



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**SUELOS Y EDAFOSEDIMENTOS EN BOLSAS KÁRSTICAS:
EVIDENCIA DE PEDOGÉNESIS Y ACTIVIDADES ANTRÓPICAS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

P R E S E N T A:

DANIELA FERNANDA VARGAS RODRÍGUEZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. SERGEY SEDOV**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2018



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.

Datos de la alumna

Daniela Fernanda Vargas Rodríguez

308106363

Licenciatura en Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias, UNAM

Datos del Tutor

Dr. Sergey Sedov

Instituto de Geología, UNAM

Datos de los sinodales

1. Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo
Facultad de Ciencias, UNAM

2. Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez
Universidad Autónoma del Estado de México

3. Dra. Berenice Solís Castillo
Escuela Nacional de Estudios Superiores – Campus Morelia, UNAM

4. Dr. Rafael Antonio López Martínez
Facultad de Ciencias, UNAM

Datos del escrito

Suelos y edafosedimentos en bolsas kársticas: evidencia de pedogénesis y actividades
antrópicas

54 p

2018

Dedicada a mi familia y amigos, pero sobre todo a María

Agradecimientos

Agradezco a la Facultad de Ciencias y a la Licenciatura en Ciencias de la Tierra por darme la oportunidad de estudiar en sus instalaciones y absorber un poco de todo el conocimiento impartido en la carrera.

Al proyecto PAPIIT IN103617 “Coevolución de la cubierta edáfica en los geosistemas kársticos de Yucatán: un enfoque integral”, por el financiamiento otorgado.

Al Dr. Sergey Sedov y la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo por su dedicación, esfuerzo, paciencia y tiempo empleado en guiar a sus alumnos, gracias por todo su apoyo, guía y consejos. ¡Gracias por permitirme integrar a su grupo de investigación!

Al M. en C. Jaime Díaz Ortega, a la Dra. Teresa Pi Puig, al Sr. Jorge René Alcalá Martínez por su apoyo en la realización de los análisis de suelo y al Instituto de Geología por permitirme el uso de sus instalaciones durante la realización de este proyecto.

A los miembros del jurado: Dr. Sergey Sedov, Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez, Dra. Berenice Solís Castillo y Dr. Rafael Antonio López Martínez por tomarse el tiempo y todos sus consejos e ideas para la culminación de este proyecto.

Al grupo de Paleosuelos, gracias por sus consejos, apoyo y paciencia, sobre todo durante los seminarios 😊. Jaime, gracias por siempre estar dispuesto a ayudarnos, sin tus conocimientos, consejos y explicaciones hubiera demorado años en comenzar a escribir y sin tus chistes, chismes e historias no hubiera sido tan divertido.

A mi familia, pero sobre todo a María, madre, sin tu inagotable fuerza todo habría sido diferente, gracias por siempre estar creando un mundo con mejores condiciones para mi y mis hermanos y enseñarme a seguir adelante pese a todo y con la mejor actitud posible. La culminación de cada ciclo, las oportunidades y cada instante de felicidad en nuestras vidas es resultado de todo tu esfuerzo.

Y, por último, Abel, Tulti, Luis, Velita y Kenn gracias amigos por acompañarme a lo largo de tantos años de estudio, por estar en todo momento, por sus conversaciones y consejos inapropiados que de alguna manera siempre resultan ser los más adecuados. A todos aquellos amigos que compartieron esta y otras etapas conmigo, gracias por ayudarme a quebrar burbujas 😊.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS..... | V |
| RESUMEN..... | 1 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 2 |
| 1.1 JUSTIFICACIÓN..... | 2 |
| 1.2 HIPÓTESIS..... | 3 |
| 1.3 OBJETIVO GENERAL..... | 3 |
| 1.4 OBJETIVOS PARTICULARES..... | 3 |
| 2. MARCO TEÓRICO..... | 4 |
| 2.1 EL CLIMA DEL HOLOCENO..... | 4 |
| 2.2 EL CLIMA DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN..... | 4 |
| 2.3 POBLAMIENTO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN..... | 5 |
| 2.4 SISTEMA KÁRSTICO..... | 6 |
| 2.5 SUELOS DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN..... | 7 |
| 3. ÁREA DE ESTUDIO..... | 9 |
| 3.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA..... | 9 |
| 3.2 GEOLOGÍA DE LA REGIÓN..... | 9 |
| 3.3 GEOMORFOLOGÍA Y RELIEVE..... | 10 |
| 3.4 SUELOS..... | 10 |
| 3.5 HIDROLOGÍA..... | 10 |
| 3.6 CLIMA..... | 11 |
| 3.7 VEGETACIÓN..... | 11 |
| 4. METODOLOGÍA..... | 13 |
| 4.1 TRABAJO DE CAMPO Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS..... | 13 |
| 4.2 LÁMINAS DELGADAS PARA MICROMORFOLOGÍA..... | 13 |
| 4.3 ANÁLISIS DE LABORATORIO..... | 15 |
| 4.3.1 <i>Análisis de textura por el método de la pipeta</i> | 15 |
| 4.3.2 <i>Colorimetría</i> | 16 |
| 4.3.3 <i>Susceptibilidad magnética χ_{LF} y susceptibilidad dependiente de la frecuencia χ_{dF}°</i> | 17 |
| 4.3.4 <i>pH y conductividad eléctrica (CE)</i> | 18 |
| 4.3.5 <i>Contenido de materia orgánica y carbonatos</i> | 18 |
| 4.3.6 <i>Difracción de rayos X</i> | 19 |
| 4.4 DATACIONES..... | 20 |
| 4.5 FITOLITOS..... | 20 |
| 5. RESULTADOS..... | 21 |
| 5.1 CALICA 10..... | 22 |
| 5.1.1 <i>Micromorfología</i> | 23 |
| 5.1.2 <i>Análisis granulométrico</i> | 26 |
| 5.1.3 <i>Colorimetría</i> | 26 |
| 5.1.4 <i>Susceptibilidad magnética</i> | 27 |
| 5.1.5 <i>pH</i> | 28 |
| 5.1.6 <i>Conductividad eléctrica</i> | 28 |
| 5.1.7 <i>Contenido de materia orgánica y carbonatos</i> | 28 |
| 5.2 CALICA 11..... | 30 |
| 5.2.1 <i>Micromorfología</i> | 31 |
| 5.2.2 <i>Análisis granulométrico</i> | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 5.2.3 Colorimetría..... | 35 |
| 5.2.4 Susceptibilidad magnética..... | 36 |
| 5.2.5 pH..... | 36 |
| 5.2.6 Conductividad eléctrica..... | 37 |
| 5.2.7 Contenido de materia orgánica y carbonatos..... | 37 |
| 5.2.8 Difracción de rayos X..... | 38 |
| 5.3 CALICA 12..... | 40 |
| 5.3.1 Micromorfología..... | 40 |
| 5.3.2 Análisis granulométrico..... | 41 |
| 5.3.3 Colorimetría..... | 42 |
| 5.3.4 Susceptibilidad magnética..... | 42 |
| 5.3.5 pH y conductividad eléctrica..... | 43 |
| 5.3.6 Contenido de materia orgánica y carbonatos..... | 43 |
| 5.4 Fitolitos..... | 44 |
| 6. DISCUSIÓN..... | 45 |
| 6.1 CRONOLOGÍA DE PERFILES..... | 45 |
| 6.2 COMPARACIÓN ENTRE PERFILES..... | 45 |
| 6.3 CORRELACIÓN DE LOS PALEOSUELOS DE CALICA 10 Y 11..... | 46 |
| 6.4 MODELO DE GÉNESIS DE SUELO DENTRO DE LAS BOLSAS KÁRSTICAS..... | 48 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 51 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 52 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| FIGURA 1. PERFIL IDEALIZADO DEL SISTEMA KÁRSTICO, TOMADO DE ESTEBAN Y KAPPLA (1983)..... | 7 |
| FIGURA 2. LOCALIZACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO | 9 |
| FIGURA 3. A] MAPA DE SUELOS DOMINANTES EN EL ESTADO DE QUINTANA ROO. B] MAPA DE HIDROGRAFÍA DEL ESTADO DE QUINTANA ROO, TOMADOS DE (INEGI, 2017)..... | 11 |
| FIGURA 4. VEGETACIÓN DE LA ZONA..... | 12 |
| FIGURA 5. IMAGEN PANORÁMICA, CANTERA CALICA..... | 13 |
| FIGURA 6. FRAGMENTO DEL DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ARCILLAS, TOMADO DE USGS..... | 19 |
| FIGURA 7. UBICACIÓN DE LOS PERFILES EN EL PAISAJE | 21 |
| FIGURA 8. DESCRIPCIÓN DE CAMPO, PERFIL CALICA 10 | 22 |
| FIGURA 9. MICROMORFOLOGÍA, CALICA 10 | 26 |
| FIGURA 10. GRANULOMETRÍA, CALICA 10 | 26 |
| FIGURA 11. COLORIMETRÍA, CALICA 10..... | 27 |
| FIGURA 12. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA EN BAJA FRECUENCIA NORMALIZADA POR LA MASA Y LA SUSCEPTIBILIDAD DEPENDIENTE DE LA FRECUENCIA, CALICA 10 | 27 |
| FIGURA 13. PH, CALICA 10 | 28 |
| FIGURA 14. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, CALICA 10..... | 28 |
| FIGURA 15. MATERIA ORGÁNICA Y CARBONATOS, CALICA 10 | 29 |
| FIGURA 16. DESCRIPCIÓN DE CAMPO, PERFIL CALICA 11 | 30 |
| FIGURA 17. MICROMORFOLOGÍA, CALICA 11 | 34 |
| FIGURA 18. GRANULOMETRÍA, CALICA 11 | 35 |
| FIGURA 19. COLORIMETRÍA, CALICA 11..... | 35 |
| FIGURA 20. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA EN BAJA FRECUENCIA NORMALIZADA POR LA MASA Y LA SUSCEPTIBILIDAD DEPENDIENTE DE LA FRECUENCIA, CALICA 11 | 36 |
| FIGURA 21. PH, CALICA 11 | 37 |
| FIGURA 22. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, CALICA 11..... | 37 |
| FIGURA 23. MATERIA ORGÁNICA Y CARBONATOS, CALICA 11 | 38 |
| FIGURA 24. DIFRACTOGRAMAS DE LA MUESTRA C11M4 GLICOLADA, CALENTADA Y ORIENTADA. | 39 |
| FIGURA 25. DIFRACTOGRAMA CON LOS RESULTADOS GENERALES DE LAS FASES IDENTIFICADAS | 39 |
| FIGURA 26. DESCRIPCIÓN DE CAMPO, PERFIL CALICA 12 | 40 |
| FIGURA 27. MICROMORFOLOGÍA, CALICA 12..... | 41 |
| FIGURA 28. GRANULOMETRÍA, CALICA 12 | 42 |
| FIGURA 29. COLORIMETRÍA, CALICA 12..... | 42 |
| FIGURA 30. SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA EN BAJA FRECUENCIA NORMALIZADA POR LA MASA Y LA SUSCEPTIBILIDAD DEPENDIENTE DE LA FRECUENCIA, CALICA 12 | 43 |
| FIGURA 31. PH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA, CALICA 12..... | 43 |
| FIGURA 32. MATERIA ORGÁNICA Y CARBONATOS, CALICA 12 | 44 |
| FIGURA 33. IDENTIFICACIÓN DE FITOLITOS..... | 44 |
| FIGURA 34. A] CORRELACIÓN DE LOS PALEOSUELOS..... | 47 |
| FIGURA 35. PRIMERA FASE, FORMACIÓN Y RELLENO DE LAS DEPRESIONES KÁRSTICAS | 48 |
| FIGURA 36. PRIMERA FASE, PEDOGÉNESIS DENTRO DE LAS DEPRESIONES KARSTICAS..... | 49 |
| FIGURA 37. SEGUNDA FASE, SATURACIÓN CON AGUAS RICAS EN CARBONATOS Y RECALCIFICACIÓN DE HORIZONTES INFERIORES..... | 50 |
| FIGURA 38. TERCERA FASE, EROSIÓN Y DEPOSITO DE HORIZONTES SUPERIORES | 50 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| TABLA 1. CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA PENÍNSULA A PARTIR DE POLEN DE RHIZOPHORA MANGLE (CONDICIONES HÚMEDAS) Y CONOCARPUS ERECTUS (CONDICIONES SECAS) EN NÚCLEOS DE MANGLAR AL SUR DE CANCÚN Y SEDIMENTOS DEL RÍO HONDO (JEREMY ET AL., 2008)..... | 5 |
| TABLA 2. RANGO DE VALORES EN L´AB CORRESPONDIENTE A CADA UNA DE LAS VARIABLES | 17 |
| TABLA 3. COMPORTAMIENTO DE LA MUESTRA A DIFERENTES TRATAMIENTOS PARA DRX. | 38 |

Resumen

En el presente trabajo se estudiaron tres perfiles de suelo colectados en una cantera al SW de Playa del Carmen, Quintana Roo, México, dos de estos perfiles se encontraron dentro de depresiones kársticas y el tercero representa al suelo actual.

El objetivo principal de este trabajo fue proponer un modelo de génesis para los suelos dentro de las depresiones kársticas a partir de una comparación con el suelo actual y con esta base, determinar los cambios ambientales.

A los tres perfiles se les realizaron los siguientes análisis: textura, colorimetría, susceptibilidad magnética, pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica y carbonatos, DRX, dataciones, identificación de fitolitos y micromorfología. Estos análisis se realizaron con el fin de obtener sus características físicas, químicas y micromorfológicas y establecer una temporalidad de formación.

Los resultados mostraron que los suelos de las bolsas kársticas, en general, difieren del suelo actual y entre ellos presentan varias similitudes permitiendo proponer un mismo modelo de génesis para ambos.

1. Introducción

La península de Yucatán es una región de gran importancia cultural y geológica.

El establecimiento y desarrollo de la civilización maya y el reciente hallazgo de evidencia que confirma la presencia del hombre temprano en la Península de Yucatán (González et al., 2008) le confiere a la región gran importancia cultural. Mientras que su geología, relieve y ubicación geográfica la convierte en la región idónea para el estudio de las variaciones climáticas.

Los suelos al ser cuerpos naturales en constante evolución bajo el influjo de los cinco factores formadores (clima, relieve, material parental, organismos y tiempo) registran en sus propiedades las condiciones a las que fueron sometidos (Buol et al., 1990), por lo que su estudio puede aportar información sobre condiciones ambientales pasadas y la relación del hombre con su entorno.

La Península de Yucatán posee una gran variabilidad de suelos, en ella dominan las asociaciones de suelos poco profundos (Bautista et al., 2011), identificándose a los Leptosoles como las unidades de suelos dominantes (Bautista, 2010). Debido a su gran variabilidad y distribución la génesis de estos aún es poco conocida, es por ello que esta investigación pretende contribuir con una posible relación entre los suelos que dominan la superficie del estado de Quintana Roo y los suelos localizados dentro de las depresiones kársticas proponiendo un modelo de génesis para la formación de estos últimos.

1.1 Justificación

Tal y como plantean Cabadas et al., (2010), los procesos pedogenéticos y geomórficos que controlan el desarrollo de suelo en los paisajes kársticos tropicales aún son poco conocidos. Esto se debe a que la karstificación provoca la pérdida de la cubierta edáfica superficial, a través de los huecos generados por la disolución de la caliza, los cuales son rellenados por sedimentos, suelos y edafosedimentos.

En consecuencia, el estudio de los suelos y edafosedimentos de la Península de Yucatán depositados en las bolsas kársticas, pueden ser una fuente de información respecto a los cambios ambientales y la historia de uso de suelo por los humanos. Es así como, el análisis

de las pequeñas depresiones kársticas y sus rellenos puede ayudar al entendimiento de los procesos que han controlado el desarrollo del suelo durante el Holoceno.

1.2 Hipótesis

Las pequeñas depresiones kársticas y sus rellenos de suelo registran en sus propiedades, los cambios ambientales y la historia de ocupación humana, por lo que, al estudiarlos, nos proporcionan evidencias de las transformaciones del paisaje.

1.3 Objetivo general

Proponer un modelo de génesis de suelos para las bolsas kársticas a partir de una comparación con el suelo actual y con esta base, determinar los cambios ambientales.

1.4 Objetivos particulares

- I. Describir las características micromorfológicas, físicas y químicas de los suelos.
- II. Realizar una comparación entre los suelos en las depresiones kársticas y el suelo actual.
- III. Establecer una temporalidad de formación y desarrollo para los suelos de las bolsas kársticas.
- IV. Identificar las posibles características del suelo asociadas con posible actividad antrópica.

2. Marco teórico

2.1 El clima del Holoceno

Durante el Cuaternario, a nivel global, se han generado variaciones del clima entre periodos glaciales e interglaciales, atribuidos principalmente a cambios en la cantidad de radiación que llega a la superficie del planeta como resultado de los movimientos cíclicos en su orbita. Estas oscilaciones en el clima, entre periodos cálidos - húmedos y fríos – secos, han producido grandes cambios en la superficie del planeta por la formación y deshielo de grandes capas de hielo continentales y oceánicas.

Durante el Holoceno el clima del planeta se ha caracterizado como un periodo interglacial con un clima cálido - húmedo, en el cual las grandes capas de hielo formadas durante el Pleistoceno superior retrocedieron derivando en un aumento del nivel del mar.

2.2 El clima de la Península de Yucatán

Debido a su geología, relieve y ubicación geográfica, la Península de Yucatán es una región idónea para el estudio de las variaciones climáticas. Sus sistemas y ambientes característicos han permitido obtener información sobre los cambios eustáticos del nivel del mar y las modificaciones derivadas de estos en la región.

A partir de registros espeleológicos (González et al., 2008), lacustres (Torrescano e Islebe, 2006) y palinológicos (Islebe & Sánchez, 2002), se han realizado reconstrucciones paleoambientales. Los registros espeleológicos indican que el nivel del mar estuvo por lo menos 100 m por debajo del nivel actual, lo que permitió la formación de estos sistemas hasta tal profundidad (González et al., 2008). Mientras que las reconstrucciones palinológicas indican variaciones climáticas entre condiciones húmedas y secas (Islebe & Sánchez, 2002) (Torrescano e Islebe, 2006) durante los últimos 5,000 años (Tabla 1).

| Periodo | Especie dominante | Condiciones climáticas |
|------------------|---------------------------|------------------------|
| 4,600 a 4,000 BP | <i>Rhizophora mangle</i> | Húmedas |
| 4,000 a 2,500 BP | <i>Conocarpus erectus</i> | Más secas |
| 2,500 a 1,500 BP | <i>Rhizophora mangle</i> | Húmedas |

| | | |
|-------------------|---------------------------|-----------|
| 1,500 a 1,200 BP | <i>Conocarpus erectus</i> | Más secas |
| 1,200 a 1,000 BP | <i>Rhizophora mangle</i> | Húmedas |
| 1,000 al presente | <i>Conocarpus erectus</i> | Más secas |

Tabla 1. Condiciones climáticas de la Península a partir de polen de *Rhizophora mangle* (condiciones húmedas) y *Conocarpus erectus* (condiciones secas) en núcleos de manglar al sur de Cancún y sedimentos del Río Hondo (Jeremy et al., 2008).

2.3 Poblamiento de la Península de Yucatán

Los sistemas de la Península no solo han registrado la historia climática, también han permitido conocer la relación del hombre con el ambiente desde su llegada a esta región. Los cenotes y cuevas (actualmente inundadas), de la Península de Yucatán han preservado durante miles de años la evidencia del poblamiento temprano.

El hallazgo de artefactos, huesos quemados (de especies ahora extintas), concentraciones de carbón y restos óseos humanos, entre ellos, los datados como los restos más antiguos del sur de México, correspondientes a Naia, una adolescente que murió 12,000 años atrás, indican la presencia de grupos cazadores recolectores que recorrían y posiblemente empleaban estos sistemas de cuevas como refugio desde finales del Pleistoceno, momento en el cual no se encontraban inundadas, como indica la formación misma de estos sistemas de cuevas en el estado de Quintana Roo (González et al., 2008).

Con el desarrollo de la agricultura y la aparición de las sociedades sedentarias, el hombre comenzó una constante, y cada vez más intensa, modificación de su entorno (Acosta, 2016). Para la época prehispánica la Península albergó a una de las civilizaciones más representativas de Mesoamérica, considerada de esta manera por su gran desarrollo en áreas como la astronomía y la arquitectura.

La civilización maya alcanzó su máximo desarrollo y crecimiento poblacional durante el periodo Clásico (200 d. C – 900 d. C.), sin embargo, desde el Preclásico medio estuvieron presentes con el establecimiento de aldeas y permanecieron en la región hasta el Posclásico tardío organizados en señoríos (1200 a. C – 1521 d. C) (Solanes & Vela, 2000).

El paso de pequeñas aldeas mayas a ciudades de gran tamaño como Palenque, Chichen Itzá, Calakmul y Cobá solo pudieron hacerlo adaptándose al ambiente en el que habitaron y

adquiriendo un conocimiento en el manejo y aprovechamiento de sus recursos para sostener a las numerosas poblaciones que habitaron estas ciudades y sus alrededores, sin embargo, el crecimiento y manejo de recursos estuvo acompañado de una alteración a los bosques, sabanas y humedales lo que derivó en un profundo impacto en estos ecosistemas consecuencia de la deforestación (Beach et al., 2015). Solleiro et al., (2015) y Cabadas et al., (2010) han registrado una intensa erosión como consecuencia de la deforestación durante esta época.

2.4 Sistema kárstico

La Península de Yucatán tiene rasgos muy característicos que la diferencian del resto del territorio nacional, entre estos destaca su relieve prácticamente plano y afectado por procesos kársticos (Lugo-Hubp et al., 1992).

Esteban y Kappla (1983) definen al karst como una facies diagenética impresa sobre rocas carbonatadas con exposición subaérea, producida y controlada por la disolución y migración de carbonato de calcio (CaCO_3) en agua de lluvia.

En un sistema kárstico el desarrollo del suelo tiene lugar en la zona de infiltración, dominada por la disolución y corrosión biológica (Figura 1). En esta zona el desarrollo y presencia del suelo juega un papel importante por los siguientes motivos:

- I. El desarrollo del suelo incrementa la disolución de la roca como resultado del almacenamiento de agua de lluvia y la producción de CO_2 biogénico por la actividad microbiana y la materia orgánica en descomposición, que al interactuar producen ácido carbónico.
- II. A su vez, el material insoluble de la caliza es un pequeño aporte de material parental para el desarrollo del suelo (Cabadas et al., 2010).
- III. El relieve generado por la disolución del CaCO_3 genera la pérdida en superficie del suelo y la acumulación de éste en las depresiones formadas por disolución (Cabadas, 2011).

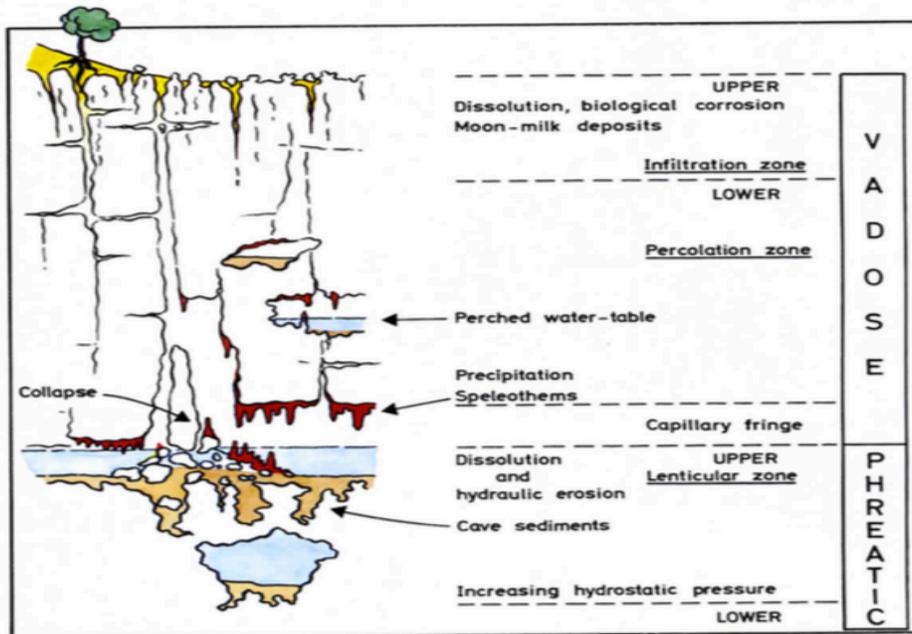


Figura 1. Perfil idealizado del sistema kárstico, tomado de Esteban y Kappla (1983).

En estos sistemas kársticos la relación entre el desarrollo, erosión y redeposición del suelo con el relieve puede estar vinculada a cambios climáticos, movimientos tectónicos y deforestación (Solleiro et al., 2015).

2.5 Suelos de la Península de Yucatán

En la Península de Yucatán dominan las asociaciones con suelos poco profundos (Bautista et al., 2011) en ella se presentan combinaciones entre suelos delgados (Leptosoles) y suelos con mayor profundidad y poco desarrollados (Cambisoles) (Krasilnikov et al., 2013).

De acuerdo con Bautista et al. (2011) los suelos que dominan la superficie son:

- i. Leptosoles, presentes en el 67% de la superficie, son suelos delgados sobre roca continua y ricos en fragmentos rocosos. Los Leptosoles rendzicos o rendzinas, son suelos oscuros, ricos en materia orgánica, desarrollados sobre roca caliza con una profundidad que no excede los 25 cm (FAO, 2014).
- ii. Gleysoles (15.5%) identificados en las zonas costeras, son suelos saturados con agua subterránea durante períodos suficientemente largos para desarrollar condiciones reductoras (colores grisáceos y/o azulados en partes bajas, y moteados pardos, rojos o amarillos generados por procesos de oxidación – reducción) (FAO, 2014).

- iii. Luvisoles (4.44%) identificados en las planicies kársticas, son suelos con un horizonte de acumulación de arcilla resultado de la migración de ésta (FAO, 2014).
- iv. Vertisoles (3.02%) identificados al sur y noreste de la Península, son suelos arcillosos, con un alto contenido de arcillas expandibles y profundas grietas en forma de cuña formadas por la expansión y contracción de las arcillas en respuesta a cambios estacionales (FAO, 2014).

A excepción de los Leptosoles, la distribución y localización de los suelos en la Península no es continua ni homogénea, los suelos se presentan en “parches” de diversos tamaños (Bautista, 2010).

De acuerdo con Sedov et al., (2007) la variabilidad y distribución de los suelos en la Península está relacionada con el relieve que impide el transporte horizontal del suelo erosionado a grandes distancias, en ves de esto, el suelo es depositado en las depresiones kársticas formadas por la misma disolución de la roca. Los mismos autores establecen que cada perfil en superficie es resultado de un equilibrio entre pedogénesis y la pérdida de suelo por transporte vertical hacia las depresiones, señalando que la diferencia de velocidades entre estos dos procesos causa dicha variabilidad.

Bautista et al., (2011) atribuyen la pérdida de suelo por transporte vertical a la combinación que existe entre el karst y el clima de la región. Para ellos la evidencia de este proceso justo es el transporte del suelo hacia las depresiones kársticas que comúnmente se encuentran parcial o completamente llenas por pedosedimentos.

3. Área de estudio

3.1 Localización geográfica

El sitio de estudio se localiza en la zona costera del estado de Quintana Roo, México, al SW de Playa del Carmen, en las coordenadas 20° 34' 58.83" N y 87° 8' 24.36" W, figura 2.

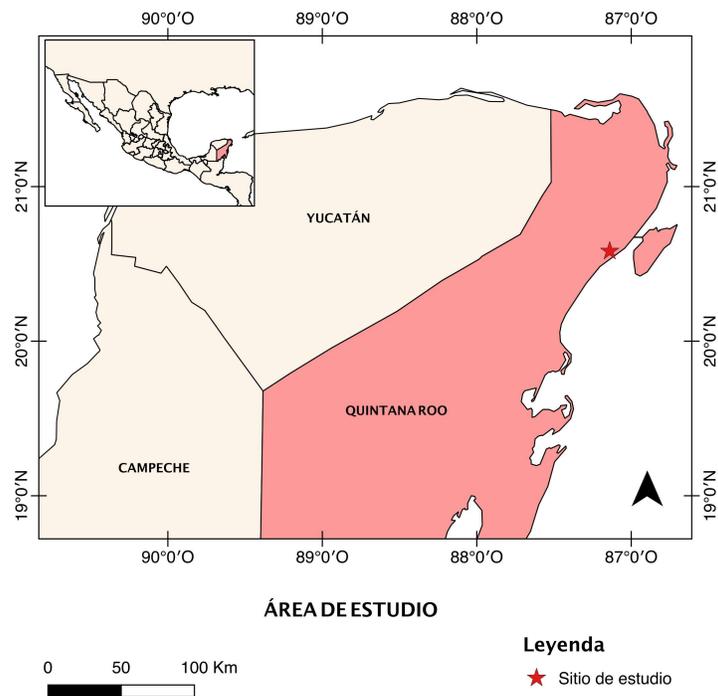


Figura 2. Localización del sitio de estudio

3.2 Geología de la región

El estado de Quintana Roo, junto con Campeche y Yucatán, pertenece a la provincia fisiográfica conocida como Península de Yucatán, conformada por una plataforma de rocas carbonatadas mesozoicas y cenozoicas sobre un basamento Paleozoico.

La plataforma tiene un espesor aproximado de 3,500 m conformado por evaporitas del Cretácico, seguido de una secuencia de calizas, evaporitas y areniscas del Paleoceno y Eoceno localizada en toda la península. La Formación Carrillo Puerto, compuesta de calizas, se localiza en la parte noreste de la Península y representa las rocas del Neógeno (Lugo-Hubp

et al., 1992). Las rocas más recientes (Pleistoceno – Holoceno) de la plataforma, se localizan en la zona costera de la Península, con un espesor aproximado de 80 km de calizas masivas de moluscos (García & Graniel, 2016). Dado que la zona de estudio se encuentra en la zona costera del estado de Quintana Roo, al sur de Playa de Carmen, las rocas expuestas corresponden a las rocas más recientes de la plataforma.

3.3 Geomorfología y relieve

En contraste con el resto del país, los estados que conforman la Península de Yucatán se caracterizan por ser una plataforma “plana” con una altitud promedio de 10 msnm, un relieve con pocas elevaciones que no exceden los 230 msnm (Pozo et al., 2011).

El sitio de estudio se localiza en la subprovincia denominada Carso Yucateco, conformada en su totalidad por rocas carbonatadas con ligera pendiente hacia el este y relieve alternante entre crestas y depresiones, esta subprovincia se distingue del resto por su karsticidad y carecer de drenaje superficial en casi toda su extensión (Pozo et al., 2011).

3.4 Suelos

De los 11 tipos de suelos presentes en el estado de Quintana Roo (INEGI, 2017), son los Leptosoles, Vertisoles, Phaeozems y Gleysoles, los que dominan la superficie, cubriendo el 80.68 %. En el sitio de estudio los suelos que dominan son los Leptosoles (Figura 3a)].

3.5 Hidrología

En general la Plataforma de Yucatán carece de red fluvial y el escurrimiento de la zona es casi en su totalidad subterráneo (Lugo-Hubp et al., 1992).

Particularmente en Quintana Roo, la mayoría de las corrientes superficiales son transitorias, de bajo caudal, recorrido muy corto y desembocan en depresiones topográficas donde forman lagunas (Pozo et al., 2011) (Figura 3b)].

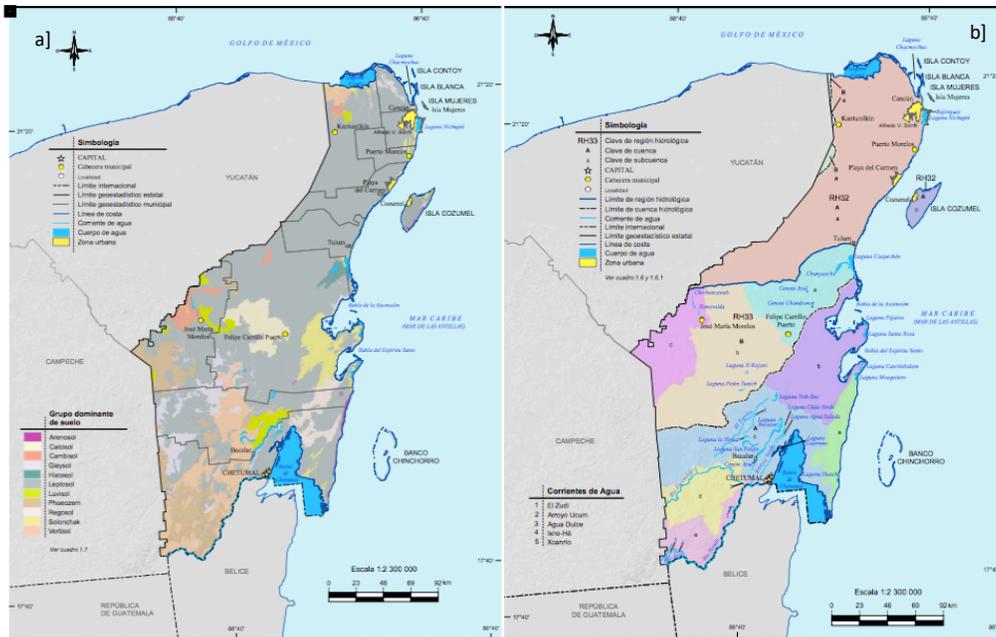


Figura 3. a) Mapa de suelos dominantes en el estado de Quintana Roo. b) Mapa de hidrografía del estado de Quintana Roo, Tomados de (INEGI, 2017).

3.6 Clima

En el estado se presentan dos tipos de climas (INEGI, 2017), cálido húmedo con abundantes lluvias en verano y cálido subhúmedo con lluvias en verano, este último presente en el 98.91% de la superficie.

La temperatura media del sitio de estudio oscila entre los 26 °C y los 28 °C, con una precipitación entre los 1200 y 1500 mm, las lluvias se presentan durante todo el año, siendo más abundantes de junio a octubre.

3.7 Vegetación

El tipo de vegetación dominante en el estado es la selva mediana subperennifolia (INEGI, 2017), figura 4. Los árboles presentan un rango de altura entre los 15 y los 25 metros, algunas de sus especies características son el Ox, chicozapote y la caoba, también se encuentran helechos, musgos y orquídeas (Pozo et al., 2011).



Figura 4. Vegetación de la zona

4. Metodología

4.1 Trabajo de campo y recolección de muestras

El trabajo de campo consistió en la visita a diferentes canteras de la zona costera de Quintana Roo, en los alrededores de Playa del Carmen. A lo largo de estos recorridos se realizaron muestreos críticos de objetos de interés.

Particularmente para este trabajo se identificaron tres perfiles, dentro de la Cantera Calica (Figura 5), de los cuales se realizó una descripción en campo y se tomaron muestras de cada horizonte para análisis de laboratorio, muestras inalteradas para microscopía de los edaforrasgos identificados y datación.



Figura 5. Imagen panorámica, cantera Calica

En el caso de las muestras no alteradas, se tomaron bloques de suelo con una dimensión aproximada de 4.5 x 2.5 x 2.5 cm y se almacenaron en papel aluminio, marcando la orientación en la que fueron tomados.

4.2 Láminas delgadas para micromorfología

Las secciones delgadas se realizaron en el taller de laminación y materiales no consolidados del Instituto de Geología de la UNAM.

Los bloques inalterados de suelo, previamente expuestos a temperatura ambiente durante dos semanas, se colocaron en bolsas de plástico dentro de recipientes y fueron etiquetados.

A cada uno de los bloques se les aplicó el siguiente tratamiento:

Impregnación

El bloque se cubrió completamente con una mezcla preparada de 70% resina cristal preparada de la marca Poliformas, 30% monómero de estireno, 40 gotas de catalizador K-2000 y 20 gotas de promotor NVC-3. Posteriormente se introdujo en una cámara de vacío a 20 atmósferas durante 15 minutos para permitir que la resina penetrase al interior y rellenará los poros.

Las muestras se dejaron en un lugar seco durante dos semanas.

Corte

Cada bloque se cortó por la mitad a un tamaño aproximado de 7 x 5 cm en una cortadora con disco de diamante (MK Pro series), todos los cortes se realizaron en seco para evitar el contacto del agua con las muestras, debido a las características del material.

Desbaste

Cada una de ellas se pasó por una secuencia de lijas con abrasivos del No. 80, 120, 220, 360 montadas en la pulidora MetaServ 200 de Buheler para desbastar hasta conseguir una superficie lisa, posteriormente cada bloque se limpió con paños para eliminar los residuos del paso anterior y se montaron en portaobjetos de 76 x 52 mm con espesor de $\pm 1 - 1.2$ mm de la marca Lauka, previamente esmerilados, utilizando resina 305 adhesivo ultravioleta y se expusieron a rayos UV por tres minutos. Posteriormente se cortaron en la cortadora de disco de diamante (sin agua) con un espesor de 2 a 3 cm y nuevamente en la pulidora se llevaron aproximadamente a 100 micras con una lija de No. 120.

Pulido

Las láminas se pulieron sobre un vidrio con una secuencia de lijas de los números 360, 400 y 600 hasta las 30 micras o con la secuencia anterior, pero de carburo de silicio en polvo con diésel o aceite Mineral White Light Macron Fine.

Cubrimiento

Finalmente se limpiaron y pasaron por un paño con alúmina. Cada una se cubrió con cubridores finos utilizando resina UV.

Para el análisis de las láminas se usó el microscopio petrográfico Olympus BX51, y el software Image Pro. Por medio del microscopio se describió la microestructura (forma, tamaño y grado de separación de los agregados), porosidad (forma), los componentes gruesos (granos minerales y fragmentos de roca, conchas de moluscos y gasterópodos), material orgánico (grado de descomposición) y los edaforrasgos (revestimientos, rellenos y concreciones) de cada lamina realizada de acuerdo con el Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias (Loaiza et al., 2015).

4.3 Análisis de laboratorio

A excepción de las muestras recolectadas para datación, el resto de las muestras se expusieron a temperatura ambiente durante dos semanas para eliminar el exceso de humedad y todos los análisis para la caracterización física y química se trabajaron con el material recolectado menor 2 mm. Por lo que cada una de estas muestras se pasó por el tamiz No. 10.

4.3.1 Análisis de textura por el método de la pipeta

El análisis de textura se llevó a cabo para determinar la cantidad de componentes, que pueden evidenciar la formación de arcilla que se produce por intemperismo.

Este análisis se obtuvo por el método de la pipeta siguiendo el procedimiento de Flores y Alcalá, (2010), omitiendo los tratamientos previos.

Se colocaron 10 g de muestra en frascos de plástico sellados herméticamente y se les añadió 10 ml de hexametáfosfato de sodio y agua destilada hasta llenar el recipiente de plástico por completo y se colocaron en la agitadora Gallenkamp durante 24 horas.

Obtención de la fracción arena

Transcurrido el tiempo de agitación la solución se pasó a través de un tamiz de 8" con malla de 53 μm y abertura (No. 270), la porción de muestra retenida se llevó a un aparato de

ultrasonido con la finalidad de facilitar la separación de las partículas y se le realizaron lavados con agua destilada. La porción de muestra retenida en el tamiz se colocó en una cápsula de porcelana de la que previamente se obtuvo su peso (a peso constante, es decir, se sometió a una temperatura de 105° C durante 24 horas para eliminar la humedad) y se llevó a la estufa a 105 ° C.

Obtención de la fracción arcilla

La solución que pasó a través del tamiz fue colectada en un vaso de precipitados de 500 ml, y se llevó a una probeta de 1000 cm³ donde se le añadió 10 ml más de hexametáfosfato de sodio y agua destilada hasta cubrir el volumen de 1000 cm³ exactamente, se tapó la probeta con un vidrio de reloj y se dejó reposar durante ocho horas.

Para obtener la porción correspondiente a la fracción arcilla se agitó la muestra durante un minuto y se dejó reposar por 3 horas 51 minutos, transcurridos el tiempo se tomó la alícuota de los primeros 10 ml de la probeta (de arriba hacia abajo) utilizando una pipeta volumétrica de 25 ml, la solución colectada se colocó en una cápsula de aluminio de la cual previamente se obtuvo su peso (a peso constante) y se llevó a la estufa a 105 ° C.

Se obtuvieron los pesos de correspondientes a la fracción arena y arcilla en la balanza analítica. La fracción limo se obtuvo restando la suma de las dos anteriores a los 10 g de muestra inicial.

4.3.2 Colorimetría

El color es una medida indirecta de los componentes del suelo.

Para la obtención del color se utilizó el colorímetro Colorlite sph870, para muestras en seco y homogeneizadas. Los resultados se tomaron en las variables L^{*}ab y se analizaron por medio del software Color Data Travel.

Los valores en L^{*}ab indican el grado de luminosidad (L^{*}), el rango de color entre valores rojos y verdes (a^{*}) y el rango entre tonos amarillos y azules (b^{*}), entre los que se encuentra cada una de las muestras. La tabla 2, muestra el comportamiento de cada una de las variables.

| Variable | Valores < 0 | Valores > 0 | |
|----------|--------------|-------------|--|
| | Coloraciones | | |
| L* | oscuras | claras | |
| | Tonalidades | | |
| a* | verdes | rojos | En ambos casos, los valores que se ubican en un rango de -5 a 5 corresponden a tonos blancos |
| b* | azules | amarillos | |

Tabla 2. Rango de valores en L´ab correspondiente a cada una de las variables

4.3.3 Susceptibilidad magnética χ_{LF} y susceptibilidad dependiente de la frecuencia $\chi_{dF\%}$

Estos dos valores revelan el contenido y tamaño de partículas magnéticas en los suelos, que se relacionan con los procesos pedogenéticos. Se llenaron por completo cubos de 8 cm³ con muestra homogeneizada y molida levemente en un mortero de ágata. Estas se llevaron al Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica, UNAM, donde se realizó medición de la magnetización en baja (κ_{LF}) y alta (κ_{HF}) frecuencia, por medio del sensor de frecuencia dual tipo M52B y un susceptibilímetro modelo M52 Bartington.

Con estos datos se obtuvo la magnetización en baja frecuencia normalizada, por medio de la ecuación 1 y la susceptibilidad dependiente de la frecuencia $\chi_{dF\%}$ (ecuación 2) que nos proporcionó la diferencia porcentual entre (κ_{LF}) y (κ_{HF}) para obtener el contenido de partículas súper paramagnéticas presentes.

$$\chi_{LF} = \kappa_{LF} / \text{masa muestra [Kg]} / \text{volumen [m}^3] \dots \text{Ecuación 1}$$

$$\chi_{dF\%} = (\kappa_{LF} - \kappa_{HF} / \kappa_{LF})(100) \dots \text{Ecuación 2}$$

4.3.4 pH y conductividad eléctrica (CE)

El pH es un parámetro importante para determinar la acidez o alcalinidad del suelo, del cual dependen otras propiedades. La CE permite conocer el grado de salinidad, y, por lo tanto, la concentración de sales en el suelo. Las muestras se llevaron al Laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología, UNAM, donde se utilizó el potenciómetro Orion VersaStar Pro que permite la medición del pH y la conductividad eléctrica simultáneamente.

La medición del pH se realizó de acuerdo con las especificaciones establecidas por Jackson, (1958). Se colocaron 10 g de muestra en frascos de plástico con tapa hermética y se añadieron 25 ml de agua destilada, estos se colocaron en una agitadora marca Gallenkamp durante 24 horas.

Previo a la introducción de los electrodos se agitó cada una de las muestras para homogeneizar la solución.

4.3.5 Contenido de materia orgánica y carbonatos

Se realizó la medición de materia orgánica y carbonatos mediante el método de pérdida por calcinación de acuerdo con Jackson, (1958). El contenido de materia orgánica representa al conjunto de los organismos del suelo que se encuentran en diferentes estados de descomposición. Por su parte, los carbonatos son indicadores de los procesos pedogenéticos, que pueden evidenciar las condiciones de formación.

Durante 24 horas se colocaron en la estufa a 105° C 18 crisoles, debido a que se realizó la medición por duplicado para cada muestra, para obtener su peso constante. Se pesaron 3 g de muestra y nuevamente se colocaron en la estufa a 105 ° C durante dos horas para eliminar la humedad y se obtuvo el peso. Transcurrido el tiempo se llevaron a la mufla a 450° C durante 24 horas y a 850° C durante dos horas, en ambos casos se registró el peso al enfriarse los crisoles.

A los pesos obtenidos después de someterse la muestra a las distintas temperaturas se les resta el peso del crisol y los resultados se introdujeron en las ecuaciones 3 y 4 para obtener el contenido de materia orgánica y carbonatos respectivamente.

Ecuación 3

Materia orgánica

$$= \left[(\text{Peso de la muestra a } 105^{\circ} \text{ C}) - (\text{Peso de la muestra a } 450^{\circ} \text{ C}) / \text{Peso de la muestra a } 105^{\circ} \text{ C} \right] * [100]$$

Ecuación 4

Carbonatos

$$= \left[(\text{Peso de la muestra a } 450^{\circ} \text{ C}) - (\text{Peso de la muestra a } 850^{\circ} \text{ C}) / \text{Peso de la muestra a } 105^{\circ} \text{ C} \right] * [100]$$

4.3.6 Difracción de rayos X

La DFX permite conocer la composición mineralógica de la fracción arcilla, que se puede relacionar con la pedogénesis. Ésta se realizó únicamente en el horizonte 2Ah2 del perfil Calica 11 en el Laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de geología, UNAM, con el objetivo de identificar las fases minerales en la fracción arcilla, que permita establecer la génesis y relación de las unidades de suelo.

Se llevó a cabo un tratamiento previo para eliminar la materia orgánica, para ello se siguió el procedimiento de Flores y Alcalá, (2010). La muestra se midió como muestra orientada, glicolada y calentada a 550 °C para determinar la naturaleza mineralógica de la arcilla. Los difractogramas se obtuvieron en un difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de níquel, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D.

La identificación se realizó siguiendo el comportamiento de la muestra ante los distintos tratamientos a los que fue sometida en el diagrama de flujo para la identificación de arcilla de la USGS (Figura 6).

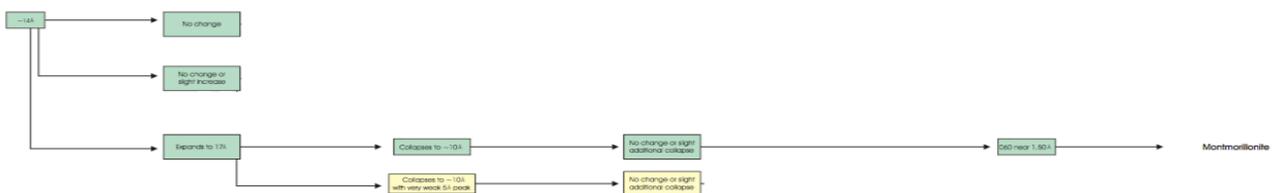


Figura 6. Fragmento del diagrama de flujo para la identificación de arcillas, tomado de USGS

4.4 Dataciones

Se realizaron dataciones de materia orgánica, carbón vegetal y caracoles contenidos en los paleosuelos por medio AMS en el Laboratorio Beta Analytic, Miami Florida, EUA, para conocer la edad de los suelos.

4.5 Fitolitos

La identificación de fitolitos es empleada en reconstrucciones paleoambientes. La identificación se realizó en los horizontes Ah1 y 2Ah1 (perfiles Calica 10 y Calica 11, respectivamente).

El método para la extracción de fitolitos fue tomado de Madella et al, (1998).

Se tomó la fracción limo obtenida en el análisis de textura y se colocaron en tubos de ensayo a los que se le añadió peróxido de hidrógeno (H_2O_2), para eliminar la materia orgánica, y se llevaron a la estufa a $60^\circ C$ para acelerar la reacción. Estos se llevaron a la centrifuga a 1000 rpm durante tres minutos. Al concluir el ciclo se desechó el sobrenadante, este procedimiento se repitió dos veces más añadiendo agua destilada a los tubos de ensayo.

Posteriormente se les añadió 10 ml de polytungstato de sodio ($Na_6(H_2W_{12}O_{40}) \cdot H_2O$) a $2.35 g/cm^3$ y se llevaron a la centrifuga a 1000 rpm durante tres minutos, concluido el ciclo se recuperó la fracción flotante con una pipeta y se llevó a un nuevo tubo de ensayo en el cual se repitió el procedimiento anterior.

Para el lavado de la fracción recuperada se le añadió agua destilada y se llevó nuevamente a la centrifuga durante tres minutos a 1500 rpm desechando el sobrenadante, se repitió este procedimiento dos veces más.

Finalmente se añadió metanol a los tubos de ensayo y se colocaron en la centrifuga durante tres minutos a 1500 rpm este procedimiento se repitió dos veces más, desechando el sobrenadante en cada ocasión.

Para la identificación el residuo obtenido se montó en un cubreobjetos y se observó en el microscopio óptico Olympus BX51. Se registraron fotomicrografías mediante el software Image Pro.

5. Resultados

Las secciones que se estudiaron en este trabajo se denominaron como Calica 10, 11 y 12. Las dos primeras representan suelos que se encuentran en una depresión kárstica (Figura 7), mientras que Calica 12 es el suelo actual.



Figura 7. Ubicación de los perfiles en el paisaje

5.1 CALICA 10

Este suelo se encontró en una depresión a 1.20 m de la superficie. Es un suelo muy delgado, de color negro que en su base tiene caracoles terrestres y agregados de suelos carbonatados. La descripción de campo se presenta en la figura 8. La edad de este suelo se obtuvo de dos muestras: de la materia orgánica del horizonte Ah y de un caracol encontrado en Bk. Las edades obtenidas fueron muy diferentes, 11,395 – 11,245 años cal AP (9445 – 9295 AC) para el caracol; y de 830 - 700 años cal AP (1120 - 1250 DC) para la materia orgánica.



| Horizonte | Espesor (cm) | Características |
|--|--------------|---|
| Ah 830 - 700 años cal AP | 110 - 126 | Horizonte de color oscuro con estructura granular y fragmentos de caliza, conchas y raíces. |
| Bk 11395 – 11245 años cal AP | 126 - 136 | Agregados con estructura subredondeada, con fuerte reacción al HCl, que asemejan fragmentos de roca. Se presentan abundantes caracoles. |
| Ck | 136 –144 | Mezcla de agregados carbonatados. |

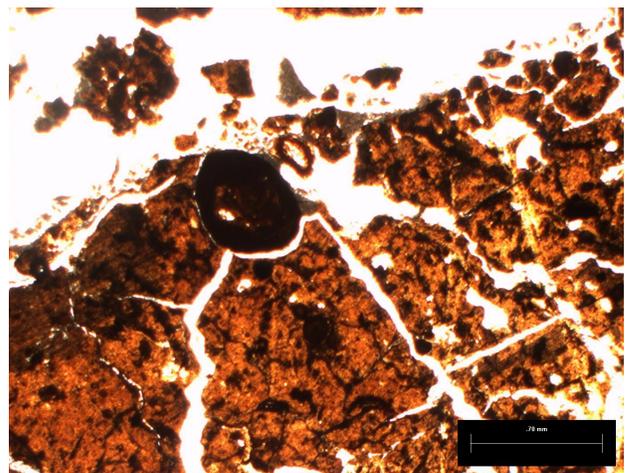
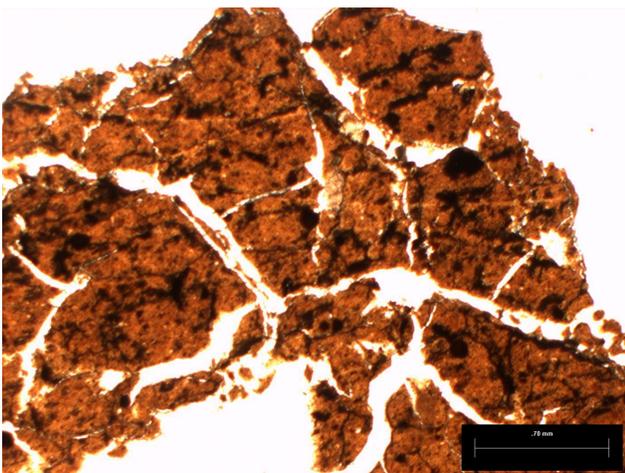
Figura 8. Descripción de campo, perfil Calica 10

5.1.1 Micromorfología

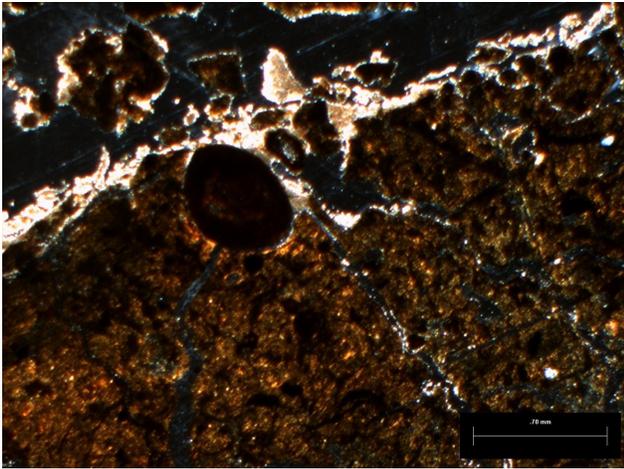
El horizonte Ah tiene una estructura de agregados en bloques subangulares, con una matriz arcillosa, separados con fisuras e intraclastos, conformando agregados en ángulos rectos (Figura 9a)]. Se observan fragmentos vegetales alterados, concreciones de hierro (Figura 9b] y 9d]), fragmentos de caracoles incorporados a la matriz del suelo y, entre las fisuras, también se encuentran carbonatos primarios con sus bordes cubiertos por suelo. La mayoría de los agregados tienen carbonatos secundarios en sus bordes (Figura 9b] y (9c])).

El horizonte Bk está formado principalmente por carbonatos secundarios (hidrogénicos) reprecipitados en agregados de suelo que asemejan a fragmentos de carbonatos primarios de tamaños variables, con fragmentos de caracoles dentro de la matriz (Figura 9e] y 9f])). En la parte superior de la lámina hay una acumulación de caracoles, entre las fisuras hay agregados de suelo muy similares a los presentes en el horizonte Ah, fragmentos de caracoles y carbonatos secundarios (Figura 9g] y 9h])).

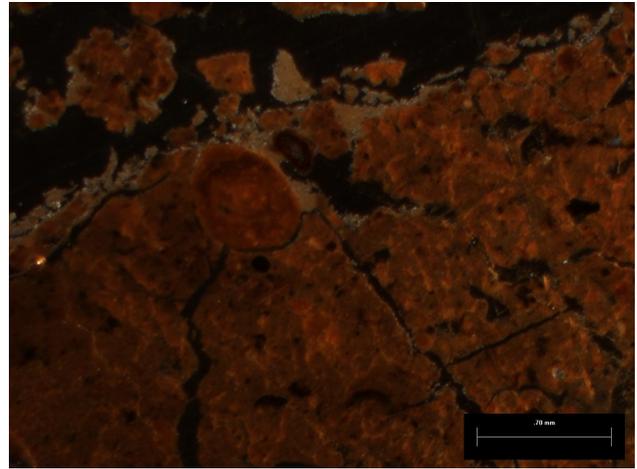
En el horizonte Ck están presentes los mismos agregados cubiertos por carbonatos secundarios, pero en tamaños más variables, con una estructura en bloques subangulares y angulares (Figura 9i] y 9j]), al igual que el horizonte superior. Entre las fisuras hay agregados de horizontes superiores (Ah) y fragmentos de caracoles (Figura 9k] y 9l])).



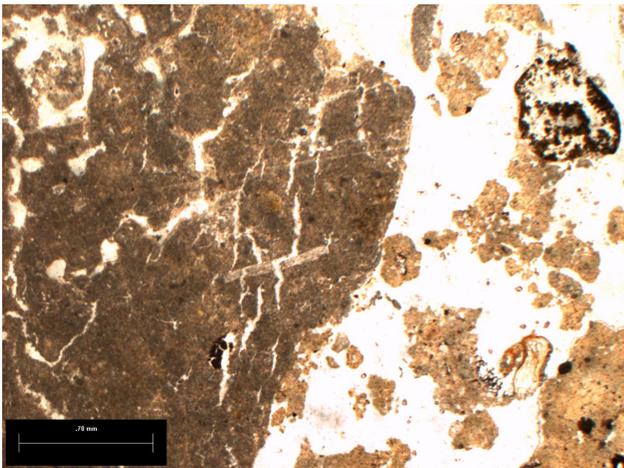
a] Estructura en bloques subangulares, horizonte Ah



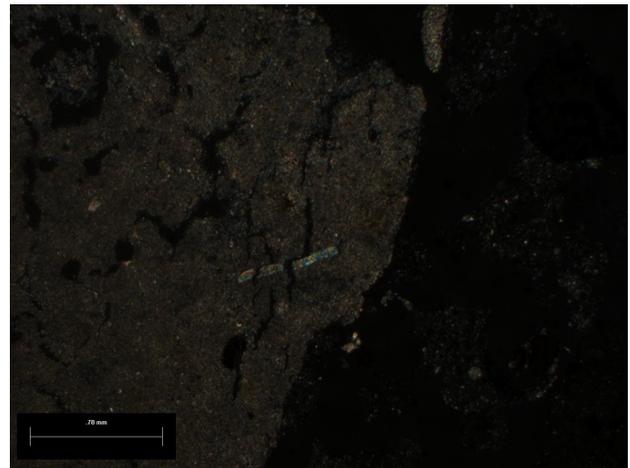
b] Concreción de Fe, fragmentos de vegetales alterados y carbonatos secundarios, horizonte Ah



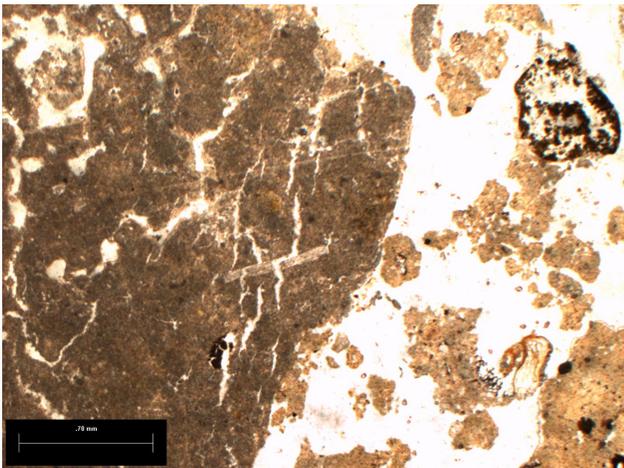
c] Reprecipitación de carbonatos secundarios en los agregados del suelo en nx, horizonte Ah



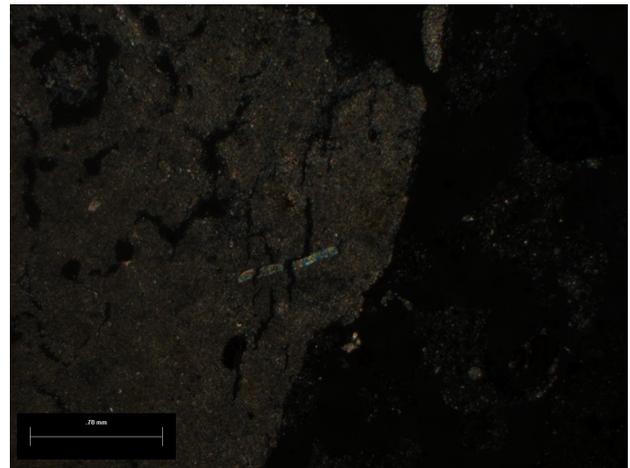
d] Concreción de Fe y fragmento vegetal alterado bajo luz polarizada y nx, horizonte Ah

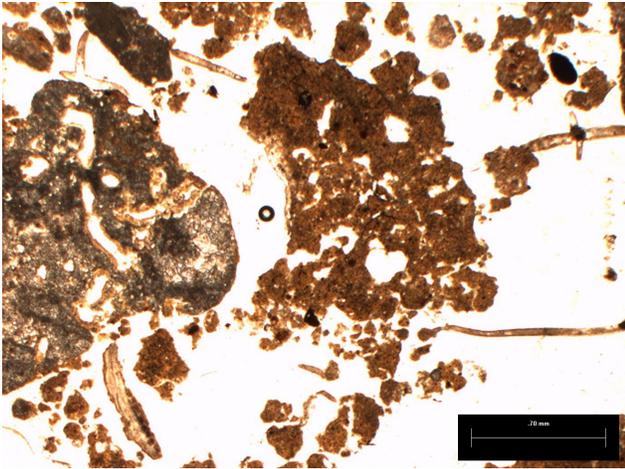


e] Agregados de suelo con carbonatos reprecipitados, horizonte Bk

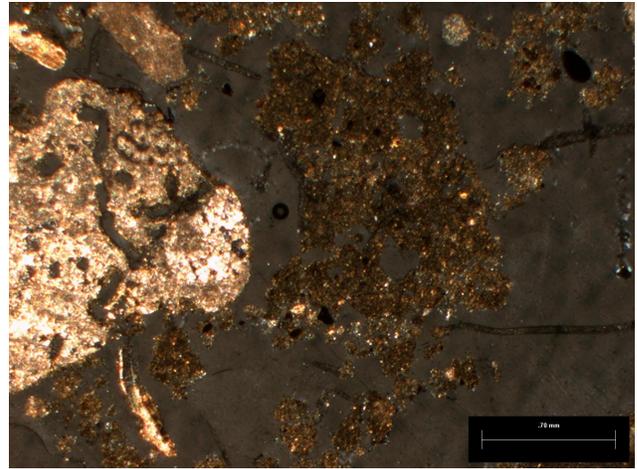


f] Agregados de suelo con carbonatos reprecipitados con nx, horizonte Bk

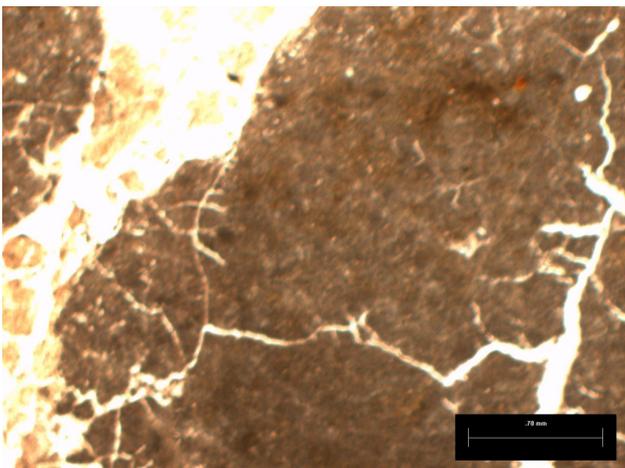




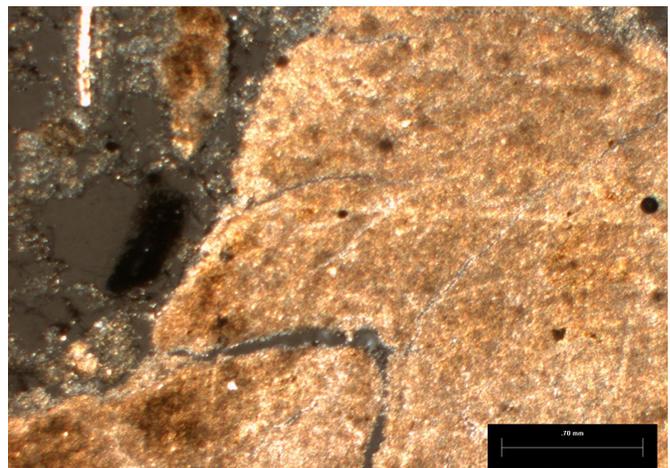
g] Agregados de suelo, fragmentos de caracoles y carbonatos primarios localizados en las fisuras, horizonte Bk



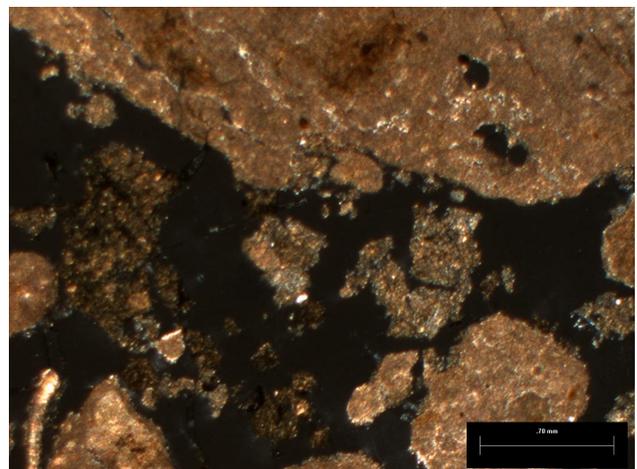
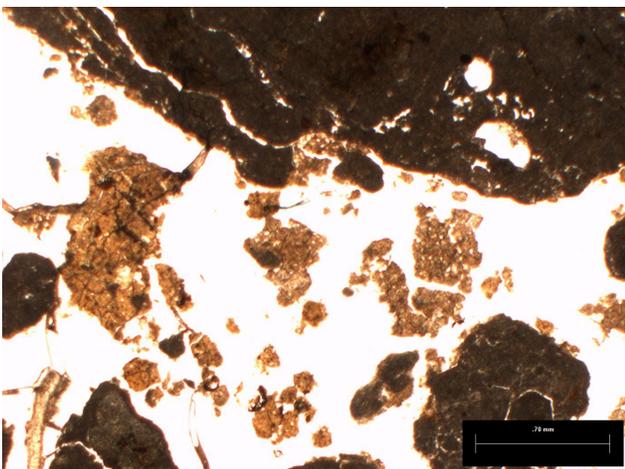
h] Imagen anterior con nx



i] Agregados carbonatados con estructura en bloques subangulares, horizonte Ck



j] Imagen anterior con nx



k] Agregados de suelo y fragmentos de caracoles entre los poros, horizonte Ck

l] La imagen anterior con nx

Figura 9. Micromorfología, Calica 10

5.1.2 Análisis granulométrico

La granulometría dentro de la bolsa es variable, como se observa en la figura 10 por un lado, vemos que la fracción dominante en los dos primeros horizontes es la fracción arcilla, con 65.6% en el horizonte Ah y 81.2% en el horizonte Bk, pero disminuye hasta 30.4% en Ck. El contenido de arena se incrementa con la profundidad de 4.3% en el horizonte Ah hasta 55% en el horizonte Ck. En cuanto a la fracción de tamaño limo es mayor en Ah con 30.05% y disminuye a 7.17% y 8.6% en Bk y Ck respectivamente.

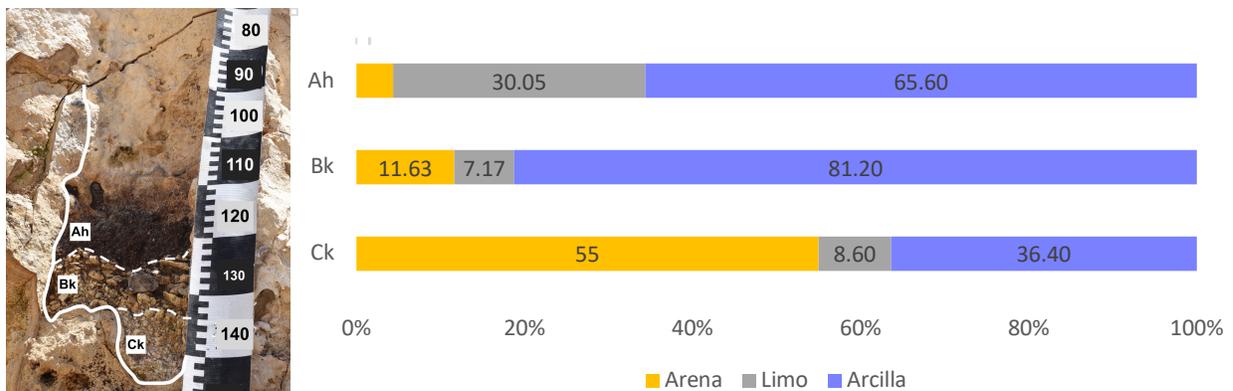


Figura 10. Granulometría, Calica 10

5.1.3 Colorimetría

La figura 11 muestra que, en general, las muestras tienen valores de luminosidad (L^*) menores que 50, lo que denota el dominio de coloraciones oscuras, siendo el horizonte Ah, el que es más oscuro. Con respecto a la intensidad del rojo y amarillo (a^* y b^* , respectivamente) el horizonte Bk tiene valores que lo ubican en tonalidades ligeramente más rojizas y amarillentas que Ah y Ck.

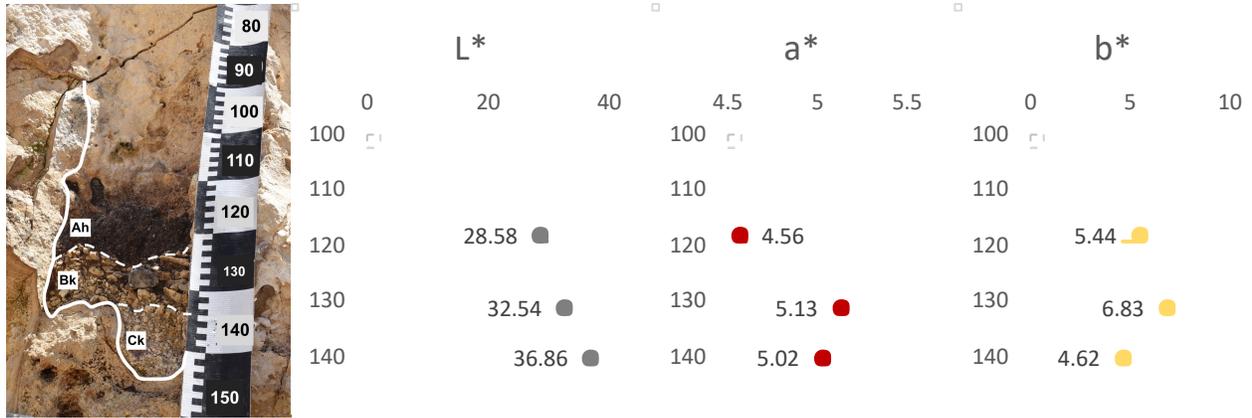


Figura 11. Colorimetría, Calica 10

5.1.4 Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad (Figura 12) tiene valores que van de 0.29 m³/kg en el horizonte Ah a 0.02 m³/kg en el horizonte Ck, que demuestra que existe un incremento (enhancement) de la susceptibilidad en el horizonte superficial. La misma tendencia se observa para la χ_{Fd} , los valores más altos se encuentran en la parte superior con valores de 11.92% y 11.01% resultado de una alta cantidad de partículas súper paramagnéticas en estos y un bajo contenido de estas en el horizonte Ck con 4.76%.

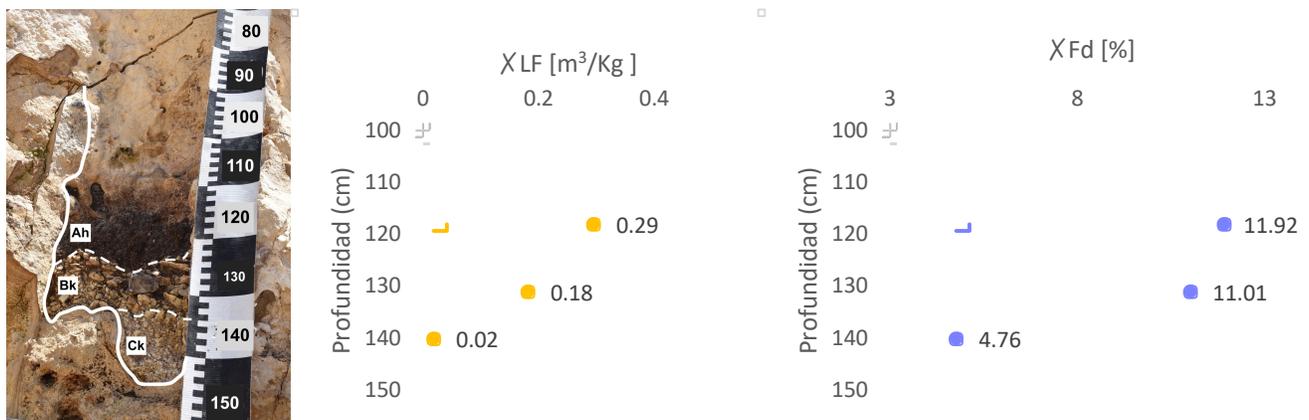


Figura 12. Susceptibilidad magnética en baja frecuencia normalizada por la masa y la susceptibilidad dependiente de la frecuencia, Calica 10

5.1.5 pH

La figura 13 muestra como disminuye el pH con la profundidad de 7.96 a 7.57, mostrando valores ligeramente alcalinos.

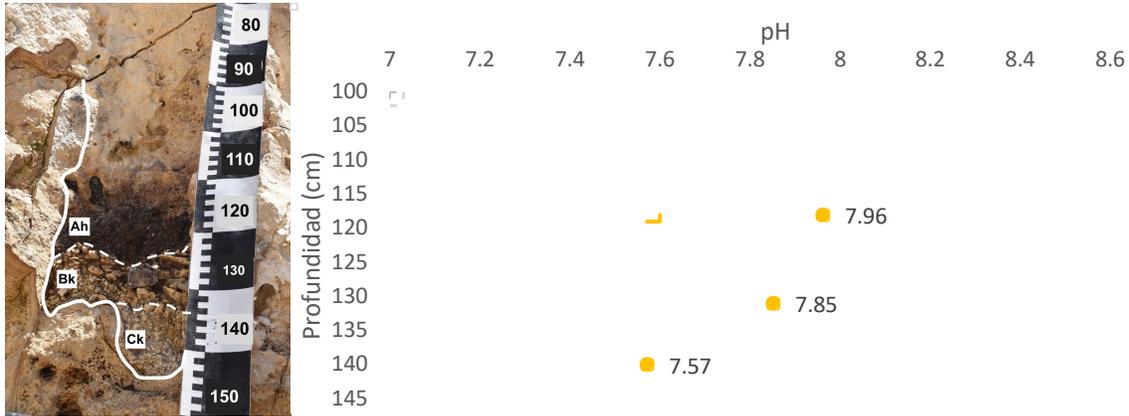


Figura 13. pH, Calica 10

5.1.6 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (Figura 14) en el perfil tiene un rango de 763.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta los 1740 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el contenido de sales tiende a aumentar hacia los horizontes inferiores.

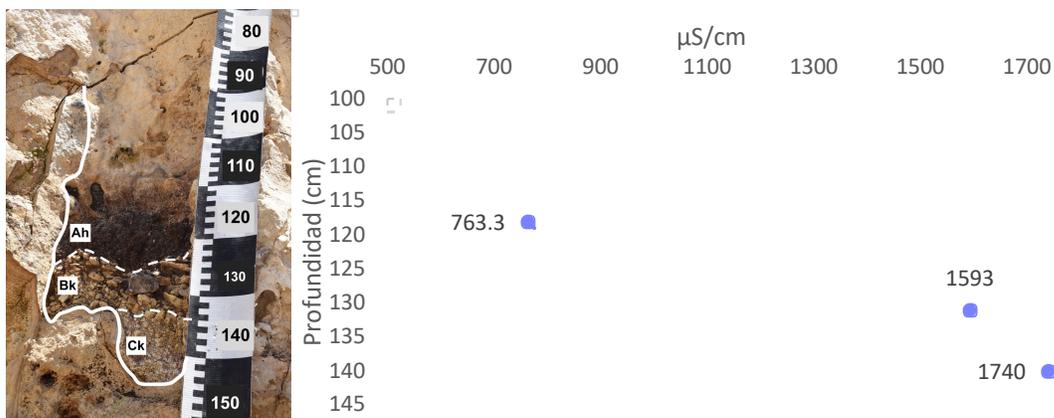


Figura 14. Conductividad eléctrica, Calica 10

5.1.7 Contenido de materia orgánica y carbonatos

En la figura 15 se observa el comportamiento del contenido de materia orgánica y carbonatos. Mientras que el contenido de materia orgánica disminuye con la profundidad, teniendo el valor

más alto (12.63%) en el horizonte Ah y el más bajo en el horizonte Ck (6.34%), el comportamiento de los carbonatos es contrario, es decir, el valor más bajo de éstos se localiza en el horizonte Ah y el valor más alto se localiza en el horizonte Ck con 33.11%.

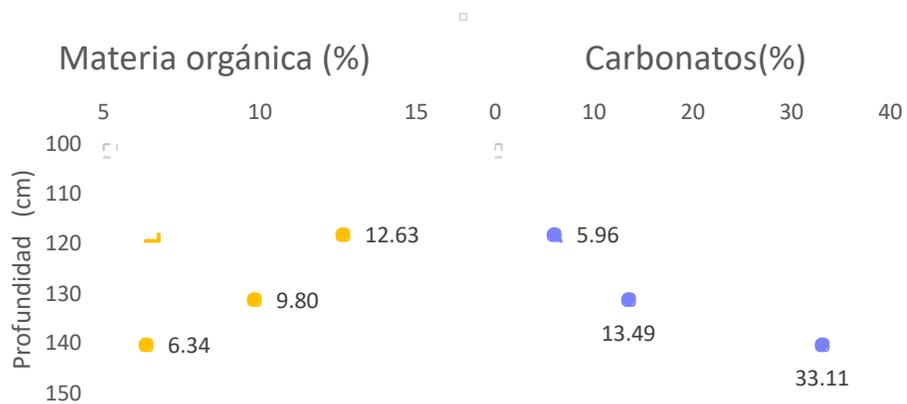
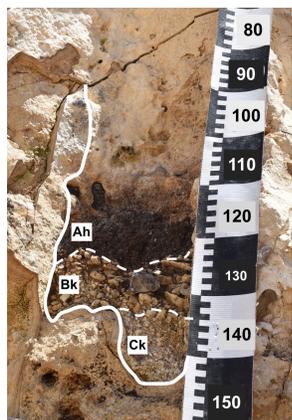


Figura 15. Materia orgánica y carbonatos, Calica 10

5.2 Calica 11

Este suelo se encontró en una depresión a 2.10 m de la superficie. La descripción de campo se presenta en la figura 16. En este suelo se dató un caracol terrestre encontrado en 2Ah1, obteniéndose una edad de 473 -308 años cal AP (1477 - 1642 DC) y fragmentos de carbón en el mismo horizonte, obteniéndose una edad de alrededor de 60 años (1950 DC).

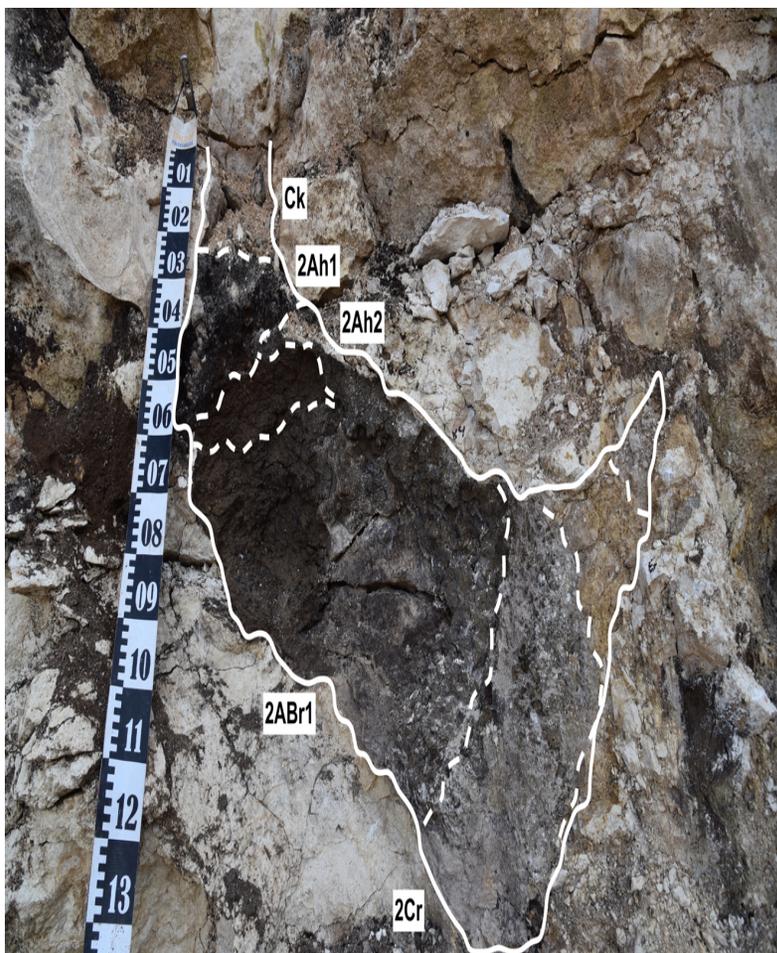


Figura 16. Descripción de campo, perfil Calica 11

| Horizonte | Espesor (cm) | Características |
|--------------------------------------|--------------|---|
| Ck | 0 - 22 | Material arenoso de color pardo con calizas de tamaño grava y fragmentos de carbon, agragados de color oscuro, raíces y caracoles |
| 2Ah1 473 - 308 años cal AP | 22 - 62 | Horizonte de color negro, la estructura va de sin estructura a granulos y agregados subredondeados. Con caracoles y fragmentos de carbonatos primarios. Horizonte con evidencia de quema, carbón. |
| 2Ah2 | 43 - 62 | Horizonte con tonalidades rojizas con estructura subangular a granular con pocos fragmentos de carbonatos primarios tamaño arena. |
| 2ABr1 | 43 - 115 | Horizonte con características reductomorficas, con estructura en bloques subangulares. |
| 2Br | 62 - 113 | Fragmentos de roca de tamaño arena y gravas de los alrededores de la bolsa |
| 2Cr | 111 - 135 | Horizonte gleyco de color gris claro con cutanes oxido-reducción en contacto abrupto con la caliza |

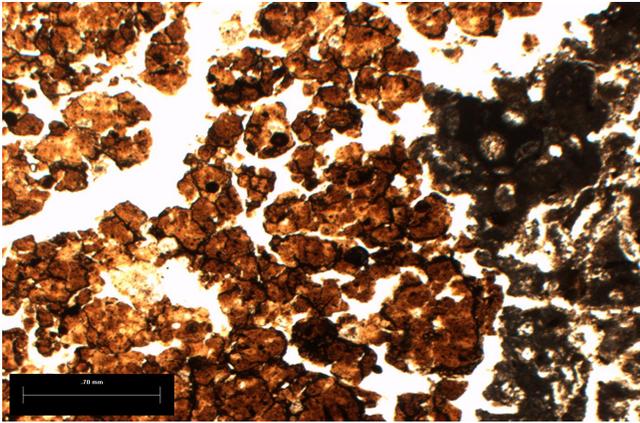
5.2.1 Micromorfología

El horizonte Ck se encuentra en contacto con el horizonte 2Ah1, este contacto es irregular, mientras que el horizonte 2Ah1 tiene una estructura granular con agregados formados principalmente de una matriz arcillosa con óxidos de Fe (Figura 17a)]. El horizonte Ck está conformado por una mezcla de carbonatos primarios de distintos tamaños, fragmentos de caracoles, tejido vegetal quemado y agregados de suelo muy parecidos al suelo del horizonte 2Ah1 (Figura 17b] y 17c]).

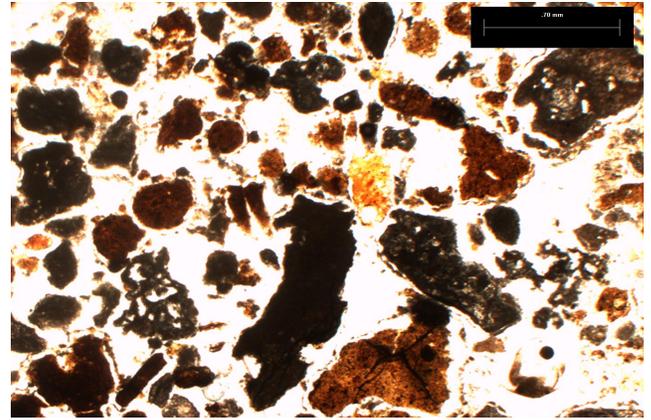
El horizonte 2Ah2 tiene una estructura dominante en bloques subangulares separados por fisuras (Figura 17d]) pero también se observan algunos gránulos, los agregados están formados mayormente de arcilla. La alta birrefringencia de los agregados se debe al acomodo de las arcillas. En general, el suelo es más compacto que el horizonte superior, con mayor contenido de concreciones de Fe (Figura 17e] y 17f]) y algunos fragmentos de carbonatos primarios con sus bordes cubiertos de suelo (Figura 17g] y 17h]).

El horizonte 2ABr1 tiene una estructura primaria en bloques subangulares con un grado moderado de agregación y parcialmente acomodados, formando una estructura secundaria, de mayor tamaño y que domina el horizonte, de estructura angular fuertemente separada (Figura 17i] y 17j]). Tiene concreciones de Fe, algunas de ellas fracturadas siguiendo el patrón de las fisuras.

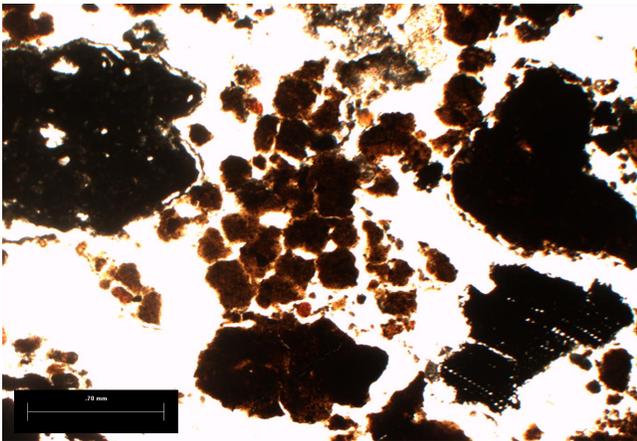
El horizonte 2Cr tiene una estructura similar al horizonte 2ABr1 con agregados en bloques subangulares y concreciones de Fe, pero la mayoría de estos se encuentran cubiertos de carbonatos secundarios reprecipitados aparentando fragmentos de roca con bordes redondeados (Figura 17k] y 17l]).



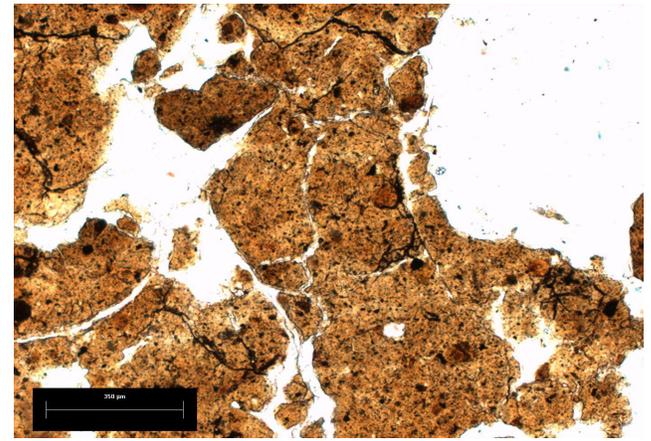
a] Estructura granular, horizonte 2Ah1



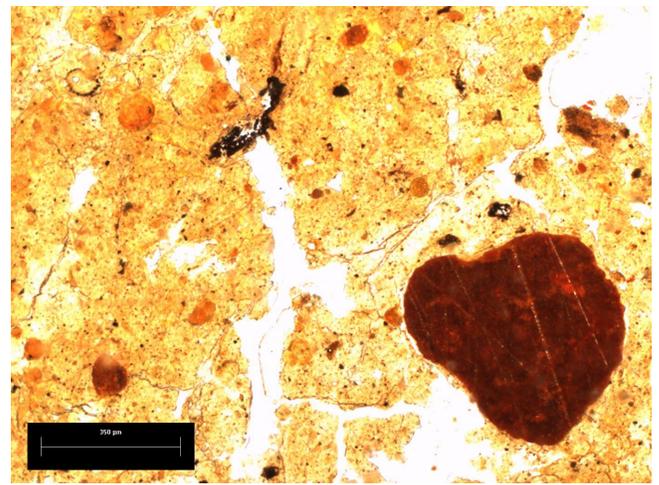
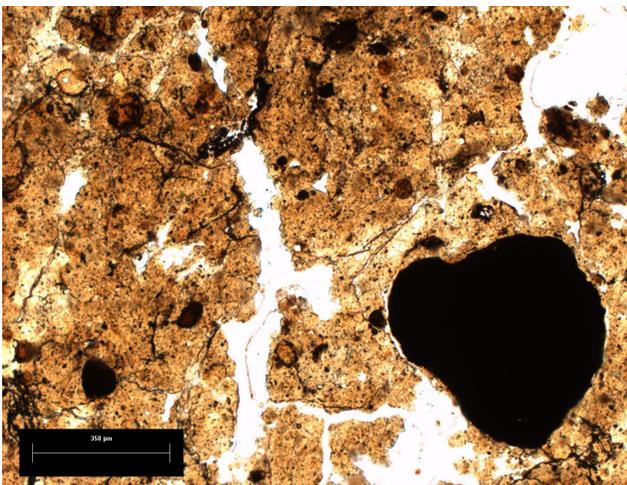
b] Mezcla de agregados de suelos, carbón y carbonatos primarios, horizonte Ck



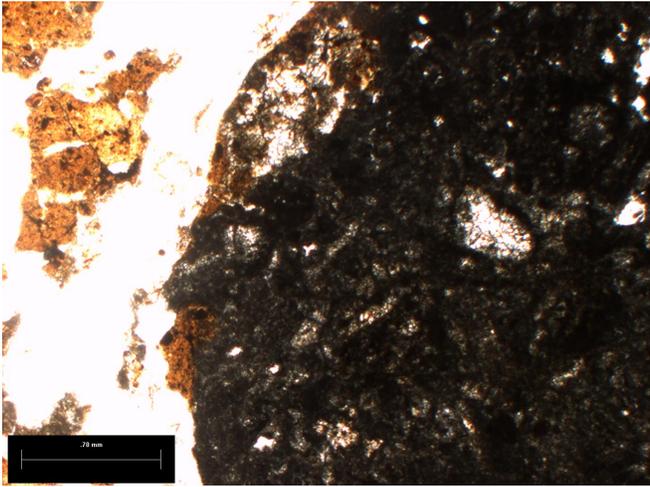
c] Carbón, agregados de suelo con estructura granular y carbonatos primarios, horizonte Ck



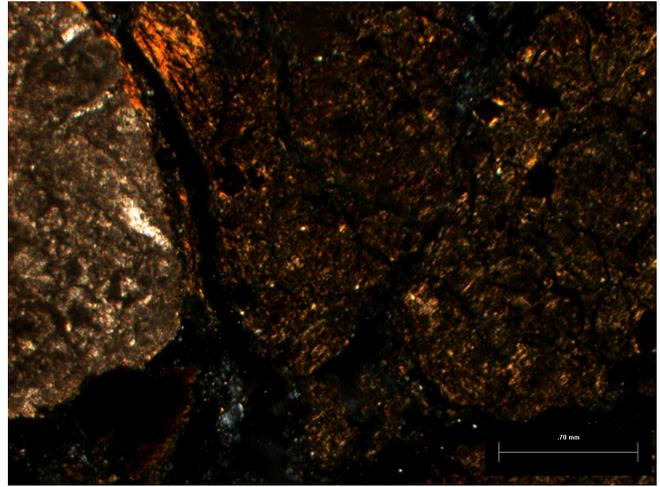
d] Estructura en bloques subangulares, horizonte 2Ah2



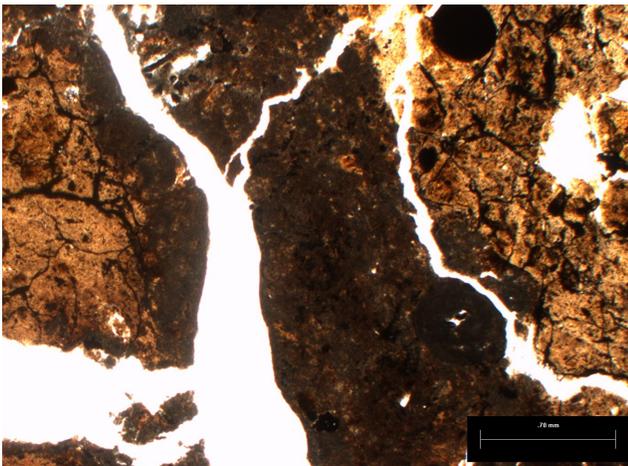
e] Concreción de Fe, horizonte 2Ah2



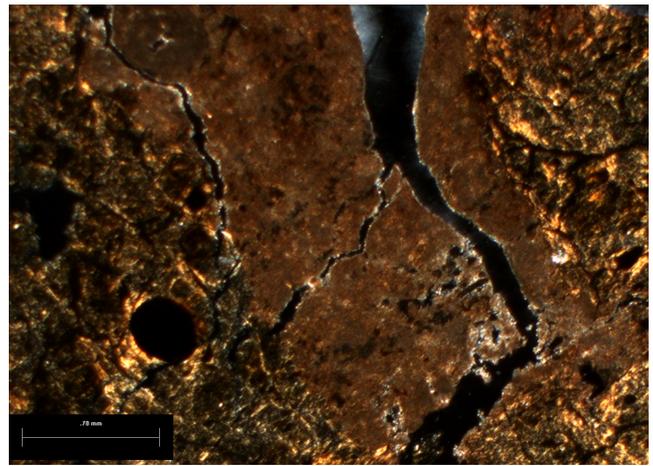
f] Concreción de Fe bajo luz reflejada, horizonte 2Ah2



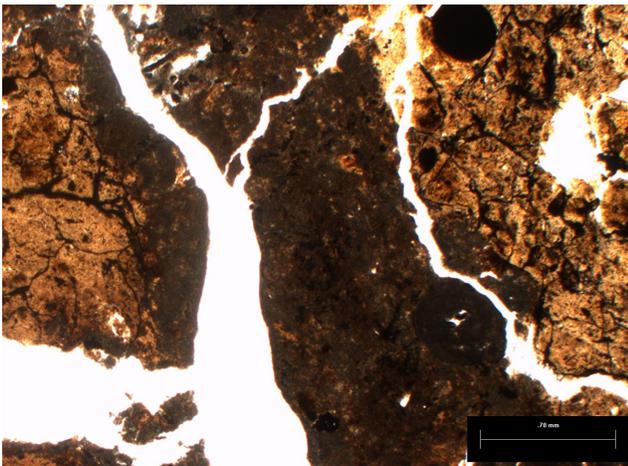
g] Fragmento de carbonato primario con sus bordes cubiertos por suelo, horizonte 2Ah2



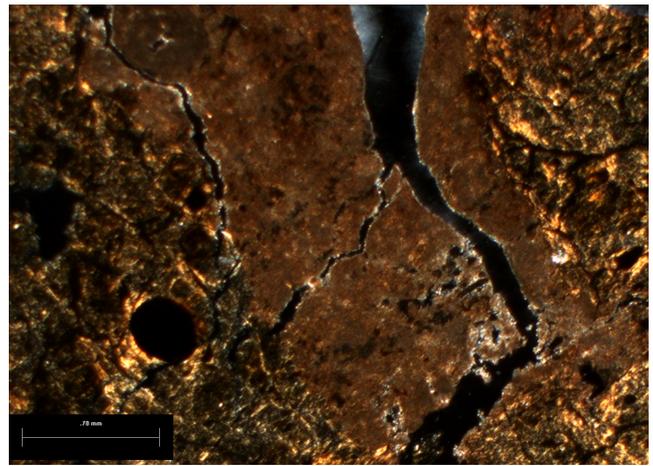
h] Fragmento de carbonato primario con sus bordes cubiertos por suelo con nx, horizonte 2Ah2

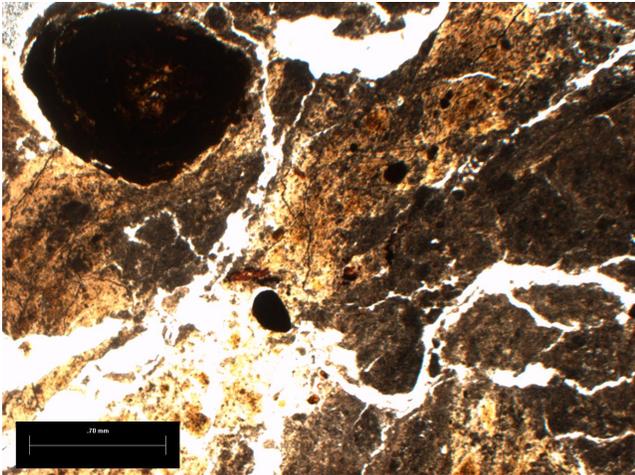


i] Estructura en bloques angulares, horizonte 2ABr1

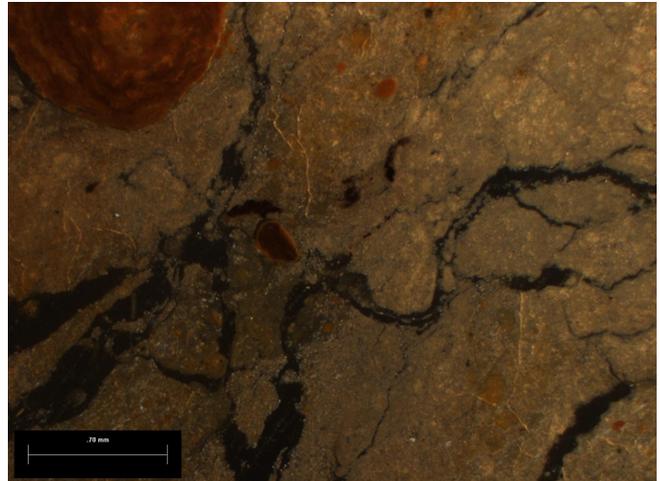


j] Estructura en bloques angulares con nx, horizonte 2ABr1





k] Agregados en bloques subangulares cubiertos por carbonatos secundarios, horizonte 2Cr



l] Agregados en bloques subangulares cubiertos por carbonatos secundarios con nx, horizonte 2Cr

Figura 17. Micromorfología, Calica 11

5.2.2 Análisis granulométrico

La granulometría del perfil Calica 11 (Figura 18) muestra dos tendencias, por un lado, el horizonte Ck y el horizonte 2Cr muestran un porcentaje similar para cada tamaño de partícula; en ambos domina la fracción arena con porcentajes ~ 45% y el contenido de partículas de tamaño arcilla representa el 36.8% y 39.2%, respectivamente. En cuanto a la fracción limo es mayor en Ck con 18.11% que en el horizonte 2Cr con 15.65%.

En los horizontes 2Ah1, 2Ah2 y 2ABr1 domina la fracción arcilla con porcentajes correspondientes al 94.4%, 84.3% y 86% respectivamente, el contenido de la fracción arena aumenta con la profundidad desde 3.13% hasta 9.51% y las partículas de tamaño limo son mayores en el horizonte 2Ah2 respecto a los horizontes 2Ah1 y 2ABr1.

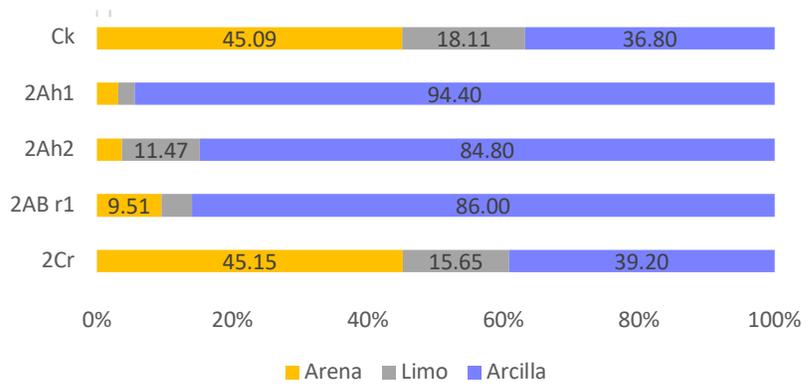
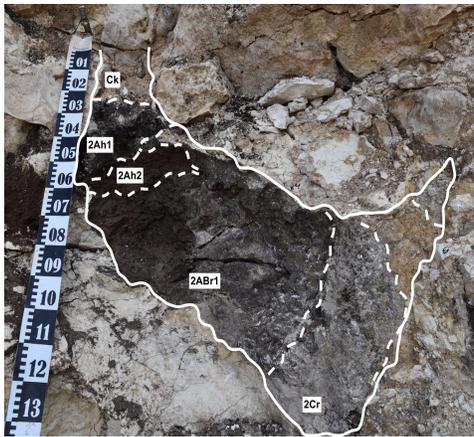


Figura 18. Granulometría, Calica 11

5.2.3 Colorimetría

La figura 19 muestra que, en general, las muestras tienen valores de luminosidad (L^*) menores que 50, lo que denota el dominio de coloraciones oscuras, siendo el horizonte 2Ah1, el más oscuro y los horizontes Ck y 2Cr los más claros. Con respecto a la intensidad del rojo y amarillo (a^* y b^* , respectivamente) los horizontes tienen valores que los ubican en tonalidades rojizas y amarillentas, el horizonte 2Ah2 presenta tonos más amarillentos y rojizos que el resto de perfil.

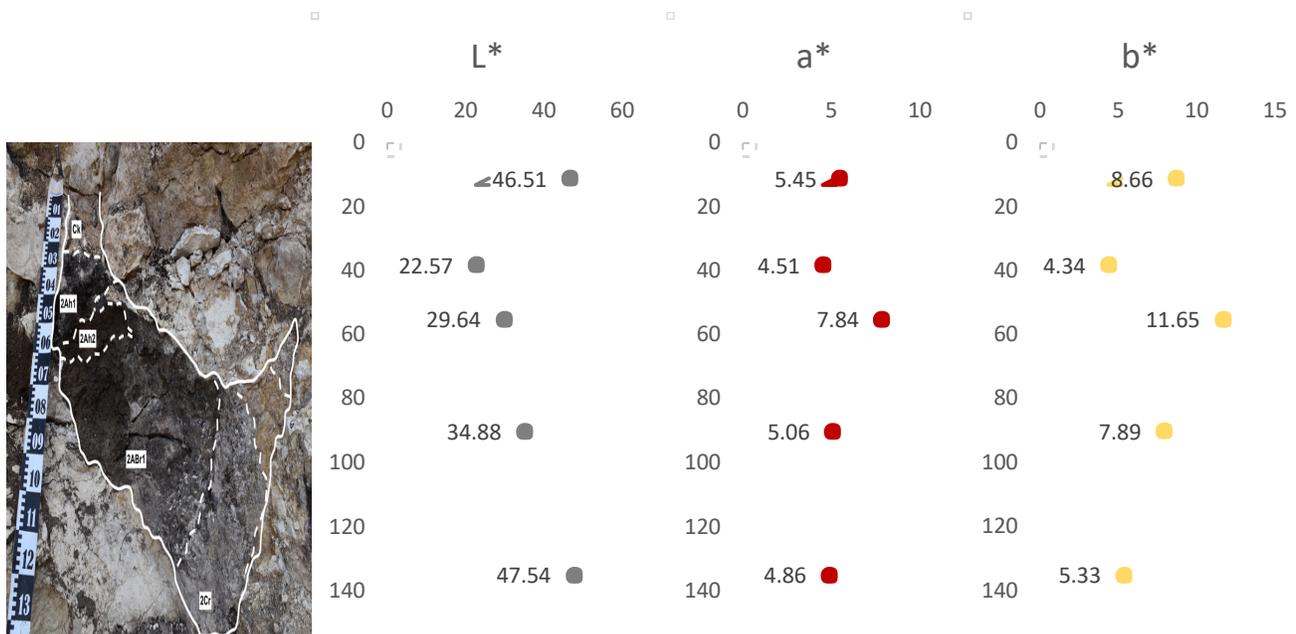


Figura 19. Colorimetría, Calica 11

5.2.4 Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad (Figura 20) en baja frecuencia tiende a disminuir conforme a la profundidad a excepción del horizonte 2Ah1 en el que se presenta un incremento notable respecto al resto de los horizontes, el valor de la susceptibilidad en este horizonte es de $0.56 \text{ m}^3/\text{kg}$, contrastando con los valores más bajos de 0.02 y $0 \text{ m}^3/\text{kg}$ en los horizontes más bajos del perfil. En el caso de la χ_{Fd} se observa claramente una disminución en el contenido de partículas súper paramagnéticas conforme aumenta la profundidad, desde valores de 13.79% en el horizonte Ck hasta el 0% en el horizonte 2Cr.

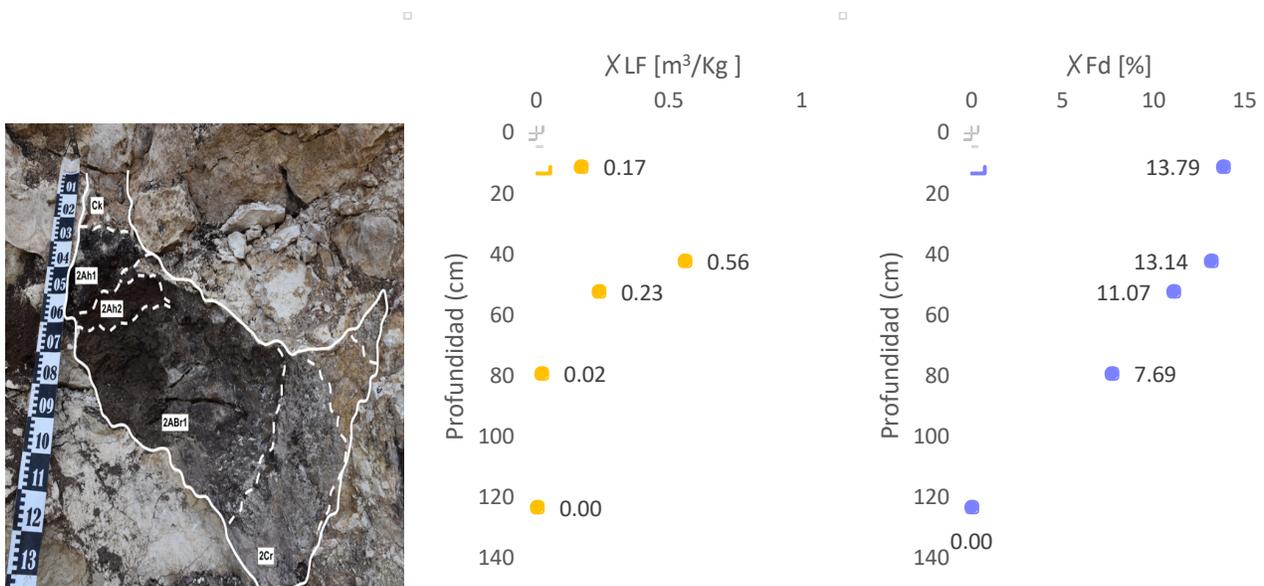


Figura 20. Susceptibilidad magnética en baja frecuencia normalizada por la masa y la susceptibilidad dependiente de la frecuencia, Calica 11

5.2.5 pH

El comportamiento del pH en el perfil Calica 11 (Figura 21) es alcalino siendo el horizonte 2Cr el que presenta la mayor alcalinidad.

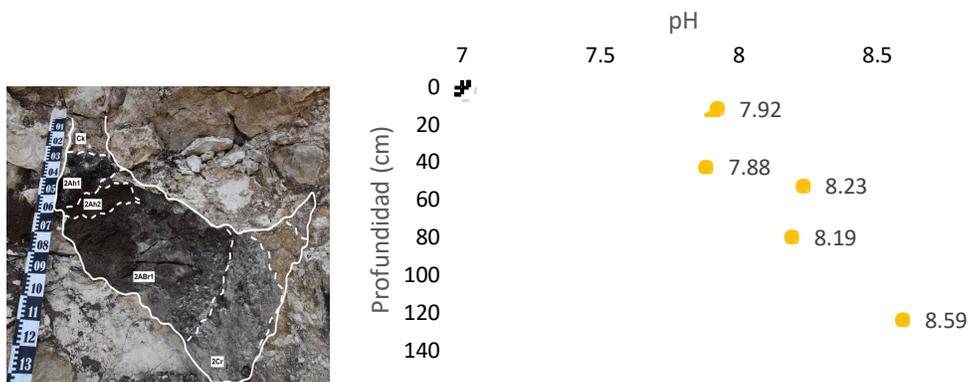


Figura 21. pH, Calica 11

5.2.6 Conductividad eléctrica

El contenido de sales en el perfil (Figura 22) tiende a disminuir del horizonte superior (Ck) con $620.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ hasta alcanzar la menor concentración en el horizonte 2Cr. Pero este comportamiento se rompe en el horizonte 2ABr1 al tener una concentración de sales mayor al resto del perfil con $657.3 \mu\text{S}/\text{cm}$.

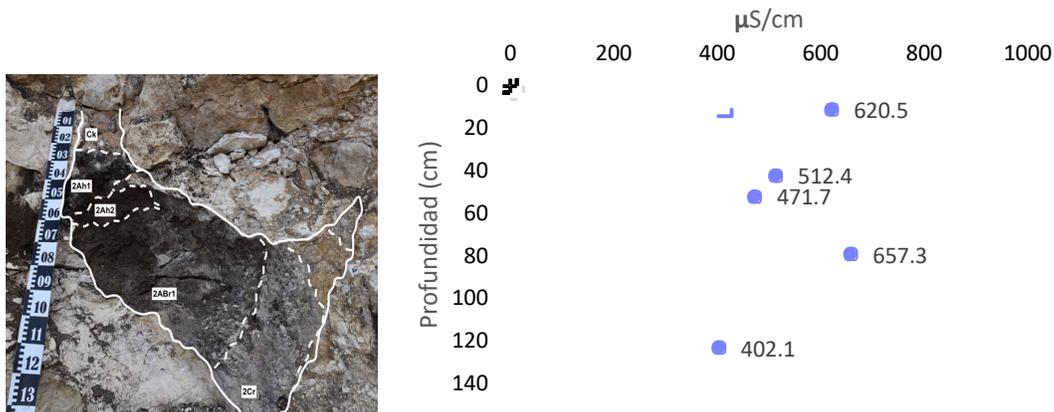


Figura 22. Conductividad eléctrica, Calica 11

5.2.7 Contenido de materia orgánica y carbonatos

En la figura 23 se muestran las tendencias del contenido de materia orgánica y carbonatos. Por un lado, los horizontes Ck y 2Cr presentan un alto contenido de carbonatos $\sim 33\%$ y valores bajos de materia orgánica (6.10% y 3.58% respectivamente) en comparación con el resto de

los horizontes. En el caso de los horizontes 2Ah1 y 2Ah2 el contenido de materia orgánica es mayor al de carbonatos con un mayor porcentaje en el horizonte 2Ah1. El horizonte 2ABr1 tiene porcentajes de ~9% tanto de materia orgánica como de carbonatos.

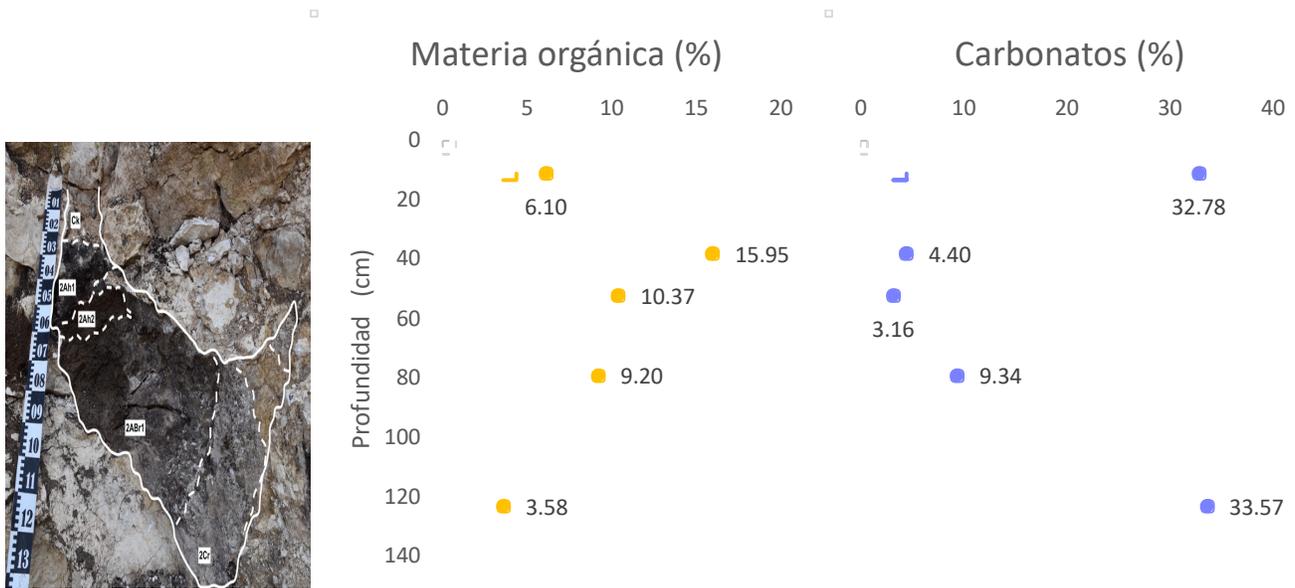


Figura 23. Materia orgánica y carbonatos, Calica 11

5.2.8 Difracción de rayos X

La figura 24 muestra los difractogramas obtenidos al someter la muestra tomada del horizonte 2Ah1 a diferentes tratamientos para la identificación del tipo de arcilla presente.

Como se muestra en los difractogramas, al tratar la muestra con etilenglicol ésta se expande de 14 Å (pico de la muestra sin tratamiento) a 17 Å y al someterla a una temperatura de 550°C colapsa a 10 Å, este comportamiento se encuentra resumido en la tabla 3.

| Picos sin tratamiento | Picos con etilenglicol | Picos a 550° C |
|-----------------------|------------------------|----------------|
| 14 Å | 16 – 17 Å | 10 Å |

Tabla 3. Comportamiento de la muestra a diferentes tratamientos para DRX.

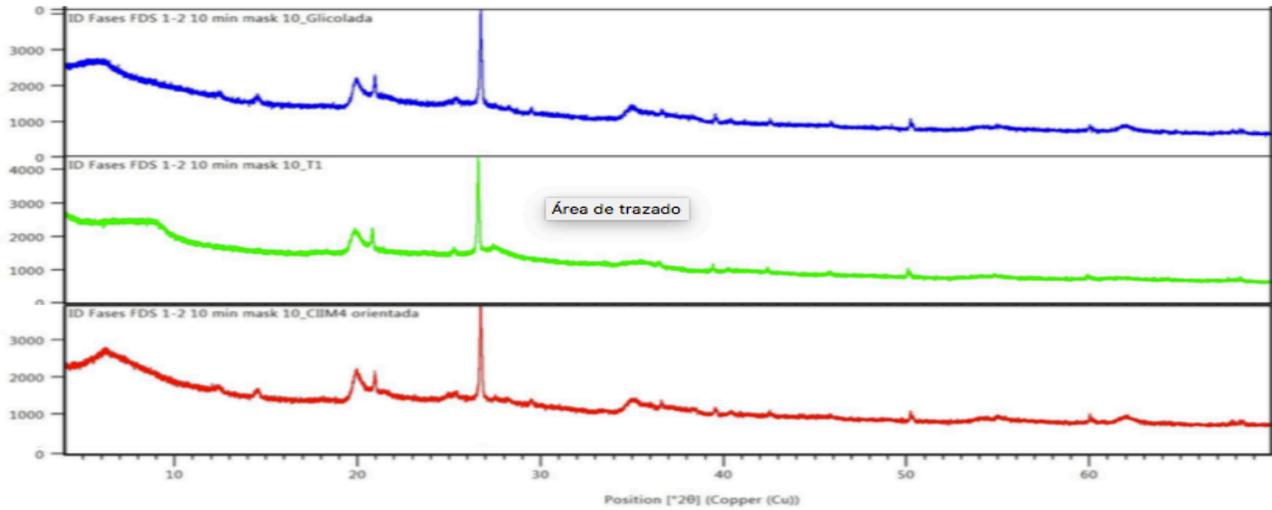


Figura 24. Difractogramas de la muestra C11M4 glicolada, calentada y orientada.

Siguiendo el comportamiento presentado en los difractogramas de la figura 24 en el diagrama de flujo para la identificación de arcillas de la USGS, se trata de una arcilla tipo montmorillonita. En general se identificaron tres fases minerales, cuarzo (SiO_2) y filosilicatos de tipo caolinita [$\sim 7 \text{ \AA}$] y esmectita [$\sim 14 \text{ \AA}$], como se muestra en el difractograma de la figura 25.

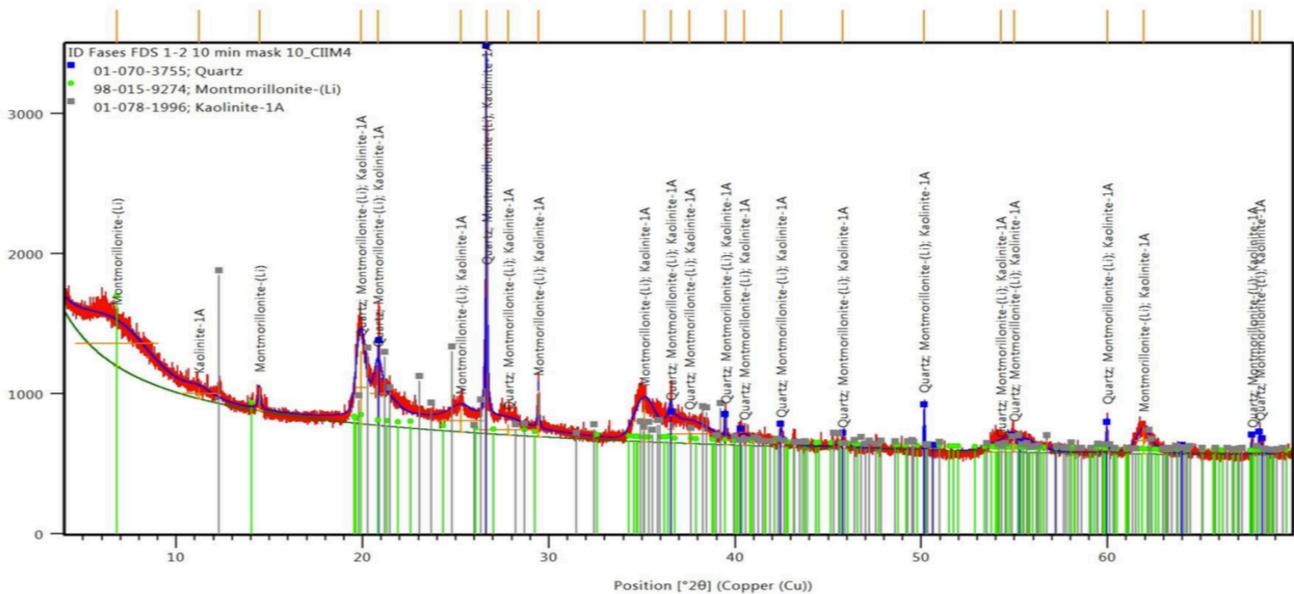


Figura 25. Difractograma con los resultados generales de las fases identificadas

5.3 CALICA 12

El suelo moderno es delgado, de color negro en contacto abrupto con roca caliza, con abundante vegetación. La descripción de campo se presenta en la figura 26.



| Horizonte | Espesor (cm) | Características |
|-----------|--------------|--|
| Ah | 0 - 20 | Horizonte oscuro con estructura granular, fragmentos de caliza, caracoles, hojarasca y raíces. |

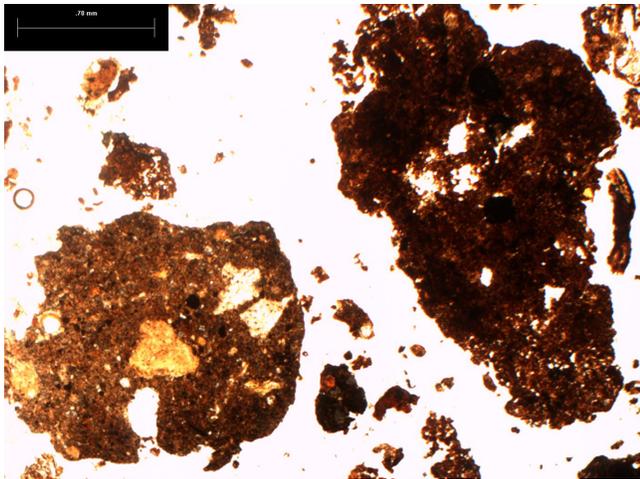
Figura 26. Descripción de campo, perfil Calica 12

5.3.1 Micromorfología

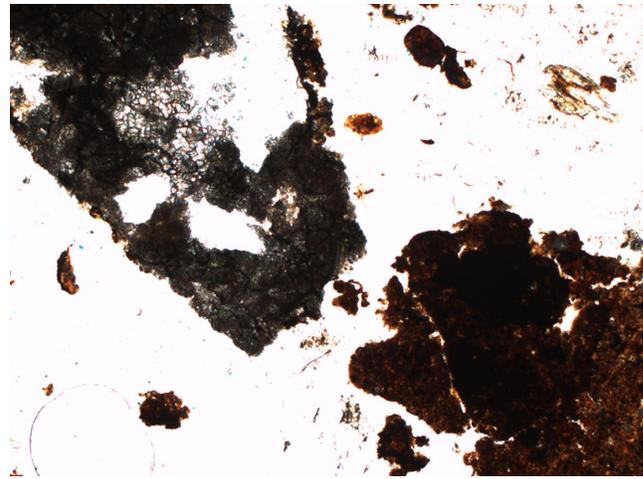
El suelo actual tiene una estructura granular, con dos tipos diferentes de agregados (Figura 27a)]. Los primeros son oscuros, compuestos principalmente de arcilla y humus. El otro tipo de agregados está constituido por fragmentos de carbonatos primarios y arcilla.

Hay fragmentos de carbonatos primarios con formas irregulares, intemperizados (Figura 27b] y 27c]) y en algunas zonas, pero en menor proporción, carbonatos secundarios reprecipitados en los bordes de los agregados.

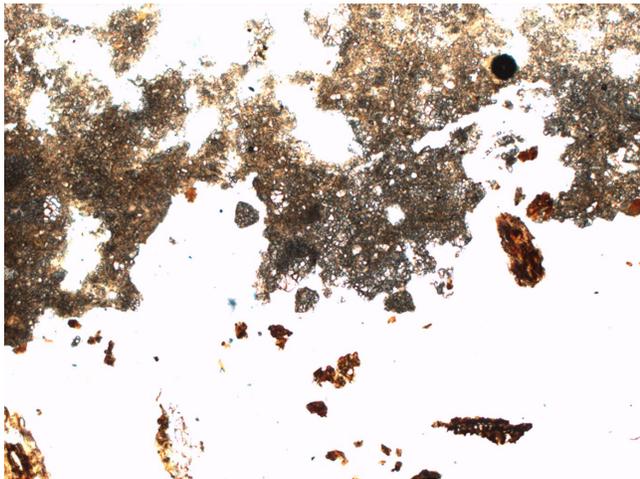
Se observa una alta actividad de mesofauna por alto contenido de coprolitos dentro de tejidos vegetales de los cuales en muchas ocasiones solo se conservan las paredes (Figura 27d]).



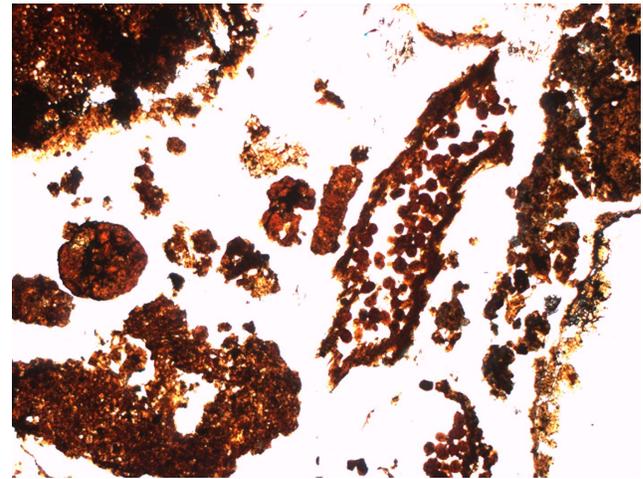
a] Estructura granular



b] Fragmentos de carbonatos primarios con intemperismo físico



c] Fragmentos de carbonatos primarios con intemperismo físico



d] Coprolitos dentro de las paredes de un tejido vegetal

Figura 27. Micromorfología, Calica 12

5.3.2 Análisis granulométrico

En el horizonte Ah la fracción dominante corresponde a la fracción limo con 44.35%, la fracción arcilla representa el 40.3% del total de la muestra, mientras que el contenido de la fracción arena corresponde al 14.85% (Figura 28).

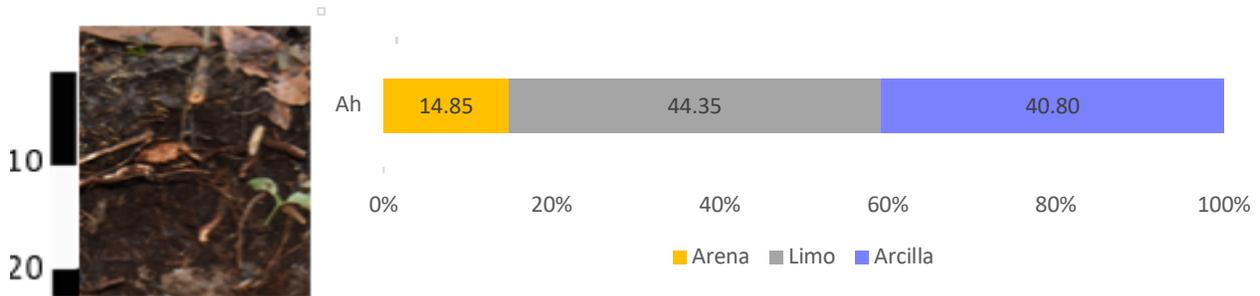


Figura 28. Granulometría, Calica 12

5.3.3 Colorimetría

La figura 29 muestra que, el horizonte Ah tiene una luminosidad (L^*) menor que 50, dominando la coloración oscura. En comparación con los paleosuelos, el suelo actual presenta los niveles más bajos de luminosidad. En cuanto a la intensidad del rojo y amarillo (a^* y b^* , respectivamente) el horizonte tiene valores que lo ubican en tonalidades ligeramente rojizas y amarillentas.

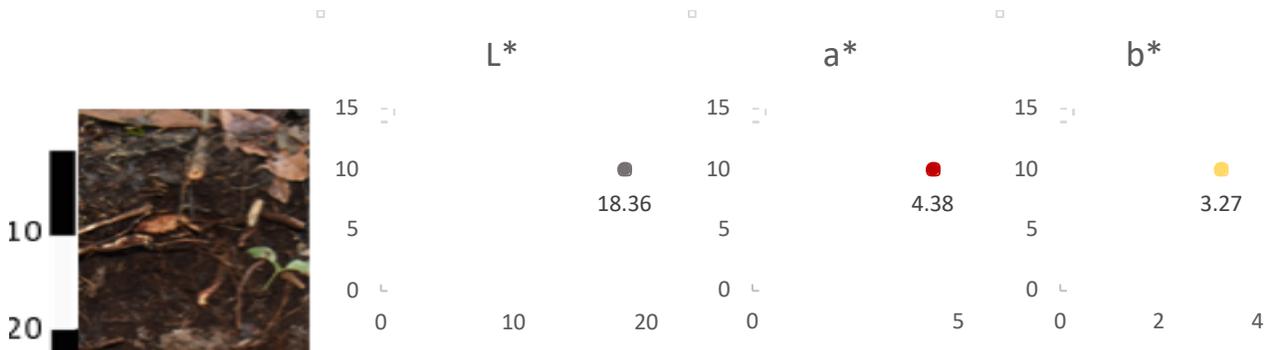


Figura 29. Colorimetría, Calica 12

5.3.4 Susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética tiene un valor de $0.29 \text{ m}^3/\text{Kg}$ mientras que la χ_{Fd} muestra un valor de 13.51% que indica un contenido alto de partículas súper paramagnéticas (Figura 30).



Figura 30. Susceptibilidad magnética en baja frecuencia normalizada por la masa y la susceptibilidad dependiente de la frecuencia, Calica 12

5.3.5 pH y conductividad eléctrica

El pH (Figura 31) tiene un valor ligeramente alcalino de 7.39 y la conductividad eléctrica tiene un valor de 1473 $\mu S/cm$.

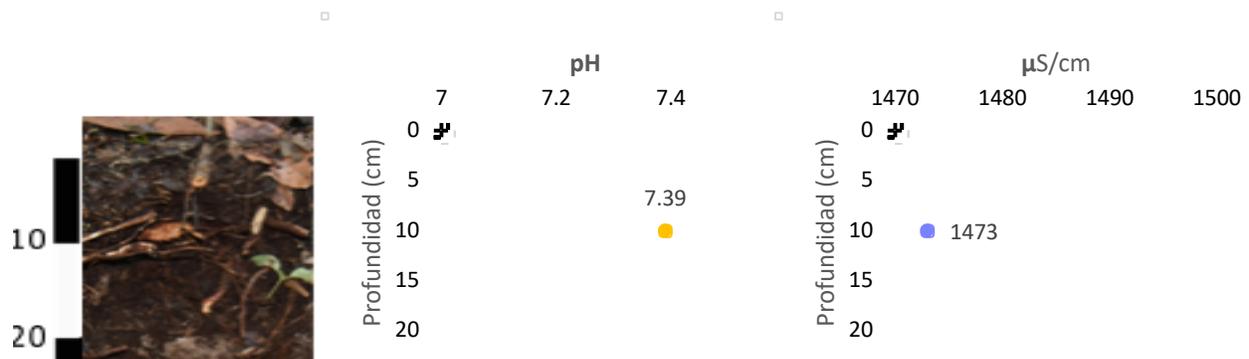


Figura 31. pH y conductividad eléctrica, Calica 12

5.3.6 Contenido de materia orgánica y carbonatos

Como se observa en la figura 32 en el horizonte Ah domina el contenido de materia orgánica con 50.89% respecto al contenido carbonatos (26.6%).

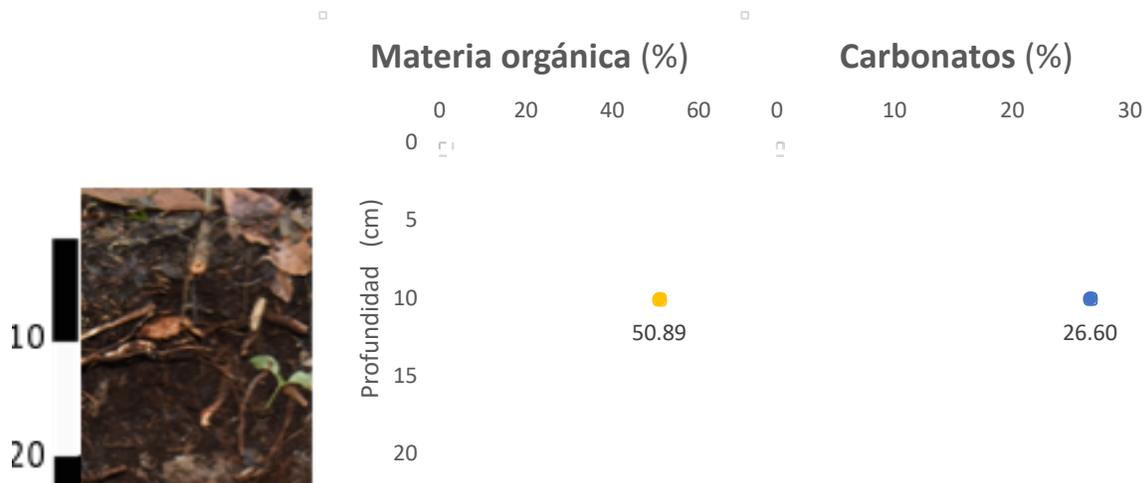
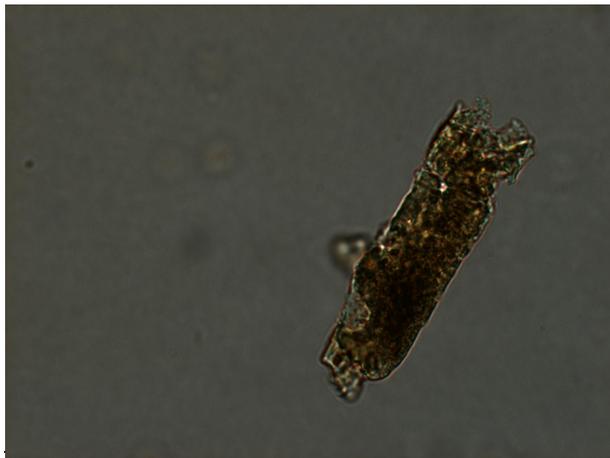


Figura 32. Materia orgánica y carbonatos, Calica 12

5.4 Fitolitos

En el horizonte 2Ah1 (Calica 11) se identificó un fitolito, posiblemente de gramínea con los bordes intemperizados y posible evidencia de quema por el color oscuro que presenta (figura 33a)], mientras que en el horizonte Ah1 (Calica 10) no se identificaron fitolitos pero se logró la identificación de una posible espícula de esponja fragmentada (Figura 33b)).



a] Fitolito con evidencia de quema



b] Espícula de esponja fragmentada

Figura 33. Identificación de fitolitos

6.1 Cronología de perfiles

Con respecto a la temporalidad de los paleosuelos estudiados, el perfil Calica 11 tiene una historia compleja, ya que contiene restos de carbón formado aproximadamente en el año 1950 y fragmentos de caracoles terrestres con una edad de 473 – 308 años AP (es decir formado entre los años 1477 y 1642 DC). Como se observa, la cubierta edáfica estuvo sometida a eventos de fuego, naturales o provocados por actividades humanas de la época moderna. La edad del caracol nos refiere también un uso de la cubierta de suelo durante la época colonial, que propició su movimiento dentro de la bolsa. Sin embargo, el resto de los horizontes, que se presumen son más antiguos, nos marcan ciclos pedogenéticos de mayor duración que dieron lugar a la formación de los horizontes 2Ah2, 2ABr, 2Cr.

Por su parte, la edad del perfil Calica 10 establece que el horizonte superior Ah con 830 – 700 años (1120-1250 DC) se formó durante el periodo posclásico, de manera que el depósito de este horizonte al interior de la depresión kárstica podría ser resultado de la erosión derivada del uso de suelo para la agricultura maya. Cabadas et al. (2010) y Solleiro et al. (2015) han demostrado la alta erosión en esta región, como consecuencia de las actividades de deforestación en la Península. Del mismo perfil se obtuvo la temporalidad más antigua, en el horizonte Bk, de 11,395-11,250 años AP que corresponde al Holoceno temprano, período en el cual los niveles del mar subieron como consecuencia del derretimiento de los glaciares formados durante Último Máximo Glacial.

6.2 Comparación entre perfiles

Como se mostró en la parte de resultados, el suelo actual tiene un porcentaje similar de limos y arcillas con un porcentaje ligeramente mayor de limos, la tonalidad es más oscura como resultado del alto contenido de materia orgánica (50.89%). No presenta rasgos reductomórficos como los observados en el resto de los perfiles por medio de micromorfología. Es probable que el alto contenido de materia orgánica también explique la menor alcalinidad del horizonte respecto al resto de los perfiles. Los valores de susceptibilidad magnética, si bien no se pueden comparar con otros horizontes del mismo suelo, son bajos con porcentajes altos

de la dependiente de la frecuencia, que indica la alta proporción de partículas súper paramagnéticas, formadas por pedogénesis.

Las características físicas y químicas mencionadas marcan una distinción muy clara entre el suelo moderno y los paleosuelos dentro de las bolsas kársticas. Sin embargo, se asemeja, sobre todo, al horizonte 2Ah1 del perfil Calica11, que muestra semejanza en la microestructura (agregados granulares), color, pH y el alto contenido de materia orgánica. La diferencia principal estriba en la granulometría por el alto contenido de arcilla (superior al 90%) y la alta susceptibilidad magnética, la cual se atribuye a los procesos de quema, evidenciados por la presencia de carbón.

El horizonte Ah de Calica 10 presenta valores similares de granulometría, pero con proporciones menores de materia orgánica y carbonatos y coloraciones más claras. Asimismo, los valores de CE son bastante diferentes, ya que en el suelo moderno son más del doble que en Calica 10 y 11. Las propiedades demuestran que el horizonte Ah tiene una génesis diferente al suelo moderno, mientras que 2Ah1 guarda notables similitudes. Es probable que parte de este suelo, proceda del suelo moderno (tal y como lo revela la edad de los fragmentos de carbón encontrados en él).

6.3 Correlación de los paleosuelos de Calica 10 y 11

En los horizontes intermedios de ambos perfiles domina la fracción arcilla con porcentajes mayores al 80%, en estos horizontes, con coloraciones oscuras, se detectaron las tonalidades más rojizas y amarillentas de sus perfiles, probablemente por el contenido de óxidos de Fe presentes, un contenido de materia orgánica superior al 9% y un bajo contenido de carbonatos (horizontes 2Ah2, 2ABr1 de Calica 11 y el Bk de Calica 10), figura 34.

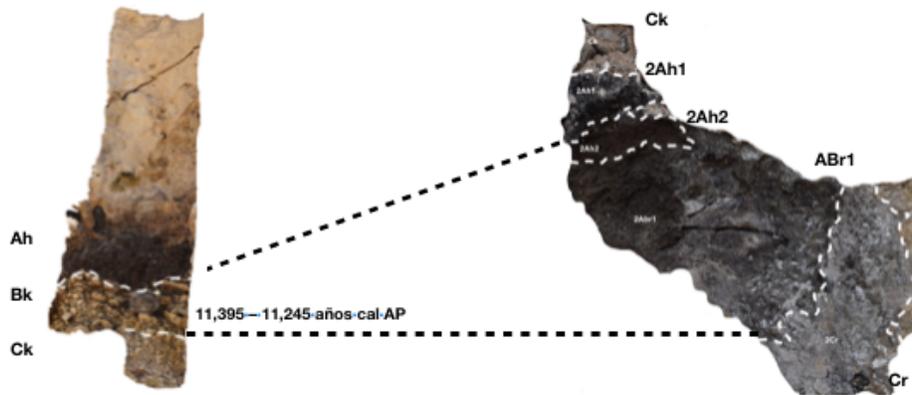


Figura 34. a] Correlación de los paleosuelos

Mientras que, en los horizontes con carbonatos primarios y secundarios, se presenta un incremento considerable en la fracción arena, el contenido de arcilla no excede el 40% y un contenido mayor al 30% de carbonatos. El alto contenido de carbonatos justifica las coloraciones menos oscuras presentadas en estos y las bajas susceptibilidades.

La micromorfología muestra que, en los horizontes inferiores de ambos perfiles, en la base de las bolsas karsticas, hubo una reprecipitación de carbonatos secundarios. Mientras la forma y estructura de los agregados en el horizonte Ah (Calica 10) y el horizonte 2Ah2 (Calica 11) son muy similares (Figura 34b)].

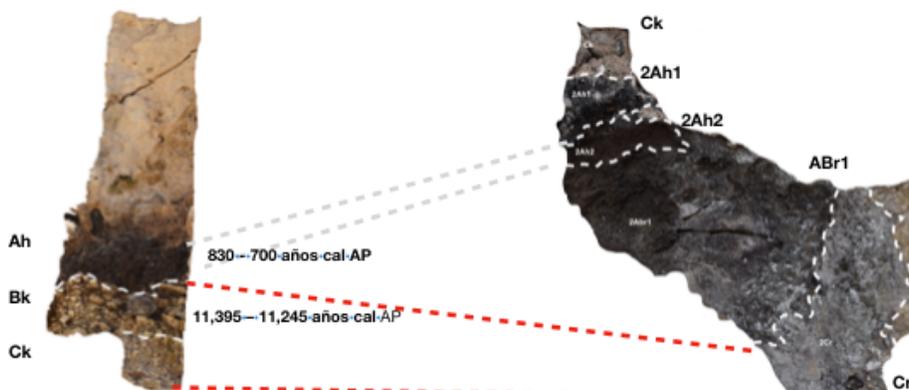


Figura 34. b] Correlación de los paleosuelos

6.4 Modelo de génesis de suelo dentro de las bolsas kársticas

Las diferencias granulométricas y micromorfológicas presentes en los perfiles hace que sea imposible atribuir el desarrollo del suelo a partir del mismo material parental. Además, considerando el tamaño de las depresiones kárstica, en particular Calica 11, y los resultados obtenidos por Cabadas, (2011) y Landa (2007) sobre el residuo insoluble de las calizas, la disolución de éstas es insuficiente para generar tal cantidad de suelo por lo que se supone que su desarrollo fue a partir de materiales depositados dentro de la depresión. Tal y como Sedov et al., (2007) y Cabadas et al., (2010) observaron en los suelos de la Península, que son erosionados y transportados a cortas distancias para ser depositados dentro de las depresiones. A partir de esto se plantea el siguiente modelo de génesis para ambos perfiles.

Primera fase

Después de la disolución de la roca y consecuente formación de las depresiones (bolsas kársticas) (Figura 35a)] se depositó un material erosionado de la superficie (Figura 35b)] es claro que éste ya tenía muchas de las características observadas pues el contenido de arcilla en los horizontes intermedios, superior al 80%, únicamente podrían explicarse por un material parental rico en éstas o un suelo muy antiguo, por lo que se propone que el relleno de la bolsa fue un suelo erosionado en superficie en un momento de inestabilidad del paisaje.

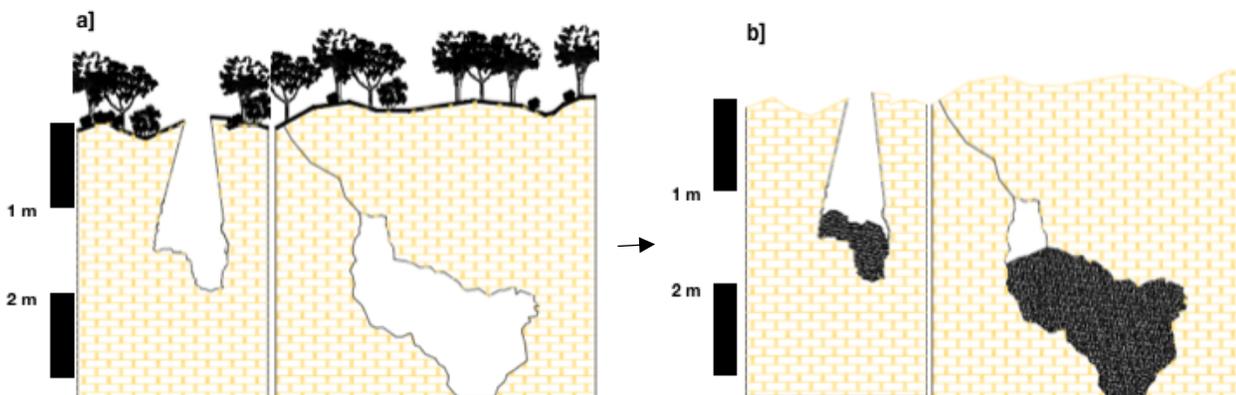


Figura 35. Primera fase, formación y relleno de las depresiones kársticas

Una vez depositado el material rico en arcillas, los procesos pedogenéticos continuaron dentro de las bolsas como lo demuestra la formación de estructura, procesos reductomórficos y la pérdida de carbonatos, el desarrollo de estas características implicó un largo periodo de tiempo (Figura 36), tan solo las características vérticas presentes en los horizontes 2Ah2, 2ABr1 en

conjunto con la presencia de montmorillonita en 2Ah1 y las condiciones reductomórficas, implican una alternancia entre de periodos secos y periodos saturados con agua. Esto quiere decir que el suelo de Calica 11 sufrió procesos de saturación de agua por periodos seguidos por sequías estacionales marcadas, se suponen los mismos procesos para ambos perfiles.

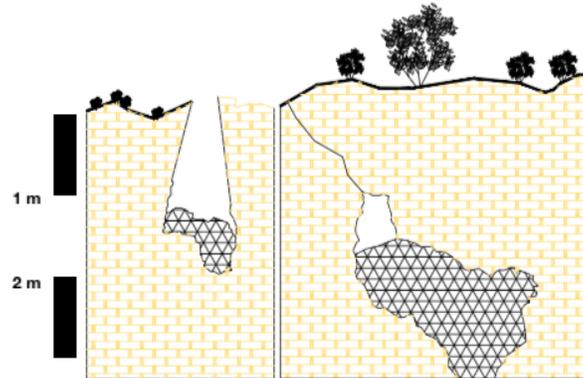


Figura 36. Primera fase, pedogénesis dentro de las depresiones karsticas

Segunda fase

Los agregados cubiertos por carbonatos secundarios presentes en las partes inferiores de las bolsas podrían explicarse a partir de dos hipótesis.

La primera de ellas supondría que los carbonatos secundarios son consecuencia de la disolución de carbonatos primarios localizados en la parte superior de los perfiles y que una vez disueltos migraron hasta la parte inferior, redepósitándose. Sin embargo, en los horizontes superiores del perfil Calica 11 no se observó evidencia que sugiera esta migración, mientras que los observados en el horizonte Ah de Calica 10, no pueden atribuirse al mismo evento de acuerdo con la datación obtenida para este horizonte que los sitúa en una temporalidad mucho más recientes para este horizonte y la evidencia micromorfológica que muestra los agregados del horizonte Ah entre los poros de los horizontes carbonatados sin ser afectados por este proceso, lo que indica que su depósito ocurrió en un momento en el que ya no se producía esta reprecipitación. Por lo que se propone como segunda hipótesis que la reprecipitación de carbonatos secundarios, en ambas bolsas, fue consecuencia de una saturación con agua rica en carbonatos, esta saturación probablemente ocurrió con aguas freáticas (Figura 37). Si bien los factores que pudieron provocar un aumento en el nivel del manto freático se desconocen, se pueden atribuir al aumento del nivel del mar por el derretimiento de los glaciares a finales

del Pleistoceno. La edad del caracol en el horizonte Bk de la bolsa Calica 10, de más de 11,000 años, sugiere que este evento puede haber sucedido alrededor de esa fecha.

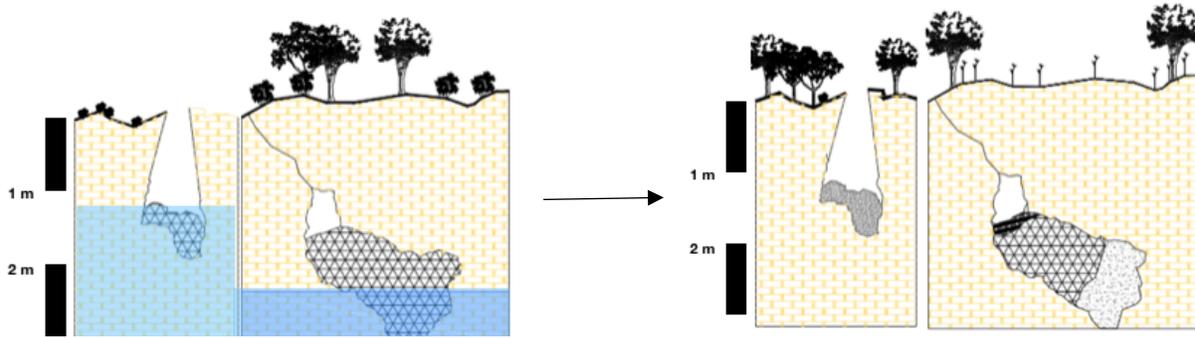


Figura 37. Segunda fase, saturación con aguas ricas en carbonatos y recalcificación de horizontes inferiores

Tercera fase

La evidencia de quema y mezcla de materiales en los horizontes superiores sugieren una erosión más intensa en superficie, la cual puede atribuirse a la modificación del entorno por actividades antropogénicas desde el periodo posclásico hasta nuestros días (Figura 38).

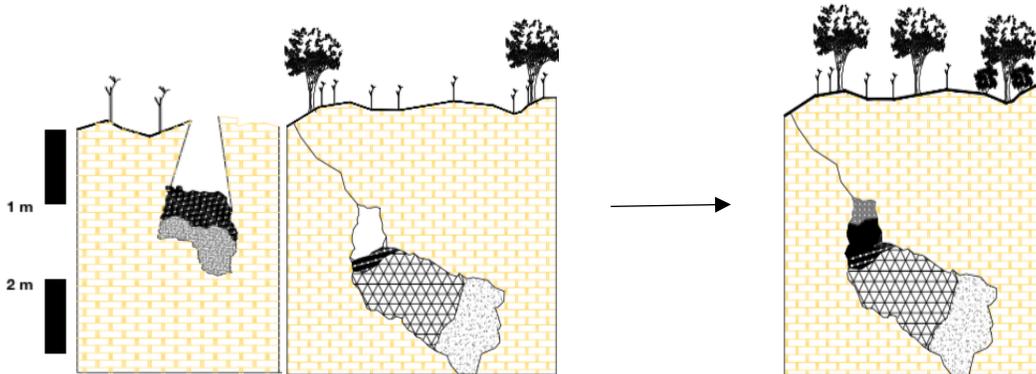


Figura 38. Tercera fase, erosión y depósito de horizontes superiores

7. Conclusiones

La caracterización física y química de los suelos junto con la micromorfología permitió realizar una comparación entre los suelos de las depresiones kársticas y el suelo actual. Los análisis mostraron que los suelos de las bolsas kársticas presentan varias similitudes entre ellos, pudiéndose identificar los mismos procesos pedogenéticos en estos perfiles, mientras que mostraron una distinción muy clara entre éstos y el suelo actual.

Las dataciones obtenidas mostraron una historia compleja de formación y desarrollo para los suelos de las depresiones kársticas, con una historia mayor a los 11,000 años y que de acuerdo con la fecha obtenida para el carbón continua hasta nuestros días.

Los análisis en conjunto con las edades obtenidas permitieron proponer un modelo para la génesis de los suelos, el cual sugiere al menos dos eventos en los cuales la modificación del paisaje resultó en la erosión y pérdida de la cubierta edáfica en superficie y su depósito dentro de las depresiones. El primero de ellos, a principios del Holoceno atribuido a los cambios en el ambiente provocados por las variaciones climáticas ocurridas en esta época, mientras que el segundo, de mayor intensidad, como lo sugiere la mezcla de caracoles, carbonatos primarios y suelo en los horizontes superiores, es atribuido a las actividades antrópicas realizadas en la región y que han derivado en una modificación del entorno desde el posclásico maya (por el uso de suelo) hasta el día de hoy. Entre estas identificó un periodo de estabilidad que permitió la pedogénesis.

Referencias bibliográficas

- Acosta, G., (2016). *Modos de producción y agricultura temprana: nuevos datos del centro y sur de México*. In: Jiménez, L. J. C., Serrano, S. C., Aguilar, A. F., González, G. A. (Eds). El poblamiento temprano en América. Serie Prehistoria en América
- Bautista, F.,(2010). Contexto físico. Capítulo 1. *El suelo*. In: Durán, R. M., (Eds). Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 496 p.
- Bautista, F., Palacio, G., Páez-Bistraín, R., Carmona-Jiménez, M. E., Delgado-Carranza, C., Cantarell, W., Tello, H., (2011). Capítulo 16. *Geografía de suelos regional: Península de Yucatán*. In: Krasilnikov, P., Jiménez-Nava, F.J., Reyna-Trujillo, T.E., García-Calderón, N. E., (Eds). Geografía de suelos de México. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Beach, T., Luzzadder-Beach S., Cook D., Dunning N., Kennett D., Krause S., Terry R., Trein D., & Valdez F., (2015). Ancient Maya impacts on the Earth's surface: An Early Anthropocene analog. *Quaternary Science Reviews*, 124, 1-30.
- Buol S.W., Hole F. D., McCracken R. J., (1990). Génesis y clasificación de suelos. México, Trillas, 417 p.
- Cabadas, B. H., Solleiro, R. E., Sedov, S., Pi, P. T., & Gama, C. J., (2010). *Pedosediments of karstic sinkholes in the eolianites of NE Yucatán: A record of Late Quaternary soil development geomorphic processes and landscape stability*. *Geomorphology*, 122, 323-337.
- Cabadas, B. H., (2011). *Pedogénesis y dinámica ambiental en el paisaje kárstico de la región noreste de Quintana Roo, México, durante el Cuaternario tardío* (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional Autónoma de México, 211 p.
- Esteban, M., Klappa, C. F., (1983), *Subaerial Exposure Environment*. In: Scholle, P. A., Bebour, D. G. Moore, C. H., (Eds). Carbonates depositional environments. The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa Oklahoma, U.S.A., 1-54.
- FAO (2014). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos* (Vol. 106). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Flores, D. L., Alcalá, M. J. R., (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos del Laboratorio de Física de suelos*. Instituto de Geología, Departamento de Edafología, Universidad Nacional Autónoma de México. 56 p.
- García, G., Graniel, E., (2016). *El Estado. Geología. En Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán. Contexto Físico*. (págs. 4 - 6). Yucatán: SEDUMA, Yucatán.

- González, G. A. H., Rojas, S. C., Terrazas, M. A., Benavente, S. M., Stinnesbeck, W., Aviles, O. J., de los Ríos, M. & Aceves, E., (2008). *The Arrival of Humans on the Yucatan Peninsula: Evidence from Submerged Caves in the State of Quintana Roo, Mexico*. *Current Research in the Pleistocene*, 25.
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2017*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
- Islebe, G., Sanchez, O., (2002). *History of Late Holocene vegetation at Quintana Roo, Caribbean coast of Mexico*. *Plant Ecol*(160), 187-192.
- Jackson, M. (1958). *Soil chemical analysis*. Engelwood Cliffs, N. J., EUA: Prentice-Hall, Inc.
- Jeremy, J. G., Reinhardt, E. G., Peros, M. C., Davidson, D. E., van Hengstom, P. J. & Beddows, P. A., (2008). *Palaeoenvironmental evolution of Cenote Aktun Ha (Carwash) on the Yucatan Peninsula, Mexico and its response to Holocene sea-level rise*. *J. Paleolimnol.*
- Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M. C., Ahrens, R. J., Cruz.Gaistardo, C. O., Sedov, S., Solleiro, R. E., (2013). *The soil of Mexico*. Netherlands, Springer, 187 p.
- Landa, A. J. F., (2007). *Caracterización del residuo silicato de las calizas como material parental de los suelos de la Península de Yucatán* (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. 52 p.
- Loaiza J. C., Stoops, G., Poch, R. M., & Casamijtana, M., (2015). *Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Pascual Bravo, 384 p.
- Lugo, H. J., Aceves, Q. J., Espinasa, P. R., (1992). *Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Instituto de Geología, UNAM, 10, 143-150.
- Madella, M., Power-Jones, A. H. & Jones, M. K.,(1998). *A simple method of extraction of opal phytoliths from sediments using a non-toxic heavy liquid*. *Journal of Archaeological Science*, 801-803.
- Pozo, C., Armijo, N., Calmé, S., (2011). *Riqueza biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*. Quintana Roo, México: Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), Gobierno del Estado de Quintana Roo y Programa de Pequeñas Donaciones (ppd). México, D. F. Tomo I, Primera edición, 342p.
- Sedov, S., Solleiro, R. E., Fedick, S. L., Gama, C. J. Palacios, M. S. & Vallejo, G. E., (2007). *Soil genesis in relation to landscape evolution and ancient sustainable land use in the northeastern Yucatan Peninsula, Mexico*. *Atti. Soc. Tosc. Sci. Nat. Mem., Serie A* 112. 115-126.

Solanes, M., Vela, E., (2000). Especial. *Atlas del México prehispánico*. Arqueología Mexicana, (5).

Solleiro, E., Terhorst, B., Cabadas, H., Sedov, S., Damm, B., Sponholz, B., Wiesbeck, C., (2015). *Influence of Mayan land use on soils and pedosediments in karstic depressions in Yucatan, Mexico.*, Lucke, B., Bäuml, R., Schmidt, M. (Eds), Soils and Sediments as Archives of Environmental Change. Geoarchaeology and Landscape Change in the Subtropics and Tropics. Franconian Geographical Society, Erlangen, Germany. 233-266 p.

Torrescano, N., Islebe, G. A., (2006). *Tropical forest and mangrove history from southeastern Mexico: a 5000 yr pollen record and implications for sea level rise.* Veg Hist Archaeobot, 15, 191-195.

USGS Coastal and Marine Geology Program . (s.f.). Obtenido de A Laboratory Manual for X-Ray Powder Diffraction:
<https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01041/html/docs/flow/index.html>