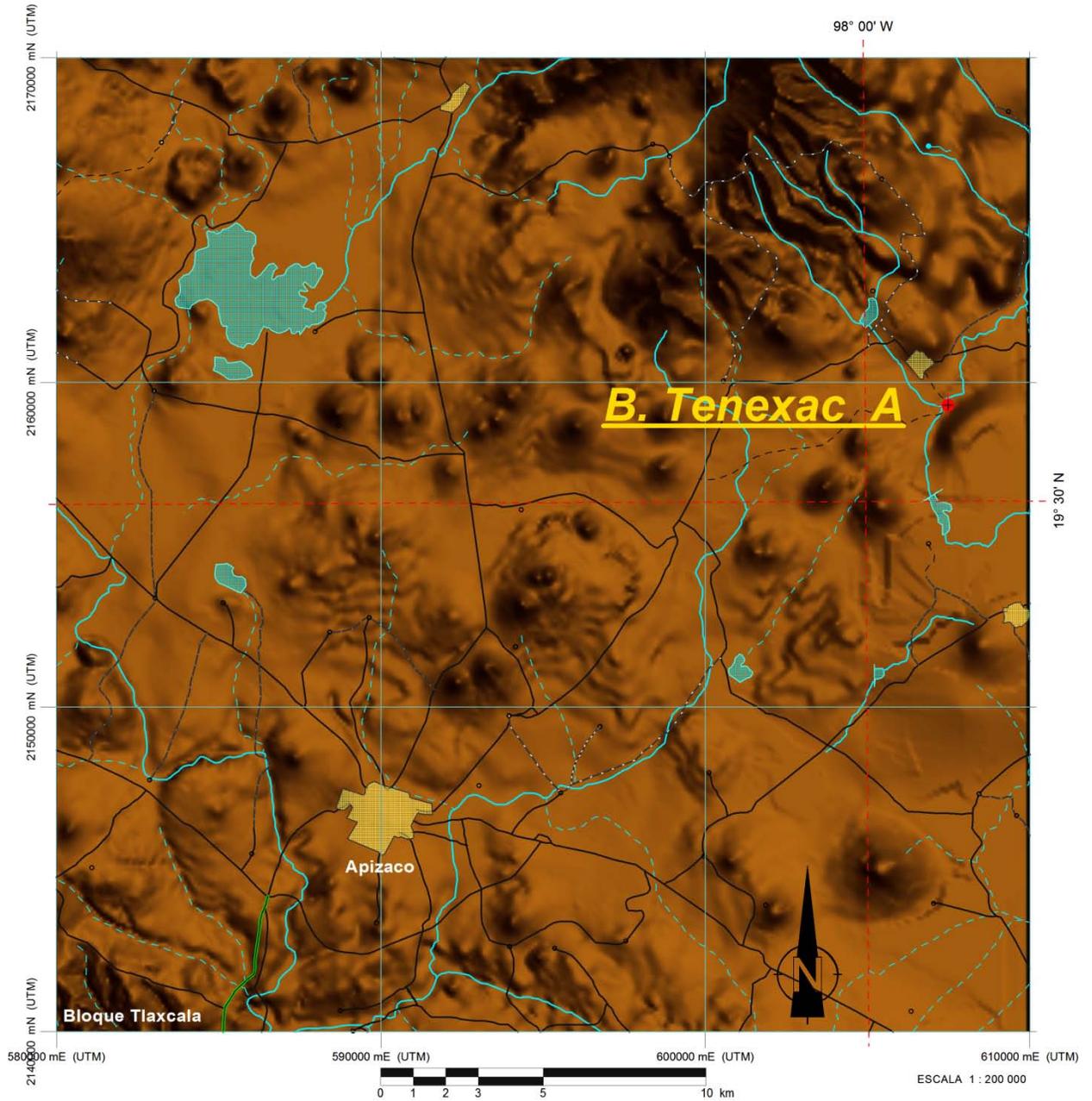
Perfil Barranca Huexoyucan, ubicado en el Bloque Tlaxcala con coordenadas: 19° 22' 16.7" N, 98° 16' 47.4" W (UTM: 2 141 943 mN - 575 631 mE), 2 476 msnm (FIGURA 5)

Perfil Río San Pablo, encontrado en el extremo norte del Valle de Teotihuacán con coordenadas: 19° 42' 30.3" N, 98° 49' 16.4" W (UTM: 2 179 094 mN - 518 734 mE), 2 301 msnm (FIGURA 6)

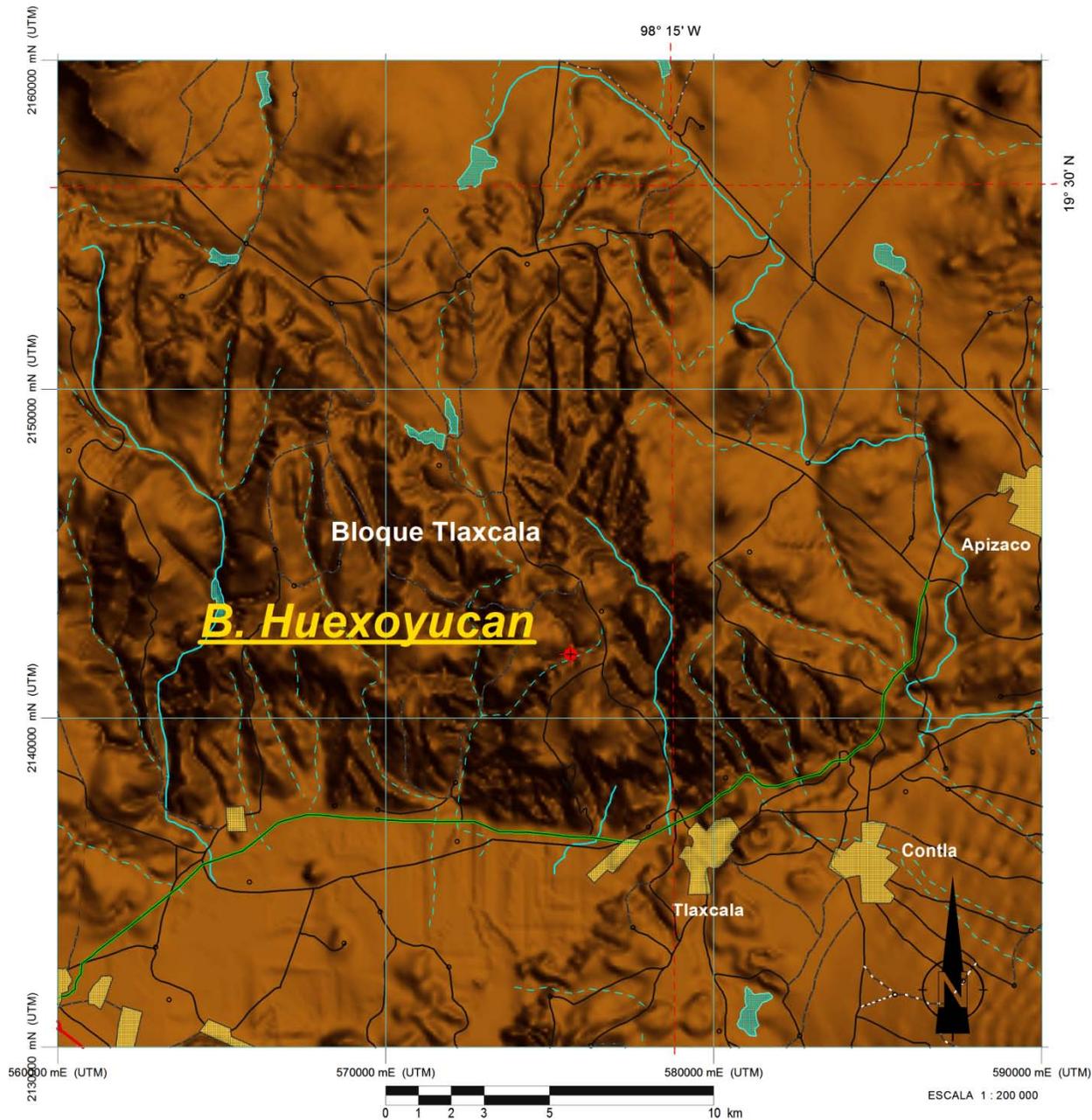


**FIGURA 3.** a) Caracterización tectónica de México y la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Siebe y Macías, 2004). b) Ubicación de las secciones paleopedológicas estudiadas y el sistema hídrico de la región (digitalización basada en las cartas topográficas 1:250 000 del INEGI: Ciudad de México E14-2, Veracruz E14-3, Cuernavaca E14-5 y Orizaba E14-6, cuyo datum es NAD 27 para México).

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS SECCIONES PALEOPEDOLÓGICAS

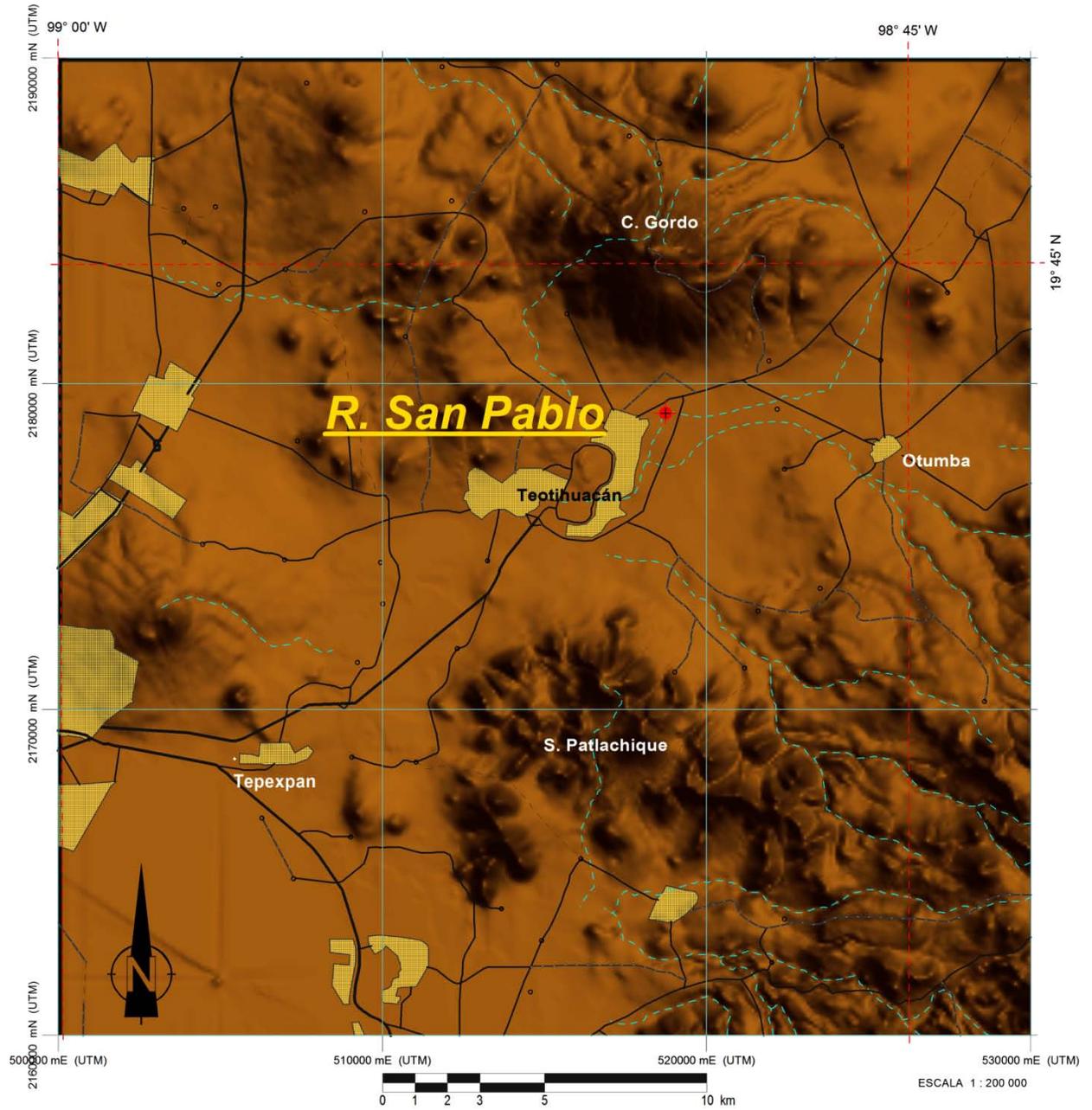


**FIGURA 4.** Vista particular de la zona donde se ubica el perfil paleopedológico *Barranca Tenexac A* mostrando el sistema hídrico de la región (digitalización basada en las cartas topográficas 1:250 000 del INEGI: Ciudad de México E14-2 y Veracruz E14-3, cuyo datum es NAD 27 para México).



**FIGURA 5.** Vista particular de la zona donde se ubica el perfil paleopedológico *Barranca Huexoyucan* mostrando el sistema hídrico de la región (digitalización basada en las cartas topográficas 1:250 000 del INEGI: Ciudad de México E14-2, cuyo datum es NAD 27 para México).

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS SECCIONES PALEOPEDOLÓGICAS



**FIGURA 6.** Vista particular de la zona donde se ubica el perfil paleopedológico *Río San Pablo* mostrando el sistema hídrico de la región (digitalización basada en las cartas topográficas 1:250 000 del INEGI: Ciudad de México E14-2, cuyo datum es NAD 27 para México).

## **3.2. LA REGIÓN PUEBLA-TLAXCALA**

El área de estudio corresponde, a grandes rasgos, al Bloque Tlaxcala el cual limita la parte norte de la gran cuenca formada en el centro del estado de Puebla colindando con Tlaxcala y circundada, además, por el Volcán La Malinche en el oriente; al sur, por la Cordillera Tentzo y; por último, por la Sierra Nevada en el oeste. La otra sección paleopedológica corresponde a la subcuenca de Apizaco, ubicada en el extremo nororiental de la misma.

### **3.2.1. CLIMA**

Las condiciones ambientales en el área de estudio corresponden a un clima subhúmedo, con temperaturas medias de 13°C y con precipitación media anual de 600-700 mm. Sin embargo, la distribución de microambientes varía de acuerdo con una topografía más específica como lo ha descrito Lauer y Stiehl (1973), quien presenta un mapa preliminar climático para la zona basándose en la clasificación de Köppen. Es así que, la región Puebla-Tlaxcala, puede considerarse como una región montañosa de los trópicos marginales con influencia marginal y extratropical. La distribución climatológica se realizó con base en los pisos latitudinales que muestra la influencia de la altitud, humedad y temperatura.

### **3.2.2. VEGETACIÓN**

La vegetación predominante en la zona muestra una diversidad de plantas debido al marcado relieve, los tipos climáticos, los diferentes grados de humedad (efectos de barlovento y sotavento) y la distribución edáfica. El mapa realizado por Klink y Lauer (Klink, 1973) abarca desde la Sierra Nevada en el oeste, un borde superior de la Sierra Madre Oriental y las cuencas

secas de Oriental y Libres, en el este; en la parte septentrional el Bloque Tlaxcala (incluyendo la pequeña cuenca de Apizaco) y; finalmente, Tehuacán hacia el sur.

La vegetación característica por debajo de los 1200 m son los mezquites y áreas de cultivo. Abajo de los 1800 m los bosques están formados por especies preferentemente tropicales, por ejemplo, las áreas de calizas y volcánicas con climas semicálido-semiárido y cálido-semiárido son bosques de especies de poca altura y xerófitas. Arriba de los 1800 m está formada por bosques naturales formados tanto por géneros tropical-montañoso hasta subantárticos. De los 2700 a los 3200 m se localizan bosques de coníferas de alta montaña, de los 3200 hasta 4100 m están los bosques de pino y; finalmente, arriba de los 4600 m se presentan zacatonales.

### **3.2.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA**

La geología del área inicia en su complejo basal por esquistos posiblemente de edad pre-Mesozoica; posteriormente, se localizan sedimentaciones continentales y marinas que conforman el Mesozoico (Lauer, 1979).

El Jurásico se caracteriza por sedimentarias rojas continentales compuestas por fragmentos de cuarzo y rocas de distinto origen no redondeadas; sobre estos depósitos se localizan, además, rocas sedimentarias con coloraciones verdes y pardas de la misma composición. Tales estratos se localizan hacia el sur de la Cordillera Tentzo, Acatlán y Tehuacán (Lauer, 1979).

Los depósitos del Cretácico se conforman por estratos de rocas sedimentarias en la base y, rematando, en la parte superior por calizas. Se trata de calizas de color pardo, gris y azulado-

**C.S. Berkovich**

---

grisáceo, son capas que varían en espesor y contienen macrofósiles, en su mayoría gasterópodos y rudistas. Estos depósitos se localizan en la Sierra Amozoc, Cordillera Tentzo (Formación Morelos) y Tehuacán. Asimismo, a este periodo corresponden la Formación Mexcala y Chicontepec, con calizas interestratificadas con lutitas (Lauer, 1979).

El Cenozoico se tipifica como un periodo de estratos fracturados, observados en el escalonamiento del Bloque Tlaxcala. La tectónica de la cuenca está caracterizada por cuatro fallas de tipo normal: Tlaxcala, Zacatelco, Huejotzingo y Tepeaca (Lermo y Bernal, 2006).

La geomorfología se caracteriza por plegamientos que se orientan predominantemente en dirección E-W debido a fallas y dislocaciones. Estos plegamientos forman una serie de barrancas producto de la descarga de agua por valles estrechos que forman una incisión eliminando el terraplén anterior conservando su vestigio solamente en los cortes de las corrientes (Lermo y Bernal, 2006).

#### **3.2.4. SUELOS**

Los suelos modernos de la región han sido clasificados por Werner (1976) de acuerdo con la geología y sus variaciones en composición (material parental), la temperatura y precipitación (clima), la topografía (relieve) y vegetación en: litosoles, regosoles, xerosoles, andosoles, cambisoles, acrisoles, luvisoles y antroposoles.

#### **3.2.5. PALEOSUELOS**

Mediante los estudios paleopedológicos realizados en el Bloque Tlaxcala se ha logrado

determinar tres unidades edáficas principales: en la base de la secuencia se encuentra la Unidad Roja (UR), seguida de la Parda (UP) y sobreyaciéndoles la Gris (UG), las cuales abarcan desde el Pleistoceno Medio hasta la actualidad y; específicamente, esta la última cubriendo del Pleistoceno Final al Reciente (Sedov *et al.*, 2009). Además, es importante señalar que la UG se subdivide en: TX1 (unidad más tardía) con un paleosuelo tipo Luvisol que se desarrolló durante el Holoceno Temprano, a ésta le subyace la unidad TX1a caracterizada por fuertes procesos de gleyzación seguida de TX1b de la *EIOM 2* y, en la base, la unidad TX2 perteneciente a la *EIOM 3*. Estas dos últimas exhiben gran acumulación de humus y arcilla, aunque en la unidad TX2 sólo se observan fuertes rasgos vérticos (Cabadas, 2007; Solis, 2010).

### 3.3. LA REGIÓN NORORIENTAL DE LA CUENCA DE MÉXICO

#### (Valle de Teotihuacán)

La parte noreste de la Cuenca de México se ubica entre los paralelos 19° 38' y 19° 45' norte y los meridianos 98° 40' y 98° 54' oeste, cubriendo una superficie aproximada de 348 km<sup>2</sup>. Al norte está delimitada por el Cerro Gordo; al oriente, por el extremo noroeste de la Sierra Nevada y; al sur, por la Sierra Patlachique.

#### 3.3.1. CLIMA

El clima está determinado por la altitud y topografía (García, 1988); por tal motivo, pueden observarse diferencias en temperatura, precipitación y tipos climáticos tanto en la planicie

**C.S. Berkovich**

---

aluvial como en los parteaguas de los complejos volcánicos que limitan la cuenca de captación. En junio se registra una temperatura media entre los 18 y 19° C en la parte baja del valle. Por arriba de los 2800 m la temperatura llega a 14° C, mientras que a 4000 m es de 6.5°C.

De la misma forma que la temperatura, los índices de precipitación cambian con las diferencias del relieve dando lugar a dos tipos de climas que varían de semisecos a subhúmedos (García, 1968). La precipitación anual en el valle es de 500 a 600 mm aunque la cantidad de lluvia varía localmente con la exposición de los lugares a los vientos dominantes y, en general, aumenta hasta alcanzar 1200 mm en las partes más altas (García, 1968).

### **3.3.2. VEGETACIÓN**

Las principales comunidades vegetales representadas actualmente en la región incluyen las combinaciones de matorral xerófilo con encino (*Quercus microphylla*), pastizal y bosque de encinos (*Quercus* spp.).

Rzendowski (1978) y Castilla y Tejero (1987) describen y establecen las comunidades vegetales, su distribución y principales componentes en el área de estudio. El matorral xerófilo es el tipo de vegetación que predomina en terrenos accidentados, pendientes suaves y cerros hasta aproximadamente los 2750 m. En Cerro Gordo, por ejemplo, el bosque de encino se puede encontrar a partir de los 2850 m o, incluso, hasta los 3000 m en la ladera sur y; en la norte, a partir de los 2700 m desplegándose hasta 3050 m, conformando un bosque denso de aproximadamente 5 m de altura. El pastizal es la vegetación de menor distribución

encontrándose principalmente en sitios de menor pendiente entre 2400 y 3050 msnm.

La vegetación introducida en el área es la producción de cultivos tales como cebada, maíz, nopal, tuna blanca, maguey y alfalfa.

### **3.3.3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA**

En general, la geología se ha descrito siguiendo los lineamientos establecidos por Mooser (1975) para la Cuenca de México, la cual está constituida por tres zonas fisiográficas: meridional, septentrional y nororiental. Las siete fases eruptivas que dieron forma a la cuenca se inician en el Oligoceno (primera y segunda etapas); seguidas de la tercera y cuarta, durante el Mioceno; la quinta a través del Plioceno y; la sexta y séptima, durante el Plio-Pleistoceno y Cuaternario Superior.

Específicamente, la zona nororiental se caracteriza por una gran actividad tectónica como consecuencia de dos sistemas de fallas: el primero se identifica con fracturas dirigidas de NW a SE (parte del Fracturamiento Acambay) y; el segundo está formado por fracturas dirigidas del SW al NE, perpendiculares al primer sistema (Mooser *et al.*, 1996).

A su vez, el sistema NW-SE está constituido por dos zonas de fracturamiento (una al sur y otra al norte del valle). En las fracturas ubicadas al sur se identifican los volcanes de la denominada Fractura Patlachique y; las del norte, sostienen los relieves de la Fractura Cerro Gordo. El sistema perpendicular (SW-NE) está formado, también, por dos zonas de fracturas: la Fractura Soltepec que constituye el parteaguas oriental, conformado por las estribaciones

**C.S. Berkovich**

---

septentrionales de la Sierra Nevada y en la que se distinguen el Cerro Picacho y el Cerro Soltepec; la Fractura Coronillas, al oeste, queda definida por el Cerro Chiconautla (hacia el sur de la fractura), el Cerro Coronillas y los conos Tlaltepec e Ixtlahuaca (al norte).

Las evidencias más antiguas de la actividad volcánica de la región noroccidental corresponden al Mioceno Medio y Tardío. El Cerro Malinalco, Cerro Patlachique y algunos afloramientos al norte de Texcoco pertenecen a la misma fase eruptiva (Vázquez y Jaimes, 1989). Estas rocas extrusivas están constituidas por andesitas de lamprobolita o augita (Barba, 1995), dacitas y tobas (Vázquez y Jaimes, 1989).

En el Cerro Patlachique también hay rocas del Plioceno Temprano (Vázquez y Jaimes, 1989; Barba, 1995) las cuales han sido denominadas, por su posición estratigráfica, como toba Don Guinyó (Vázquez y Jaimes, 1989). Se trata de secuencias piroclásticas no consolidadas constituidas por tobas cristalinas, líticas y pumíticas (Vázquez y Jaimes, 1989).

Los basaltos pliocénicos se encuentran entre la Sierra Patlachique y las lomas al SW de la región noreste (Barba, 1995). También durante el Plioceno se distinguen depósitos piroclásticos y fluviales (Vázquez y Jaimes, 1989). Además, se menciona que dentro de este grupo se encuentran las tobas amarillas que afloran en los alrededores de la zona arqueológica de Teotihuacán, específicamente, en la parte SW caracterizándose por su color amarillento y textura limo-arenosa.

Finalmente, el Cuaternario se caracteriza una intensa actividad volcánica producida por el

estratovolcán basáltico Cerro Gordo (3050 msnm) y algunos otros volcanes aislados en el área de Tezontepec-Otumba (Vázquez y Jaimes, 1989; Barba 1991). Este grupo volcánico del Cuaternario ha formado secuencias de flujos lávicos y tefras no consolidadas (Vázquez y Jaimes, 1989).

Los depósitos aluviales -por sus características litológicas, posición estratigráfica y génesis- han sido considerados como una sola unidad sedimentaria (Vázquez y Jaimes, 1989). Tales depósitos (formados por gravas, arenas y limos) afloran, básicamente, en la parte central del valle configurando sus planicies y en los cauces de arroyos mayores delineando terrazas de erosión (Barba 1995).

Según Mooser *et al.*, (1996), los sedimentos en la región nororiental del lago estuvieron expuestos a diferentes alternancias en los gradientes de temperatura. Cuando la temperatura descendía surgían suelos blandos y arcillosos como resultado del proceso de alteración fisicoquímica de los materiales aluviales y cenizas volcánicas en ambientes lacustres. Luego, si la temperatura aumentaba, el lago tendía a disminuir hasta desaparecer y los suelos blandos se consolidaban por deshidratación. En consecuencia, al producirse tales transgresiones y regresiones lacustres dieron por resultado depósitos de arcillas o la formación de suelos.

#### **3.3.4. SUELOS**

Los tipos de suelos principales que caracterizan actualmente al área de estudio incluyen phaeozems (48%), vertisoles (16%), cambisoles (13%) y leptosoles (13.5%). Los nombres fueron tomados de la clasificación FAO-UNESCO (1994) y la WRB (2006).

### **3.3.5. PALEOSUELOS**

Los paleosuelos identificados están constituidos por la superposición de diversos horizontes diagnósticos y capas de aluvión volcanogénico (Solleiro *et al.*, 2006). Cada una de dichas discontinuidades muestra diferentes edades y grados de desarrollo, lo cual es distintivo de suelos policíclicos. Según los datos obtenidos por  $^{14}\text{C}$  los paleosuelos se formaron en distintas épocas, desde el Pleistoceno Tardío hasta el Holoceno-Reciente (McClung *et al.*, 2003; Solleiro *et al.*, 2011).

Los perfiles se caracterizan como pedocomplejos y, generalmente, son representativos de ciclos cortos de estabilidad del paisaje (Solleiro *et al.*, 2006, 2011). La duración de estos ciclos depende tanto de la presencia de eventos catastróficos de orden natural, como de la intensidad y duración del impacto antropogénico y tecnogénico sobre el suelo.

En el Valle de Teotihuacán, el inicio de impacto humano en los suelos se ha estimado desde aproximadamente 3100 a.A.P. Estos perfiles corresponden al período de ocupación de la cultura teotihuacana y están constituidos por dos o más horizontes Ap y Ah, superpuestos de modo vertical y cuyas características han evolucionado conjuntamente, este impacto ha originado una degradación ambiental en el valle (Rivera *et al.*, 2007).

## **Capítulo 4**

# **RESULTADOS**



## Capítulo 4

### RESULTADOS

Para cada uno de los perfiles de suelo estudiados los resultados se organizaron de la siguiente manera: a) *caracterización morfológica* (obtenida de las observaciones en campo y a través de los análisis micromorfológicos de las láminas delgadas), b) *propiedades físicas* (granulometría y susceptibilidad magnética), c) *propiedades químicas* (carbono orgánico total e isótopos estables de carbono) y d) *contenido paleomicrobotánico* (fitolitos, polen y diatomeas).

#### 4.1. PERFIL BARRANCA TENEXAC A

##### 4.1.1. RASGOS MORFOLÓGICOS

*Descripción morfológica en campo* (FIGURAS 7 y 48. 1a-1d)

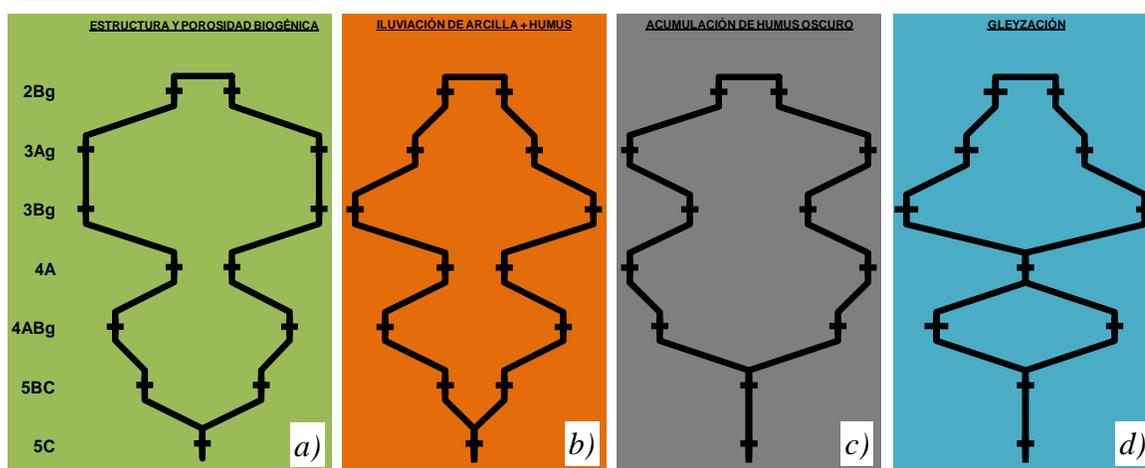
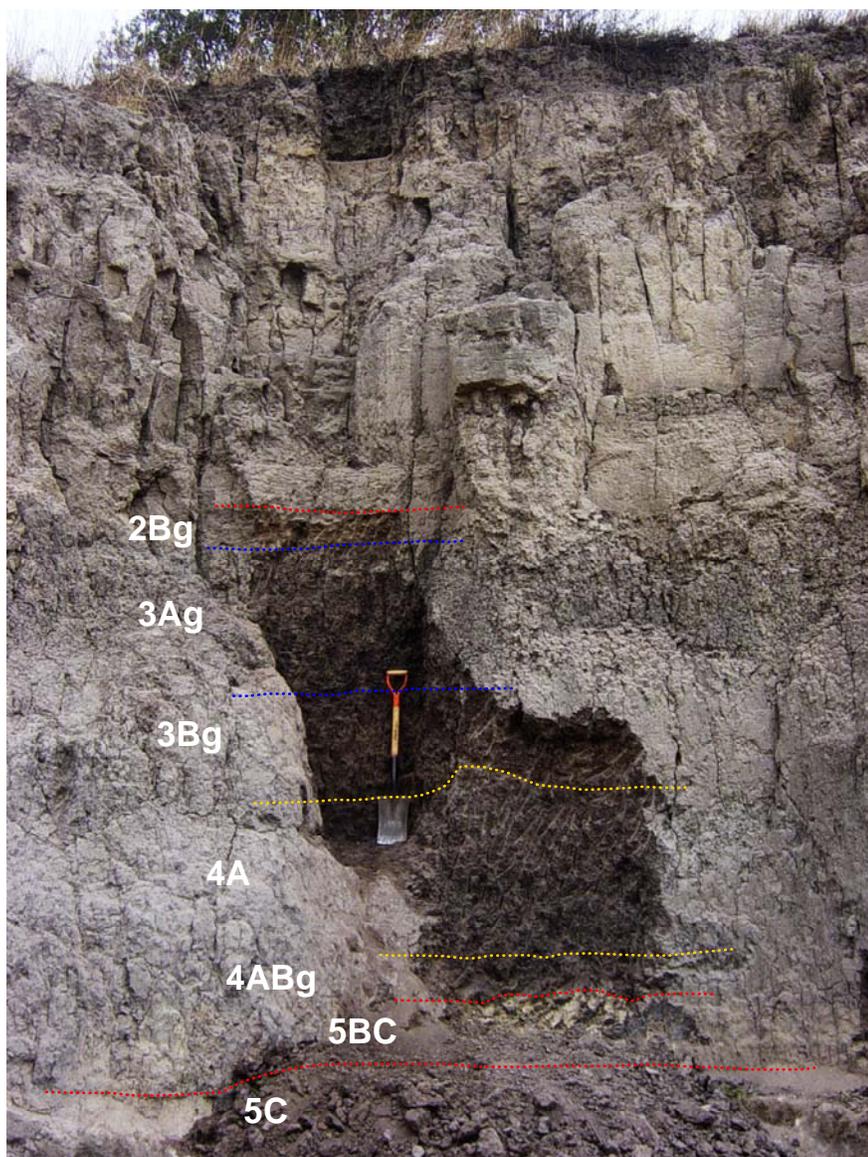


FIGURA 7. Procesos pedogénicos que caracterizan la morfología del perfil Barranca Tenexac A. a) Estructura y porosidad biogénica; b) Iluviación de arcilla y humus; c) Acumulación de humus oscuro y; d) Gleyzación.

**C.S. Berkovich**

---

El perfil *Tenexac A* se localiza en las coordenadas geográficas 19° 31' 36.1" N - 97° 58' 32.2" W (UTM: 2 159 299 mN - 607 479 mE), a una altitud sobre el nivel del mar de 2 488 metros. Esta sección edáfica fue estudiada -con otro enfoque- por Aleksander Borejsza (2006) y consta de una secuencia sedimentaria que va del Holoceno Medio hasta el Reciente sepultando una



**FIGURA 8.** Sección edáfica *Barranca Tenexac A*.

4.1. PERFIL BARRANCA TENEXAC A

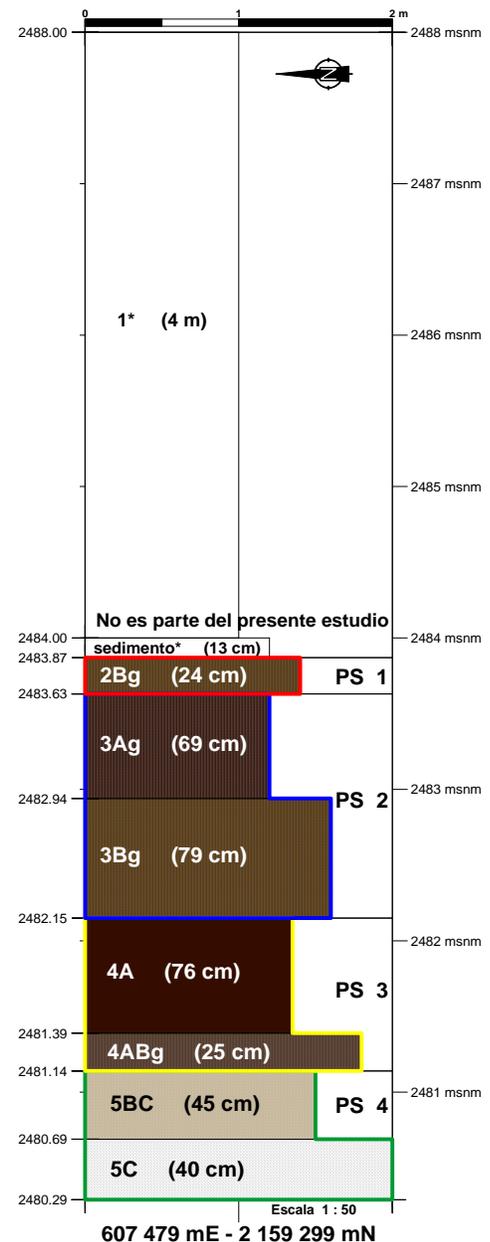
4.1.1. Rasgos morfológicos

Descripción morfológica en campo

serie de paleosuelos pertenecientes al Holoceno Temprano. Para fines del presente trabajo de investigación solamente se consideran estos últimos cada uno de los cuales fueron clasificados como se muestran en las FIGURAS 8 y 9.

Del primer paleosuelo (PS 1) sólo queda el horizonte 2Bg que se caracteriza por tener una estructura columnar que rompe a bloques subangulares pequeños; el color de la matriz es marrón claro con textura arcillo-limosa; presenta biocanales rellenos con orientación predominantemente vertical y se observan zonas con coloraciones rojo-amarillentas asociadas a ellos; el límite inferior es difuso.

**FIGURA 9.** Modelo gráfico representativo de la pedostratigrafía del perfil *Barranca Tenexac A* donde se muestra la distribución de los paleosuelos (PS) que lo constituyen. \* Zonas estudiadas por Borejsza (2006) no analizadas en el presente estudio.



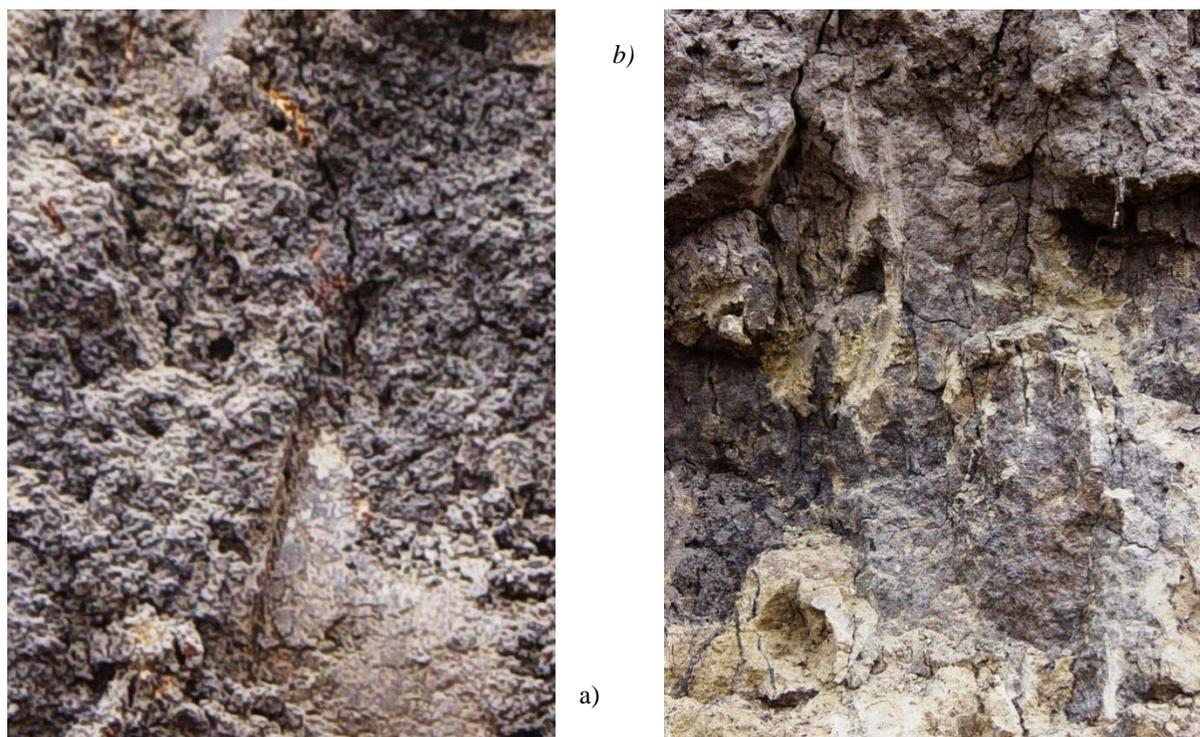
En los horizontes 3Ag y 3Bg del siguiente paleosuelo (PS 2) aumenta la cantidad de materia orgánica y la estructura de tipo columnar está más desarrollada; asimismo, los rasgos de iluviación de arcilla se acentúan incluso con halos ferrígenos amarillentos recubriendo los

**C.S. Berkovich**

---

bioporos (FIGURA 10a). También presentan pigmentación orgánica en la superficie de los agregados que aumenta con la profundidad y películas de óxidos de hierro. En la parte superior hay más rasgos reductomórficos y acumulación de materia orgánica hacia la base. El límite con el suelo subyacente es difuso.

El paleosuelo formado por los horizontes 4A/4ABg/4C es menos desarrollado que el suelo



**FIGURA 10.** *Tenexac A.* a) Horizonte 3Bg donde se muestra la iluviación de arcilla y los halos ferrígenos. b) Horizonte 5BC. Bioporos y cutanes de materia orgánica y arcilla recubriendo la estructura columnar de la matriz de color amarillenta.

superior. El horizonte 4A tiene una estructura en bloques pequeños subangulares que rompen a granular, con textura arcillo-limosa, los biocanales con películas negras y rojo-pardas están en

todas direcciones. El siguiente horizonte 4ABg muestra rasgos reductomórficos asociados a biocanales, estructura columnar que rompe a bloques subangulares y con textura más arcillosa que el horizonte superior. En la base de este paleosuelo, cuyo límite es abrupto, existen escasos recubrimientos superficiales puesto que en la parte superior son muy finos.

Al último paleosuelo (PS 4) lo forman los horizontes 5BC/5C. El primero (5BC) presenta una matriz amarillenta; estructura en bloques angulares grandes que tienden a prismáticos pequeños; la textura es areno-limosa; tiene biocanales en todas direcciones preferencialmente horizontal y cutanes de materia orgánica y arcilla recubriendo la estructura (FIGURA 10b). Le subyace el horizonte 5C el cual no muestra ningún rasgo de edafogénesis, su textura es limosa con baja densidad aparente.

#### **4.1.2. CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS**

La micromorfología de los paleosuelos que conforman en el perfil Tenexac A queda definida como sigue:

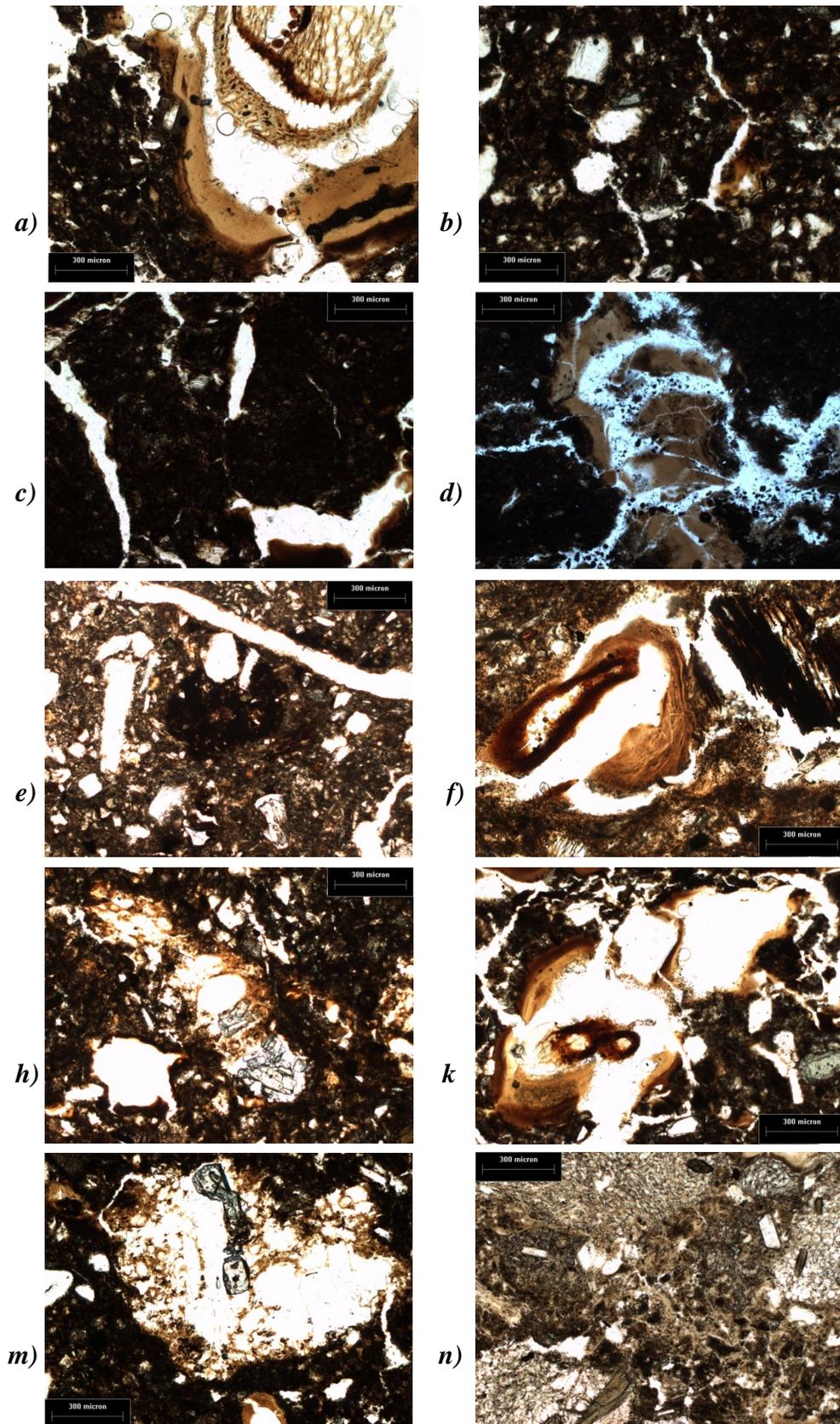
1. El paleosuelo integrado por los horizontes 3Ag/3Bg presenta rellenos y revestimientos de arcilla limpios y tejido orgánico parcialmente descompuesto que aún conserva su estructura celular (FIGURA 11a). En el horizonte 3Ag se observan una microestructura en bloques subangulares con un grado de pedalidad moderado, abundantes agregados con superficies rugosas y suavizadas y canales curvados (FIGURA 11b). La estructura

en bloques subangulares a nivel microscópico del horizonte 3Bg se distingue como fisuras que separan los agregados (FIGURA 11c), las laminaciones de sus cutanes de arcilla rellenan y/o recubren los poros a manera de halos (FIGURA 11d), además de la presencia continua de nódulos (FIGURA 11e).

2. En el Paleosuelo 3 (4A/4ABg), los tejidos vegetales se encuentran parcialmente descompuestos, algunos aún conservan partículas excretales producto de la actividad biológica (FIGURA 11f); también se observa un fuerte grado de intemperismo de los minerales primarios aunque algunos, como el vidrio volcánico, están frescos (FIGURA 11h). En el horizonte 4A aumenta la cantidad de materia orgánica; los cutanes se observan laminados; hay más bioporos los cuales están rellenos de arcilla y presentan un halo por oxido-reducción así como la presencia de nódulos ferrígenos (FIGURA 11k). El horizonte 4ABg muestra una estructura más compacta, laminar y fisurada; entre las fisuras se tienen rellenos de materiales poco meteorizados (FIGURA 11m) y la cantidad de materia orgánica disminuye.

3. El horizonte 5BC del Paleosuelo 4 destaca por el intemperismo de sus minerales y la presencia de fragmentos de roca aunque la matriz está constituida en un 40% de minerales del tamaño de la arena fina. La cantidad de materia orgánica disminuye; los cutanes de arcilla son muy finos recubriendo los pedos y se observan laminados en los poros (FIGURA 11n).

4.1. PERFIL BARRANCA TENEXAC A  
 4.1.2. Características micromorfológicas



**FIGURA 11.** Tenexac A. Micromorfología. *a)* 3Ag. Microestructura de los agregados. *c)* 3Bg. Microestructura de los agregados. *b)* 3Ag. Tejido orgánico. *b)* 3Ag. Tejido orgánico y rellenos de arcilla. *e)* 3Bg. Concreciones. *f)* 4A. Desechos microexcretales y materia orgánica. *h)* 4A. Mineralos frescos relleno poros. *k)* 4A. Bioporos rellenos de arcilla y óxidos de hierro. *m)* 4ABg. Poros rellenos de minerales poco meteorizados. *n)* 5BC. Minerales, agregados y recubrimientos.

### 4.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS

#### 4.1.3.1. Granulometría

La particularidad del perfil Tenexac A es la frecuente presencia de horizontes acumuladores de materia orgánica relacionada con el aumento de arcilla, pero también, con una mayor proporción en la fracción arena en horizontes tipo C. Los primeros cuatro horizontes muestran poca variabilidad en cada una de las fracciones siendo los porcentajes de arcilla de alrededor

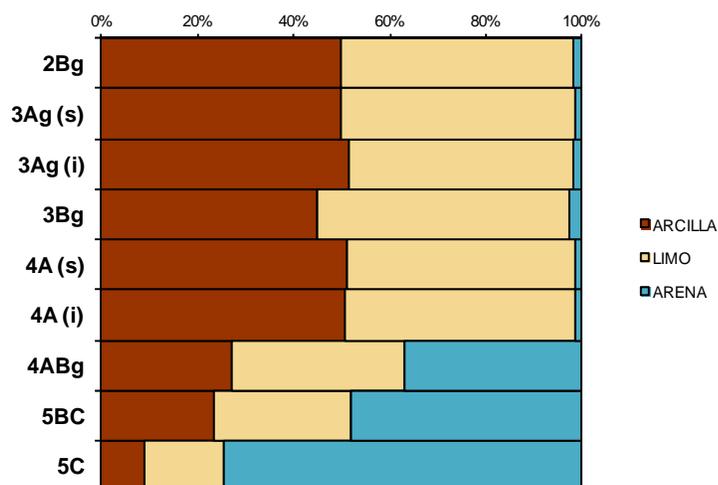


FIGURA 12. Tenexac A. Granulometría.

del 50% con una muy mínima cantidad de arena. A partir del horizonte 4ABg -hasta la base del perfil- la arcilla disminuye paulatinamente de 27% a 9% mientras que, la arena aumenta proporcionalmente desde un 37% hasta un 75% (FIGURAS 12 y 49a).

#### 4.1.3.2. Susceptibilidad magnética

Las muestras de susceptibilidad magnética fueron medidas en baja frecuencia ( $\chi^l$ ) y se presentan en las unidades  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$  del Sistema Internacional (SI). Los datos arrojan la menor

4.1. PERFIL BARRANCA TENEXAC A

4.1.3. Propiedades físicas - 4.1.4. Propiedades químicas

4.1.3.1. Granulometría - 4.1.3.2. Susceptibilidad magnética - 4.1.4.1. COT - 4.1.4.2.  $\delta^{13}C$

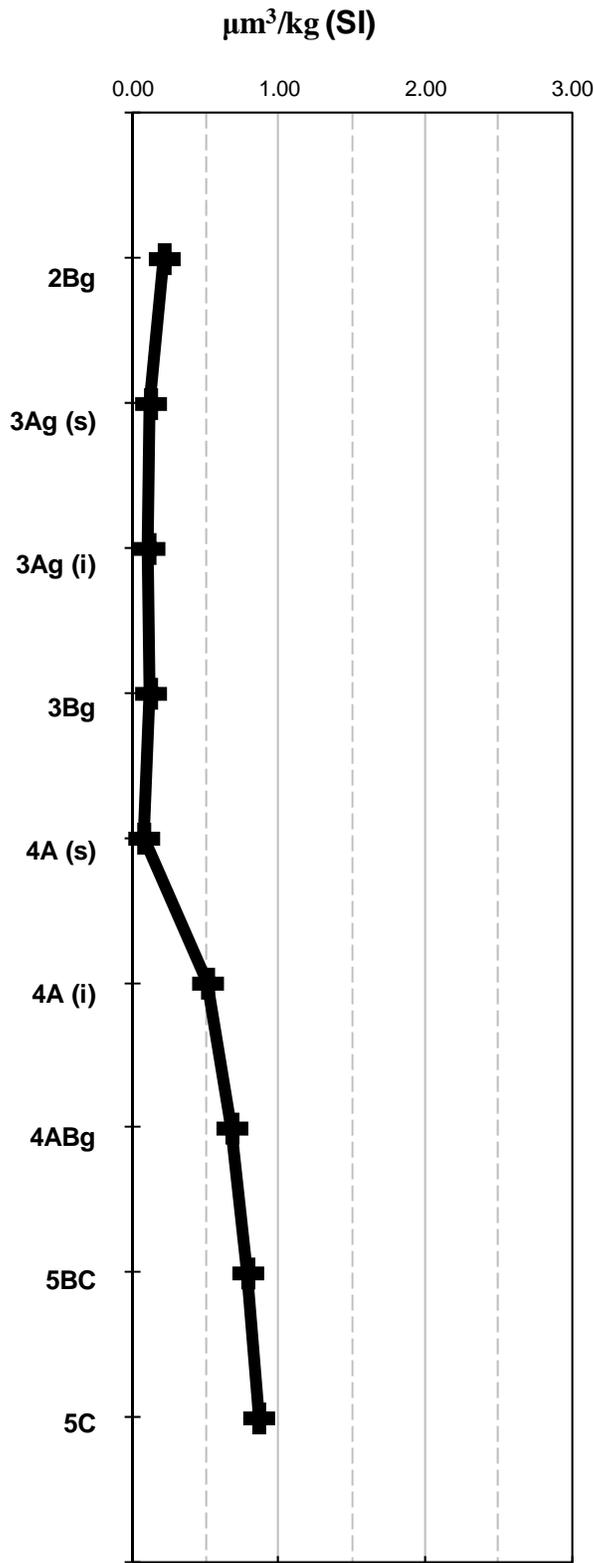


FIGURA 13. Tenexac A. Susceptibilidad magnética.

susceptibilidad de 0.075  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$  debido a que se trata de horizontes orgánicos o muy edafizados pero, conforme se acercan a la base del perfil (5C) empiezan, paulatinamente, a ser mayores por tratarse de horizontes con minerales más “frescos”. Esto último se presenta a partir de la parte inferior de 4A hasta alcanzar el valor máximo de 0.860  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$  (FIGURAS 13 y 50a).

4.1.4. PROPIEDADES QUÍMICAS

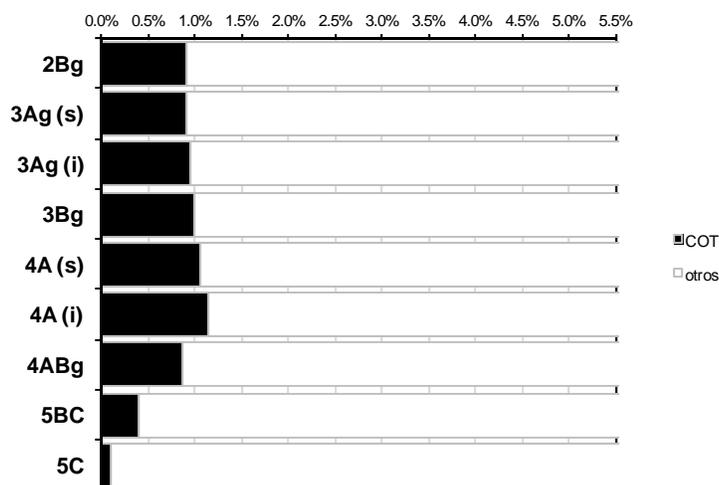
4.1.4.1. Carbono Orgánico Total (COT)

El valor más alto de carbono orgánico está en la parte inferior de 4A siendo de 1.132%. Los valores intermedios se presentan hacia la parte superior de este horizonte alcanzando 0.900%. Sin embargo, hacia la base del perfil

C.S. Berkovich

---

disminuye paulatina, pero drásticamente, hasta alcanzar el valor mínimo de 0.100% en el horizonte 5C (FIGURAS 14 y 51a).



**FIGURA 14.** *Tenexac A.* Carbono Orgánico Total (COT).

#### 4.1.4.2. Isótopos Estables de Carbono

##### Valores $\delta^{13}C$ de la sección paleopedológica

Los valores de  $\delta^{13}C$  en la materia orgánica de los paleosuelos de este perfil son relativamente homogéneos. Pueden notarse pequeñas oscilaciones entre el valor máximo localizado en 3Bg (-19.4‰) y el mínimo en el horizonte 5BC (-21.4‰). Esta secuencia pertenece a la *EIOM 1*, pues el fechamiento de  $9,988 \pm 77$  aAP en 5BC (Borejsza, 2006) corresponde a los  $9,260 \pm 50$  aAP (Beta 250974) de Huexoyucan (FIGURA 15).

#### 4.1.5. CONTENIDO PALEOMICROBOTÁNICO

##### 4.1.5.1. Fitolitos

4.1. PERFIL BARRANCA TENEXAC A

4.1.5. Contenido paleomicrobotánico

4.1.5.1. Fitolitos - 4.1.5.2. Diatomeas

En el perfil Tenexac A los porcentajes de fitolitos varían de la forma siguiente: el horizonte denominado 5C es el que muestra los valores mínimos (20.76%), mientras que los horizontes orgánicos presentan los mayores proporciones fluctuando entre 67.58% y 43.48% (FIGURAS 16 y 52a). En general, en todos los horizontes los fitolitos de pastos, piramidales y meteorizados suman aproximadamente la mitad contra la otra de los fitolitos no identificados (FIGURAS 17 y 52b).

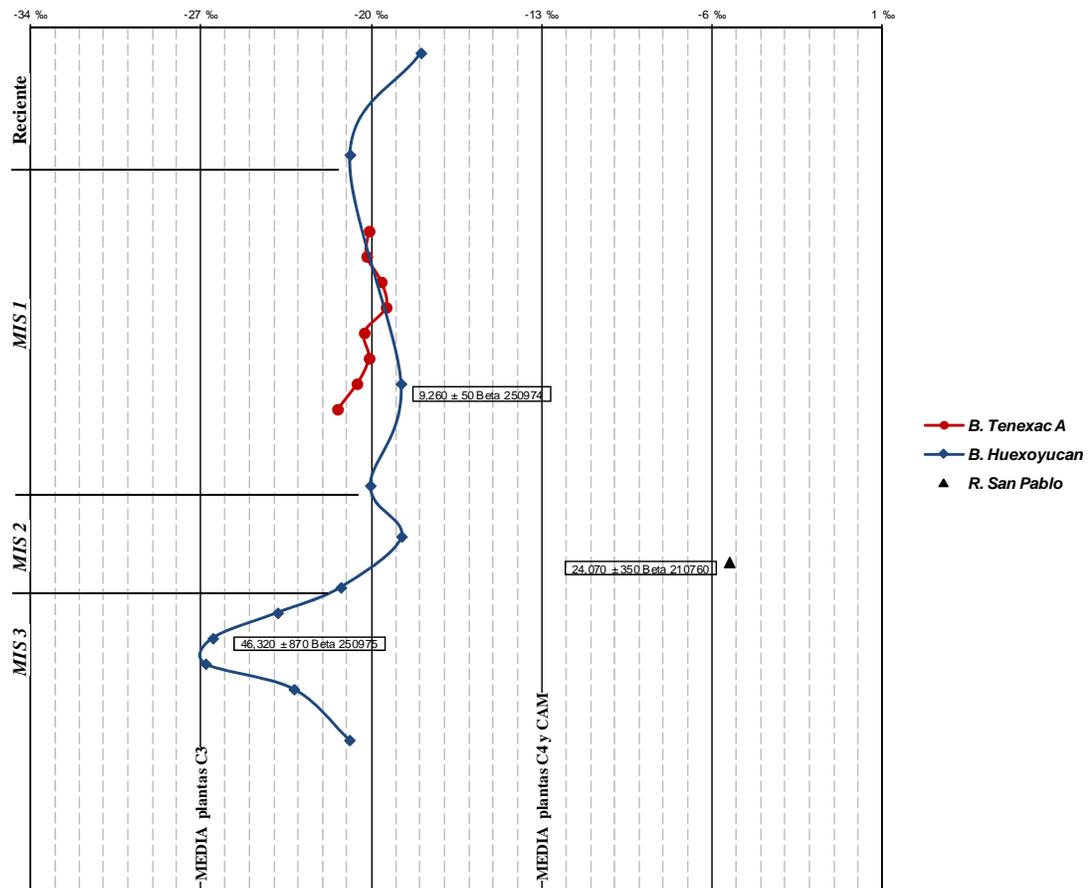


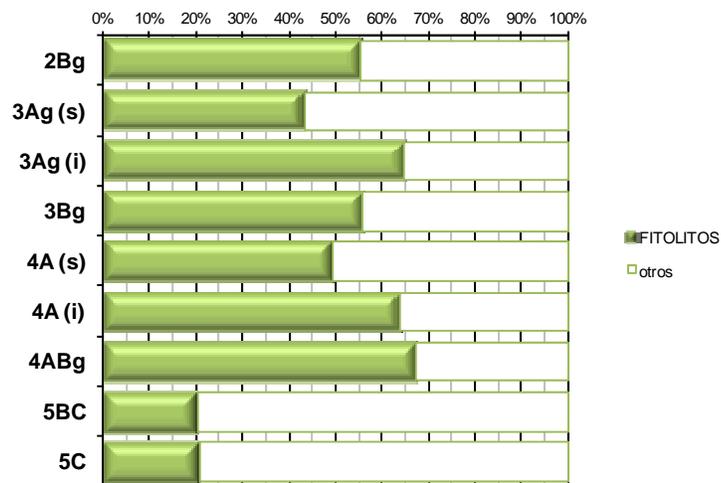
FIGURA 15. Isótopos estables de carbono: Valores de  $\delta^{13}C$  de las secciones edáficas estudiadas.

4.1.5.2. Diatomeas

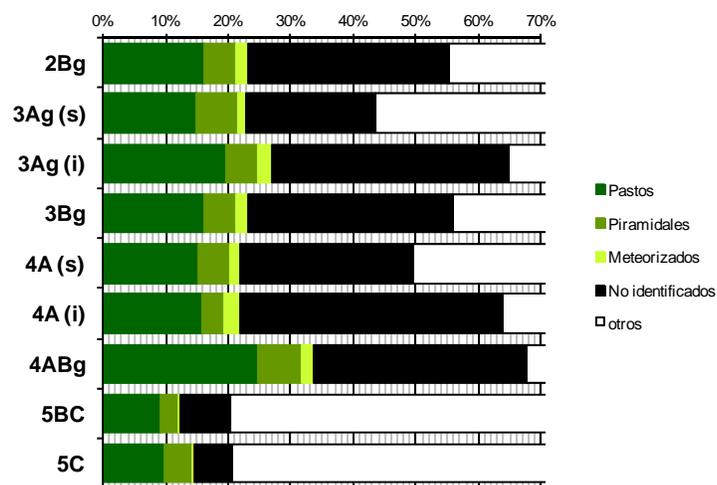
Los análisis de diatomeas en esta sección edáfica se refieren solamente a la presencia o

C.S. Berkovich

ausencia de las mismas. En términos generales, es muy poca la proporción existente, es decir, sólo son tres los horizontes de suelo que contienen diatomeas: el 2Bg presenta 0.110%; el 3Bg, 0.224% y; 5BC, el 0.143% (FIGURAS 18 y 53a).



**FIGURA 16.** *Tenexac A.* Porcentaje de fitolitos.



**FIGURA 17.** *Tenexac A.* Porcentaje de fitolitos por tipos.

4.2. PERFIL BARRANCA HUEXOYUCAN

4.2.1. Rasgos morfológicos

Descripción morfológica en campo

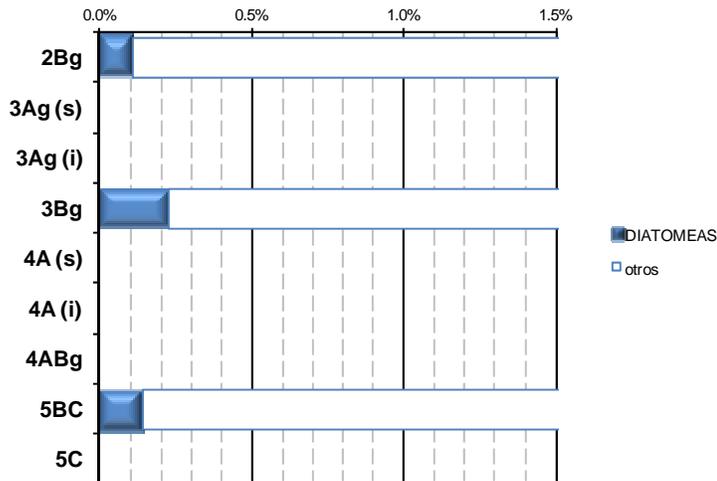


FIGURA 18. Tenexac A. Porcentaje de diatomeas.

4.2. PERFIL BARRANCA HUEXOYUCAN

4.2.1. RASGOS MORFOLÓGICOS

Descripción morfológica en campo (FIGURAS 19 y 48. 2a-2d)

El perfil Huexoyucan se localiza en las coordenadas geográficas 19° 22' 16.7" N - 98° 16' 47.4" W (UTM: 2 141 943 mN - 575 631 mE), a 2 476 msnm. En este perfil se describieron y analizaron seis paleosuelos, así como el suelo moderno, cada uno de los paleosuelos fue numerado y su descripción detallada se muestra en las FIGURAS 20 y 21.

Al suelo moderno lo definen los horizontes A/AC/C. Se trata de un suelo poco desarrollado, con textura areno-limosa, sin estructura y muchas raíces producto de la alteración antrópica del lugar evidenciada por la presencia de restos de cultura material.

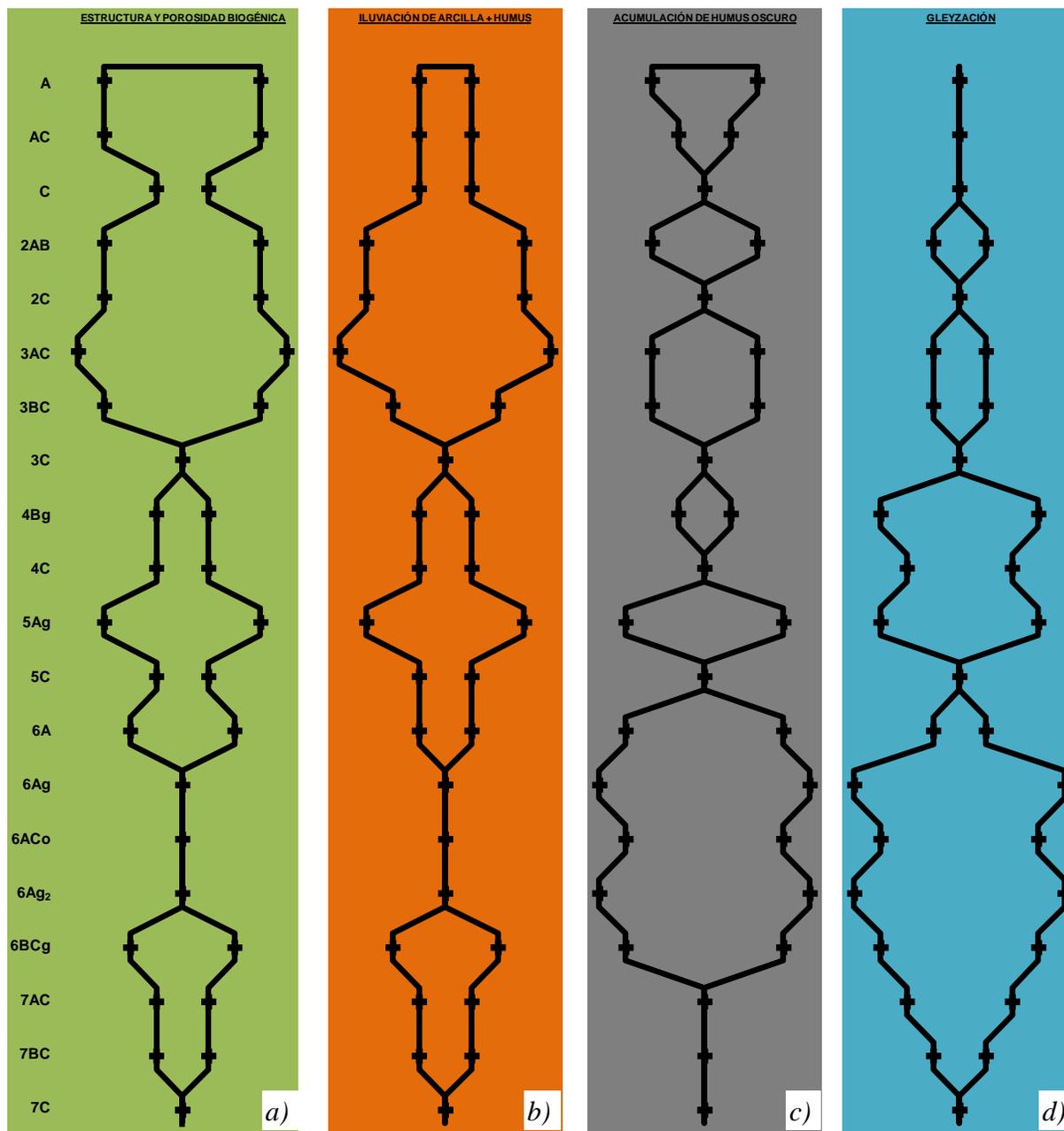


FIGURA 19. Procesos pedogenéticos que caracterizan la morfología del perfil Barranca Huexoyucan. a) Estructura y porosidad biogénica; b) Iluviación de arcilla y humus; c) Acumulación de humus oscuro y; d) Gleyzación.

La configuración del Paleosuelo 1 (PS 1) está definida por los horizontes 2AB/2C. Es un suelo muy profundo, más desarrollado y más compacto que el que le sobryace. El horizonte 2AB se caracteriza por una textura arcillo-limosa, estructura en bloques subangulares y, dentro de los

4.2. PERFIL BARRANCA HUEXOYUCAN

4.2.1. Rasgos morfológicos

Descripción morfológica en campo



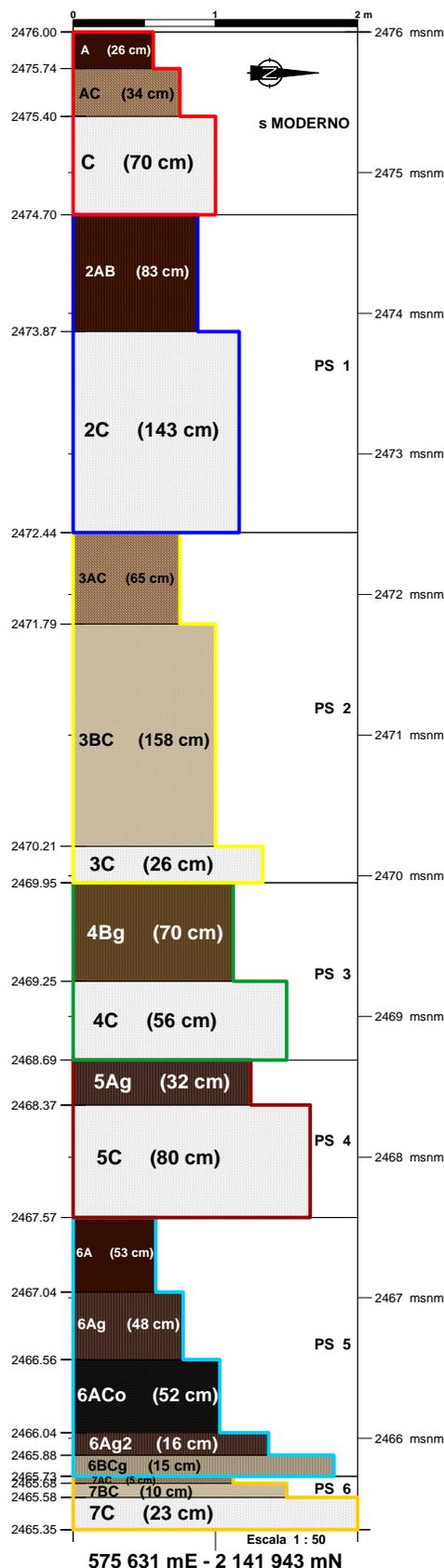
FIGURA 20. Sección edáfica *Barranca Huexoyucan*.

agregados, se observan poros biogénicos (FIGURA 22a). Los recubrimientos o cutanes oscuros (FIGURA 22b) de los agregados disminuyen gradualmente con la profundidad. El horizonte 2C es duro y compacto, sin estructura y con textura areno-limosa.

Los horizontes 3AC/3BC/3C conforman el siguiente paleosuelo (PS 2) que se caracteriza por

un aumento en la cantidad de materia orgánica y una estructura más desarrollada, asimismo aumentan los rasgos de iluviación de arcilla que se observan como halos amarillentos rodeando los bioporos y concreciones ferrígenas (FIGURA 23a, b y c).

El Paleosuelo 3 (PS 3), formado por los horizontes 4Bg/4C es más desarrollado que el suelo superior; 4Bg es un horizonte donde los rasgos reductomórficos son abundantes: moteados, nódulos, recubrimiento pardo verdoso posiblemente de arcilla muy discontinua; el siguiente horizonte no tiene estructura y la fracción arena predomina (FIGURA 24a y b).



**FIGURA 21.** Modelo gráfico representativo de la pedostratigrafía del perfil Barranca Huexoyucan donde se muestra la distribución de los paleosuelos (PS) que lo constituyen.

El Paleosuelo 4 (PS 4) está muy desarrollado, en 5Ag los rasgos reductomórficos predominan, con alta acumulación de humus y arcilla en la matriz, así como en la superficie de los agregados, por procesos de iluviación (FIGURA 25a y b); el horizonte 5C no muestra ningún rasgo de edafogénesis, su textura es limosa con baja densidad aparente (FIGURA 25a y c).

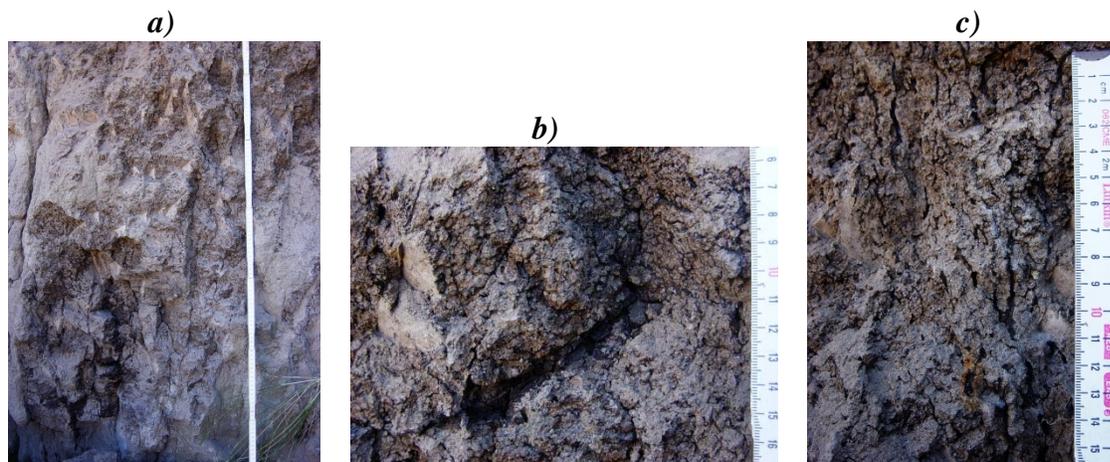
En la base del perfil se documentaron dos paleosuelos. PS 5 es de color pardo grisáceo, con estructura en bloques angulares y subangulares, con menor cantidad de arcilla; 6Ag es un horizonte de acumulación de humus (FIGURA 26a y b), mientras que el horizonte 6ACo es un horizonte de acumulación de arcilla, humus y material orgánico poco alterado (FIGURA 26a y c). El último paleosuelo (PS 6) tiene una configuración 7AC/7BC/7C, donde el horizonte 7AC presenta mayor contenido de humus y arcilla que el horizonte 7BC que contiene acumulación de Fe en bandas y mayor cantidad de la fracción limo y arena (FIGURA 27a y b).

Las características generales de los procesos edafogénicos del perfil se muestran en la FIGURA 19 y 48 (2a-2d) y pueden resumirse en los siguientes puntos:

1. El suelo moderno del perfil Huexoyucan tiene poco desarrollo, su estructura y porosidad biogénica, la acumulación de humus oscuro y la poca iluviación disminuyen conforme aumenta la profundidad.
2. Los Paleosuelos 1 y 2 se caracterizan por la acumulación de humus oscuro, iluviación de arcilla con humus en los bioporos. La estructura, la porosidad biogénica



**FIGURA 22.** *Huexoyucan*, horizonte 2AB. *a)* Estructura y porosidad biogénica. *b)* Cutanes de materia orgánica y arcilla.



**FIGURA 23.** *Huexoyucan*. *a)* Acumulación de materia orgánica en 3AC y 3BC. *b)* Iluviación de materia orgánica y arcilla en 3BC. *c)* Bioporos y halos ferrígenos en 3BC.



**FIGURA 24.** *Huexoyucan*, horizonte 4Bg. *a)* y *b)* Rasgos reductomórficos.

4.2. PERFIL BARRANCA HUEXOYUCAN

4.2.1. Rasgos morfológicos

Descripción morfológica en campo

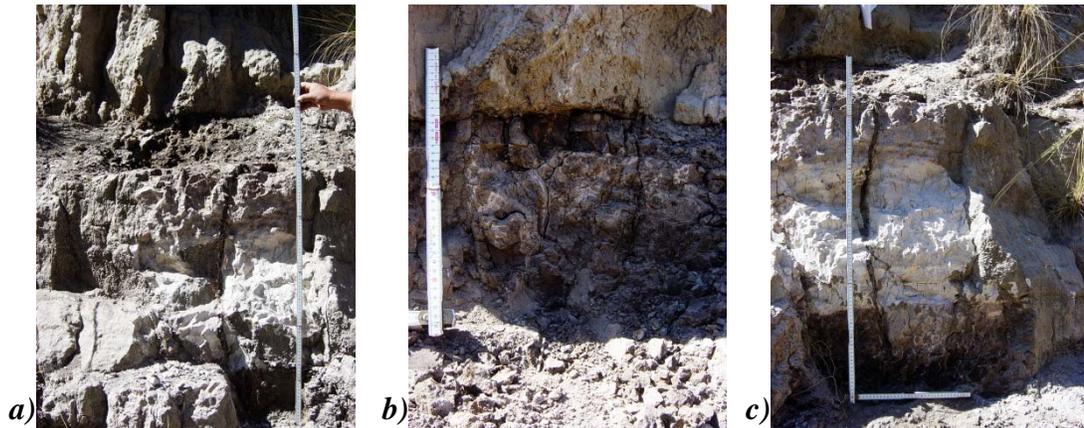


FIGURA 25. *Huexoyucan*. a) Vista general del Paleosuelo 4. b) Rasgos reductomórficos y acumulación de materia orgánica en 5Ag. c) Horizonte 5C.

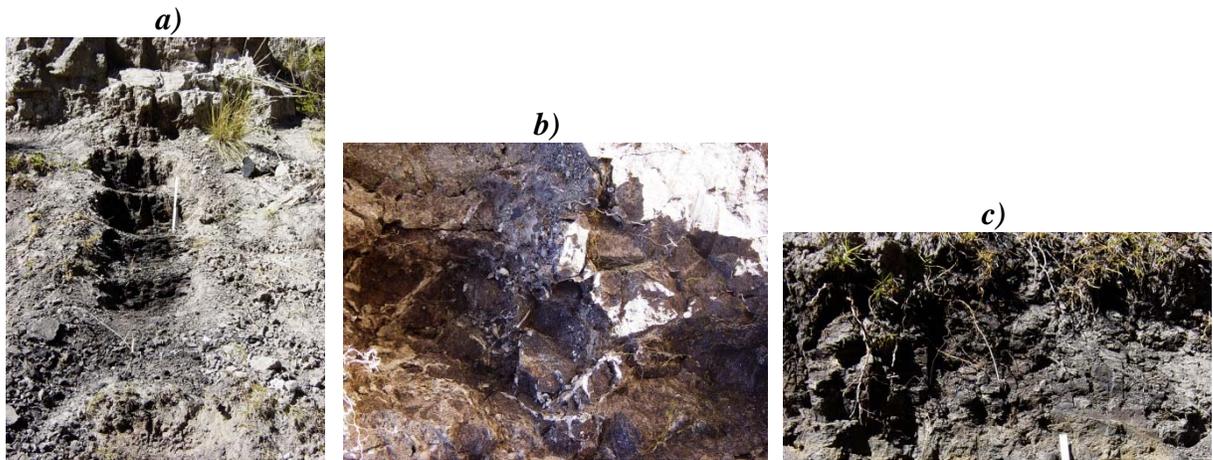


FIGURA 26. *Huexoyucan*. a) Vista general del Paleosuelo 5. b) Rasgos reductomórficos y acumulación de humus en 6Ag. c) Acumulación de materia orgánica no humificada en 6ACo.

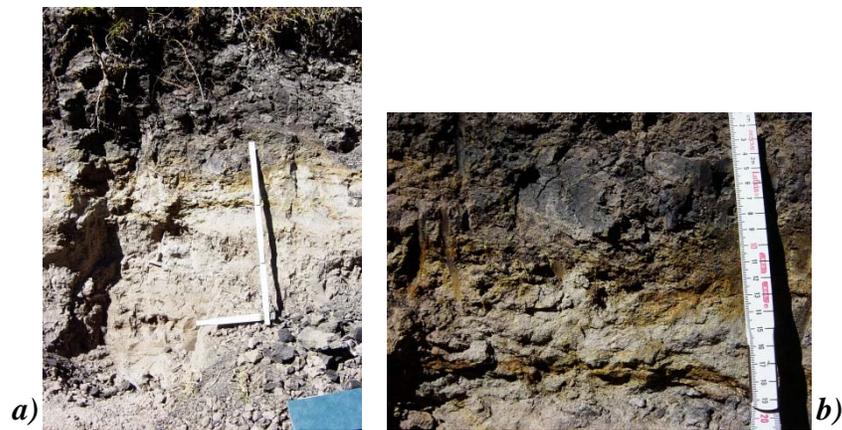


FIGURA 27. *Huexoyucan*. a) Vista general del Paleosuelo 6. b) Mayor cantidad de materia orgánica en 7AC y FeO bandeado en 7BC.

y la iluviación de arcilla aumentan en PS 2. El Paleosuelo 1 es menos desarrollado que el 2. Este último presenta un incremento en cada uno de los procesos mencionados.

3. Los horizontes 4Bg/4C conforman un PS 3 que está caracterizado por los fuertes rasgos gleycos que se observan, así como por la iluviación de arcilla y humus en los bioporos; aunque la estructura y porosidad biogénica es mínima, la acumulación de humus oscuro se incrementa.
4. El Paleosuelo 4 tiene estructura y porosidad biogénica, gleyzación e iluviación de arcilla y humus más uniformes.
5. El Paleosuelo 5 se caracteriza por presentar un máximo de acumulación arcilla y humus oscuro, así como de los rasgos gleycos.
6. El último paleosuelo (PS 6) se distingue por mantener rasgos gleycos que conforman una serie de laminaciones de óxidos de hierro que siguen las geoformas típicas de ambientes aluviales.

#### **4.2.2. CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS**

Las propiedades micromorfológicas que conforman en el perfil Huexoyucan se describen como sigue:

1. El suelo moderno se caracteriza por una alta cantidad de pápulas; los tejidos vegetales están en sus primeras fases de descomposición (FIGURA 28a). Se observan laminaciones y algunas concreciones de hierro; los fragmentos de roca son redondeados (FIGURA 28b) y minerales poco meteorizados (FIGURA 28c).
2. El primer paleosuelo (PS 1) presenta estructura más compacta. Se observan revestimientos de arcilla y tejido orgánico parcialmente descompuesto pero que aún conserva su estructura celular (FIGURA 28d). Los minerales muestran revestimientos de arcilla y materia orgánica en sus límites (FIGURA 28e), con un grado de alteración del 60% (FIGURA 28e). Los rellenos y revestimientos de arcilla están limpios y laminados. En los límites de los fragmentos de roca se observan pequeñas áreas en donde la arcilla se acumula, con moteados en la matriz. En el límite con el paleosuelo inferior se presentan diatomeas de la especie *Cymbella* (FIGURA 28f) y recubrimientos de goethita sobre los cutanes de arcilla que recubren los bioporos (FIGURA 28h).
3. En el siguiente paleosuelo (PS 2) los tejidos vegetales se encuentran parcialmente descompuestos (FIGURA 28k), algunos aún conservan excreciones de la microfauna. También se observan pápulas y diatomeas deformadas de la especie *Pinnularia* (FIGURA 28m) y *Navicula* (FIGURA 28m). Los minerales primarios aumentan su grado de meteorización (FIGURA 28n), aunque algunos están “frescos” como el vidrio volcánico. En el horizonte 3AC de este paleosuelo la cantidad de materia orgánica

aumenta; asimismo los cutanes se observan laminados (FIGURA 28p) y los bioporos están rellenos de arcilla; en el horizonte 3C se muestra una estructura más compacta, laminar y fisurada, entre las fisuras se tienen rellenos de materiales poco meteorizados (FIGURA 28r).

4. En el Paleosuelo 3 se observa una microestructura en bloques subangulares. La meteorización de los minerales se muestra en un 45%. También hay una especie de cámaras biogénicas con materiales del tamaño de la arena fina y gruesa que contrastan con la textura de la matriz. La característica principal de este paleosuelo es la presencia de goethita asociada a bioporos (FIGURA 28t), esta asociación en ocasiones se muestra con minerales opacos, posiblemente manganeso (FIGURA 28t). En el horizonte 4Bg se observan revestimientos de hierro y arcilla deformados, los tejidos vegetales se muestran muy fragmentados pero con fuerte birrefringencia bajo luz polarizada, lo cual evidencia su parcial descomposición.
  
5. El Paleosuelo 5 es rico en materia orgánica que está incorporada a la matriz (FIGURA 28u). Así mismo, se observan acumulaciones de espículas de esponja, diatomeas y fitolitos, las cuales están incorporadas en la matriz (FIGURA 28u). La estructura es en bloques angulares con cavidades. Se tienen moteados de material orgánico amorfo en un 80%. Los fragmentos de roca redondeados son de menor tamaño que en los paleosuelos superiores. Los rellenos de arcilla son densos y completos mostrando fracturas (FIGURA 28v).

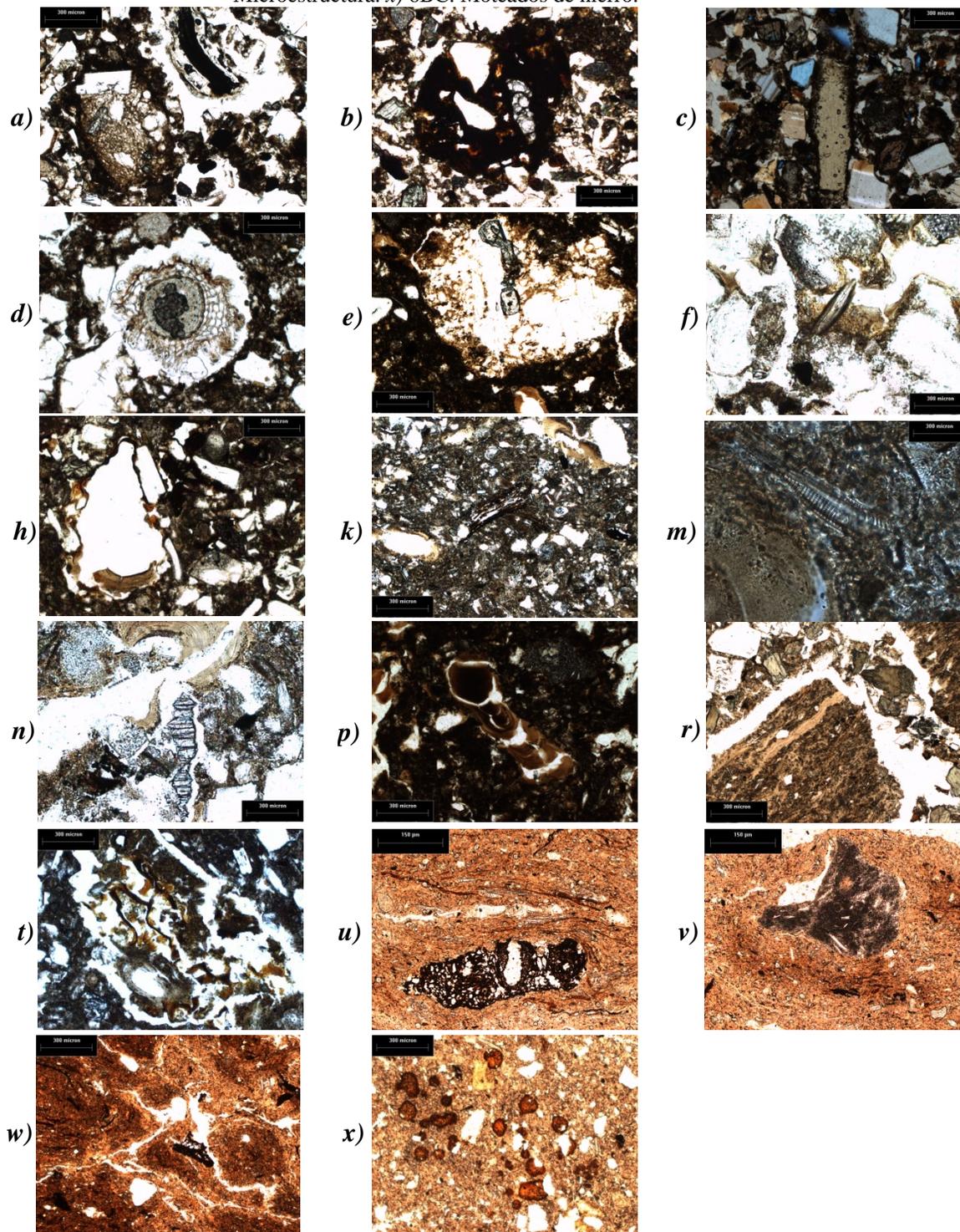
6. En el horizonte orgánico 6ACo hay un aumento de materia orgánica, con una microestructura en líneas onduladas y suavizadas (FIGURA 28w) que ocasionalmente están rellenas de arcilla rojiza o materia orgánica amorfa, también se tienen diatomeas de la especie *Eunotia* y *Pinnularia* deformadas e incorporadas a la matriz.
  
7. En la base de los horizontes orgánicos también se presenta la microestructura laminar. Los fragmentos de roca están revestidos con materiales de hierro y minerales oscuros, como el manganeso. Con la profundidad, la cantidad de materia orgánica disminuye, ya que las coloraciones de la matriz son pardas claras y los minerales están poco meteorizados.
  
8. En el horizonte 6BC la coloración de la matriz es rojiza, con moteados de material de hierro tanto goethita como hematita (FIGURA 28x). Nuevamente aumenta la meteorización de los minerales y fragmentos de roca. En los horizontes más inferiores de este paleosuelo hay un aumento en la cantidad de materia orgánica, evidenciada por la coloración parda oscura de la matriz; los rellenos de arcilla son densos completos y laminados; la matriz del suelo está constituida en un 40% de minerales del tamaño de la arena fina.

### 4.2.3. PROPIEDADES FÍSICAS

#### 4.2.3.1. Granulometría

El perfil localizado en la Barranca Huexoyucan muestra una variabilidad estandarizada en los

**FIGURA 28.** *Huexoyucan*. Micromorfología. Suelo moderno: *a*) tejido vegetal, *b*) concreciones de hierro, *c*) minerales poco meteorizados. PS1: *d*) tejido, *e*) revestimientos de arcilla, *f*) diatomea, *h*) cutanes de arcilla. PS2: *k*) tejido, *m*) pápulas y diatomeas, *n*) minerales, *p*) relleno de bioporos, *r*) microestructuras laminares fisuradas. PS3: *t*) recubrimientos sobre minerales. PS5: *u*) materia orgánica en la matriz, *v*). *w*) 6ACo. Microestructura. *x*) 6BC. Moteados de hierro.



4.2. PERFIL BARRANCA HUEXOYUCAN

4.2.3. Propiedades físicas

4.2.3.1. Granulometría - 4.2.3.2. Susceptibilidad magnética

porcentajes de cada una de las fracciones, es decir, la distribución corresponde según el tipo de horizonte del que se trate (FIGURAS 29 y 49b).

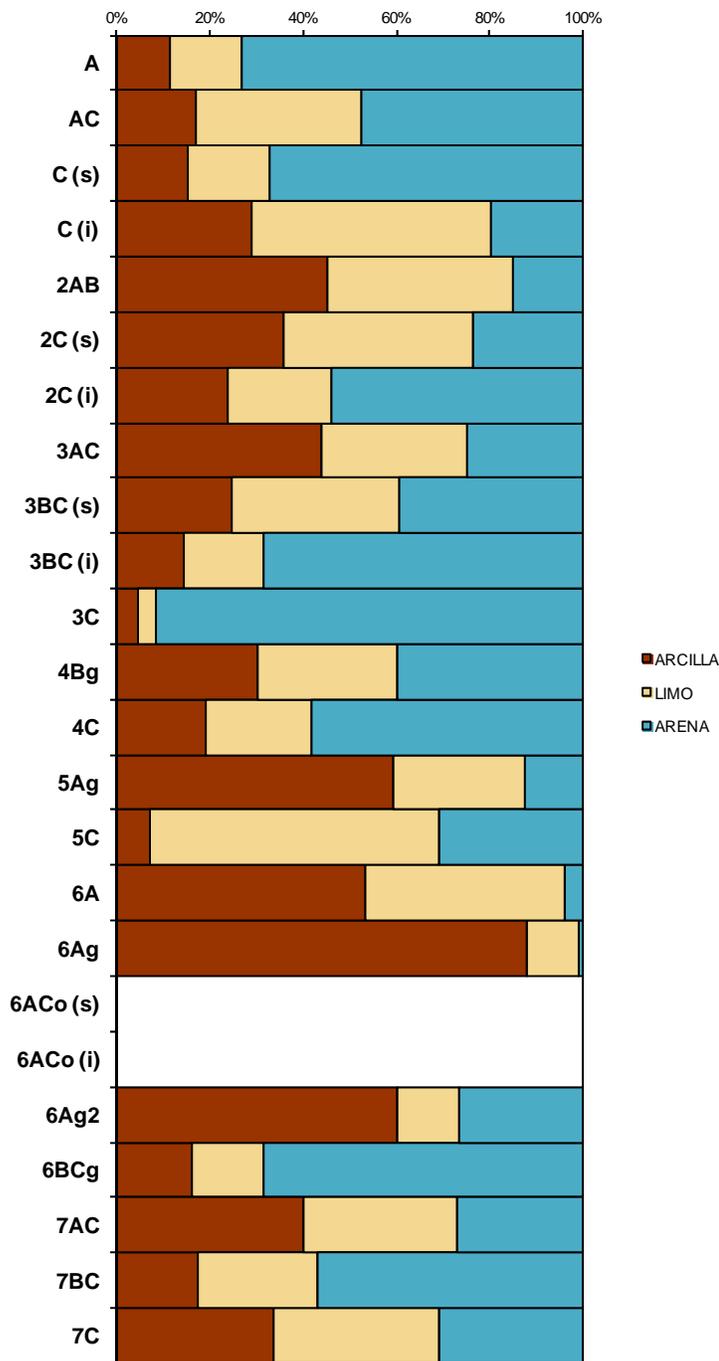


FIGURA 29. Huexoyucan. Granulometría.

**C.S. Berkovich**

---

En el suelo moderno los porcentajes de la fracción arena son los dominantes mientras que, en los paleosuelos (de PS1 a PS6) subyacentes la fracción arcilla es la que sobresale, pero siguiendo el patrón de disminución conforme se acercan a los horizontes tipo C.

En PS1, de 2AB a 2C, la fracción arcilla va de 45.30% a 23.83%; el limo es de 39.57% – 22.27% y; la arena de 15.13% – 53.90%. El PS2, de 3AC a 3C, tiene los porcentajes: arcilla 43.99% – 4.66%; limo 31.02% – 3.85%; arena 24.99% – 91.48%. Del horizonte 4Bg a 4C del PS3 las proporciones son: arcilla 30.18% – 19.27%; limo 29.86% – 22.61%; arena 39.96% – 58.11%. El Paleosuelo 4, con 5Ag y 5C, los datos arrojan: arcilla 59.24% – 7.35%; limo 28.25% – 61.56%; arena 12.50% – 31.09%. El Paleosuelo 5, derivado de una turba edafizada, tiene la particularidad de que los horizontes orgánicos (6A, 6Ag, 6ACo y 6Ag<sub>2</sub>) son los que más acumulan arcilla; en tanto que, en 6BCg la fracción arena domina con un 68.53%. En el paleosuelo en la base del perfil (PS6), 7AC y 7C las fracciones tienden a ser proporcionales; si embargo, en el horizonte intermedio (7BC) la arena aumenta hasta un 56.99%, esto puede deberse a la dinámica fluvial (estabilidad–inestabilidad) en el momento de pedogénesis.

#### **4.2.3.2. Susceptibilidad magnética**

Las muestras de susceptibilidad magnética fueron medidas en baja frecuencia ( $\chi^l$ ) y se presentan en las unidades  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$  del Sistema Internacional (SI).

El suelo moderno muestra un comportamiento como sigue: horizonte A tiene el mayor valor (1.212  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$ ); luego, en el siguiente (AC) baja a 0.654  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$  para después, volver a incrementar a 1.172  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$  en C. El Paleosuelo 1 pasa del horizonte orgánico (2AB) con 0.068  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$  al mineral (2C) con 0.409  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$ . En PS 2, se registra la mayor susceptibilidad

magnética de todo el perfil en su horizonte 3C con un dato de  $1.798 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  pasando paulatinamente desde 3AC cuyo valor es  $0.109 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ . El gleyco 4Bg ( $0.218 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ ) se ve superado someramente por 4C ( $0.354 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ ). En los paleosuelos 5 y 6 las señales son muy bajas (desde  $0.0136 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  a  $0.095 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ ) y solamente se ven incrementadas a partir de 6Ag<sub>2</sub> y 6BCg (con 0.259 y 0.558, respectivamente). El último paleosuelo (PS 6) empieza con  $0.327 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  en 7AC, pasando por  $0.763 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  (7BC) y, volviendo a bajar en 7C con  $0.490 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ , quizá debido a que es un suelo poco desarrollado y a que el horizonte intermedio (7BC) presenta el bandeado acumulado de FeO (FIGURAS 30 y 50b); a pesar de esto, la señal es muy baja, similar a la del resto de los horizontes.

#### 4.2.4. PROPIEDADES QUÍMICAS

##### 4.2.4.1. Carbono Orgánico Total (COT)

Desde el suelo moderno hasta el Paleosuelo 4 (PS 4) los valores de carbono orgánico siguen el patrón normal de concentrarse en

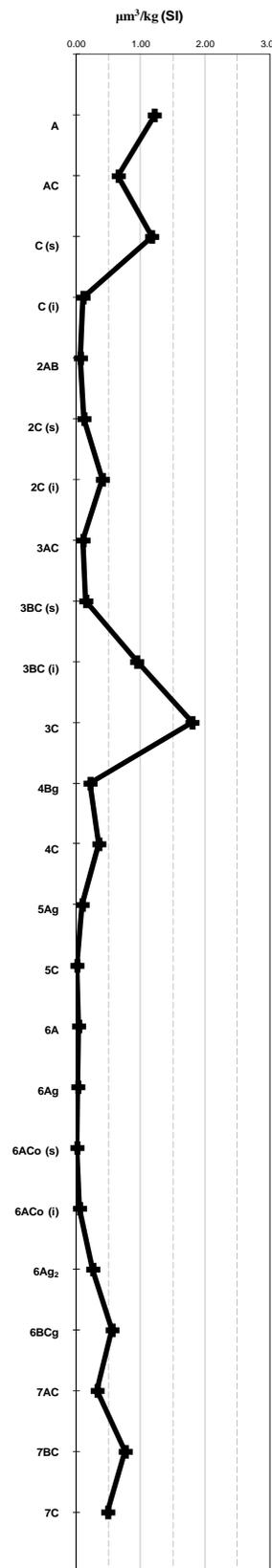
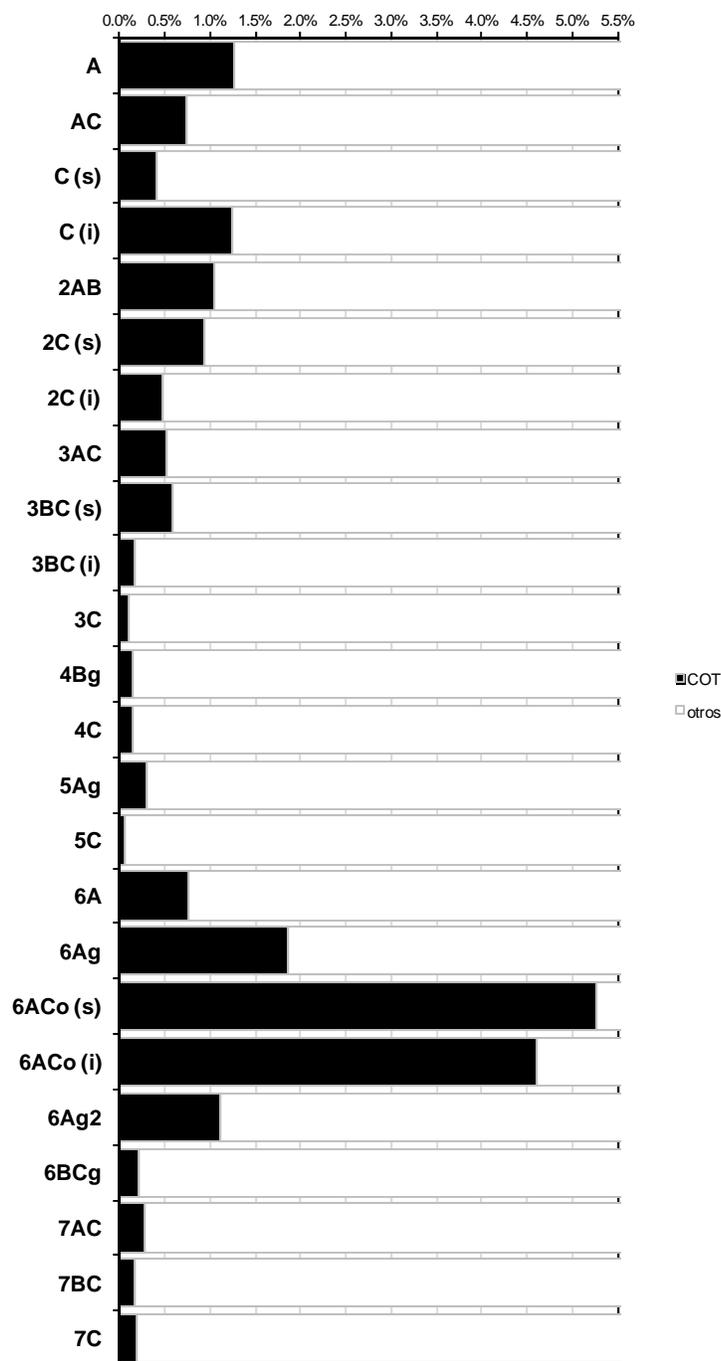


FIGURA 30. Huexoyucan. Susceptibilidad magnética.

C.S. Berkovich

los horizontes orgánicos disminuyendo en los tipos C de cualquier forma, los datos no van más allá de 1.275% (horizonte A). Sin embargo, en PS 5 las concentraciones se disparan hasta alcanzar 5.272% (en 6ACo) por tratarse de una turba y ser, precisamente, este horizonte donde

se acumula la materia orgánica no humificada. El Paleosuelo 6 (PS 6) contiene poco carbono orgánico por ser horizontes, de alguna u otra forma, tipos C y cuya mayor cantidad es de 0.288% en 7AC (FIGURAS 31 y 51b).



**FIGURA 31.** Huexoyucan. Carbono Orgánico Total (COT).

#### 4.2.4.2. Isótopos Estables de Carbono

##### Valores $\delta^{13}C$ de la sección paleopedológica (FIGURA 15)

En Huexoyucan, las firmas con los valores menores corresponden a la turba (PS 5, Fluvisol hístico) en el horizonte 6ACo con  $-26.82\text{‰}$  y  $-26.52\text{‰}$ , que se formó durante la *EIOM 3*; este paleosuelo es uno de los más antiguos con un fechamiento de  $46,320 \pm 870$  aAP (Beta250975). El Paleosuelo 4 (Luvisol estágnico) y 3 (Gleysol) formados durante la *EIOM 2* con un fechamiento que corresponde al de San Pablo de  $24,070 \pm 350$  aAP (Beta210760), muestra un incremento con respecto al paleosuelo anterior al oscilar de  $-18.77\text{‰}$ . a  $-20.05\text{‰}$ , respectivamente. PS2 y PS1 (fluvisoles) asociados al Holoceno Temprano (*EIOM 1*, horizonte 3AC fechado en  $9,260 \pm 50$  aAP, Beta 250974) muestran valores de  $\delta^{13}C$  que fluctúan entre  $-18.79\text{‰}$  y  $-20.89\text{‰}$ . En el suelo moderno (Phaeozem háplico) se muestra un incremento en los valores hasta  $-17.97 \text{‰}$ .

#### 4.2.5. CONTENIDO PALEOMICROBOTÁNICO

##### 4.2.5.1. Fitolitos (FIGURAS 32, 33 y 52c-d)

El conteo de fitolitos se realizó con la finalidad de establecer, por un lado, las diferencias cuantitativas y; por el otro, las cualitativas (aunque limitadas a pastos y piramidales) entre horizontes que ayuden a establecer los cambios desde la superficie expuesta a una determinada vegetación. Su proporción es relativa y está en función del total de minerales que se observaron en las preparaciones.

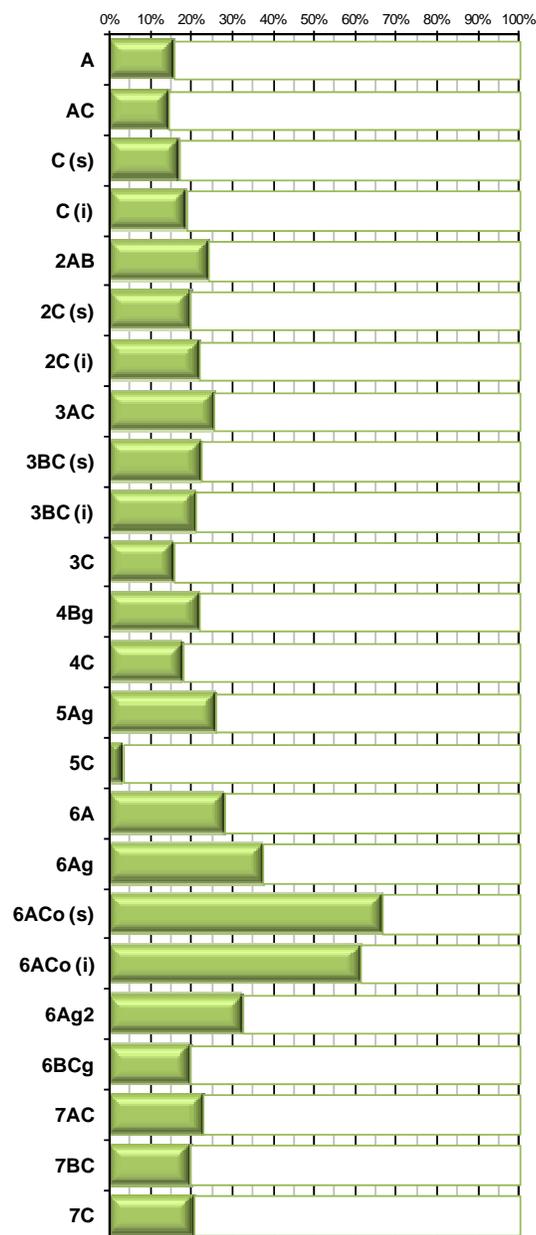


FIGURA 32. *Huexoyucan*. Porcentaje de fitolitos.

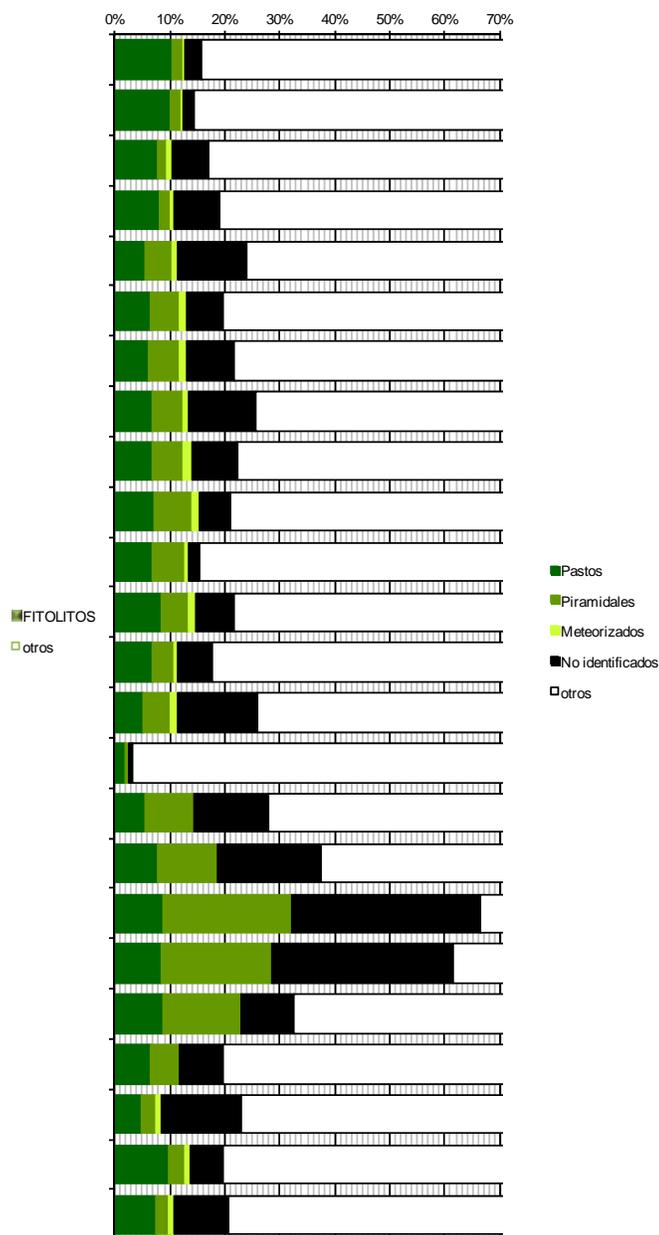


FIGURA 33. *Huexoyucan*. Porcentaje de fitolitos por tipos.

En el perfil Huexoyucan la variación en los porcentajes es de la siguiente manera. El suelo moderno va de 15.860% en A (10.573% de pastos, 1.922% piramidales y el resto meteorizados y no identificados) a 18.910% en C inferior (donde 8.268% son pastos, 1.975%

son piramidales y el resto entre meteorizados y no identificados). El PS1 tiene el 23.910% en 2AB (5.435% pastos, 4.909% piramidales y lo demás están alterados) bajando la concentración a 21.810% en C inferior (6.237% pastos, 5.444% piramidales). El Paleosuelo 2 concentra el 25.651% en 3AC (de los cuales el 6.722% son pastos y el 5.793% son piramidales) y bajando paulatinamente hasta el 15.500% en 3C (6.888% pastos, 5.729% piramidales). En PS3 se encuentra el 21.757% en 4Bg (donde el 8.355% son de pastos, el 5.106% son piramidales) y el 17.767% en 4C (6.888% pastos, 4.045% piramidales). El Paleosuelo 4 tiene 25.910% en el horizonte 5Ag (5.277% pastos, 4.749% piramidales) y 3.370% en 5C (1.854% de pastos, 0.674% piramidales) siendo este horizonte el que menos fitolitos tiene de toda la secuencia. Por otra parte, el PS5 es el que contiene el mayor porcentaje de fitolitos en toda la secuencia, concentrándose más en la parte superior de 6ACo con un 66.519% donde 8.781% son pastos; 23.378% piramidales y; el 34.360% no fueron identificados. En el último paleosuelo (PS6) el porcentaje es de 22.860% en 7AC (4.868% pastos, 2.659% piramidales) disminuyendo insignificamente (19.740%) en 7BC y; aumentando a 20.632% en 7C (7.439% pastos, 2.333% piramidales y; lo restante, entre meteorizados y no identificados).

#### **4.2.5.2. Polen (FIGURA 34)**

En el perfil Huexoyucan también se llevó a cabo un análisis de concentración de palinomorfos, pero únicamente en los horizontes 6Ag y 6ACo (superior e inferior), formados durante la *EIOM 3*, pues es en esta porción en donde se presentaron dichos elementos.

La distribución de las especies arbóreas en 6Ag, 6ACo (s) y 6ACo (i) es, respectivamente:

C.S. Berkovich

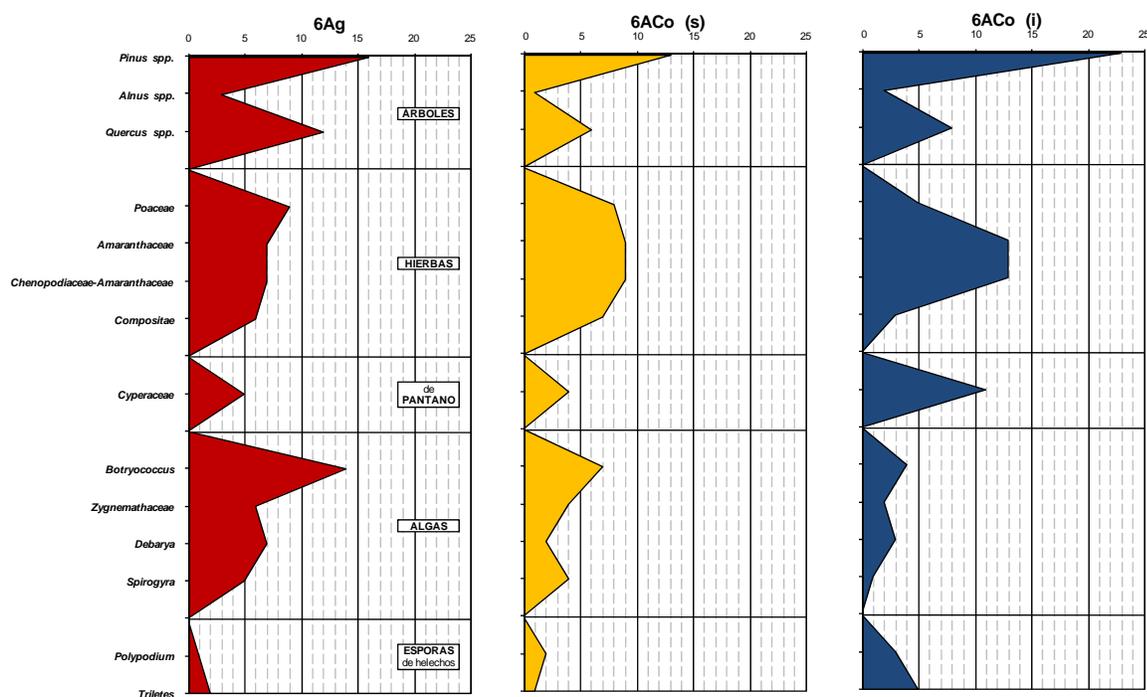
*Alnus spp.* 3, 1 y 2; *Pinus spp.* 16, 13 y 23 y; *Quercus spp.* 12, 6 y 8.

La distribución de las herbáceas en 6Ag, 6ACo (s) y 6ACo (i) es, respectivamente: *Amaranthaceae* 7, 9 y 13; *Chenopodiaceae-Amaranthaceae* 7, 9 y 13; *Compositae* 6, 7 y 3 y; *Poaceae* 9, 8 y 5.

La distribución de las especies de pantano en 6Ag, 6ACo (s) y 6ACo (i) es: *Cyperaceae* 5, 4 y 11, respectivamente.

La distribución de algas en 6Ag, 6ACo (s) y 6ACo (i) es, respectivamente: *Botryococcus* 14, 7 y 4; *Debarya* 7, 2 y 3; *Spirogyra* 5, 4 y 1 y; *Zygnemathaceae* 6, 4 y 2.

La distribución de las especies de esporas de helechos en 6Ag, 6ACo (s) y 6ACo (i) es, respectivamente: *Polypodium* 1, 2 y 3 y; *Triletes* 2, 1 y 5.



**FIGURA 34.** *Huexoyucan*. Plantas identificadas por medio de polen y sus concentraciones en los horizontes más orgánicos: 6Ag y 6ACo (superior e inferior).

4.2.5.3. Diatomeas (FIGURAS 35, 36 y 53b)

El estudio se concentró en los paleosuelos donde hubo presencia de diatomeas (PS2, PS3, PS5 Y PS6) y más específicamente en donde hubo mayor concentración, es decir, en el horizonte 6ACo; tomándose como referencia el 6Ag.

Las cuatro especies encontradas más representativas en los horizontes 6Ag y 6ACo (superior y inferior) son *Pinnularia spp.* (características de aguas profundas en turberas), *Aulacoseira spp.* (características en aguas dulces, neutras o muy poco ácidas), *Eunotia spp.* (de pantanos ácidos) y *Epithemia spp.* (de pantanos alcalinos poco profundos); asimismo se observó la presencia dominante de

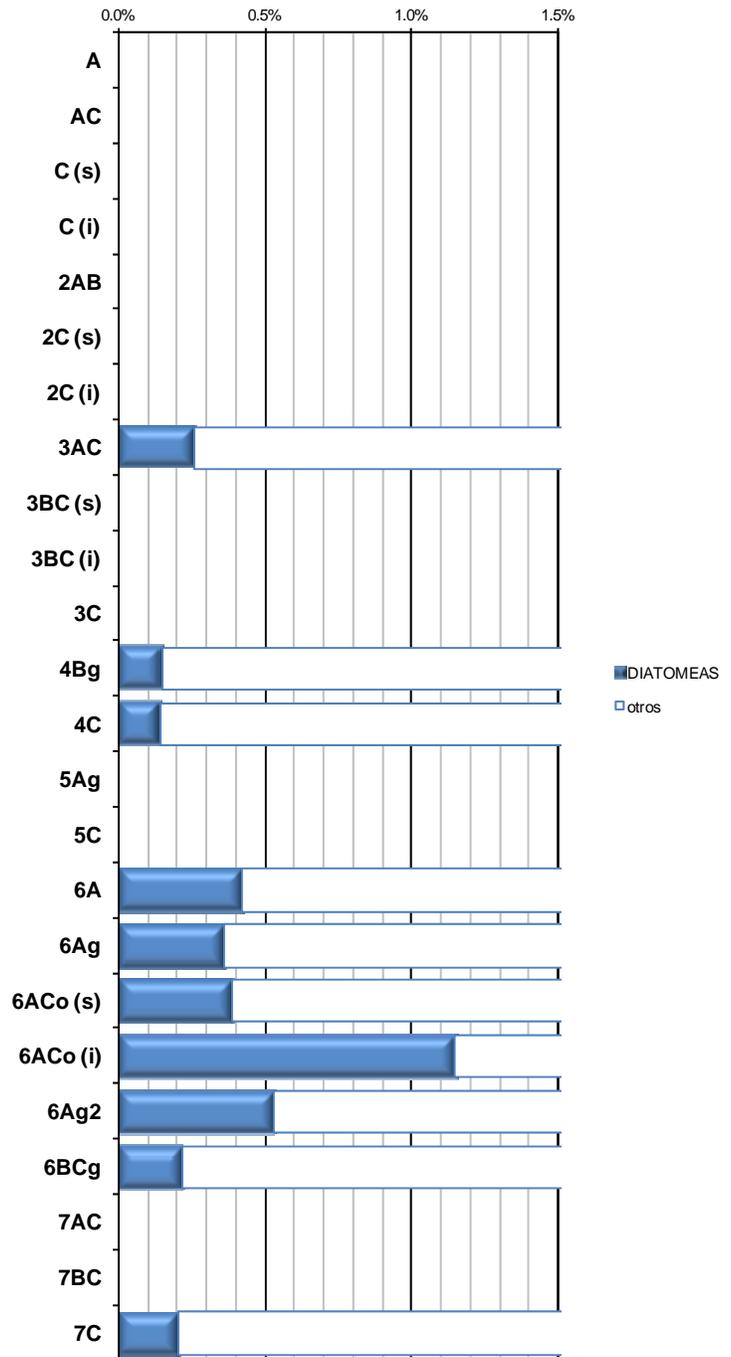
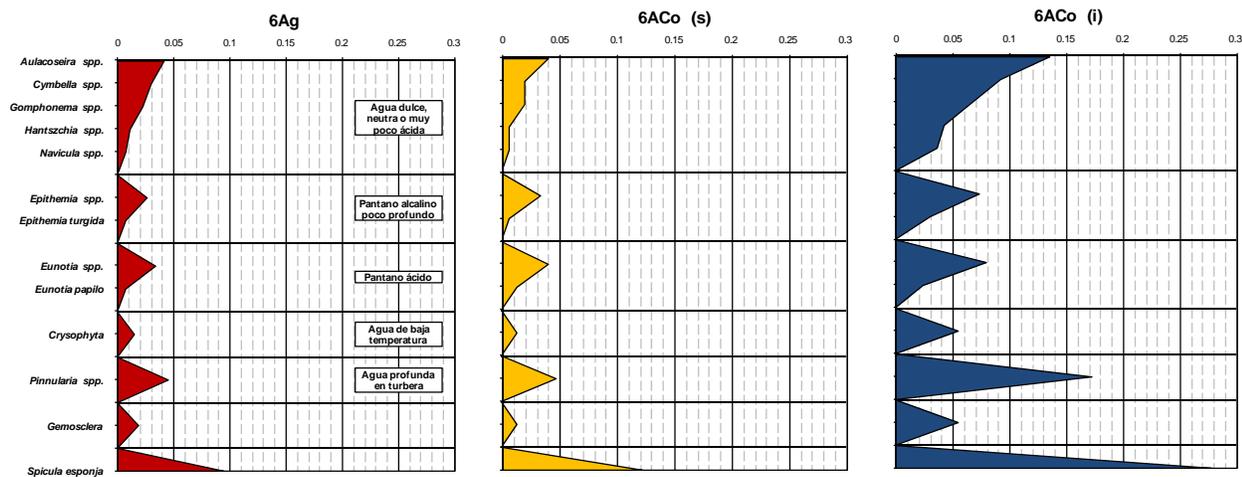


FIGURA 35. Huexoyucan. Porcentaje de diatomeas.

C.S. Berkovich

espículas de esponja. Sin embargo, la concentración de especies varía dependiendo del tipo de horizonte y la profundidad del mismo.

Además, los restos de las algas *Crysophyta* en los sedimentos lacustres constituyen un indicador apropiado de condiciones paleoambientales, se observan en cuerpos de agua someros, fríos (5-12°C) de reducida mineralización, estado oligo-mesotrófico. Las especies *Pinnularia*, *Eunotia* y *Aulacoseira* son de ambientes que pueden tolerar la desecación, con conductividad eléctrica baja, su presencia sugiere vegetación abundante y comunidades de agua dulce como las espículas de esponja. Su asociación indica una planicie de inundación de un cuerpo de agua somero con fluctuaciones importantes. Las espículas de esponja y las *Crysophytas* tienen preferencia por ambientes ácidos.



**FIGURA 36.** Huexoyucan. Porcentajes de especies de diatomeas identificadas en los horizontes más orgánicos: 6Ag y 6ACo superior e inferior.

### 4.3. PERFIL RÍO SAN PABLO

#### 4.3.1. RASGOS MORFOLÓGICOS

*Descripción morfológica en campo* (FIGURAS 37 y 48. 3a-3e)

El perfil Río San Pablo se localiza en las coordenadas geográficas 19° 42' 30.3" N - 98° 49' 16.4" W (UTM: 2 179 094 mN - 518 734 mE), a una altitud sobre el nivel del mar de 2 301 metros. En este perfil se describieron y analizaron sólo tres de las cuatro unidades paleoedáficas puesto que SP1 (suelo moderno y Paleosuelos 1-4) ya fue estudiada por Rivera (Rivera *et al.*, 2007; Rivera, 2009). La clasificación y descripción detallada se muestra en las FIGURAS 38 y 39.

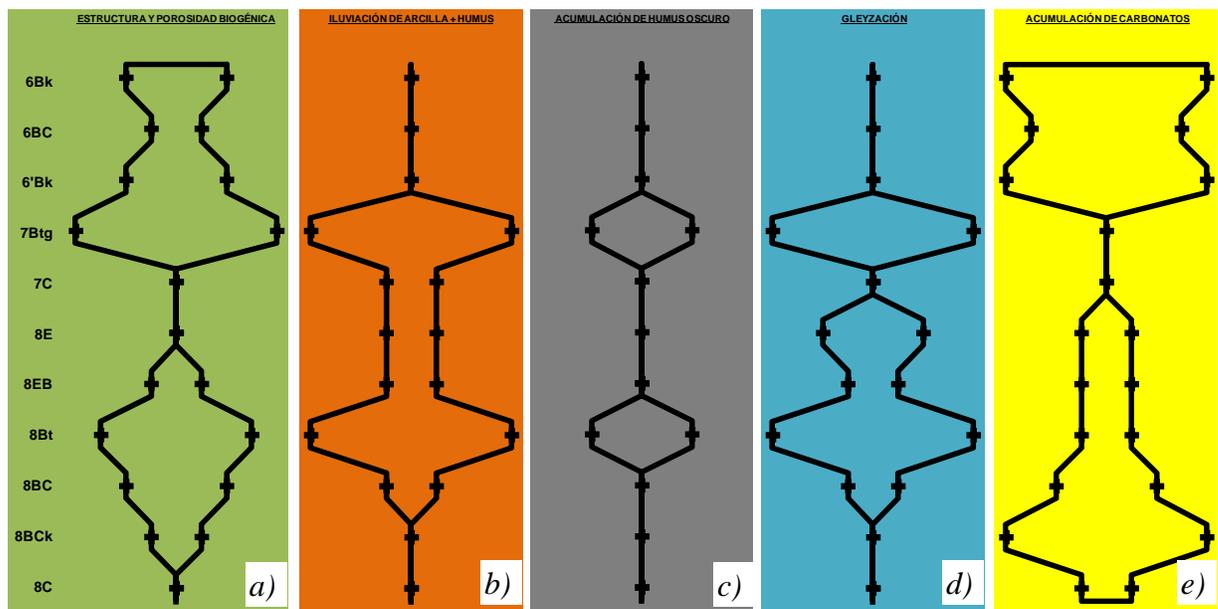
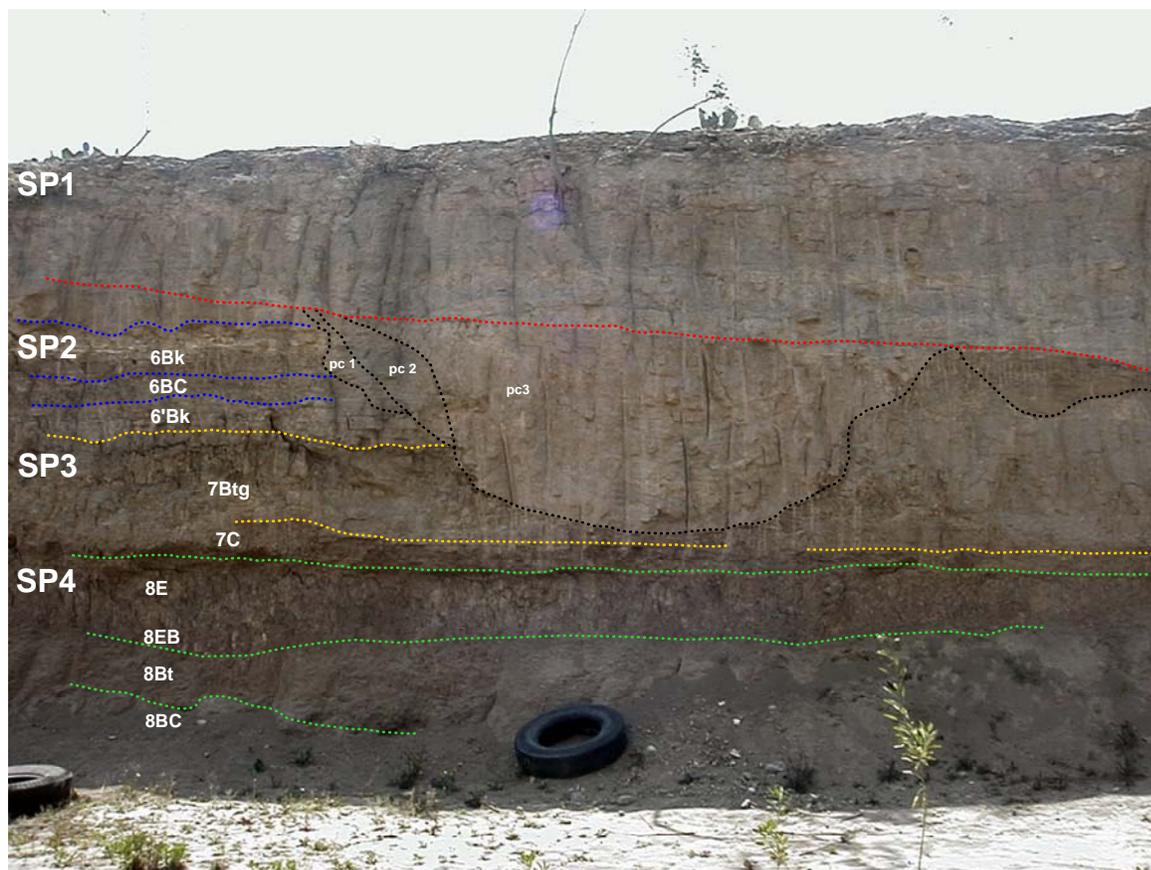


FIGURA 37. Procesos pedogenéticos que caracterizan la morfología del perfil *Río San Pablo*. a) Estructura y porosidad biogénica; b) Iluviación de arcilla y humus; c) Acumulación de humus oscuro; d) Gleyzación y; e) Acumulación de carbonatos.



**FIGURA 38.** Sección edáfica *Río San Pablo*.

En la sección San Pablo se diferencian el suelo moderno y cuatro unidades pedostratigráficas (SP1-SP4, desde la unidad más joven a las más antigua). Estas unidades están separadas por paleocanales rellenos con sedimento aluvial que muestran fuertes límites de erosión (FIGURA 38).

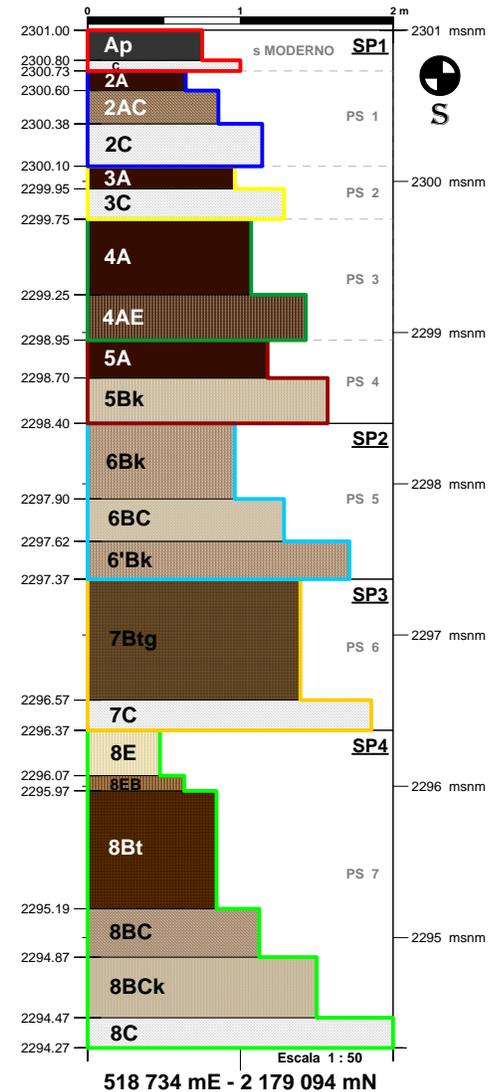
El Paleosuelo 7 (unidad SP4) es el más antiguo y es el más intensamente desarrollado. Tiene una configuración 8E/8EB/8Bt/8BCK/8C (FIGURA 39). El horizonte 8E es limoso y muestra pequeñas manchas de Mn. 8Bt es arcilloso con estructura prismática que fácilmente se rompe en bloques subangulares, tiene recubrimientos limosos verticalmente distribuidos a lo largo de

4.3. PERFIL RÍO SAN PABLO

4.3.1. Rasgos morfológicos

Descripción morfológica en campo

**FIGURA 39.** Modelo gráfico representativo de la pedostratigrafía del perfil *Río San Pablo* donde se muestra la distribución de las unidades (SP) y los paleosuelos (PS) que lo constituyen.



biocanales y se presentan moteados de Mn. Los cutanes de arcilla son comunes, así como las facetas de fricción también muestran estos recubrimientos. El horizonte 8C es más arenoso, laminado y contiene fragmentos de roca. En la base de este suelo se observan concreciones y rellenos de carbonatos. SP4 es clasificado como un *Albeluvisol* *vértico* que descansa sobre un coluvión.

La unidad SP3 contiene el paleosuelo (PS6), al parecer, menos desarrollado con una secuencia 7Btg/7C (FIGURA 39). Sin embargo, estos dos horizontes corresponden a la parte basal de un suelo más desarrollado cuyo o cuyos horizontes superiores se erosionaron. Este suelo se caracteriza por abundantes krotovinas rellenas con un material más oscuro, granulado y friable (probablemente originados en los horizontes hipotéticos 7A o 7AB). La estructura de 7Btg es

**C.S. Berkovich**

---

prismática con cutanes de arcilla y abundantes características reductomórficas, conformando un paleosuelo clasificado como *Luvisol estágnico*. El contacto entre el SP3 y SP4 es abrupto evidenciando un evento erosivo.

La unidad SP2 está formada por el Paleosuelo 5 (PS5). Se trata de un suelo calcáreo, formado por un pedocomplejo con una configuración de horizontes 6Bk/6BC/6'Bk (FIGURA 39). En el horizonte 6Bk se observan rellenos de carbonatos con una orientación tanto vertical y horizontal. El 6'Bk hacia el este se une con un depósito del canal donde pueden reconocerse características gléycas. En el lado oeste de la sección, el contacto entre SP2 y SP3 es abrupto; mientras que, por el lado oriental, el límite es más gradual. SP2 está cortada por varios depósitos de canal [paleocanal 1 (pc1), paleocanal 2 (pc2) y paleocanal 3 (pc3); este último penetra hasta 7Btg en SP3 (FIGURA 38)] con una orientación aproximada NW-SE y perpendicular a la actual dirección del arroyo. El Paleosuelo 5 (PS5) fue clasificado como un *Calcisol*. Además, los carbonatos en el horizonte 6'Bk proporcionaron una edad radiocarbónica de  $24,070 \pm 350$  aAP (Beta 210761), lo cual indica que este suelo se formó durante la *EIOM 2*. En consecuencia, las unidades SP3 y SP4 se pudieron haber formado antes, es decir, durante la *EIOM 3*.

#### **4.3.2. CARACTERÍSTICAS MICROMORFOLÓGICAS**

Las observaciones en las secciones delgadas mostraron que todos los materiales que forman el suelo se derivan de una tefra. Las fracciones secundarias consisten en minerales volcánicos típicos, incluyendo el vidrio volcánico, plagioclasas, piroxenos, anfíboles pero en

proporciones variables. El grado de meteorización de los minerales es bajo a lo largo de la secuencia, incluso, componentes tan inestables como el vidrio volcánico están presentes en todos los paleosuelos.

El Paleosuelo7 (PS7) en SP4 reveló un arreglo heterogéneo en la masa basal del horizonte 8E: áreas enriquecidas con arena blanqueada y limo grueso que impregnan a los sedimentos limo-arcillosos. Son comunes los moteados pardos y las películas, así como recubrimientos limosos en los poros más grandes (FIGURA 40a). El horizonte 8Bt está dominado por una matriz de limo fino y arcilla; a pesar de que en campo se identificó como arcilla iluvial en los agregados, los revestimientos de arcilla aparecen sólo en unos pocos canales más grandes, límpidos, con una alta birrefringencia, pero delgada y por lo general no laminados (FIGURA 40b). La estructura muestra una disposición compacta, una red de fisuras (a menudo curvadas) forman agregados en bloques angulares (FIGURA 40c) con bandas delgadas de arcilla orientada en sus caras (cutanes de estrés) (FIGURA 40d). Las concreciones y rellenos de carbonatos que se encontraron en SP4 específicamente en el horizonte 8Bck muestra que tanto los rellenos de calcitas como los de carbonatos neoformados (en su mayoría de micrita con finas bandas esféricas) llenan completamente el espacio entre cada microestructura. Estas capas de arcilla iluviada también han reincorporado fragmentos de otros cutanes (FIGURA 40d y e) lo cual muestra que la formación de carbonatos fue como sigue: primero, se presenta la iluviación de arcilla, después los carbonatos se precipitaron sobre ésta y, luego, en cierta forma, destruyeron y sustituyeron la arcilla iluviada.

Las secciones delgadas de los horizontes 7Btg y 7C de la unidad de SP3 muestran una

---

**C.S. Berkovich**

---

abundancia y desarrollo máximo de edaforrasgos de iluviación de arcilla. Los cutanes son gruesos, laminados, con alta birrefringencia y, en ocasiones, asociadas con finas películas oscuras ferrígenas (FIGURA 40f).

La unidad SP2 se caracteriza por un cambio significativo en la mineralogía de la fracción gruesa. Contrario a lo que sucedía en los paleosuelos subyacentes, dominados por minerales cristalinos, en todos los horizontes de SP2 son abundantes los fragmentos de vidrio volcánico. Los horizontes Bk de PS5 muestran una impregnación desigual con calcita secundaria en la masa basal, sobre todo micríticas (FIGURA 40h) con unos pocos cristales grandes alargados en los poros. Sin embargo, en las áreas libres de carbonatos es frecuente encontrar moteados de FeO y capas de arcilla deformada. También, es importante notar que los edaforrasgos reductomórficos y de iluviación de arcilla son más abundantes (FIGURA 40k) entre estos horizontes cálcicos (6Bk y 6'Bk).

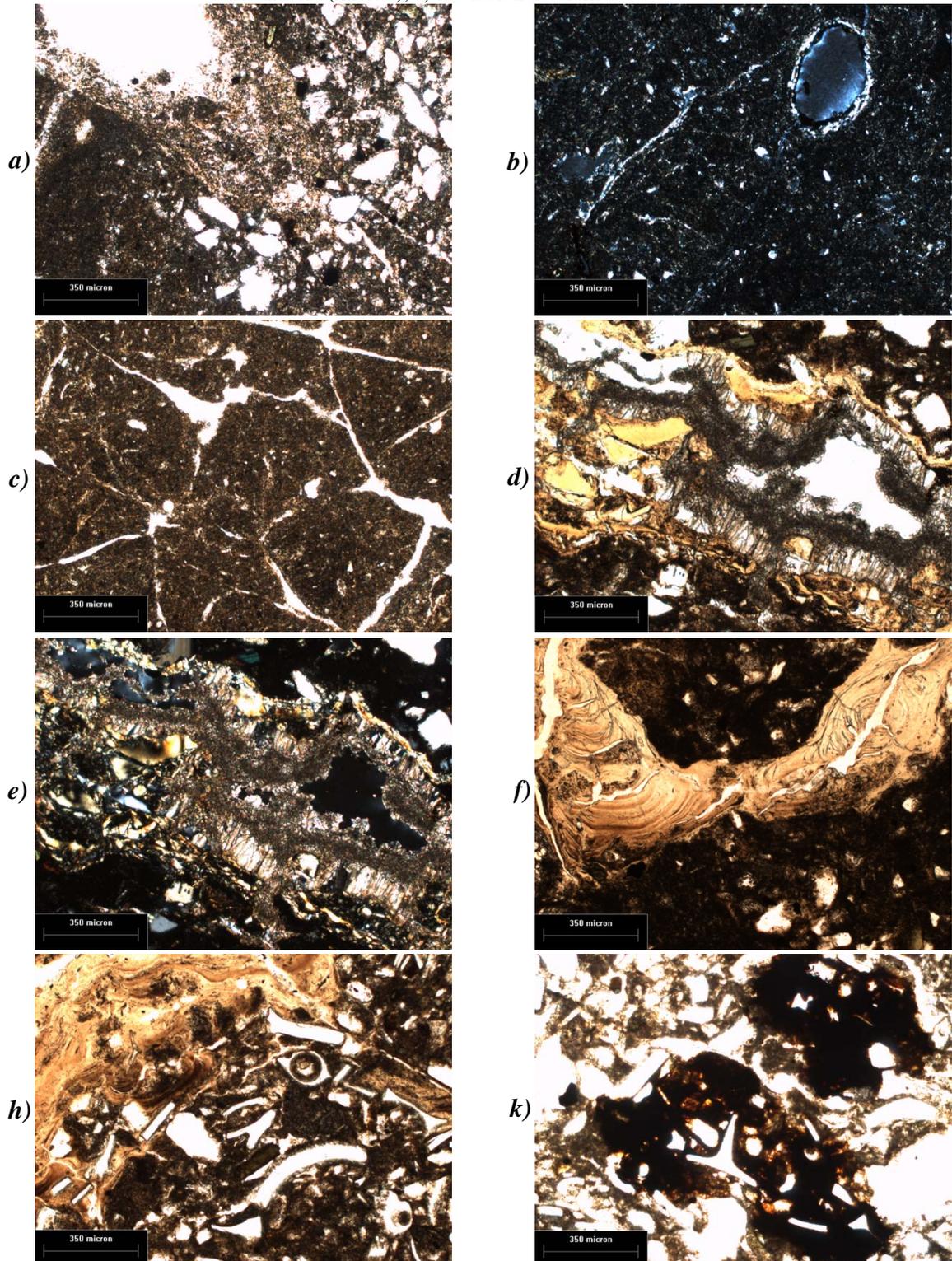
### **4.3.3. PROPIEDADES FÍSICAS**

#### **4.3.3.1. Granulometría (FIGURAS 41 y 49c)**

El perfil San Pablo muestra una variabilidad típica en los porcentajes de cada una de las fracciones que corresponde al tipo de paleosuelo y de los horizontes que lo componen donde, en general, se ve una clara dominancia del grano tamaño limo (FIGURAS 41 y 49c).

En SP2 (Paleosuelo 5), el horizonte 6Bk es el único en el cual la fracción arena es la predominante con 58.9%, disminuyendo en 6BC a 35.3% para volver a aumentar en 6'Bk a

FIGURA 40. *San Pablo*. Micromorfología. SP4: a) recubrimientos limosos de bioporos, b) Horizonte 8Bt, birrefringencia de cutanes, c) microestructura d) cutanes de estrés y carbonatos neoformados, e) Birrefringencia. SP3: f) iluviación de arcilla. SP2: h) Calcita secundaria (micrita), k) iluviación de arcilla.



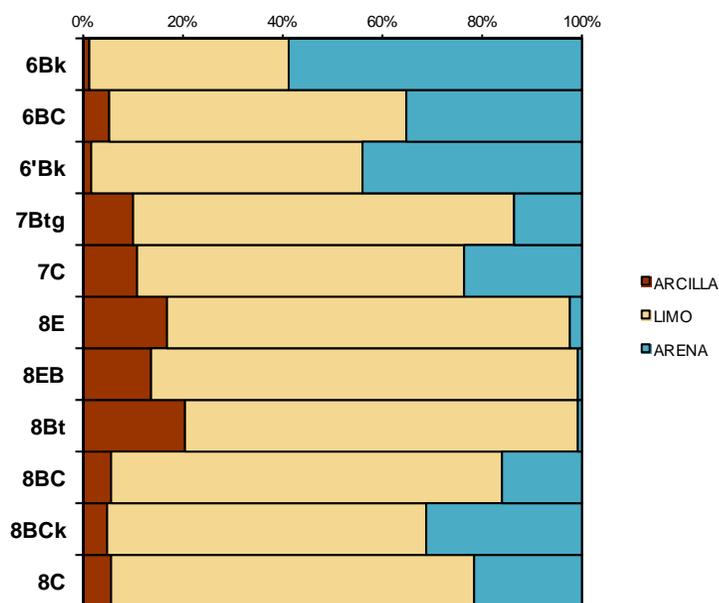
C.S. Berkovich

---

43.9%; en el horizonte intermedio anterior es donde se encuentra la mayor cantidad de arcilla, apenas rebasando el 5%.

En el Paleosuelo 6 (unidad SP3) por su tipo, *Luvisol estagnico*, aumenta la cantidad de arcilla a casi el 11% en los dos horizontes que lo conforman, pero la dominancia de la fracción limo es clara (76.2% en 7Btg y 65.4% en 7C).

En el siguiente paleosuelo (PS7 de la unidad SP4), la fracción arcilla aumenta a su máximo en toda la secuencia estudiada: 20.4% en 8Bt; el horizonte 8EB muestra la mayor acumulación de limo con un 85.4%. A partir de 8BC y hasta la base del perfil, la arcilla disminuye al mínimo de 4.7% en 8BCk; mientras que la arena aumenta a 15.8% en 8BC, a 31.3% en 8BCk y a 21.7% en 8C.



**FIGURA 41.** San Pablo. Granulometría.

4.3.3.2. Susceptibilidad magnética (FIGURAS 42 y 50c)

Las muestras de susceptibilidad magnética fueron medidas en baja frecuencia ( $\chi^l$ ) y se presentan en las unidades  $\mu\text{m}^3/\text{kg}$  del Sistema Internacional (SI).

En general, la parte analizada de este perfil de suelo revela la mayor señal (casi  $2.5 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ ) de las tres secciones estudiadas. Esto puede ser explicado, por un lado, en términos del origen, composición y tipo de depósito del material parental, es decir, se trata de unidades volcánicas con minerales relativamente “frescos” redepositadas por dinámicas fluviales y; por el otro, mediante los procesos pedogenéticos que modificaron dichos componentes.

La distribución de la señal magnética en el Paleosuelo 5 de la unidad SP2 sigue un patrón estandarizado donde el horizonte 6BC posee el valor más alto con  $2.493 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ , mientras que

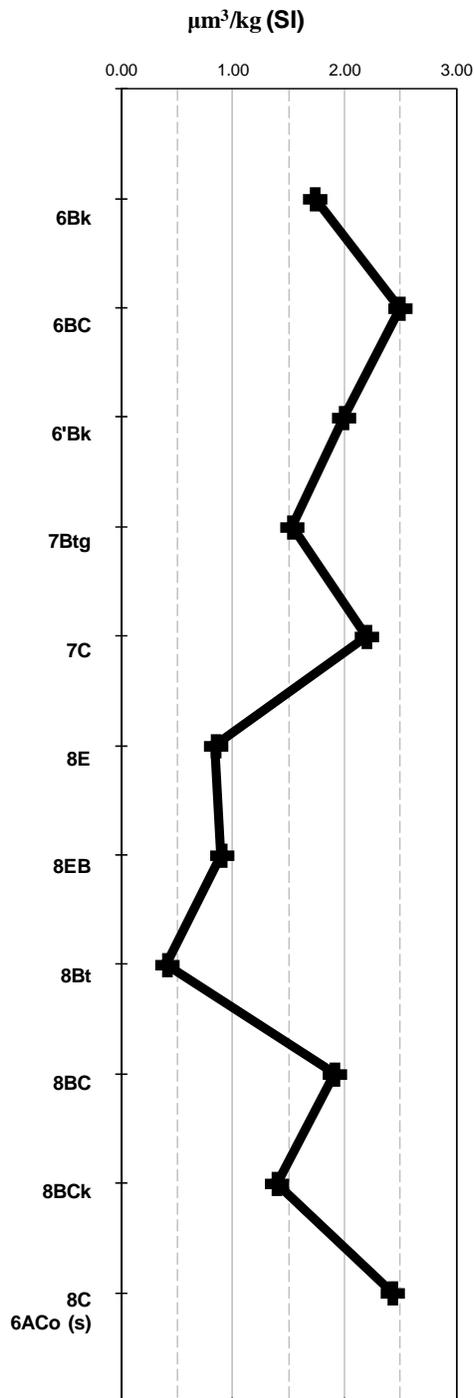


FIGURA 42. San Pablo. Susceptibilidad magnética.

**C.S. Berkovich**

---

los tipos Bk son menores ( $1.730 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  y  $1.989 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ ). En SP3 (PS6) se suscita el mismo fenómeno pues la señal en 7BC es  $2.193 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  y en 7Btg es de  $1.526 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ . La base del perfil, SP4 (PS7), no es la excepción pues sigue el modelo de un suelo tipo *Albeluvisol vértico* donde 8BC y 8C poseen los valores más altos con  $1.907 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  y  $2.425 \mu\text{m}^3/\text{kg}$ , respectivamente; en tanto que los horizontes de eluviación e iluviación presentan las señales mínimas, incluso de todo el perfil, con  $0.845 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  en 8E,  $0.899 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  en 8EB y  $0.409 \mu\text{m}^3/\text{kg}$  en 8Bt.

#### **4.3.4. PROPIEDADES QUÍMICAS**

##### **4.3.4.1. Carbono Orgánico Total (COT) (FIGURAS 43 y 51c)**

A primera vista, lo que resalta es que en los horizontes cálcicos de cada paleosuelo (por separado) hubo mayor acumulación de carbono de origen orgánico, lo cual puede indicar que para que se neoformaran carbonatos la fuente pudo haber sido la materia orgánica integrada con anterioridad en tales horizontes justificando un residuo aún considerable.

Los valores de carbono orgánico en el Paleosuelo 5 (SP2) son 0.300% en 6Bk, 0.200% en 6BC y, nuevamente 0.300% en 6'Bk. En SP3 (Paleosuelo 6) existe un pequeño incremento en 7Btg alcanzando 0.400%. El Paleosuelo 7 (en SP4) concentra el 0.800% en 8E, 8BCk y 8C, en tanto que en los horizontes intermedios 8EB, 8Bt y 8BC cada uno tiene 0.600% (FIGURAS 43 y 51c).

4.3. PERFIL RÍO SAN PABLO

4.3.4. Propiedades químicas

4.3.4.1. Carbono Orgánico Total (COT) - 4.3.4.2. Isótopos Estables de Carbono ( $\delta^{13}C$ )

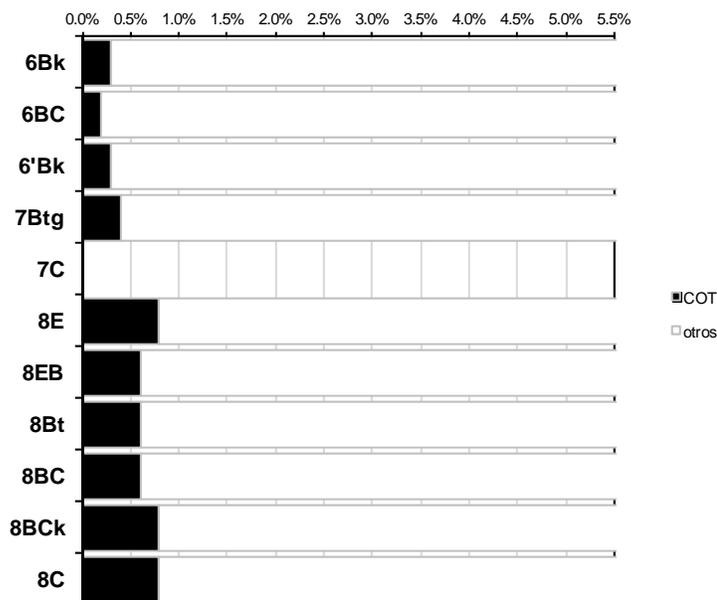


FIGURA 43. San Pablo. Carbono Orgánico Total (COT).

4.3.4.2. Isótopos Estables de Carbono

Valores  $\delta^{13}C$  de la sección paleopedológica (FIGURA 15)

En San Pablo, la firma isotópica se tomó en el horizonte 6'Bk (Paleosuelo 5 de la unidad SP2) la cual tiene un valor de -5.300‰, reportando la firma con el máximo dato de los tres perfiles estudiados.

4.3.5. CONTENIDO PALEOMICROBOTÁNICO

4.3.5.1. Fitolitos (FIGURAS 44, 45 y 52e-f)

El conteo de fitolitos se realizó con la finalidad de establecer por un lado diferencias cuantitativas y; por el otro, las cualitativas (aunque limitadas a pastos y piramidales) entre horizontes que ayuden a establecer los cambios desde la superficie expuesta a una determinada vegetación.

C.S. Berkovich

En el perfil San Pablo la variación en los porcentajes es de la siguiente manera. El Paleosuelo 5 (unidad SP2) acumuló el 13.538% en 6Bk (8.964% de pastos, 1.195% piramidales y el resto entre meteorizados y no identificados), 36.450% en 6BC (donde 13.930% son pastos, 2.786% son piramidales) y el 25.585% en 6'Bk (14.044% de pastos, 0.996% de piramidales). La unidad SP3 (PS6) tiene el 26.492% en 7Btg (13.279% pastos, 2.378% piramidales) subiendo la concentración a 28.431% en 7C (15.400% pastos, 2.900% piramidales). El Paleosuelo 7 (unidad SP4) concentra el 33.036% en 8E (de los cuales el 19.000% son pastos, el 1.900% son piramidales y el restante es entre meteorizados y no identificados), el 30.702% en 8EB (15.200% pastos, 2.500% piramidales), el 23.762% en 8Bt (donde el 10.500% son de pastos, el 1.800% son piramidales), el 25.766% en 8BC (13.874% pastos, 2.676% piramidales), el 30.944% en el horizonte 8BCK (19.422% pastos, 0.996% piramidales) y el 38.154% en 8C (18.334% de pastos, 1.487% piramidales). Resumiendo, los horizontes tipo C de cada paleosuelo acumulan la mayor cantidad de fitolitos.

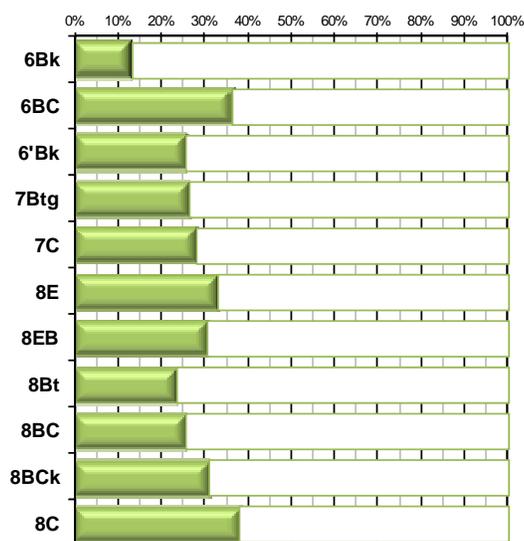


FIGURA 44. San Pablo. Porcentaje de fitolitos.

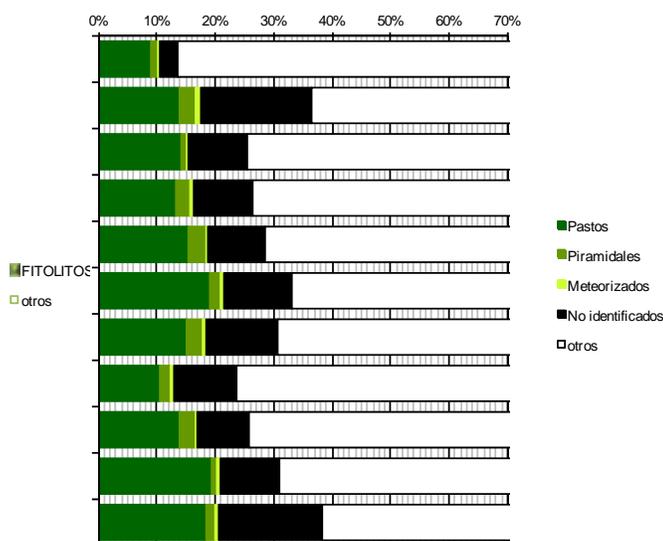


FIGURA 45. San Pablo. Porcentaje de fitolitos por tipos.

#### 4.3.5.2. Diatomeas (FIGURAS 46 y 53c)

El estudio se basó solamente en detectar la presencia-ausencia de diatomeas y en el conteo de su concentración en los paleosuelos de este perfil.

En SP2 el horizonte 6BC acumuló la mayor cantidad con un 0.183%, le sigue 6'Bk con 0.103% y el 0.054% en 6Bk. En el Paleosuelo 6 (unidad SP3) sólo se detectó presencia en 7Btg con el 0.241%. La unidad SP4 (PS7) tiene el 0.347% en 8C reportando el mayor porcentaje de todo el perfil, el 0.234% en 8BC y disminuyendo a 0.124% en 8Bck.

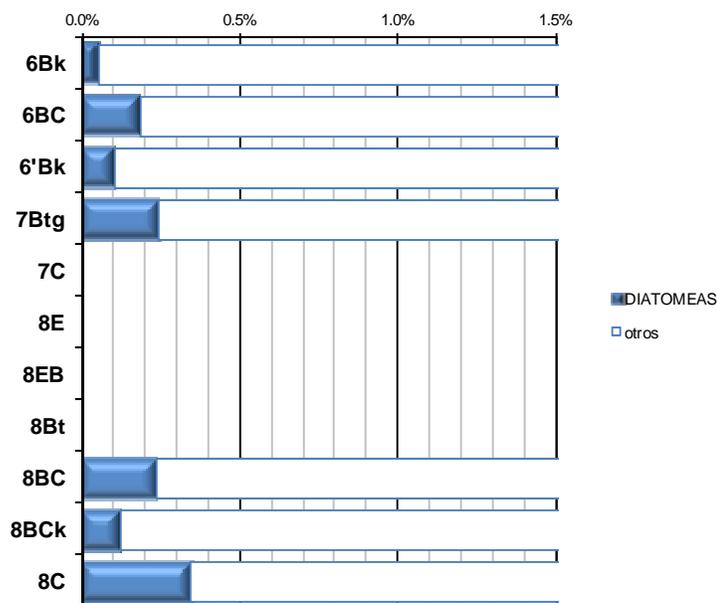


FIGURA 46. San Pablo. Porcentaje de diatomeas.

## 4.4. FECHAMIENTOS Y CORRELACIÓN EDAFOESTRATIGRÁFICA

### 4.4.1. FECHAMIENTOS

Las unidades edafoestratigráficas están conformadas por paleosuelos cuyas edades no están calibradas y se reportan en años antes del presente (aAP). Además de los fechamientos se puede hacer una relación con otras secciones por la similitud entre las propiedades

**C.S. Berkovich**

---

morfológicas, físicas y químicas analizadas en cada paleosuelo y que son los resultados mostrados en todos los párrafos anteriores.

Para hacer la correlación se usaron datos y definiciones de estudios previos en Tlaxcala (Sedov *et al.*, 2009) y Teotihuacán (Solleiro *et al.*, 2006; 2011). Tal es así que el fechamiento de  $9,260 \pm 50$  aAP corresponde a la unidad *TX1*; la de  $21,340 \pm 110$  aAP corresponde a *TX1a*;  $24,070 \pm 350$  aAP es compatible con *TX1b* y; finalmente, la unidad *TX2* con la fecha de  $46,320 \pm 870$  aAP. En la FIGURA 47 se muestra cada una de las unidades relacionadas con cada perfil.

Otro factor que se debe considerar al tratar de hacer una correlación es que las propiedades morfológicas, químicas y físicas varían dependiendo de la ubicación en la topografía del perfil ya que esta condiciona los procesos pedogenéticos que imprimen los rasgos observables; sin embargo, los fechamientos han permitido realizarla como sigue (FIGURA 47):

1. La unidad *TX1* se correlaciona con los luvisoles y fluvisoles estágnicos de *Tenexac A* y con los fluvisoles de *Huexoyucan*. En San Pablo con la unidad SP1 (Rivera, 2007; Rivera *et al.*, 2009).
2. *TX1a* se correlaciona solamente con *Huexoyucan* y está representada por un Gleysol que es fácilmente reconocible en campo por su coloración pardo-clara.
3. *TX1b* se correlaciona con el Luvisol estágnico de *Huexoyucan* y en *San Pablo* con un

| B. Tenexac A               |           |               |                | B. Huexoyucan             |                  |                                |                | R. San Pablo  |           |                                |                | UNIDAD EDAFOESTRATIGRÁFICA | PERIODO DEL CUATERNARIO | ETAPA ISOTÓPICA DEL OXIGENO |
|----------------------------|-----------|---------------|----------------|---------------------------|------------------|--------------------------------|----------------|---|-----------|--------------------------------|----------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| TIPO DE PALEOSUELO         | HORIZONTE | FECHAMIENTO   | $\delta^{13}C$ | TIPO DE PALEOSUELO        | HORIZONTE        | FECHAMIENTO                    | $\delta^{13}C$ | TIPO DE PALEOSUELO                                      | HORIZONTE | FECHAMIENTO                    | $\delta^{13}C$ |                            |                         |                             |
|                            |           |               |                | <i>Phaeozem háplico</i>   | A                |                                | -17.97         |   |           |                                |                |                            | Reciente                | <i>EIOM 1</i>               |
| <i>Luvisol estagnéico</i>  | 2Bg       | 8260 ± 60 aAP | -20.1          | <i>Fluvisol</i>           | 2AB              |                                | -20.89         |   |           |                                |                | TX1                        | Holoceno Temprano       | <i>EIOM 1</i>               |
| <i>Luvisol estagnéico</i>  | 3Ag (s)   |               | -20.2          |                           |                  |                                |                |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
|                            | 3Ag (i)   |               | -19.6          | <i>Fluvisol</i>           | 3AC              | 9,260 ± 50 aAP (Beta 250974)   | -18.79         |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
|                            | 3Bg       |               | -19.4          |                           |                  |                                |                |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
| <i>Fluvisol estagnéico</i> | 4A (s)    |               | -20.3          |                           |                  |                                |                |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
|                            | 4A (i)    |               | -20.1          |                           |                  |                                |                |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
| <i>Fluvisol</i>            | 4ABg      | 9990 ± 80 aAP | -20.6          |                           |                  |                                |                |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
| <i>Fluvisol</i>            | 5BC       |               | -21.4          |                           |                  |                                |                |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
|                            |           |               |                | <i>Gleysol</i>            | 4Bg              |                                | -20.05         |   |           |                                |                | TX1a                       | Pleistoceno Final       | <i>EIOM 2</i>               |
|                            |           |               |                | <i>Luvisol estagnéico</i> | 5Ag              |                                | -18.77         | <i>Calcisol</i>   | 6'Bk      | 24,070 ± 350 aAP (Beta 210760) | -5.3           | TX1b                       |                         |                             |
|                            |           |               |                | <i>Fluvisol histórico</i> | 6A               |                                | -21.26         | <i>Luvisol estagnéico</i><br><i>Albeluvisol vértico</i> |           |                                |                | TX2                        | Pleistoceno             | <i>EIOM 3</i>               |
|                            |           |               |                |                           | 6Ag              |                                | -23.86         |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
|                            |           |               |                |                           | 6ACo (s)         | 46,320 ± 870 aAP (Beta 250975) | -26.52         |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
|                            |           |               |                |                           | 6ACo (i)         |                                | -26.82         |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
|                            |           |               |                |                           | 6Ag <sub>2</sub> |                                | -23.19         |   |           |                                |                |                            |                         |                             |
|                            |           |               |                | <i>Fluvisol</i>           | 7AC              |                                | -20.91         |   |           |                                |                |                            |                         |                             |

FIGURA 47. Correlación edafoestratigráfica, cronológica y firmas de  $\delta^{13}C$  de los perfiles estudiados. Los fechamientos de Tenexac A fueron tomados de Borejsza (2006); mientras que los de San Pablo de Solleiro *et al.* (2011).

Calcisol, pero ello puede deberse a ambientes muy locales.

4. La unidad TX2 se relaciona con un Fluvisol hístico y un Fluvisol en *Huexoyucan* y los dos paleosuelos basales (Luvisol estagnico y Albeluvisol vértico) de *San Pablo* muy probablemente pertenezcan a esta etapa (Solleiro *et al.*, 2011).

#### **4.4.2. COMPARACIÓN REGIONAL DE LOS VALORES DE $\delta^{13}\text{C}$**

Basada en los datos de las FIGURAS 15 y 47 se realiza una comparación con el registro de los valores  $\delta^{13}\text{C}$  documentados por Lounejeva *et al.*, (2006) y Solleiro *et al.*, (2009), esta correlación muestra varias tendencias. La primera, del Holoceno Temprano hacia el Holoceno Tardío evidencia unas pequeñas oscilaciones entre plantas C3 y C4 dominando, al final, la vegetación C4. La segunda tendencia, del Pleistoceno hacia el Holoceno temprano, da una curva hacia valores  $\delta^{13}\text{C}$  con vegetación tipo C4 hacia uno C3. Una más se refiere a un pronunciado paso de la *EIOM 3* (hacia los  $43,620 \pm 870$  aAP), en la cual hay un claro predominio de plantas C3, a la *EIOM 2* que va hacia a una vegetación C4. En todos los casos tendencias son reflejo de las condiciones del microclima de cada región.

4.4. FECHAMIENTOS Y CORRELACIÓN EDAFOSTRATIGRÁFICA  
4.4.2. Comparación regional de los valores de  $\delta^{13}\text{C}$

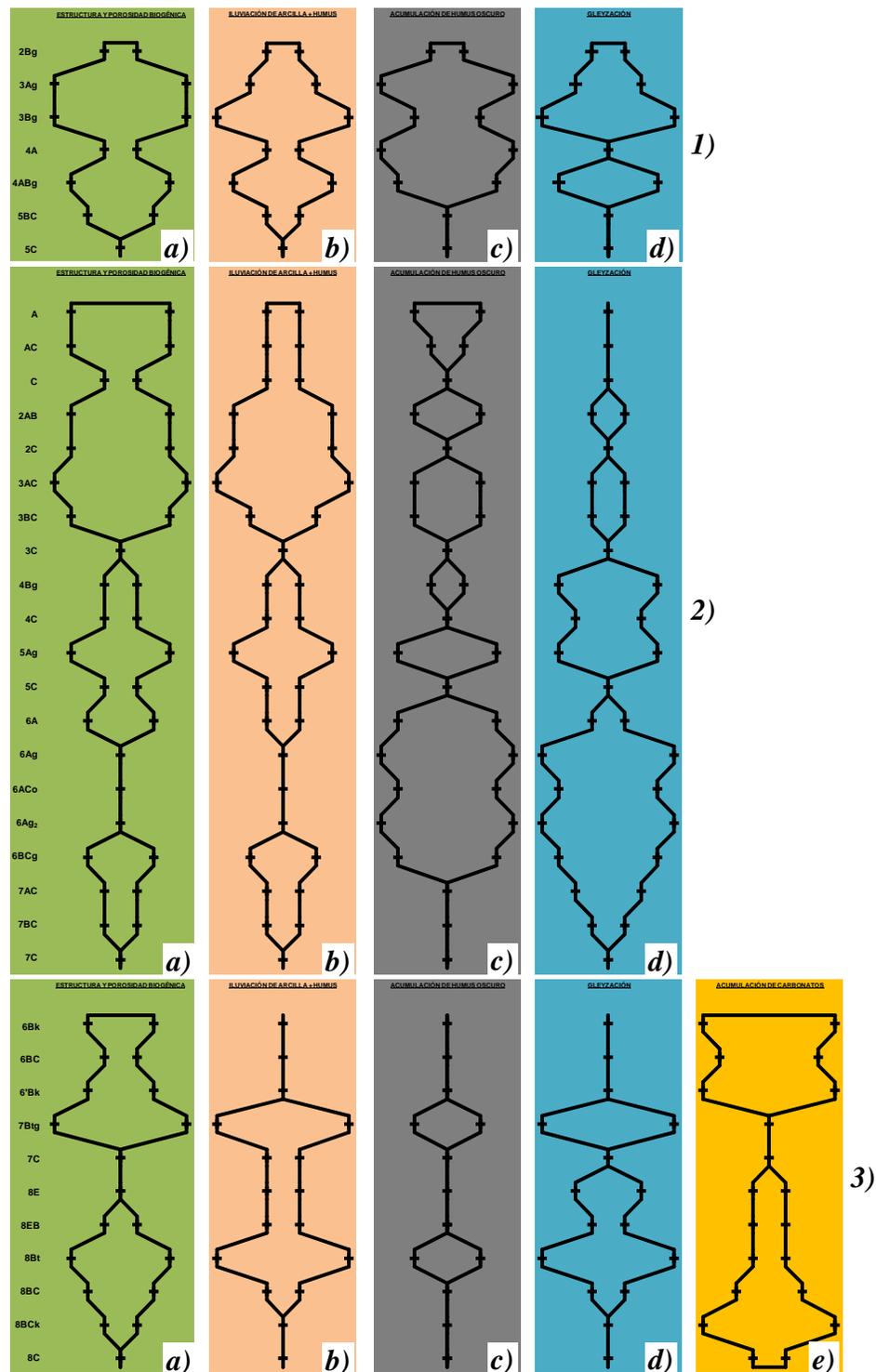
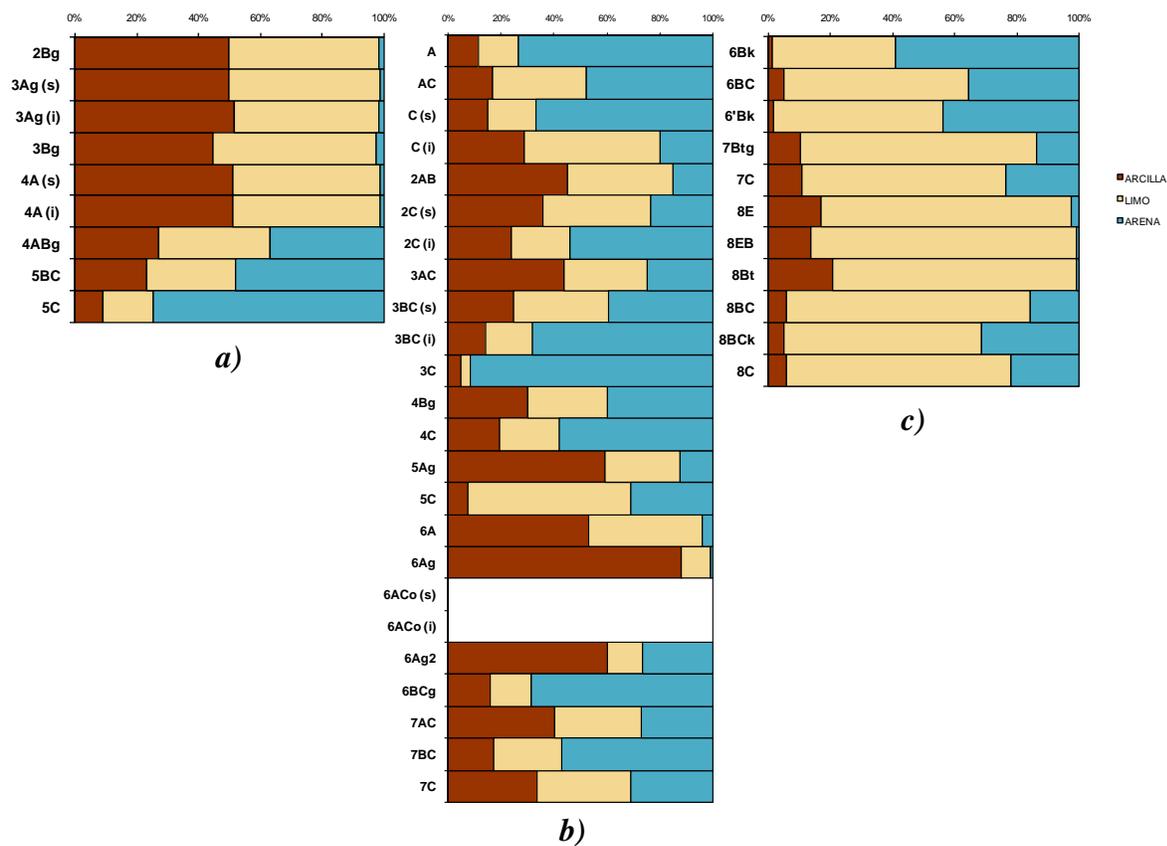


FIGURA 48. Procesos pedogénicos que caracterizan la morfología de los perfiles. 1) Tenexac A, 2) Huexoyucan y 3) San Pablo. a) Estructura y porosidad biotégica; b) Iluviación de arcilla y humus; c) Acumulación de humus oscuro; d) Gleyzación y; e) Acumulación de carbonatos.



**FIGURA 49.** Fracciones granulométricas: a) Tenexac A, b) Huexoyucan y c) San Pablo.

FIGURA 49. Granulometría  
FIGURA 50. Susceptibilidad magnética

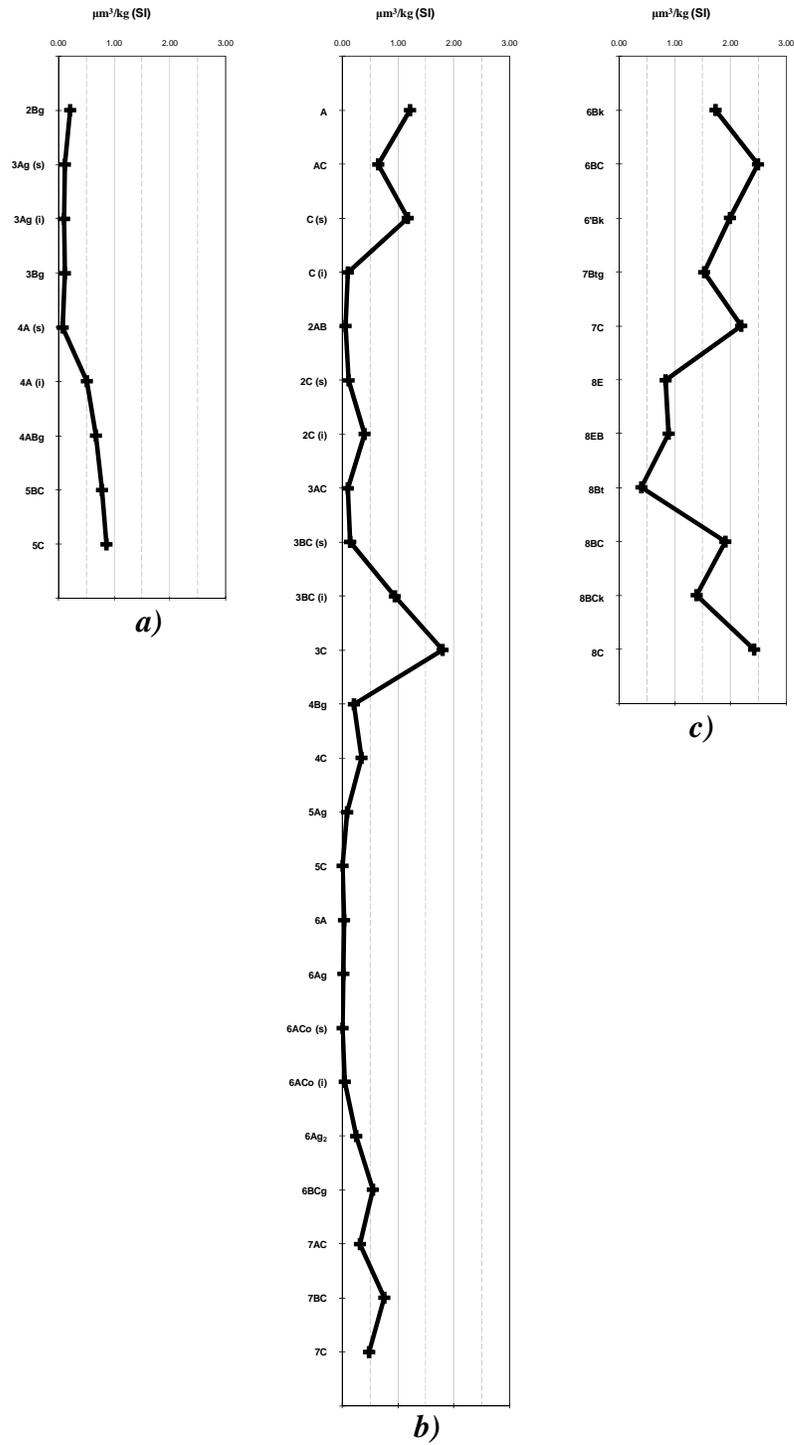
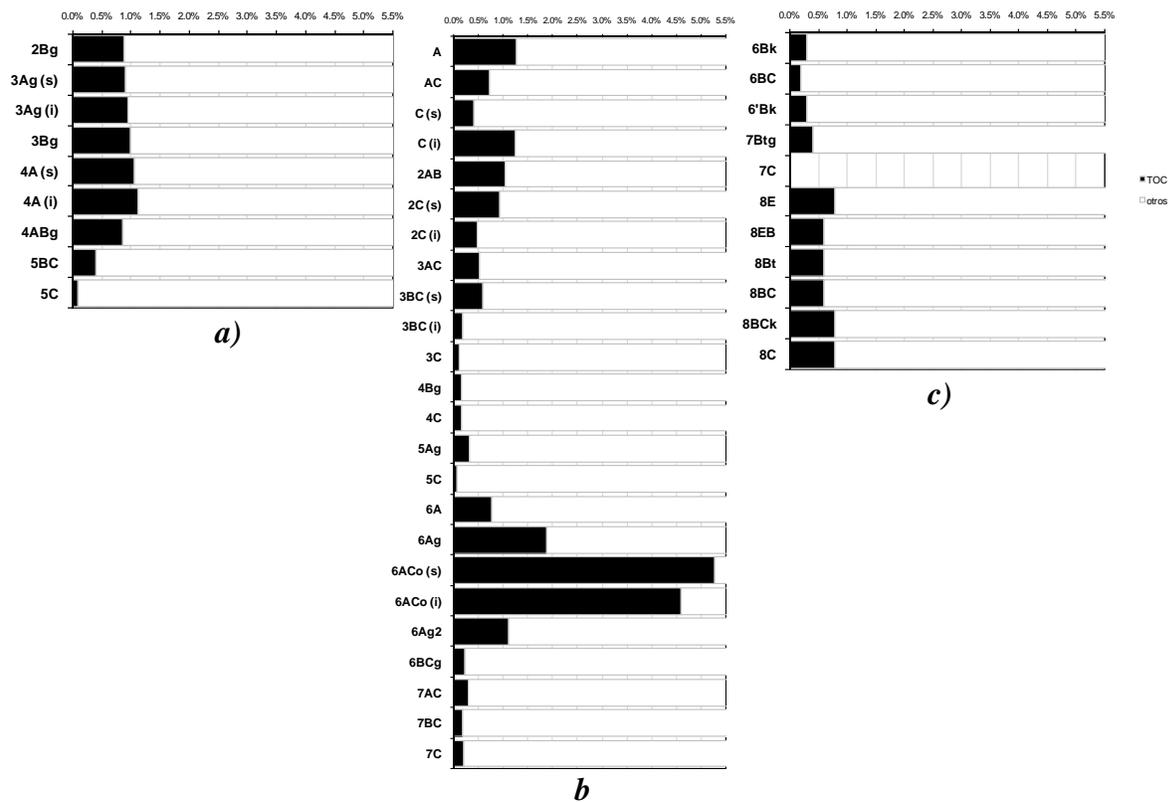


FIGURA 50. Susceptibilidad magnética: a) Tenexac A, b) Huexoyucan y c) San Pablo.



**FIGURA 51.** Carbono Orgánico Total (COT): a) Tenexac A, b) Huexoyucan y c) San Pablo.

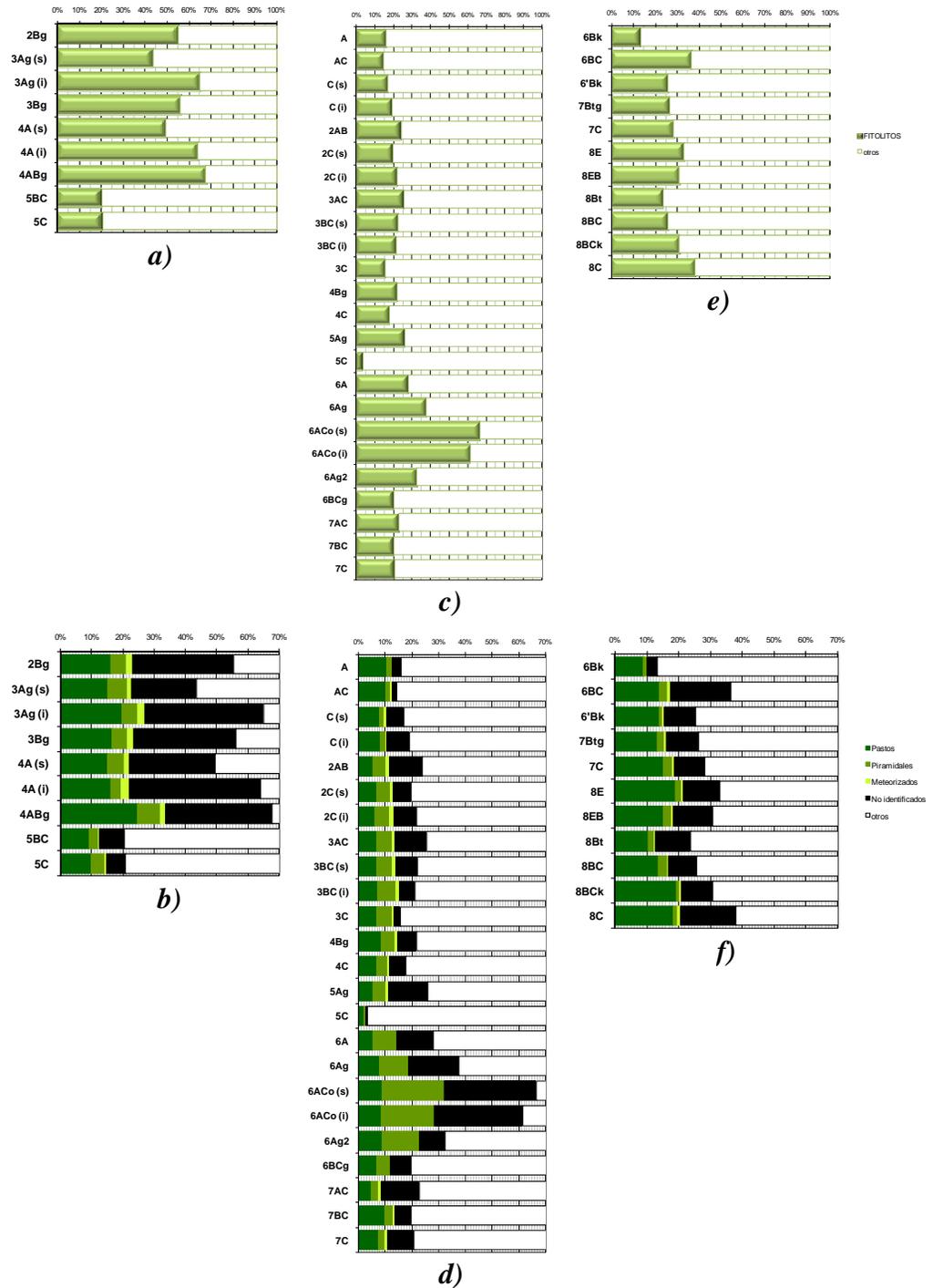
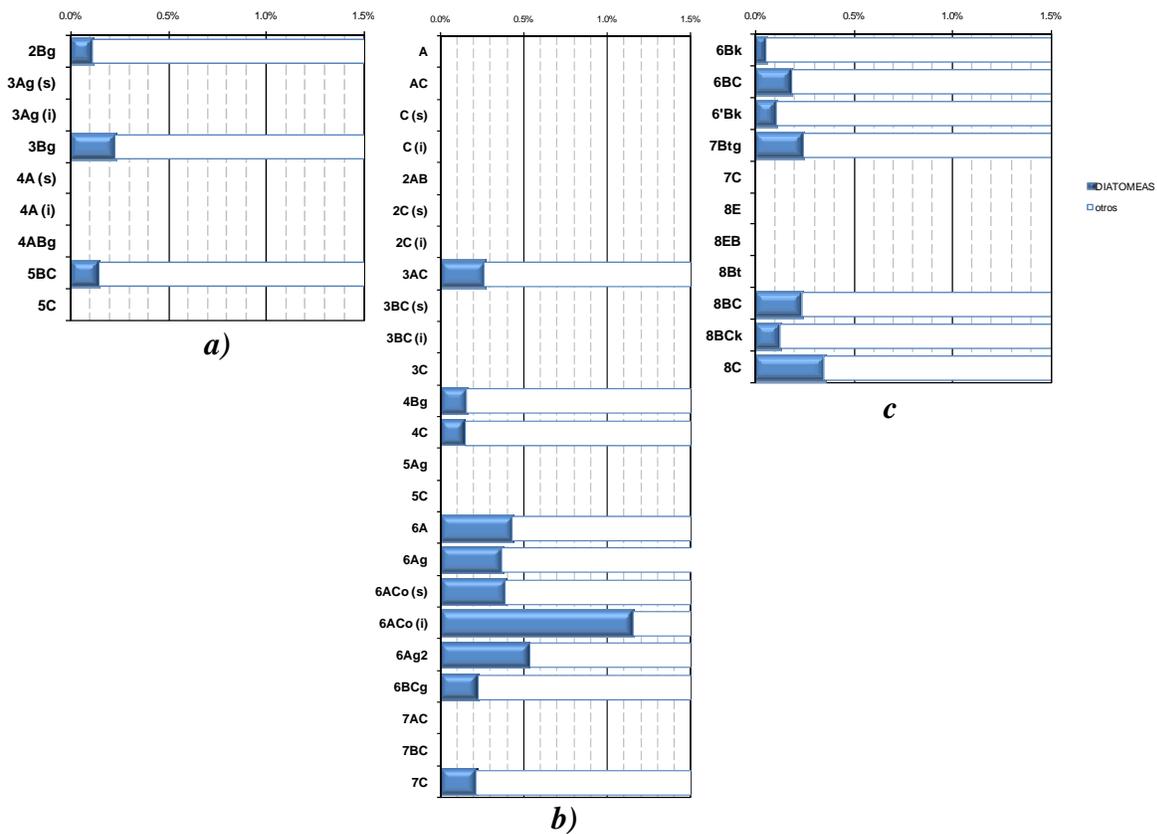


FIGURA 52. Tenexac A: a) Porcentaje de fitolitos; b) Porcentaje de fitolitos por tipos. Huexoyucan: c) Porcentaje de fitolitos; d) Porcentaje de fitolitos por tipos. San Pablo: e) Porcentaje de fitolitos; f) Porcentaje de fitolitos por tipos.

**C.S. Berkovich**



**FIGURA 53.** Diatomeas: a) Tenexac A, b) Huexoyucan y c) San Pablo.

## **Capítulo 5**

# **DISCUSIÓN**



## Capítulo 5.

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir del estudio de los rasgos y procesos pedogenéticos, reflejados en las propiedades de estas secuencias edáficas del Cuaternario Tardío en el centro de México, se pueden inferir las diferencias no solamente en el tipo de formación de un suelo, sino también su grado de desarrollo bajo determinadas condiciones ambientales (Sedov *et al.*, 2009). Los análisis macro y micromorfológicas, apoyados en todos los demás datos de laboratorio, muestran contrastantes tipos de procesos pedogenéticos que se llevaron a cabo en las distintas unidades de paleosuelos aquí estudiadas.

#### **5.1. INTERPRETACIÓN Y CORRELACIÓN PALEOCLIMÁTICA Y MEMORIA EDÁFICA**

##### **5.1.1. ETAPA ISOTÓPICA DEL OXÍGENO 3 (EIOM 3)**

El paleoclima durante la *EIOM 3* se reconoce por medio de un *Paleofluvisol hístico* en la base del perfil *Huexoyucan* fechado en  $46,320 \pm 870$  aAP, contrastando con un *Paleoluvisol estágnico* en la cima del perfil *Tlalpan C* fechado en  $38,160 \pm 5880$  aAP (Solis, 2010) que, a su vez, conforman la unidad pedoestratigráfica denominada como *TX2* (Sedov *et al.*, 2009) (FIGURAS 47 y 54).

C.S. Berkovich

Los rasgos pedogenéticos característicos del Fluvisol hístico son casi imperceptibles, pero la notable deposición en laminaciones de materia orgánica, parcialmente descompuesta (condiciones anaeróbicas) observada en las secciones delgadas, evidencian procesos de acumulación de humus obscuro y fuerte gleyzación.

|   |                                      |                          |                               |   |   |  |
|---|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|---|---|--|
|   | <b>EIOM 1</b><br>(≤ 10.3 ka AP)      | <b>Holoceno</b>          | <b>TX1</b>                    | <b>Pequeña Edad de Hielo (PEH)</b><br>(1.3 - 1.45 ka DC a 1.85-1.9 ka DC) |   |  |
|   |                                      |                          |                               | <b>Periodo Medieval Cálido (PMC)</b><br>(6.0 - 5.0 ka AP)                 |   |  |
| <b>Último Glacial (UG)</b><br>(74.0 - 10.3 ka AP) | <b>EIOM 2</b><br>(28.0 - 10.3 ka AP) | <b>Pleistoceno Final</b> | <b>TX1a</b><br>(< 22.0 ka AP) | <b>Última Deglaciación (UD)</b><br>(18.0 - 10.0 ka AP)                    | <b>Glacial Tardío (GT)</b><br>(14.0 - 11.3 ka AP) | <b>Younger Dryas (YD)</b><br>(12.7 - 11.5 ka AP) |
|   |                                      |                          | <b>TX1b</b><br>(< 28.0 ka AP) | <b>Último Máximo Glacial (UMG)</b><br>(28.0 - 18.0 ka AP)                 |   |  |
|   | <b>EIOM 3</b><br>(53.0 - 28.0 ka AP) | <b>Pleistoceno</b>       | <b>TX2</b>                    |   |   |  |
| <b>Último Interglacial (U)</b><br>(≥124.0 ka AP)  |                                      |                          |                               |   |   |  |

**FIGURA 54.** Correlación paleoclimática.

Para que los anteriores procesos se presenten es necesario que existan condiciones climáticas húmedas y frías; además, tal aseveración también se apoya en los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  que muestran un intervalo de -26.82‰ a -21.26‰. Asimismo, los horizontes orgánicos de este periodo documentan condiciones de humedad deducidas por la presencia de polen de taxa mesofítica y de humedal como las algas (*Botryococcus*, *Zygnemathaceae*, *Debarya* y *Spirogyra*). El registro de las diatomeas *Crysophyta* y *Hantzschia spp.* sugiere un ambiente frío (5-12°C) y de *Eunotia spp.*, *Pinnularia spp.*, *Cymbella spp.* y *Navicula spp.* remiten a un clima húmedo con periodos estacionales marcados.

---

Este periodo, en el Valle de Teotihuacán, está representado por los paleosuelos SP3 y SP4 de la sección *San Pablo*. Específicamente, el paleosuelo SP4 se caracteriza por una combinación entre un horizonte E sobre uno Bt; este último, muestra iluviación de arcilla en forma de cutanes y el máximo en el contenido de la misma, lo cual evidencia una diferenciación controlada, principalmente, por el proceso de iluviación. Las láminas delgadas muestran micro áreas enriquecidas de arenas con coloraciones muy claras (blancas) y la presencia de recubrimientos limosos en los poros, típicas para un horizonte eluvial de un *Albeluvisol*. La susceptibilidad magnética proporciona evidencia adicional mostrando un mínimo muy acentuado en el horizonte E también típico para estos tipos (Rivas *et al.*, 2006). Las condiciones reductomórficas moderadas observadas como moteados, nódulos y recubrimientos de hierro y manganeso indican procesos gleycos.

El paleosuelo SP3 es menos desarrollado mostrando una combinación compleja en sus propiedades pedogenéticas. De forma peculiar y contradictoria se observaron en las secciones delgadas una fuerte gleyzación con un alto grado de actividad faunística (numerosas krotovinas); es decir, es necesaria una fuerte saturación de agua para los procesos reductomórficos, pero puede ser una limitante para la población animal. Sin embargo, la formación de barita en este horizonte refuerza los rasgos hidromórficos, lo cual es congruente con la combinación entre los procesos reductomórficos y la iluviación. Solleiro *et al.* (2011) refieren la posible asociación de este mineral con suelos hidromórficos, es decir, saturados temporalmente con un cuerpo de agua que contiene sulfatos y donde el bario se deriva de las rocas ígneas presentes en la Cuenca de México.

**C.S. Berkovich**

---

En consecuencia, ambos registros (Huexoyucan y San Pablo) para este periodo, revelan condiciones de humedad permanente bajo climas templados y bajas tasas de evapotranspiración durante el desarrollo de los paleosuelos, aunque la presencia de rasgos vérticos indica variantes estacionales marcadas por periodos de menor humedad que se combinan con periodos de abundante precipitación. Tal posibilidad está apoyada por la presencia de carbonatos en concreciones y rellenos de fisuras en SP4 y la fuerte zooperturbación en el paleosuelo SP3 indicando una fuerte estacionalidad entre condiciones húmedas y secas.

Los registros isotópicos del oxígeno también sugieren una etapa de oscilaciones entre condiciones cálidas (pero en general más frías que en la actualidad) y frías, provocando que se presentaran condiciones de humedad pero con estaciones secas marcadas las cuales prevalecieron hasta los 30,000 aAP cuando el clima terrestre entró en una fase de enfriamiento extremo (Bond *et al.*, 1993).

Estas condiciones climáticas también se han registrado en otras áreas del centro de México (Valle de Teotihuacán y el Nevado de Toluca) sugiriendo condiciones más frías y húmedas con fases secas en el intervalo de 50,000 a 37,000 años, manteniéndose constantes hasta el final del interestadial (Sedov *et al.*, 2003).

Los registros lacustres del Lago de Tecocomulco (el más cercano a la zona de estudio) reportan un periodo húmedo y ligeramente cálido entre 42,000 y 37,000 aAP. En esta misma secuencia, pero en el periodo entre 37,000 y 31,000 aAP, se experimenta un relativo

incremento en la profundidad del lago. Posteriormente, a los 30,000 aAP, se documenta una fase fría y húmeda y el nivel del lago decrece (Caballero y Ortega, 1998). El periodo de 35,000-32,000 años AP está caracterizado por el avance glacial de MI de la última glaciación en el Volcán La Malinche indicando una mayor precipitación y temperaturas bajas (Lauer, 1979).

### **5.1.2. ETAPA ISOTÓPICA DEL OXÍGENO 2 (EIOM 2)**

Este periodo está caracterizado por dos intervalos de pedogénesis. El primero corresponde al evento climático denominado Último Máximo Glacial (UMG) representado por la unidad pedostratigráfica *TX1b* conformada, por un lado, por paleosuelos con un alto desarrollo de estructura (bloques angulares) y porosidad biogénica, así como la acumulación de humus e iluviación de arcilla en contraste con paleosuelos compuestos por horizontes cálcicos en el Valle de Teotihuacán, que se caracteriza por cambios contrastantes en el ambiente con fases de inestabilidad que formaron paleocanales con sedimentación de tipo aluvial (fechado en 24,070 ± 350 aAP). El segundo intervalo de pedogénesis durante la *EIOM 2* está presente en la unidad pedostratigráfica *TX1a* asociada con el Glacial Tardío (GT). Este periodo se distingue por suelos hidromórficos de coloración pardo-clara con poco desarrollo de estructura y porosidad biogénica, así como menor meteorización e iluviación de arcilla. En Teotihuacán, de acuerdo con los fechamientos, ambas unidades (*TX1a* y *TX1b*) están asociadas con la unidad SP2.

#### **5.1.2.1. Último Máximo Glacial (UMG)**

**C.S. Berkovich**

---

Las evidencias paleopedológicas del Último Máximo Glacial (*UMG*) se presentan en los paleosuelos clasificados en campo como luvisoles estágnicos con edades no calibradas de  $26,525 \pm 1180$  a  $22,070 \pm 120$  aAP (Sedov *et al.*, 2009). La unidad *TX1b* se caracteriza por procesos de acumulación e iluviación de arcilla y humus y menor cantidad (en comparación con las otras unidades pedostratigráficas) de rasgos de gleyzación sugiriendo una humedad permanente como resultado de condiciones de frío severo que han sido reportadas por Heine (1994) al inicio de la *EIOM 2*.

Solis (2010) reporta que durante el *UMG* en el Bloque Tlaxcala se desarrollaron luvisoles estágnicos tanto en la cima (perfil *Tlalpan C*) como en la ladera (perfil *La Concepción C*). Su señal climática se caracteriza por un incremento en la acumulación de humus oscuro; fuertes condiciones reductomórficas observadas como moteados, nódulos y recubrimientos de hierro y manganeso indicando procesos gleycos. Ambos procesos pedogénicos sugieren una humedad permanente durante el desarrollo de los paleosuelos bajo condiciones ambientales más templadas que en la *EIOM 3*.

También para la región de Tlaxcala se presentan propiedades derivadas de fases secas como lo muestra el valor de  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-18.77\text{‰}$  (FIGURAS 27 y 32), así como por la relación de halloysita y caolinita reportada en estudios anteriores para el perfil *Barranca Mamut* (Sedov *et al.*, 2009b). Ohngemach y Straka (1978) indican un clima frío y relativamente seco intercalados con periodos cortos más fríos y húmedos para la Cuenca Puebla-Tlaxcala entre los 31,000 y 18,000 aAP. En cuanto a la sección *San Pablo*, con fecha de  $24,070 \pm 350$  aAP, como se trata de horizontes cálcicos, el valor de  $-5.30\text{‰}$  corrobora esta tendencia a vegetación C4 y CAM

---

de acuerdo con la relación de Cerling y Quade (Bernal *et al.*, 2011).

Los registros paleolimnológicos en la Cuenca de México indican que durante el UMG (26,000 - 18,000 años AP) el clima tiende a condiciones frías y secas, con una baja diversidad de vegetación forestal y taxa subacuática como *Isöetes* y algas (Lozano y Xelhuantzi, 1997; Metcalfe *et al.*, 2000).

Los datos polínicos de Tepexpan, evidencia condiciones templadas (disminución de *Pinus*, ausencia de *Picea* y aumento de *Quercus*) y menos húmedas (aumento de polen herbáceo) entre los 27,000 y 20,000 aAP (Sedov *et al.*, 2010). Es importante señalar que Caballero (1997) sugiere que el UMG en el Altiplano Central se presenta entre los *ca.* 23,000 y 18,500 aAP, cuando los niveles del Lago de Chalco alcanzan su nivel mínimo, sugiriendo un clima menos húmedo para este intervalo de tiempo. Bradbury (1989) también documenta para los 24,000 aAP un descenso general de los lagos de la Cuenca de México.

Una tendencia opuesta para el centro de México está documentada por Bradbury (2000) en el occidente de México, la cual trata de un clima ligeramente húmedo con lluvias considerables en invierno debido a una fuente de humedad atmosférica proveniente del Pacífico. Esto coincide con los hallazgos en los paleosuelos (unidad pedoestratigráfica PT2) del Nevado de Toluca (Sedov *et al.*, 2001; 2003), así como lo propuesto por González y Fuentes (1980) quienes sugieren un clima relativamente húmedo y cálido entre los 30,000 y 24,000 aAP.

En la cuenca superior del Lerma se ha registrado un incremento en el polen herbáceo

**C.S. Berkovich**

---

(*Poaceae*) en los estratos del Lago Chignahuapan (23,000 aAP) sugiriendo condiciones menos húmedas para el Pleistoceno Tardío (Lozano y Vázquez, 2005). Esto se relaciona con un descenso en la línea de bosques, a elevaciones de 3000 msnm (que actualmente se ubica cerca de los 4000 msnm), y una expansión de las praderas alpinas indicando un descenso de temperatura más que un fenómeno de menor precipitación.

El registro glacial del centro de México evidencia un clima seco y frío (Vázquez y Heine, 2004) ya que no se documentan avances de glaciares durante el Último Máximo Glacial, exceptuando los registros del Volcán Ajusco que muestran dos avances glaciares: El Marqués entre los 27,000 y 26,000 aAP y Santo Tomás entre los 25,000 y 24,000 aAP.

#### **5.1.2.2. Última Deglaciación (UD), Glacial Tardío (GT) y Younger Dryas (YD)**

La unidad pedostratigráfica *TX1a* está conformada por un paleosuelo clasificado en campo como Gleysol. Cuando Cabadas (2007) define esta unidad, el fechamiento del *Paleogleysol* era incierto ( $21,340 \pm 110$  aAP) ya que presenta una incongruencia con las edades radiocarbónicas de *TX1b*. La explicación es de que se trata de procesos de redeposición de humus de suelos más antiguos que se mantienen en los paleosuelos poco desarrollados de la unidad *TX1a* (Sedov *et al.*, 2009). Sin embargo, es posible asociarlo con el Glacial Tardío (GT) ya que el inicio de su pedogénesis se presenta alrededor de los  $16,820 \pm 70$  y  $17,310 \pm 920$  aAP (Sedov *et al.*, 2009), cuando finaliza la pedogénesis de *TX1b*.

Las características morfológicas de esta unidad corresponden a un clima frío y húmedo, ya que los rasgos de hidromorfismo evidencian un decremento en la acumulación de humus y

**5.1. INTERPRETACIÓN Y CORRELACIÓN PALEOCLIMÁTICA Y MEMORIA EDÁFICA****5.1.2. Etapa Isotópica del Oxígeno 2 (EIO2)**

## 5.1.2.2. Última Deglaciación (UD), Glacial Tardío (GT) y Younger Dryas (YD)

---

contenido de arcilla produciendo con ello una coloración gris claro que es fácilmente perceptible en campo. Debido al hidromorfismo los valores de la susceptibilidad son bajos coincidiendo con lo reportado por Rivas *et al.* (2006). Asimismo, los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de  $-20.05\text{‰}$  en *Huexoyucan* indican una vegetación preferentemente de pastizales.

En contraste con *TX1a* y *TX1b* de Tlaxcala están las condiciones de formación de *San Pablo* ya que alterna señales de pedogénesis de climas húmedos con secos dando pie a la formación de los horizontes Bk en combinación con la precipitación de calcita secundaria en perfiles cercanos estudiados.

La reconstrucción paleoambiental de este periodo está poco documentado en el centro de México. Heine (1984) registra un avance glacial en el Volcán La Malinche (MII) evidenciando un clima frío y húmedo que coincide con los registros paleopedológicos en el Nevado de Toluca, que indican un clima frío-húmedo pero con periodos secos como lo muestran los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  en los paleosuelos PT0 ( $11,595 \pm 180$  aAP) y PT1 ( $13,870 \pm 180$  aAP) (Sedov *et al.*, 2003).

Otros registros paleopedológicos también evidencian un clima húmedo y frío en el Valle de Teotihuacán, tal es el caso del desarrollo del Luvisol estagnico ( $11,160 \pm 60$  aAP) en la localidad denominada como *Maseca* (Solleiro *et al.*, 2006) y la formación de un Albeluvisol ( $12,160$  aAP) en el área del Glacis de Buenavista, Morelos (Solleiro *et al.*, 2003). Además, este periodo corresponde a los avances glaciares de alta montaña de la Faja Volcánica Transmexicana fechados alrededor de los 15,000 aAP (White y Valastro, 1984; Heine, 1994).

**C.S. Berkovich**

---

Lauer (1979) documenta un clima extremadamente frío y húmedo entre 21,000 y 13,000 años AP favoreciendo la formación del suelo fBo1 (Andosol) y el avance del glaciar MI en el Volcán de La Malinche, el cual presenta fluctuaciones en temperatura y precipitación. También en el Volcán Iztaccíhuatl se registra el avance del glaciar Hueyatlaco I (entre los 20,000 y 17,500 aAP) y Hueyatlaco II (entre los 17,000 y 14,000 aAP) (Lachniet y Vázquez, 2005). En Cofre de Perote entre los 20,000 y 14,000 aAP también se presenta un avance glaciar que corresponde con Hueyatlaco I y II (Carrasco *et al.*, 2009) y, en el Ajusco se documenta el avance del glaciar Albergue entre los 21,000 y 16,000 aAP.

Algunos registros paleopedológicos de la Última Deglaciación (*UD*) evidencian un clima menos húmedo. Por ejemplo, la precipitación y concentración de carbonatos con edades de 17,000 años AP en la zona de Pachuca, los fechados en 20,000 aAP en Texcoco y los de Río San Pablo con edades similares (Cabadas, 2007).

Los registros paleolimnológicos del Glacial Tardío (*GT*) evidencian niveles lacustres altos en Chalco (Bradbury, 1989), mientras que en Texcoco y Tecocomulco se documentan condiciones áridas de los 15,000 a 14,500 aAP debido al *hiatus* en las secuencias. En Tecocomulco este periodo está relacionado con la formación de una capa de caliche indicando una aridez intermitente (Caballero *et al.*, 1999).

En San Pablo el *GT* se caracteriza por fases de sedimentación intensa en forma de paleocanales (Solleiro *et al.*, 2011). Además, la inestabilidad climática se evidencia en los tepetates formados en el Glacis de Buenavista (Díaz *et al.*, 2010).

### **5.1.3. ETAPA ISOTÓPICA DEL OXÍGENO 1 (EIOM 1)**

#### **5.1.3.1. Holoceno Temprano**

Igualmente, en las áreas fluviales de Tlaxcala se han registrado pedocomplejos (suelos cumúlicos) que registran los eventos climáticos desde el Holoceno Temprano (10,300 aAP) hasta el Holoceno Tardío (3,100 aAP). Los paleosuelos que corresponden temporalmente al Holoceno Temprano se caracterizan por una pedogénesis de climas húmedos (generalmente presentan hidromorfismo y los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  fluctúan entre aproximadamente -20 ‰ y -18 ‰) y fríos (permitiendo acumular humus en la matriz del suelo). Mientras que los del Holoceno Medio y Tardío evidencian una tendencia hacia condiciones menos húmedas (Borejsza, 2005; Borejsza y Frederick, 2008).

La unidad pedoestratigráfica *TXI* (Huexoyucan, horizonte 3AC, fechado en  $9,260 \pm 50$  aAP) evidencia las condiciones paleoambientales predominantes en el Holoceno Temprano, la cual se conforma por paleosuelos que presentan fuertes propiedades gleycas y reductomórficas observadas en las secciones delgadas que, conjuntamente, con los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  que varían de -20.89‰ a -18.79‰ sugieren condiciones húmedas. Además, la acumulación de humus obscuro en los suelos de este periodo permite añadir a las características ambientales húmedas la existencia de temperaturas frías.

Los valores bajos de susceptibilidad evidencian condiciones de hidromorfismo, aunque el máximo se presenta en los sedimentos que reflejan la naturaleza volcánica de los mismos. Asimismo, los altos valores de susceptibilidad permiten identificar mayor cantidad de eventos erosivos que se reflejan en dicha variabilidad de la señal.

Es importante señalar que la pedogénesis dominante en el Holoceno Temprano se caracteriza por un alto grado de desarrollo con un máximo en los procesos de acumulación de humus obscuro, iluviación de arcilla, gleyzación, estructura y porosidad biogénica.

La sección Barranca *Tenexac A* se caracteriza por una fuerte acumulación de humus y alta presencia de propiedades reductomórficas como concreciones ferrígenas. Para este perfil se tienen dos fechamientos, el primero, en la base con una edad no calibrada de  $9,990 \pm 80$  aAP, y; el otro, en la parte superior cuya edad de radiocarbono es  $8,260 \pm 60$  aAP (Borejsza y Frederick 2008). Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  varían entre  $-21.40$  ‰ y  $-19.40$  ‰ (FIGURAS 15 y 47) evidenciando un clima preferentemente húmedo y que, además, está apoyado por las bajos valores de susceptibilidad magnética (FIGURAS 13 y 50a).

Los datos de esta investigación sugieren un periodo que se caracteriza por condiciones climáticas frías y relativamente húmedas a los inicios del Holoceno. Esta misma tendencia está documentada por los registros glaciales, es decir, en el Volcán La Malinche entre los 10,000 y 9,000 aAP se documenta el avance del glaciar MIII, relacionado con el avance en el Iztaccíhuatl del Milpulco II entre los 8,300 y 7,300 aAP (Vázquez y Heine, 2004). Asimismo los registros paleolimnológicos del Lago de Chalco indican un incremento en la precipitación durante el Holoceno Temprano (Lozano y Ortega, 1998; Metcalfe *et al.*, 2000).

Estos registros coinciden parcialmente con estudios paleopedológicos en el centro de México, específicamente con los de la sección Tepexpan, los cuales indican una fase de relativa

**5.1. INTERPRETACIÓN Y CORRELACIÓN PALEOCLIMÁTICA Y MEMORIA EDÁFICA****5.1.3. Etapa Isotópica del Oxígeno 1 (EIOM 1)**5.1.3.1. Holoceno Temprano - 5.1.3.2. Holoceno Medio

---

humedad en los inicios del Holoceno que continúa con una clara tendencia hacia un clima más seco a finales de este periodo (Sedov *et al.*, 2010). Esta misma tendencia también se reporta en el Valle de Teotihuacán evidenciada por la acumulación de carbonatos pedogénicos en las zonas de baja pendiente (Solleiro *et al.*, 2006; Cabadas, 2007).

Los registros lacustres en Tecocomulco y Chalco indican una transición abrupta en las comunidades vegetales, desde bosques abiertos y pastizales de clima frío durante el Pleistoceno Final hacia una extensión de bosques de coníferas (*Alnus spp.*, *Quercus spp.*, *Picea spp.*, *Pinus spp.*) en el Holoceno Temprano que continúa hacia condiciones más secas en el Holoceno Medio (Caballero *et al.*, 1999; Lozano y Vázquez, 2005).

En los sedimentos del Valle El Marrano, localizado en el noroeste del volcán Iztaccíhuatl, los registros glaciales Milpulco I (12,000-10,500 aAP) y Milpulco II (8,300-7,300 aAP), conjuntamente con los registros polínicos, permitieron establecer la fluctuación de la línea de bosque. El diagrama de polen documenta el establecimiento de pastizales alpinos en el Holoceno Temprano (10,900 aAP -edad calibrada-) que permanecen hasta los 7,200 aAP -edad calibrada-, sugiriendo condiciones más frías que las actuales. El desarrollo de bosques de coníferas entre los 7,200 y 6,500 aAP -edades calibradas- muestra un aumento en la temperatura posterior al avance glacial Milpulco II y un clima más húmedo en el Altiplano Central (Lozano y Vázquez, 2005).

Asimismo en las áreas fluviales en el noroeste de Tlaxcala se ha documentado una paleovegetación predominantemente de pastizal bajo la cual se desarrolló un suelo muy

biogénico y orgánico (Borejsza y Frederick, 2008).

En la cuenca alta de Tlaxcala, en una capa arqueológica análoga a la unidad pedoestratigráfica *TXI* ( $9,260 \pm 50$  aAP -edad no calibrada-, fecha del presente estudio) se ha registrado material lítico del Paleolítico Superior (García, 1973) cuya cronología (11,000 aAP) permite inferir presencia humana en la región desde el Holoceno Temprano.

### **5.1.3.2. Holoceno Medio**

El Holoceno Medio es un periodo de menor humedad (Metcalf *et al.*, 2000), lo cual se ve reflejado en la acumulación de carbonatos en el horizontes tipo B y valores altos de  $\delta^{13}\text{C}$  del humus que puntualiza la presencia de plantas tipo C4 y CAM. Ambos aspectos se relacionan con condiciones climáticas semiáridas (vegetación xerófita en las cuestas y la parte más baja del valle).

En Tlaxcala tanto la presencia de carbonatos pedogénicos y los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de los suelos modernos indican una vegetación dominada por plantas tipo C4 en un 65%. Lauer (1979) menciona para la región un incremento de la temperatura hasta de 2° permitiendo la formación del suelo fBo3 en el Volcán La Malinche reportado por Heine (1973).

El Holoceno Tardío es un periodo con fuertes modificaciones antrópicas en el ambiente desde el Formativo Temprano (1,600 aAC a 200 aDC) hasta la actualidad (Borejsza *et al.*, 2008), lo cual se observa por la presencia de artefactos (cerámica y lítica) en el suelo moderno. La similitud de los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (-17.18‰) con los reportados para el Valle de Teotihuacán

permite inferir su fuerte modificación antrópica o un incremento en la erosión natural (Heine, 2003).

El suelo moderno en cada uno de los perfiles no presenta fuertes rasgos edafogenéticos, ya que se observan en las secciones delgadas evidencias de erosión como laminaciones y pápulas, lo cual se asocia con el cultivo y la deforestación, actividades que han estado presentes al menos durante los últimos 3,000 años (McClung *et al.*, 2003; Borejsza *et al.*, 2008).

## **5.2. ETAPAS DE PEDOGÉNESIS / SEDIMENTACIÓN: Estabilidad vs. inestabilidad**

El último paso para la interpretación de las secciones pedoestratigráficas consiste en una visión esquemática de las etapas de estabilidad e inestabilidad del paisaje durante la *EIOM 3*, *EIOM 2* y la *EIOM 1* (Holoceno Temprano y Medio), lo cual depende del tipo y la intensidad relativa de la pedogénesis y los procesos geomorfológicos.

En la *EIOM 3* el paisaje se mantuvo estable puesto que la pedogénesis muestra un grado de desarrollo avanzado en sus procesos que se llevan a cabo en lapsos de tiempo mayor (acumulación de arcillas e iluviación), es así como se observan en las unidades *TX2* de Huexoyucan (Fluvisol y Fluvisol hístico), *SP4* (Albeluvisol vértico) y *SP3* (Luvisol estágnico) de San Pablo.

En San Pablo, la estabilidad del suelo estuvo determinada por los procesos de erosión-

---

**C.S. Berkovich**

---

sedimentación, los cuales interrumpieron parcialmente la formación de SP3 pero no la de SP4. El material parental del paleosuelo SP3 se compone de la mezcla de material volcánico retrabajado. Esta mezcla está claramente documentada en el patrón de susceptibilidad magnética donde se encontró gran diferencia entre los horizontes 8E (SP4) y 7C (SP3). No es posible proporcionar un marco de tiempo exacto para estos eventos, pero la presencia de material volcánico ácido en la unidad SP3 que comprende el paleosuelo es un indicador clave ya que fue posible relacionar este material a la fuerte actividad del Volcán Tláloc que produjo materiales piroclásticos ácidos entre los 30,000 y 34,000 años AP (Hernández, 2007). La presencia de vidrio volcánico poco meteorizado en SP3 apoya esta hipótesis (Solleiro *et al.*, 2011). Cosa distinta pasó con la formación del Fluvisol hístico de Huexoyucan ( $46,320 \pm 870$  aAP), en cuyo origen (también aluvial) se estabiliza la sedimentación con inundación y gran acumulación de materia orgánica, mostrando fuertes propiedades reductomórficas. A pesar de las diferencias en las localidades, en ambos casos se infieren condiciones de humedad abundante.

Durante la *EIOM 2* en San Pablo el paisaje era bastante inestable y es observable porque hay secuencias de ciclos de sedimentación. Luego se producían fases de estabilización dando pie a una especie de polipedogénesis y la formación de SP2. Este suelo presenta un conjunto de características muy distintas en comparación con las otras unidades de suelo: es más arenoso, no tiene evidencia de una fuerte erosión y está constituida principalmente por capas de caliche, lo que indica periodos de clima secos. Sin embargo, este suelo es policíclico, es decir, presenta dos etapas de formación de suelo (6Bk y 6'Bk).

La fase más antigua fechada ( $24,070 \pm 350$  años AP, en 6'Bk) está representada por la presencia de una capa de caliche, que cambia lateralmente a características gleycas y; finalmente, en depósitos de canal. La otra fase también contiene una capa de caliche (aún sin fecha), pero Solleiro *et al.*, (2011) suponen que se formó durante el Último Máximo Glacial. Esta secuencia culmina con una etapa de inestabilidad marcada por la presencia de paleocanales con orientación NNW-SSE que cortan hasta SP3.

En Huexoyucan la *EIOM 2* se presentó con condiciones más estables, también con procesos de sedimentación dominando sobre los erosivos, de modo tal que se lograron formar, primero un Luvisol estagnico durante el Último Máximo Glacial y; posteriormente, un Gleysol durante el llamado Glacial Tardío.

Esta misma tendencia está documentada para Tlaxcala donde la activación de los procesos de inestabilidad en el paisaje se debe a un ajuste fluvial a inicios del Holoceno (10,300 aAP). Tal ajuste responde a una transición de condiciones glaciales a condiciones interglaciales que ocasionó un incremento en la descarga de los afluentes provocando incisiones geomorfológicas en los valles (Borejsza y Frederick, 2008).

Durante el Holoceno se registran tendencias hacia condiciones más secas. Sin embargo, ya en el Holoceno Tardío se detecta inestabilidad relacionada con la perturbación antrópica (Heine, 2003; McClung *et al.*, 2003).



## **Capítulo 6**

# **CONCLUSIONES**



## Capítulo 6

# CONCLUSIONES

### 6.1. SOBRE LOS PALEOSUELOS

1. En capítulos anteriores se han expuesto correlaciones entre las unidades pedostratigráficas de las secciones edáficas estudiadas. Ello también permite inferir condiciones climáticas regionales al compararse con investigaciones paleopedológicas previas, lo que en conjunto muestran una clara tendencia paulatina hacia condiciones climáticas secas.

2. Durante la *EIOM 3* se desarrollan “paleo-fluvisoles” en Tlaxcala que evidencian condiciones climáticas frías y húmedas muy estables al grado de adquirir características de gran acumulación de materia orgánica. Sin embargo, en el Valle de Teotihuacán, bajo este mismo medio se generan primero, un “Paleo-Albeluvisol” con propiedades vérticas y; luego un “Paleo-Luvisol” con características estágnicas; ello significa que este paleorelieve regional influyó para que la humedad fuera un poco menor que en las partes altas de la región de Tlaxcala, a casi 200 metros de diferencia en altitud.

3. En la *EIOM 2*, hacia el Último Máximo Glacial los “luvisoles” presentan rasgos estágnicos, de lo cual se puede inferir un clima húmedo y frío que se alterna con etapas de menor humedad dejando esta configuración en los paleosuelos.

**C.S. Berkovich**

---

4. Las características de un clima contrastante, a nivel zonal, se ven reflejadas en la etapa final del Último Máximo Glacial (o ya entre la Última Deglaciación y el Glacial Tardío). Por un lado, están los “paleo-gleysoles” de Tlaxcala evidenciando un incremento considerable en la humedad y frío severo y; por el otro, el “Paleo-Calcisol” policíclico de San Pablo, reflejando condiciones de mucha humedad, pero también inestabilidad alternada con periodos secos que formaron los horizontes cálcicos.

5. Durante la *EIOM 1*, los paleosuelos del Holoceno Temprano son fluvisoles y luvisoles algunos con propiedades estágnicas propios de climas húmedos y fríos. En contraste, hacia el Holoceno Medio las condiciones hacia un clima más seco se evidencian a partir de la formación de carbonatos pedogénicos.

## **6.2. SOBRE LA PALEOVEGETACIÓN**

6. La caracterización de nichos ecológicos se puede inferir de las propiedades morfológicas, químicas, micromorfológicas y contenido micropaleobotánico de los paleosuelos. Es así que en Barranca Huexoyucan resalta, en general, la formación de pastizales extensos. Sin embargo, este patrón de la paleovegetación en Huexoyucan fluctúa en cada período de cambio en el clima.

7. En la *EIOM 3* se presenta una configuración de suelos *Fluvisol–Fluvisol hístico* (en Tlaxcala) y *Albeluvisol vértico–Luvisol estágnico* (Valle de Teotihuacán), evidenciando

ecosistemas forestales (*Quercus spp.*, *Pinus spp.* y *Alnus spp.*), con zonas abiertas que permiten el crecimiento de pastizales (*Poaceae*, *Amaranthaceae*). Pero en la base de pendientes se pueden desarrollar humedales o pantanos con taxa acuáticas (*Botryococcus*, *Zygnemathaceae*, *Debarya*, *Spirogyra*) y esporas de helechos (*Polypodium*, *Triletes* y *Compositae*).

8. La *EIOM 2* se caracteriza por dos intervalos: el primero, durante el Último Máximo Glacial conformado por un *Luvisol estágnico* (Tlaxcala) mostrando un ecosistema forestal abierto desde la cima hasta la pendiente del paisaje y un *Calcisol* (Valle de Teotihuacán) con desarrollo de amplios pastizales en las planicies. El segundo intervalo (Última Deglaciación o Glacial Tardío) está constituido por *gleysoles* desarrollados bajo un nicho forestal en la cima, pero el desarrollo de pastizales se incrementa distribuyéndose desde las laderas hasta los valles.

9. Ya en la *EIOM 1*, durante el Holoceno Temprano, se documenta un arreglo de paleosuelos *Fluvisol–Fluvisol estágnico–Fluvisol–Luvisol estágnico*, los cuales se desarrollaron en sistemas forestales desde la cima hasta la pendiente, pero en la pendiente el bosque es abierto permitiendo el crecimiento de pastizales hasta las partes bajas. Sin embargo, durante el Holoceno Medio, en la secuencia Tepexpan (Sedov *et al.*, 2010), está registrado el paleosuelo que representa este periodo, *Fluvisol téfrico*, el cual indica una pedogénesis en áreas secas, permitiendo inferir el crecimiento de xerófitas.

### **6.3. SOBRE EL POBLAMIENTO TEMPRANO**

10. Las evidencias de primeras ocupaciones humanas en el centro de México se ubican temporalmente en el Holoceno Temprano y Holoceno Medio. Los registros arqueológicos reportan dos periodos: el primero con edades de entre los 11,000 y 10,000 aAP y; el segundo, entre 7,500 y 4,500 aAP. Los análisis del colágeno de los restos óseos evidencian una dieta de plantas C3 y CAM (González *et al.*, 2003).

11. La recreación de escenarios paleoclimáticos realizados en el presente estudio y su concordancia con datos de isotopía en restos humanos, permiten establecer que la biomasa producida por estos pastizales húmedos debió ser importante como atractores para los últimos grandes herbívoros pleistocénicos sobrevivientes. Por tanto, estos ecosistemas son propicios para las prácticas de cacería y recolección, aunque aptos para acampar sólo durante las temporadas de baja humedad.

12. Finalmente, de la misma forma que se presentaron distintos escenarios de nichos ecológicos del Holoceno Temprano y Medio en depósitos de origen aluvial, es importante mencionar que debido justo a estas características de rápida sedimentación, permitieron la conservación de algunos vestigios, en estos paleosuelos, de las actividades de los primeros pobladores.

# **LITERATURA CITADA**



---

## LITERATURA CITADA

- ACOSTA OCHOA, Guillermo  
 2008 *La cueva de Santa Marta y los cazadores-recolectores del Pleistoceno Final - Holoceno Temprano en las regiones tropicales de México*. Tesis de doctorado (2 vols.). Instituto de Investigaciones Antropológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, 382 pp.
- AEPPLI, Hans y Ernst SCHÖNHALS  
 1973 Los suelos de la Cuenca Puebla-Tlaxcala. *Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica, Comunicaciones, 7*: 15–19.  
 1975 *Los suelos de la cuenca de Puebla-Tlaxcala: investigaciones acerca de su formación y clasificación*. *El Proyecto México de la Fundación Alemana para la Investigación Científica VIII*, Wilhelm Lauer (Ed.). Franz Steiner, Wiesbaden. 153 pp.
- ARELLANO, Alberto R.V.  
 1953a Estratigrafía de la Cuenca de México. *Memoria del Congreso Científico Mexicano, 3*: 172–186.  
 1953b Datos geológicos sobre la antigüedad del hombre en la Cuenca de Méjico. *Memoria del Segundo Congreso Mexicano de Ciencias Sociales, V* (sobretiro): 213–219.
- BARBA PINGARRÓN, Luis Alberto  
 1995 *El impacto en la paleogeografía de Teotihuacán*. Tesis doctoral. Facultad de Filosofía y Letras. División de Estudios de Posgrado. Universidad Nacional Autónoma de México. 92 p.
- BERNAL, Juan Pablo, Matthew LACHNIET, Malcolm MCCULLOCH, Graham MORTIMER, Pedro MORALES and Edith CIENFUEGOS  
 2011 A speleothem record of Holocene climate variability from southwestern Mexico. *Quaternary Research, 75*: 104–113.
- BIRKELAND, Peter W.  
 1984 *Soils and geomorphology*. Oxford University Press, New York. USA, 372 pp.  
 1990 Soil-geomorphic research. A selective overview. *Geomorphology, 3*: 207–224.
- BOND, G., W. BROECKER, S. JOHNSEN, J. MCMANUS, L. LABEYRIE, J. JOUZEL and G. BONANI  
 1993 Correlations between climate records from North Atlantic sediment and Greenland ice. *Nature, 365*: 143–147.
- BOREJSZA, Aleksander  
 2005 Evolución de las Barrancas Tlaxcaltecas durante el Holoceno: Registros aluviales del cambio climático y el uso agrícola de las laderas. *Symposium Interdisciplinario Cambios Ambientales Recientes y Pasados en el Estado de Tlaxcala*. Beatriz Ortega Guerrero y Gloria Vilaclara Fatjó (Eds.). División de Investigación y Posgrado, FES-IZTACALA UNAM y Unión Mexicana para Estudios del Cuaternario (UMEC), pp. 17–18.  
 2006 *Agricultural slope management and soil erosion in Tlaxcala, Mexico*. Ph.D dissertation. University of California, Los Angeles. 564 pp.
- BOREJSZA, Aleksander and Charles D. FREDERICK  
 2008 Fluvial response to Holocene climate change in low-order streams of central Mexico. *Journal of Quaternary Science*.
-

**C.S. Berkovich**

---

- BOREJSZA, Aleksander, Isabel RODRÍGUEZ LÓPEZ, Charles D. FREDERICK and Mark D. BATEMAN  
2008 Agricultural slope management and soil erosion at La Laguna, Tlaxcala, Mexico. *Journal of Archaeological Science*, **35**: 1854–1866.
- BRADBURY, J. Platt  
1971 Paleolimnology of Lake Texcoco. Evidence from diatoms. *Limnology and Oceanography*, **16**: 180–200.  
1989 Late Quaternary lacustrine paleoenvironments in the Cuenca de México. *Quaternary Science Review*, **8**: 75–100.  
2000 Limnologic history of Lago de Pátzcuaro, Michoacán, Mexico for the past 48,000 years: impacts of climate and man. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **163**: 69–95.
- BRYAN, Kirk  
1948 Los suelos complejos y fósiles de la altiplanicie de México en relación a los cambios climáticos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **XIII**: 1–20.  
1953 Comentario e intento de correlación con la cronología glacial. *Memoria del Segundo Congreso Mexicano de Ciencias Sociales*, **V** (sobretiro): 220–225.
- BUTZER, Karl W.  
1982 *Archaeology as human ecology: Method and theory for a contextual approach*. Cambridge University Press, New York. 364 pp.
- CABADAS BÁEZ, Héctor Víctor  
2007 *Paleosuelos del Centro de México como indicadores de cambios ambientales ocurridos durante los últimos 30,000 años*. Tesis de Maestría, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. 105 pp.
- CABALLERO-MIRANDA, Margarita E.  
1997 Reconstrucción paleolimnológica del Lago de Chalco, México, durante el Último Máximo Glacial. El registro de diatomeas entre 34,000 y 15,000 años A.P. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **14** (1): 91–100.
- CABALLERO, Margarita and Beatriz ORTEGA GUERRERO  
1998 Lake levels since about 40,000 years ago at Lake Chalco, near Mexico City. *Quaternary Research*, **50**: 69–79.
- CABALLERO, Margarita, Socorro LOZANO, Beatriz ORTEGA, Jaime URRUTIA and Jose Luis MACIAS  
1999 Environmental characteristics of Lake Tecocomulco, northern basin of Mexico, for the last 50,000 years. *Journal of Paleolimnology*, **22**: 399–411.
- CABALLERO, M., G. VILA CLARA, A. RODRÍGUEZ and D. JUÁREZ  
2001 Short term climatic change in lake sediments from Lake Alchichica, Cuenca Oriental, México. *Geofísica Internacional*, **33**: 201–220.
- CANUL MONTAÑEZ, Mirna Ethel  
2008 *Reconstrucción paleoclimática (Cuaternario Tardío) de la porción occidental del Valle de Tehuacán, Puebla, México: estudio palinológico*. Tesis de maestría. Instituto de Ecología. Universidad Nacional Autónoma de México. 79 pp.
- CARRASCO-NÚÑEZ, Gerardo, Lee SIEBERT, R. DÍAZ, Lorenzo VÁZQUEZ, Lucía CAPRA  
2009 Evolution and hazards of a long-quiescent compound shield-like volcano: Cofre de Perote, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.08.010.

- 
- CARBONELL, Eudald (Coord.)  
 2005 *Homínidos: Las primeras ocupaciones de los continentes*. Editorial Ariel, Barcelona, España. 780 pp.
- CASTILLA, M.E. y J.D. TEJERO  
 1987 Flora y vegetación del Cerro Gordo (San Juan Teotihuacan) y regiones aledañas, Valle de México. *Biótica*, **12** (4): 231–255.
- CASTILLO CERÓN, Jesús Martín, Miguel Ángel CABRAL PERDOMO y Víctor BRAVO CUEVAS  
 2005 Vertebrados cuaternarios de la región Puebla-Tlaxcala. *Symposium Interdisciplinario Cambios Ambientales Recientes y Pasados en el Estado de Tlaxcala*. Beatriz Ortega Guerrero y Gloria Vilaclara Fatjó (Eds.). División de Investigación y Posgrado, FES-IZTACALA UNAM y Unión Mexicana para Estudios del Cuaternario (UMEC), pp. 11–12.
- CATT, J.A.  
 1986 Relict properties in soils of the central and north-west european temperate region. *Catena Supplement*, **16**: 41–58.  
 1990 Paleopedology manual. *Quaternary International*, **6**: 1–95.
- CHARLTON, Rosemary  
 2008 *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge, New York. 234 pp.
- CÓRDOVA, Carlos E. and Jeffrey R. PARSONS  
 1997 Geoarchaeology of an aztec dispersed village on the Texcoco piedmont of central Mexico. *Geoarchaeology: An International Journal*, **12** (3): 177–210.
- CORNWALL, I.W.  
 1970 Geology and Early Man in Central Mexico. *American Antiquity*, **49**: 379–391.
- COVICH, A. and M. STUIVER  
 1974 Changes in oxygen 18 as a measure of long-term fluctuations in tropical lake levels and molluscan populations. *Limnology and Oceanography*, **19**: 682–691.
- DINCAUZE, Dena Ferran  
 2000 *Environmental archaeology. Principles y practice*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 587 pp.
- DOKUCHAEV, Vasiliy Vasilevich  
 1883 *Russkiy chernozem*. (en ruso) Russkaya kollektziya, edición 2008. 480 pp.
- ERFFA, Axel von, Wolfgang HILGER, Klaus KNOBLICH y Richard WEYL  
 1976 Geología de la cuenca alta de Puebla-Tlaxcala y sus contornos. Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica, *Comunicaciones*, **13**: 99–118.
- FANNING, Delvin S. and Mary C.B. FANNING  
 1989 *Morphology, genesis, and classification*. John Wiley and Sons. New York. USA. 395 pp.
- FAO-UN  
 2006 *World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication*. World Soil Resources Reports 103. Rome. 132 pp.
- GARCÍA, E.  
 1968 Clima actual de Teotihuacan. *Materiales para la arqueología de Teotihuacan*, J.L. Lorenzo (Ed.). Instituto Nacional de Antropología e Historia. pp. 10–27.
-

**C.S. Berkovich**

---

- 1988 *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. 3ra. edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, 217 p.
- GARCÍA-BÁRCENA, Joaquín  
2007 La Cuenca de México. Etapa Lítica (30 000 a 2 000 a.C.). Los primeros pobladores. *Arqueología Mexicana*, **XV (86)**: 30–33.
- GARCÍA COOK, Ángel  
1973 Una punta acanalada en el Estado de Tlaxcala, México. Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica, *Comunicaciones*, **9**: 39–42.
- GASSE, Françoise  
1980 Flore des diatomées lacustres Plio-Pléistocènes du Gadeb (Éthiopie) –système, paléoécologie, biostratigraphie. *Revue Algologique*, Memoire hors-série, **3**, 249 p.
- GERRARD, John  
1987 (Ed.) *Alluvial soils*. Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York. 305 pp.  
1992 *Soil geomorphology. An integration of pedology and geomorphology*. Chapman and Hall, London. G. B. 269 pp.
- GONZÁLEZ, S., J.C. JIMÉNEZ-LÓPEZ, R. HEDGES, D. HUDDART, J.C. OHMAN, R. TURNER & J.A. POMPA Y PADILLA  
2003 Earliest humans in the Americas: New evidence from Mexico. *Journal of Human Evolution*, **44**: 379–387.
- GONZÁLEZ QUINTERO, Lauro y M.M. FUENTES  
1980 El Holoceno en la porción central de la cuenca del Valle de México. *Memorias del III Coloquio sobre Paleobotánica y Palinología*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. *Colección Científica*, **86**: 195–200.
- GUENTHER, Ekke W. y Horst BUNDE  
1973 Las investigaciones geológicas y paleontológicas en México durante los años de 1965 a 1969. Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica, *Comunicaciones*, **7**: 19–21.
- HAYNES, Jr., C. Vance  
2008 Younger Dryas “black mats” and the Rancholabrean termination in North America. The National Academy of Sciences of the USA. *PNAS*, **105 (18)**: 6520–6525.
- HEINE, Klaus  
1973 Variaciones más importantes del clima durante los últimos 40,000 años en México. Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica, *Comunicaciones*, **7**: 51–58.  
1975 *Studien zur Jungquartären Glazialmorphologie Mexikanischer Vulkane, mit einem Ausblick auf die Klimageschichte*. Steiner. 178 pp.  
1984 Comment on “Pleistocene glaciation of Volcano Ajusco, Central Mexico, and comparison with the standard mexican glacial sequence by Sidney E. White and Salvatore Valastro, Jr”. *Quaternary Research*, **22**: 242–246.  
1994 The late-glacial moraine sequences in Mexico: Is there evidence for the Younger Dryas event? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **112**: 113–123.

- 
- HERNÁNDEZ, J.I.  
2007 *Geología y geomorfología de la región de los yacimientos de obsidiana de Otumba en el sector norte de la Sierra Nevada de México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- HOLLIDAY, Vance T.  
1985 Early and Middle Holocene Soils at the Lubbock Lake archaeological site, Texas, *Catena*, **12**: 61–78.  
1992 *Soils in archaeology. Landscape evolution and human occupation*. Smithsonian Institution Press, 254 pp.
- JENNY, Hans  
1941 *Factors of soil formation. A system of quantitative pedology*. McGraw-Hill Book Company. 281 pp.
- KLINK, Hans-Jürgen.  
1973 La división de la vegetación natural en la región Puebla- Tlaxcala. Proyecto Puebla-Tlaxcala. Fundación Alemana para la Investigación Científica, *Comunicaciones*, **7**: 25–31.
- KRAMER, K. und H. LANGE-BERTALOT  
1991 Süßwassweflora von Mitteleuropa. Gustav Fisher Verlag. *Bacillariophyceae*, **2/1**: 876 pp.; **2/2**: 596 pp.; **2/3**: 576 pp., **2/4**: 437 pp.
- KRAUS, Mary J., and A. ASLAN  
1999 Paleosol sequences in floodplain environments: A hierarchical approach. M. Thiry and R.S. Coincon (Eds.), *Palaeoweathering, palaeosurfaces and related continental deposits*. *International Association of Sedimentologists*, Special Publication, **27**: 303–321.
- KRAUS, Mary J.  
2002 Basin-scale changes in floodplain paleosols: Implications for interpreting alluvial architecture. *Journal of Sedimentary Research*, **72** (4): 500-509.
- LACHNIET, Matthew S. and Lorenzo VÁZQUEZ-SELEM  
2005 Last Glacial Maximum equilibrium line altitudes in the circum-Caribbean (Mexico, Guatemala, Costa Rica, Colombia, and Venezuela). *Quaternary International*, **138-139**: 129–144.
- LAUER, Wilhelm y Eckart STIEHL  
1973 La clasificación del clima en la región Puebla-Tlaxcala. Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica, *Comunicaciones*, **7**: 31–35.
- LAUER, Wilhelm  
1979 Medio ambiente y desarrollo cultural en la región Puebla-Tlaxcala. Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica, *Comunicaciones*, **16**: 29–54.
- LERMO-SAMANIEGO, Javier e Isabel BERNAL-ESQUIA  
2006 Zonificación sísmica del estado de Tlaxcala, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, número especial de geología urbana, **LVIII** (2): 215–221.
- LORENZO, José Luis  
1956 Notas sobre la arqueología y cambios climáticos en la Cuenca de México. *La Cuenca de México. Consideraciones geológicas y arqueológicas*. Federico Mooser, Sidney E. White y José Luis Lorenzo (Coords.). Dirección de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D. F. pp. 29–51.
-

**C.S. Berkovich**

---

- 1958 Una hipótesis paleoclimática para la cuenca de México. *XXXI Congreso Internacional de Americanistas*. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 579–84.
- LOUNEJEVA BATURINA, E., P. MORALES PUENTE, H.V. CABADAS BÁEZ, E. CIENFUEGOS ALVARADO, S. SEDOV, E. VALLEJO GÓMEZ and E. SOLLEIRO REBOLLEDO  
2006 Late Pleistocene to Holocene environmental changes from  $\delta^{13}\text{C}$  determinations in soils at Teotihuacan, Mexico. *Geofísica Internacional*, **45** (2): 85–98.
- LOUNEJEVA BATURINA, E., P. MORALES PUENTE, E. CIENFUEGOS ALVARADO, S. SEDOV and E. SOLLEIRO REBOLLEDO  
2007 Late Quaternary environment in the Teotihuacan Valley, México, inferred from  $\delta^{13}\text{C}$  in soils. *SAS Bulletin*, **30** (1): 6–11.
- LOZANO-GARCÍA, María del Socorro, Beatriz ORTEGA-GUERRERO, Margarita CABALLERO-MIRANDA and Jaime URRUTIA-FUCUGAUCHI  
1993 Late Pleistocene and Holocene paleoenvironments of Chalco Lake, Central Mexico. *Quaternary Research*, **40**: 332–342.
- LOZANO-GARCÍA, María del Socorro and Beatriz ORTEGA-GUERRERO  
1994 Palynological and magnetic susceptibility records of Lake Chalco, central Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **109**:177–191.
- 1998 Late Quaternary environmental changes of the central part of the Basin of Mexico; correlation between Texcoco and Chalco basins. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **99**: 77–93.
- LOZANO-GARCÍA, M.S., M.S. XELHUANTZI-LÓPEZ y E. MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ  
1996 Metodología, alcances y limitaciones del análisis palinológico del Cuaternario en México. *Investigaciones recientes en paleobotánica y palinología*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. *Colección Científica*, **294**: 77–90.
- LOZANO-GARCÍA, María del Socorro and María Susana XELHUANTZI-LÓPEZ  
1997 Some problems in the Late Quaternary pollen records of central Mexico: Basins of Mexico and Zacapu. *Quaternary International*, **43/44**: 117–123.
- LOZANO-GARCÍA, Socorro and Lorenzo VÁZQUEZ-SELEM  
2005 A high-elevation Holocene pollen record from Iztaccíhuatl volcano, central Mexico. *The Holocene*, **15** (3): 299–338.
- MACPHAIL, Richard I. and Joseph M. MCAVOY  
2008 A micromorphological analysis of stratigraphic integrity and site formation at Cactus Hill, an Early Paleoindian and hypothesized Pre-Clovis occupation in south-central Virginia, USA. *Geoarchaeology: An International Journal*, **23** (5): 675–694.
- MARTÍNEZ LÓPEZ, Leticia, M. Rosario FERNÁNDEZ BARAJAS y Arnulfo REYES MATA  
2005 Vertebrados fósiles de la Barranca Huexoyucan, Tlaxcala. *Symposium Interdisciplinario Cambios Ambientales Recientes y Pasados en el Estado de Tlaxcala*. Beatriz Ortega Guerrero y Gloria Vilaclara Fatjó (Eds.). División de Investigación y Posgrado, FES-IZTACALA UNAM y Unión Mexicana para Estudios del Cuaternario (UMEC), pp. 35–38.
- MCCLUNG DE TAPIA, Emily, Elizabeth SOLLEIRO-REBOLLEDO, Jorge GAMA-CASTRO, José Luis VILLALPANDO and Sergey SEDOV  
2003 Paleosols in the Teotihuacan valley, Mexico: evidence for paleoenvironment and human impact. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **20** (3): 270–282.

- 
- MEHRA, O.P. and M.L. JACKSON  
 1960 Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate buffer. *Clays and Clay Minerals*, **7**: 317–327.
- METCALFE, Sarah E., Sarah L. O'HARA, Margarita CABALLERO and Sarah J. DAVIES  
 2000 Records of Late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico: A review, *Quaternary Science Reviews*, **19**: 699–721.
- MOOSER, Federico  
 1956 Consideraciones geológicas acerca de la formación del Lago de Texcoco. *La Cuenca de México. Consideraciones geológicas y arqueológicas*. Federico Mooser, Sidney E. White y José Luis Lorenzo (Coords.). Dirección de Prehistoria, Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D. F. pp. 9–18.  
 1975 Historia geológica de la Cuenca de México. *Memorias de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal*, Departamento del Distrito Federal, Tomo I, pp. 7–38.
- MOOSER, Federico y Francisco GONZÁLEZ RUL  
 1961 Erupciones volcánicas y el hombre primitivo en la Cuenca de México. *Homenaje a Pablo Martínez del Río*. XXV Aniversario. Los orígenes americanos. pp. 137-141.
- MOOSER, F., A. MONTIEL y A. ZÚÑIGA  
 1996 Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla: Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos. *Comisión Federal de Electricidad 1937-1996*, México. Carta Texcoco (5b).
- MORRISON, R.B.  
 1978 Quaternary soil stratigraphy concepts, methods, and problems. W.C. Mahanay (Ed.). *Quaternary Soils: GeoAbstracts*, pp. 77–108.
- Munsell  
 2000 *Munsell soil color charts*. Greta G. Macbeth. New Windsor, N.Y.
- NIEDERBERGER, Christine Betton  
 1969 Paleocología humana y playas lacustres post-pleistocénicas en Tlapacoya.. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D. F. *Boletín I.N.A.H.*, **37**:19–24.
- OHNGEMACH, Dieter  
 1973 Análisis polínico de los sedimentos del Pleistoceno Reciente y del Holoceno en la región Puebla-Tlaxcala. Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica. *Comunicaciones*, **7**: 47–49.
- OHNGEMACH, Dieter and Herbert STRAKA  
 1978 La historia de la vegetación en la región Puebla-Tlaxcala durante el Cuaternario Tardío. Proyecto Puebla-Tlaxcala, Fundación Alemana para la Investigación Científica. *Comunicaciones*, **15**: 189–204.
- O'LEARY, M.H.  
 1988 Carbon isotopes in photosynthesis. *Bioscience*, **38**: 328–336.
- ORTEGA-GUERRERO, B. and J. URRUTIA-FUCUGAUCHI  
 1997 A palaeomagnetic secular variation record from Late Pleistocene-Holocene lacustrine sediments from Chalco Lake, Basin of Mexico. *Quaternary International*, **43/44**: 87–96.
-

**C.S. Berkovich**

---

- ORTEGA-GUERRERO, Beatriz and Anthony J. NEWTON  
1998 Geochemical characterization of Late Pleistocene and Holocene tephra layers from the Basin of Mexico, Central Mexico. *Quaternary Research*, **50**: 90–106.
- ORTEGA-GUERRERO, B., R. THOMPSON and J. URRUTIA-FUCUGAUCHI  
2000 Magnetic properties of lake sediments from lake Chalco, central Mexico, and their paleoenvironmental implications. *Journal of Quaternary Sciences*, **15**: 127–140.
- ORTEGA-GUERRERO, Beatriz, Sergey SEDOV, Elizabeth SOLLEIRO-REBOLLEDO and Ana SOLER  
2004 Magnetic mineralogy in Barranca Tlalpan exposure paleosols, Tlaxcala, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **21**(1): 120–132.
- PATRICK, R. and C.W. REIMER  
1966 *The diatom flora of the United States*. Vols. I and II/1. Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia No. 13. 688 pp.
- PÉREZ PÉREZ, Julia  
2007 *Agricultura en terrazas en el cerro San Lucas, Valle de Teotihuacán*. Famsi. 15 pp.
- PINSON, Ariane O.  
2008 Geoarchaeological context of Clovis and Western Stemmed Tradition sites in Dietz Basin, Lake County, Oregon. *Geoarchaeology: An International Journal*, **23** (1):63–106.
- QUADE, Jay, Richard M. FORESTER, William L. PRATT and Claire CARTER  
1998 Black mats, Spring-Red streams, and Late-Glacial-Age recharge in southern Great Basin *Quaternary Research*, **49**: 129–148.
- RETALLACK, Gregory J.  
1983 A paleopedological approach to the interpretation of terrestrial sedimentary rocks: the mid-Tertiary paleosols of Badlands National Park, South Dakota. *Geological Society of America Bulletin*, **94**: 823–840.  
1984 Trace fossils of burrowing beetles and bees in an Oligocene paleosol, Badlands National Park, South Dakota. *Journal of Paleontology*, **58**: 571–592.  
1990 *Soils of the past. An introduction to paleopedology*. Blackwell Science. U. K. 404 pp.
- RIVAS ORTIZ, Jorge Francisco  
2003 *Propiedades magnéticas de los paleosuelos cuaternarios del Nevado de Toluca y su aplicación en la reconstrucción paleoambiental*. Tesis de maestría, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 135 pp.
- RIVAS, Jorge, Sergey SEDOV, Elizabeth SOLLEIRO and Anne SOLER  
2004 Magnetic mineralogy in Barranca Tlalpan exposure paleosols, Tlaxcala, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **21** (1): 120–132.
- RIVAS, Jorge, Beatriz ORTEGA, Sergey SEDOV, Elizabeth SOLLEIRO and Svetlana SYCHERA  
2006 Rock magnetism and pedogenetic processes in Luvisol profiles: Examples from Central Russia and Central Mexico. *Quaternary International*, **156-157**: 213–223.
- RIVERA-URIA, Ma. Yazmín, Sergey SEDOV, Elizabeth SOLLEIRO-REBOLLEDO, Julia PÉREZ-PÉREZ, Emily MCCLUNG, Alfredo GONZÁLEZ y Jorge GAMA-CASTRO  
2007 Degradación ambiental en el valle Teotihuacan: evidencias geológicas y paleopedológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **59** (2): 203-217.

- 
- RIVERA URIA, Maria Yazmin  
2009 *Impacto del desarrollo cultural prehispánico en la cubierta edáfica del Valle de Teotihuacán*. Tesis de maestría, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. 124pp.
- RODRÍGUEZ RAMÍREZ, Alejandro  
2002 *Aspectos paleolimnológicos de la historia reciente del lago La Preciosa, Puebla*. Instituto de Investigaciones en Ciencias del Mar y Limnología. Tesis de maestría. UNAM. 75 pp.
- RUHE, R.V. and W.H. SCHOLTES  
1956 Ages and development of soil landscapes in relation to climatic and vegetational change in Iowa. *Soil Science Society of America Proceedings*, **20**: 264–273.
- RUHE, R.V.  
1965 Quaternary paleopedology. *Quaternary of the United States*, H.E. Wright and D.G. Frey (Eds.). Princeton University Press. pp. 755–764.
- RZEDOWSKI, Jerzy  
1978 *Vegetación de México*. Limusa, México, D.F. 432 pp.
- SÁENZ DE RIVAS, Concepción  
1978 *Polen y esporas. Introducción a la palinología y vocabulario palinológico*. H. Blume Ediciones. Madrid, España. 219 pp.
- SCHAETZL, Randall and Sharon ANDERSON  
2005 *Soils. Genesis and geomorphology*. Cambridge University Press. New York. USA. 817 pp.
- SCHLICHTING, E. und H.P. BLUME  
1966 *Bodenkundliches Praktikum*. Verlag Paul Parey, Hamburg. 134 pp.
- SEDOV, S., E. SOLLEIRO-REBOLLEDO, J. GAMA-CASTRO, E. VALLEJO-GÓMEZ and A. GONZÁLEZ-VELÁZQUEZ  
2001 Buried paleosols of the Nevado de Toluca: an alternative record of Late Quaternary environmental change in Central Mexico. *Journal of Quaternary Science*, **16(4)**: 375–389.
- SEDOV, Sergey, Elizabeth SOLLEIRO-REBOLLEDO, Pedro MORALES-PUENTE, Angélica ARIAS-HERRÍA, Ernestina VALLEJO-GÓMEZ and Carolina JASSO-CASTAÑEDA  
2003 Mineral and organic components of the buried paleosols of the Nevado de Toluca, Central Mexico, as indicators of paleoenvironments and soil evolution. *Quaternary International*, **106-107**: 169–184.
- SEDOV, Sergey y Elizabeth SOLLEIRO  
2005 Paleosuelos pleistocénicos de Tlaxcala; ¿Qué nos dicen sobre la dinámica ambiental? *Symposium Interdisciplinario Cambios Ambientales Recientes y Pasados en el Estado de Tlaxcala*. Beatriz Ortega Guerrero y Gloria Vilaclara Fatjó (Eds.). División de Investigación y Posgrado, FES-IZTACALA UNAM y Unión Mexicana para Estudios del Cuaternario (UMEC), pp. 15–16.
- SEDOV, Sergey  
2006 Barranca Tlalpan. *IVth International Symposium on Deteriorated Volcanic Soils (ISVO'06). Field Excursion Guide Part II*, Commission of the European Union, 54 pp.
- SEDOV, Sergey, Elizabeth SOLLEIRO-REBOLLEDO, Birgit TERHORST, Jesús SOLÉ, María de Lourdes FLORES-DELGADILLO, Gerd WERNER and Thomas POETSCH  
2009 The Tlaxcala basin paleosol sequence: a multiscale proxy of the middle to late Quaternary environmental change in central Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **26 (2)**: 448–465.
-

**C.S. Berkovich**

---

- SEDOV, Sergey, Socorro LOZANO-GARCÍA, Elizabeth SOLLEIRO-REBOLLEDO, Emily MCCLUNG DE TAPIA, Beatriz ORTEGA-GUERRERO and Susana SOSA-NÁJERA  
2010 Tepexpan revisited: A multiple proxy of local environmental changes in relation to human occupation from a paleolake shore section in Central Mexico. *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2009.09.003
- SIEBE, Christina, Reinhold JAHN y Karl STAHR  
1996 *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Publicación Especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México. 57 pp.
- SIEBE, Claus and José Luis MACÍAS  
2004 *Volcanic hazards in the Mexico City metropolitan area from eruptions at Popocatepetl, Nevado de Toluca, and Jocotitlán stratovolcanoes and monogenetic scoria cones in the Sierra Chichinautzin Volcanic Field*. Field Guide, Penrose Conference, Neogene-Quaternary Continental Margin Volcanism, January 2004, State of Puebla, México. Geological Society of America, 77 p.
- SMITH, Grant D. and Michael MCFEAL  
1997 Paleoenvironmental and geoarchaeologic implications of late Quaternary sediments and paleosols: north-central to southwestern San Juan Basin, New Mexico. *Geomorphology*, **21**: 107–138.
- SOLIS CASTILLO, Berenice  
2010 *Toposecuencia de suelos volcánicos como herramienta para la reconstrucción paleoambiental del Cuaternario Tardío en Tlaxcala*. Tesis de maestría. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. 178 pp.
- SOLLEIRO-REBOLLEDO, E., S. SEDOV, J. GAMA-CASTRO, D. FLORES ROMÁN and G. ESCAMILLA-SARABIA  
2003 Paleosol-sedimentary sequences of the Glacis de Buenavista, central Mexico: interaction of Late Quaternary pedogenesis and volcanic sedimentation. *Quaternary International*, **106-107**: 185–201.
- SOLLEIRO-REBOLLEDO, Elizabeth, José Luis MACÍAS, Jorge GAMA-CASTRO, Sergey SEDOV and Leopold D. SULERZHITSKY  
2004 Quaternary pedostratigraphy of the Nevado de Toluca volcano. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **21 (1)**: 101–109.
- SOLLEIRO, Elizabeth y Sergey SEDOV  
2005 Perfiles de paleosuelos de las localidades de Tlalpan y Mamut, Tlaxcala. *Symposium Interdisciplinario Cambios Ambientales Recientes y Pasados en el Estado de Tlaxcala*. Beatriz Ortega Guerrero y Gloria Vilaclara Fatjó (Eds.). División de Investigación y Posgrado, FES-IZTACALA UNAM y Unión Mexicana para Estudios del Cuaternario (UMEC), pp. 39–59.
- SOLLEIRO-REBOLLEDO, Elizabeth, Sergey SEDOV, Emily MCCLUNG DE TAPIA, Héctor CABADAS, Jorge GAMA-CASTRO and Ernestina VALLEJO-GÓMEZ  
2006 Spatial variability of environment change in the Teotihuacan Valley during the Late Quaternary: Paleopedological inferences. *Quaternary International*, **156-157**: 13–31.
- SOLLEIRO-REBOLLEDO, E., S. SYCHEVA, S. SEDOV, E. MCCLUNG DE TAPIA, Y. RIVERA-URIA, C. SALCIDO-BERKOVICH, A. KUZNETSOVA  
2011 Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, México: Responses to Late Quaternary environmental changes, *Quaternary International*, doi:10.1016/j.quaint.2010.08.005

- 
- STRAKA, Herbert and Dieter OHNGEMACH  
 1989 Late Quaternary vegetation of the Mexican Highland. *Plant Systematics and Evolution*, **162**: 115–132.
- TARGULIAN, Victor O. and Sergey V. GORYACHKIN  
 2004 Soil memory: Types of records, carriers, hierarchy and diversity. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **21** (1): 1–8.
- 2008 (Red.) *Pamyat' pochv. Pochva kak pamyat' biosferno-geosferno-antroposfern'ix vzaimodeystviy*. Rossiyskaya Akademiya Nauk. Institut Geografii. 687 c. (en ruso).
- TERRA, Helmut de  
 1947 Preliminary note on the discovery of fossil man at Tepexpan in the Valley of Mexico. *American Antiquity*, **13** (1): 40–44.
- 1948 Historia del Valle de Méjico en las postrimerías del Cuaternario en relación con el hombre prehistórico (Resumen). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, **XIII**: 77–79.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., M.S. LOZANO-GARCÍA, B. ORTEGA-GUERRERO, M. CABALLERO-MIRANDA, R. HANSEN, H. BOEHNEL and J.F.W. NEGENDANK  
 1994 Paleomagnetic and paleoenvironmental studies in the southern Basin of Mexico-I. Volcanosedimentary sequence and basin structure of Chalco Lake. *Geofísica Internacional*, **33**: 421–430.
- URRUTIA-FUCUGAUCHI, J., M.S. LOZANO-GARCÍA, B. ORTEGA-GUERRERO and M. CABALLERO-MIRANDA  
 1995 Paleomagnetic and paleoenvironmental studies in the southern Basin of Mexico-II. Late Pleistocene- Holocene Chalco Lake record. *Geofísica Internacional*, **34**: 33–53.
- VÁZQUEZ E., R. y P. JAIMES  
 1989 Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, **28** (2): 133–189.
- VÁZQUEZ Selem, Lorenzo and Klaus HEINE  
 2004 Late Quaternary glaciations of Mexico. *Quaternary Glaciations – Extent and Chronology. Part III: South America, Asia, Africa, Australia, Antarctica*, J. Ehlers and P.L. Gibbard (Eds.), pp. 233–242.
- VÁZQUEZ-SELEM, Lorenzo  
 2005 Las glaciaciones en el centro de México: Estado del conocimiento. *Symposium Interdisciplinario Cambios Ambientales Recientes y Pasados en el Estado de Tlaxcala*. Beatriz Ortega Guerrero y Gloria Vilaclara Fatjó (Eds.). División de Investigación y Posgrado, FES-IZTACALA UNAM y Unión Mexicana para Estudios del Cuaternario (UMEC), p. 5.
- WATERS, Michael R.  
 1992 *Principles of geoarchaeology. A north american perspective*. The University of Arizona Press, Tucson. 1996 edition. 399 pp.
- WHITE, Sidney E.  
 1962 El Iztaccíhuatl. Acontecimientos volcánicos y geomorfológicos en el lado oeste durante el Pleistoceno Superior. Instituto Nacional de Antropología e Historia. *Investigaciones*, **6**, 80 pp.
- WHITE, S. and S. VALASTRO  
 1984 Pleistocene glaciation of volcano Ajusco, central Mexico, and comparison with standard mexican glacial sequence. *Quaternary Research*, **21**: 21–35.
-

**C.S. Berkovich**

---

YAALON, D.H.

- 1971 (Ed.) *Paleopedology: Origin, nature and dating of paleosols*. International Society for Soil Science and Israel University Press, Jerusalem.
- 1975 Conceptual models in pedogenesis. Can soil-forming functions be solved? *Geoderma*, **14**: 189–205.