



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Paleosuelos en el sistema kárstico de Yucatán y su uso en la
reconstrucción de la cubierta edáfica perdida**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A:

Daniel Vela Godínez



**DIRECTOR DE TESIS:
Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo
2018**

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.



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.



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 está 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 lo estuvo 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 del alumno:

Daniel Vela Godínez

308208766

Licenciatura en Ciencias de la Tierra

Facultad de Ciencias, UNAM

Datos del Tutor:

Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo

Instituto de Geología, UNAM

Datos Sinodal 1:

Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez

Universidad Autónoma del Estado de México

Datos Sinodal 2:

Dra. Teresa Pi Puig

Instituto de Geología, UNAM

Datos Sinodal 3:

Dr. Rafael Antonio López Martínez

Instituto de Geología, UNAM

Datos Sinodal 4:

Berenice Solís Castillo

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, UNAM

Datos de la Tesis

Paleosuelos en el sistema kárstico de Yucatán y su uso en la reconstrucción de la cubierta
edáfica perdida

51p

2018

Agradecimientos.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ciencias por darme la oportunidad de estudiar una carrera, como es Ciencias de la Tierra y mostrarme ese conocimiento tan valioso para poder aprovecharlo, ahora y en el futuro.

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

A la Doctora Elizabeth Solleiro Rebolledo por la dedicación, tiempo, entrega y el esfuerzo realizado para guiar a todos sus alumnos y por haberme adoptado en su grupo de trabajo como uno de ustedes.

Al M. en C Jaime Díaz Ortega, a la Dra. Teresa Pi Puig, al Quím. Rufino Lozano Santa Cruz y al Dr. Francisco Martín Romero por el apoyo brindado en la realización de los análisis requeridos y al Instituto de Geología de la UNAM por brindarme las instalaciones en el desarrollo de esta tesis.

A los miembros del jurado: Dra. Elizabeth Solleiro, Dr. Héctor Víctor Cabadas Báez, Dra. Teresa Pi Puig, Dr. Rafael Antonio López Martínez y a la Dra. Berenice Solís Castillo por brindarme el interés, tiempo y consejos para el mejoramiento y culminación de esta tesis.

Al grupo de Paleosuelos por haberme aconsejado, guiado y sobre todo acogido como uno de ustedes en este camino lleno de obstáculos, pero también de risas y alegría.

A Dani, a Fernando, a Orlando, a Sara y todos los amigos que encontré, por su compañía, consejos, apoyo, risas, amistad y todas las aventuras que tuvimos durante el tiempo que duro nuestra carrera y las actividades realizadas dentro de la UNAM.

A Malinali Castañeda Romero por su apoyo, comprensión, consejos y todo el amor que me brindó para sortear los obstáculos, por las aventuras y cariño que me regaló y sobre todo por las enseñanzas que abrieron mi mente y corazón para afrontar no solo este logro, sino muchos otros a lo largo del tiempo que coincidimos.

A mis padres Alejandro Vela Bustamante y María Sonia Godínez Estrada y mis hermanos Alejandro, Areli y Carlos por aguantarme y por brindarme todo el esfuerzo, los consejos, los recursos y el apoyo, pero sobre todo el amor y la educación que ha sido uno de los mejores regalos y uno de los grandes pilares en mi vida. GRACIAS FAMILIA.

**PARA MI ABUELO JUAN VELA DE LA SANCHA.
GRACIAS POR ENSEÑARME EL CAMINO DEL AMOR Y LA JUSTICIA.**

Índice

	Páginas
Agradecimientos	
Resumen	1
Capítulo 1. Introducción	2
Justificación	2
Hipótesis	3
Objetivo general	3
Objetivos particulares	3
Capítulo 2. Marco Teórico	5
Rocas carbonatadas	5
El Karst y sus componentes	6
Suelo	8
Relación Suelo-Karst	10
Capítulo 3. Metodología	11
Muestreo en campo	11
Morfología	12
Micromorfología	13
Colorimetría	14
Difracción de rayos X (DRX)	15
Geoquímica de elementos mayores obtenida por fluorescencia de rayos X.	16
Fluorescencia de rayos X portátil	16
Fluorescencia de rayos X convencional	16
Capítulo 4. Área de estudio	18
Localización del área de estudio	18
Geología	19
Geomorfología	20

Clima	21
Vegetación	22
Hidrología	22
Suelo	23
Capítulo 5. Resultados	24
Morfología en campo	25
Colorimetría de los materiales estudiados	27
Micromorfología	28
Análisis mineralógico por difracción de rayos X	33
Composición química por fluorescencia de rayos X (equipo portátil).	36
Fluorescencia de rayos X (convencional)	37
Capítulo 6. Discusión de Resultados.	40
Comparación del suelo en la bolsa con los suelos actuales de la Península de Yucatán.	40
Procedencia de los materiales encontrados dentro del objeto de estudio.	41
Pedosedimentos	43
Modelo de formación de los suelos/pedosedimentos en la bolsa.	44
Capítulo 7.- Conclusiones	47
Referencias	48

Índice de Figuras

Figura	Pagina
1 Ambientes deposicionales de carbonatos.	6
2 Perfil idealizado de un sistema Kárstico.	8
3 Distribución actual de suelos en la Península de Yucatán.	9
4 Localización de la zona de estudio, Akumal QR., México.	11
5 Perfil C4 muestreado dentro de la cantera CALICA	12

6	2 de las 12 muestras tomadas en el perfil C4.	13
7	Zona de estudio.	18
8	Mapa geológico de la Península de Yucatán	19
9	Rocas carbonatadas y forma kárstica	20
10	Formas de disolución hechas por el agua al disolver la roca carbonatada	21
11	Vegetación típica Quintana Roo	22
12	Suelo réndzico	23
13	Perfil C4 con las muestras marcadas en las profundidades donde fueron tomadas.	24
14	Tendencia en los valores obtenidos con el espectrómetro para las variables L*, a* y b*.	27
15	Fotografías de láminas delgadas de las muestras C4M1, C4M2, C4M3, C4M4. LN – luz natural; LP – luz polarizada; LR – luz reflejada	30
16	Fotografías de láminas delgada de la muestra C4M5. LN – luz natural; LP – luz polarizada; LR – luz reflejada	32
17	Fotografías de láminas delgada de la muestra C4M6, C4M7, C4M8, C4M9, C4M10, C4M11 y C4M12. LN – luz natural; LP – luz polarizada; LR – luz reflejada	33
18	Difractograma de C4M8 que muestra el espectro de bohemita y esmectita	35
19	Difractograma C4M5 que muestra los picos de bohemita, hematita, caolinita y esmectita (los últimos dos son filosilicatos de 7 y 14 Å respectivamente).	35
20	Concentraciones de Ca dentro del perfil	36
21	Concentraciones de Fe, Mn, Ti dentro del perfil C4.	37
22	Contenido de elementos dentro de la muestra C4M8, con excepción de CaO.	39

23	Contenido de elementos dentro de la muestra C4M8, con excepción de CaO.	39
24	El nivel del mar esta alto y se depositan las capas sedimentarias.	46
25	Baja el nivel del mar y se exponen las capas sedimentarias, comienza la colonización vegetal, la formación y desarrollo del suelo y del karst	46
26	Transporte del suelo a la forma kárstica y maduración del mismo dentro de ella.	47
27	Transgresión marina, litificación de la forma kárstica y formación de capas sedimentarias sobre la misma.	47

Índice de Tablas

Tabla		Pagina
1	Principales suelos, actuales, dentro de la Península de Yucatán.	9
2	Descripción de las muestras tomadas en campo.	25
3	Mineralogía de las muestras C4M8 y C4M5	34
4	Resultados en %Masa del contenido de dos muestras procesadas con la técnica de Fluorescencia de Rayos X.	38

Resumen.

Este trabajo está enfocado a entender los procesos de pedogénesis y del desarrollo de los sistemas kársticos, determinando su comportamiento, desarrollo y evolución. En el trabajo de campo se tomaron 12 muestras de suelos y roca en el estado de Quintana Roo, dentro de una cantera de roca caliza, tratando de representar el sistema de una geoforma kárstica, con su contenido edáfico dentro de ella, junto con los diferentes rasgos observados, para su posterior análisis.

El análisis de laboratorio está enfocado a la caracterización de este sistema a través de la observación del color, de la micromorfología en lámina, el contenido de elementos mayores obtenido por fluorescencia de Rayos X en dos diferentes equipos (portátil y convencional) y su contenido mineralógico por Difracción de Rayos X.

Se realizó la comparación del material edáfico encontrado en la forma kárstica con el suelo actual que domina la superficie de la Península de Yucatán. A su vez se hizo la relación del material edáfico de la forma kárstica con su posible origen, así como los procesos ocurridos durante y posterior a su formación.

Con esta información, se realizó un modelo de desarrollo del paisaje, enmarcando las diferentes etapas del desarrollo del sistema kárstico y suelos, el cual ocurrió durante épocas de bajo nivel del mar; su sepultamiento por sedimentos carbonatados marinos que se acumularon en fases transgresivas; y la litificación de los suelos por carbonatación.

Dado que el suelo de la paleosuperficie en este sistema dinámico no se conserva, el encontrarlo en las depresiones kársticas representa un campo de oportunidad para el estudio de la cubierta edáfica pérdida.

Capítulo 1.- Introducción

La Península de Yucatán se caracteriza por ser una plataforma carbonatada de origen marino. Las regiones costeras, como el estado de Quintana Roo, poseen registros de rocas calizas formadas en el Cuaternario. Estas calizas al estar en contacto con los factores ambientales desarrollan procesos de karstificación.

Los suelos que se forman en los paisajes kársticos son, generalmente, delgados y discontinuos, aunque se combinan con suelos profundos, arcillosos de color rojo (Durn, 2003).

En la Península de Yucatán, Bautista et al. (2010) han reconocido a las Rendzinas o Leptosoles réndzicos como las unidades de suelos dominantes, en tanto que los Luvisoles crómicos ocupan un menor porcentaje. Cabadas et al. (2010) han mostrado la presencia de suelos rojos, arcillosos en las depresiones kársticas del estado de Quintana Roo, los cuales tienen diversos orígenes. Es decir, no se forman por la simple disolución de las calizas.

La pregunta que surge es si la formación del suelo en el pasado, durante las etapas regresivas marinas, dentro de estos paisajes kársticos se asemejan o no a los que se tienen actualmente.

Justificación.

La historia geológica de la Península de Yucatán ha sido ampliamente estudiada, sobre todo lo que se refiere a la evolución de los sedimentos marinos, hasta conformar el paisaje actual. Asimismo, se conoce extensivamente su riqueza natural y arqueológica. Se tiene una buena documentación de los recursos biológicos, edáficos e hídricos. Sin embargo, no se tiene completo conocimiento sobre la génesis del suelo y los pedosedimentos que se

mueven hacia las depresiones kársticas y mucho menos de la interacción que surge de estos dos elementos, suelo y karst.

En algunos trabajos se ha tratado de entender los procesos tanto edáficos como de su interacción con el sistema kárstico, pero aún no se tiene el panorama completo. Lo que presento en esta tesis, refleja algunos de los procesos ocurridos dentro del marco de este ambiente edáfico, de karstificación y de sedimentación.

Hipótesis.

- El suelo acumulado dentro de las bolsas kársticas se forma originalmente en la superficie y posteriormente es transportado hacia las depresiones formadas por los procesos de karstificación. Se considera, entonces que el estudio de las propiedades del suelo permite establecer la historia ambiental de formación, transporte y pedogénesis dentro de las formas kársticas, del mismo.

Objetivo.

- Realizar una caracterización del material de relleno de una forma kárstica (paleosuelo), dentro del sistema kárstico de Quintana Roo con diferentes técnicas analíticas tanto físicas como químicas para identificar cómo se formó y se “perdió” de la superficie.

Objetivos particulares.

1. Comparación entre el suelo actual y el suelo encontrado dentro de la forma kárstica.

2. Relacionar los materiales encontrados dentro de nuestro perfil con su posible origen.
3. Hacer una relación del suelo y el karst mediante los diferentes procesos encontrados en los materiales estudiados.
4. Hacer una cronología de eventos basados en las evidencias de los materiales estudiados.

Capítulo 2.-Marco Teórico

Es necesario, para los fines de esta tesis, la revisión de algunos conceptos relacionados con los temas principales. En este capítulo se describirá a las rocas carbonatadas se definirá el Karst, el suelo y las interacciones generadas entre estos elementos. A su vez, también revisaremos brevemente los tiempos geológicos y algunos eventos relacionados con el área de estudio.

Rocas carbonatadas.

Las rocas carbonatadas están compuestas principalmente de CaCO_3 o el $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$, precipitando en el ambiente de depósito, a diferencia de las rocas silicoclásticas sedimentarias que provienen de materiales erosionados y son transportados al lugar de depósito (Flügel, 2010). Esto es importante para entender la génesis de las rocas carbonatadas y los diferentes tipos de estas.

Según Flügel (2010) existen 3 tipos de ambientes en donde los sedimentos carbonatados precipitan. La zona continental, la zona marina y la zona de transición entre el mar y el continente (Ver Figura 1.).

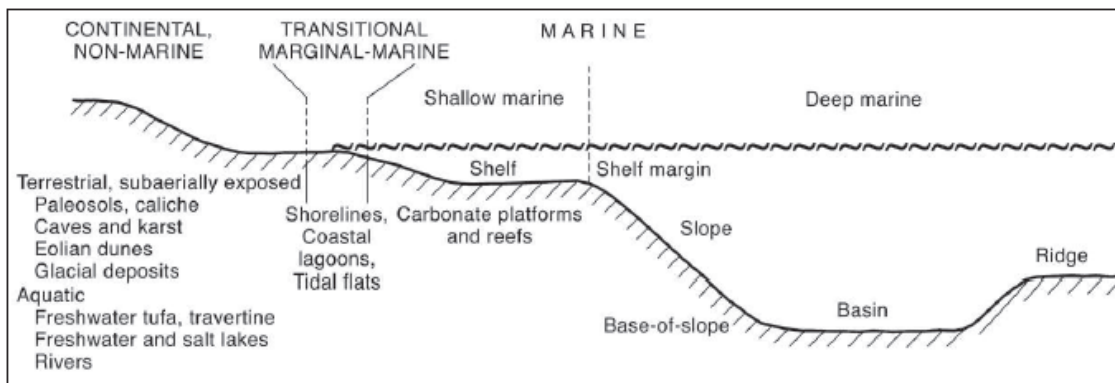


Figura. 1.- Ambientes deposicionales de carbonatos (Flügel, 2010).

La composición de las rocas, la estructura y el tamaño de grano adquieren sus características conforme al ambiente de depósito. Esto por los diferentes elementos que se encuentran en el mismo.

Particularmente, en la zona del nor-este de la Península de Yucatán se encuentran rocas del Terciario y Cuaternario, siendo las rocas más jóvenes las que están más cercanas a la línea de costa (Butterlin & Bonnet, 1960). Dichas rocas que se desarrollaron en el Cuaternario, se originaron por los cambios globales en el nivel del mar, los cuales fueron provocados por: cambios de la órbita del planeta, cambios en la inclinación del eje terrestre y cambios en el punto de la órbita en que ocurren los equinoccios y solsticios, lo que provoca un cambio en la cantidad de radiación solar que llega a cada punto del planeta, de esta manera hay periodos más fríos (glaciales) y periodos más cálidos (interglaciales) a lo largo de este periodo (Imbrie & Imbrie, 1979)

Cuando ocurren los periodos más fríos, el nivel del mar desciende y las rocas carbonatadas quedan expuestas a los elementos que intemperizan estas rocas, en la zona subaérea, llamando a esto regresiones marinas. Y cuando ocurren los periodos más cálidos, el nivel del agua sube y la superficie subaérea es menor llamándolo transgresiones marinas.

El karst y sus componentes.

El Karst se refiere a un tipo de paisaje que se desarrolla cuando hay presencia de rocas carbonatadas como: calizas y dolomías así como la presencia de cuevas, bolsas kársticas, espeleotemas, entre otros (Ver Fig. 2.). Se desarrolla por, el flujo de agua meteórica y subterránea que circula a través de la roca, así como de algunos otros elementos biológicos y físicos (Ford & Williams, 2007).

Según Esteban y Klappa (1983), el karst está dividido en zona vadosa y zona freática. En esta tesis nos enfocamos en la parte vadosa o también llamada superficie de exposición subaérea y, dentro de ella, a la parte superficial del karst o el epikarst.

Se hacen dos divisiones dentro del karst, en cuanto a los procesos erosivos, la parte erosiva donde el material es removido principalmente por disolución y la parte de deposición, relacionada con la precipitación de los carbonatos removidos por la disolución en diferentes formas como las estalagmitas y estalactitas. (Ford & Williams, 2007).

El epikarst refiere a la parte más superficial del karst, la profundidad media está entre los 3 y 10 m regularmente, pero puede cambiar, siendo la parte que se encuentra por debajo del suelo, si es que hay presencia de éste.

Normalmente, la porosidad de las rocas marinas no excede el 2% pero en el caso de las rocas que se encuentra en la zona del epikarst superan el 20% de porosidad por los procesos de disolución y los factores que los provocan (Ford & Williams, 2007). Algunas de las principales morfologías del epikarst creadas por la disolución y meteorización de las rocas carbonatas son: bolsas karsticas, rundkarren, tuberías de disolución, dolinas, formas convexas y cóncavas del terreno entre otros (Esteban & Klappa, 1983).

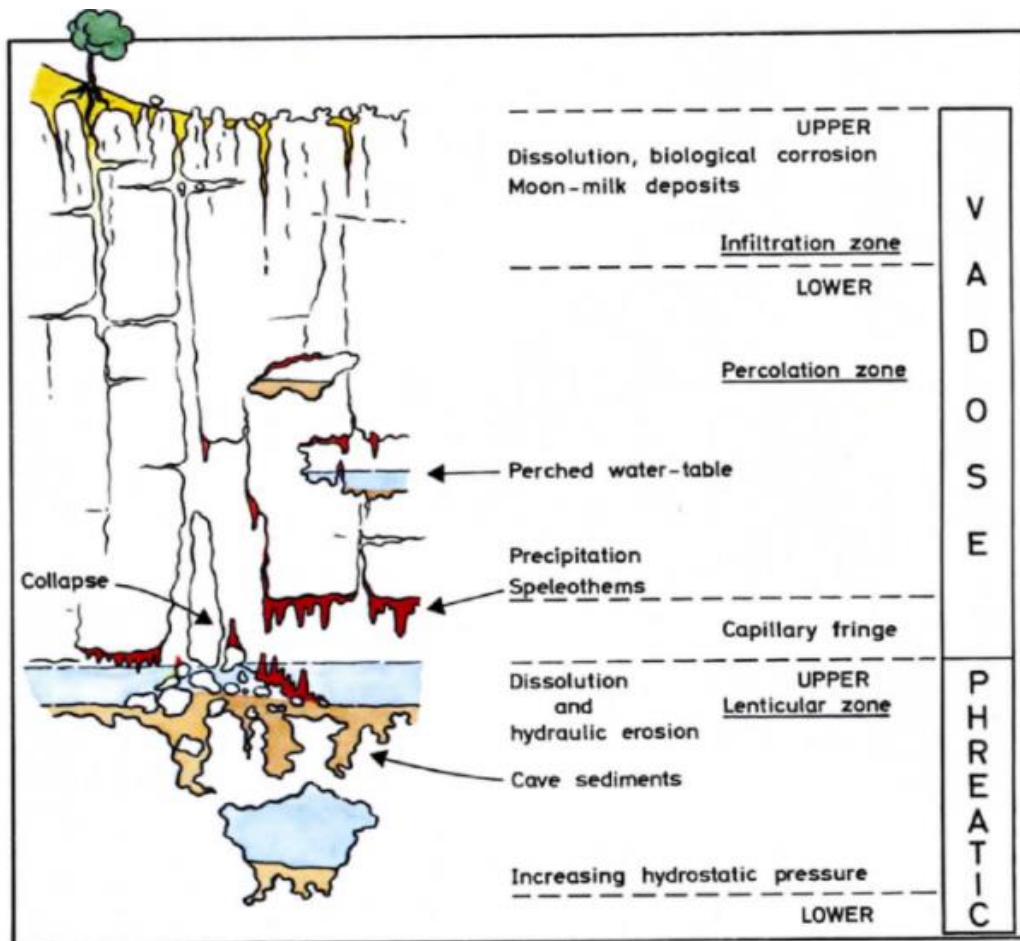


Figura. 2.- Perfil idealizado de un sistema Kárstico, tomado de Esteban y Klappa, 1983.

Suelo.

El suelo es un elemento que se desarrolla a partir de la interacción entre una roca o un sustrato expuesto a diferentes factores como el clima, la biota y la topografía. (Clemente, 1973).

Existen 3 principales interacciones de los diferentes factores con la roca y el sustrato, para la generación del suelo, la alteración de rocas que conforman el sustrato, el incremento de la materia orgánica dado por la biota que interactúa con el sustrato, desde bacterias, animales, plantas y todo organismo que tiene una influencia sobre este y la movilización de elementos.

Esto es provocado, principalmente, por el agua meteórica, generando horizontes de iluviación (acumulación) y eluviación (lavado) (Clemente, 1973). Estos procesos generan diferentes tipos de suelos dependiendo del tipo de sustrato y las interacciones, de esta manera no es el mismo suelo que encontramos en una zona donde existen rocas volcánicas o rocas sedimentarias silicoclasticas o carbonatadas.

La Península de Yucatán se caracteriza por tener los tipos de suelo que se muestran en la Tabla 1, en tanto que su distribución se presenta en la Figura 3, siendo el grupo dominante el de los Litosoles, actualmente se denominan Leptosoles réndzicos.

Tabla 1.- Principales suelos, actuales, dentro de la Península de Yucatán. Tomada de (Bautista, 2005)

Cambisol (B).	Son suelos jóvenes y pocos desarrollados pueden presentar ligera acumulación de arcilla, CaCO ₃ , Fe, Mn, etc. Estos suelos son altamente susceptibles a la erosión.
Castañozem (K).	Presentan una capa superior de color pardo o rojo oscuro, rica en materia orgánica y nutrientes; y acumulación de caliche suelto o ligeramente cementado en el subsuelo
Feozem (H).	Tiene una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes.
Gleysol (G).	Suelos que se inundan en alguna época del año se caracterizan por presentar colores grises, azulosos o verdosos que al secarse y exponerse al aire pueden presentar manchas rojas.
Litosol (I).	Suelos con una profundidad menor a los 10 cm.
Luvisol (L).	Suelos que tienen un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo, son levementes ácidos y altamente fértiles, son de color rojo o pardo rojizo.
Nitosol (N).	Suelos muy profundos (más de 150 cm), enriquecidos con arcilla y son de color rojo.
Regosol (R).	Suelos que no presentan diferenciación clara entre los horizontes.

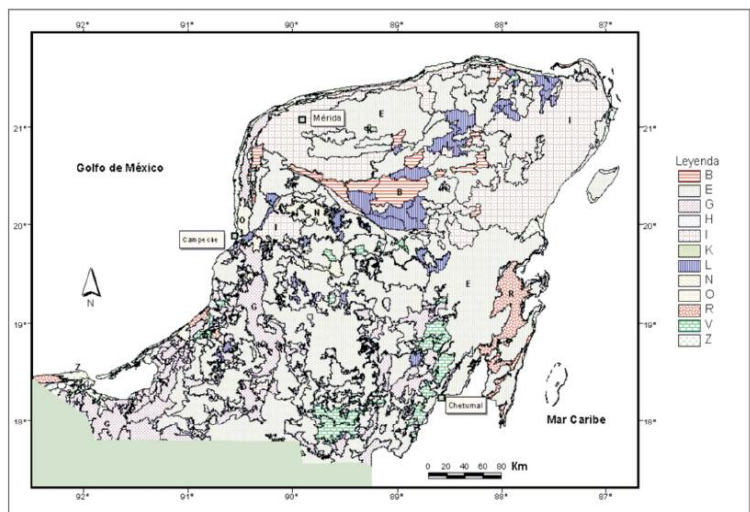


Figura 3.- Distribución actual de suelos en la Península de Yucatán (Bautista, 2005).

Relación Suelo-Karst.

El epikarst se forma por diferentes procesos, uno de los más importantes es la interacción con el agua meteórica, la cual disuelve a los carbonatos y mediante fenómenos como la evaporación y la presión parcial del CO₂ los libera, pero existen otros procesos que también contribuyen a su formación. Uno de estos procesos es la interacción con el suelo y todos los elementos que estos involucran, las bacterias que atacan a la roca, los ácidos húmicos y fúlvicos generados por los componentes orgánicos del suelo y los ácidos que generan las raíces y la presión que estas ejercen sobre las mismas para tomar algunos de los nutrientes para ser aprovechados por la vegetación son algunos ejemplos (Gillieson, 1996).

Al ser transportados los suelos por los elementos que lo erosionan como el agua y el viento, cae en las geomorfologías del karst como las cuevas y las bolsas kársticas, sirviendo de esta manera como un registro y archivo de los ambientes que predominaron en el momento en que el suelo se estaba desarrollando (Ford & Williams 2007).

Capítulo 3. Metodología.

Para cumplir al objetivo de esta tesis, se realizó el siguiente procedimiento utilizando diferentes técnicas de muestreo en campo y análisis de laboratorio.

Muestreo en campo.

Se realizó una visita al estado de Quintan Roo, en la península de Yucatán, dentro de los municipios de Solidaridad y Tulum, comprendiendo los sitios de Playa del Carmen, Akumal y Tulum en la costa del Mar Caribe, dentro de la mina de roca carbonatada CALICA (Figura 4).



Figura 4.- Localización de la zona de estudio, Akumal QR., México. (Google Maps 2017).

En CALICA, se levantaron varias secciones para definir las unidades litoestratigráficas y los paleosuelos contenidos dentro de las mismas. Para este trabajo, se tomó la sección C4 (Figura 5), en el cual se podía observar un paleosuelo litificado dentro de una forma kárstica.

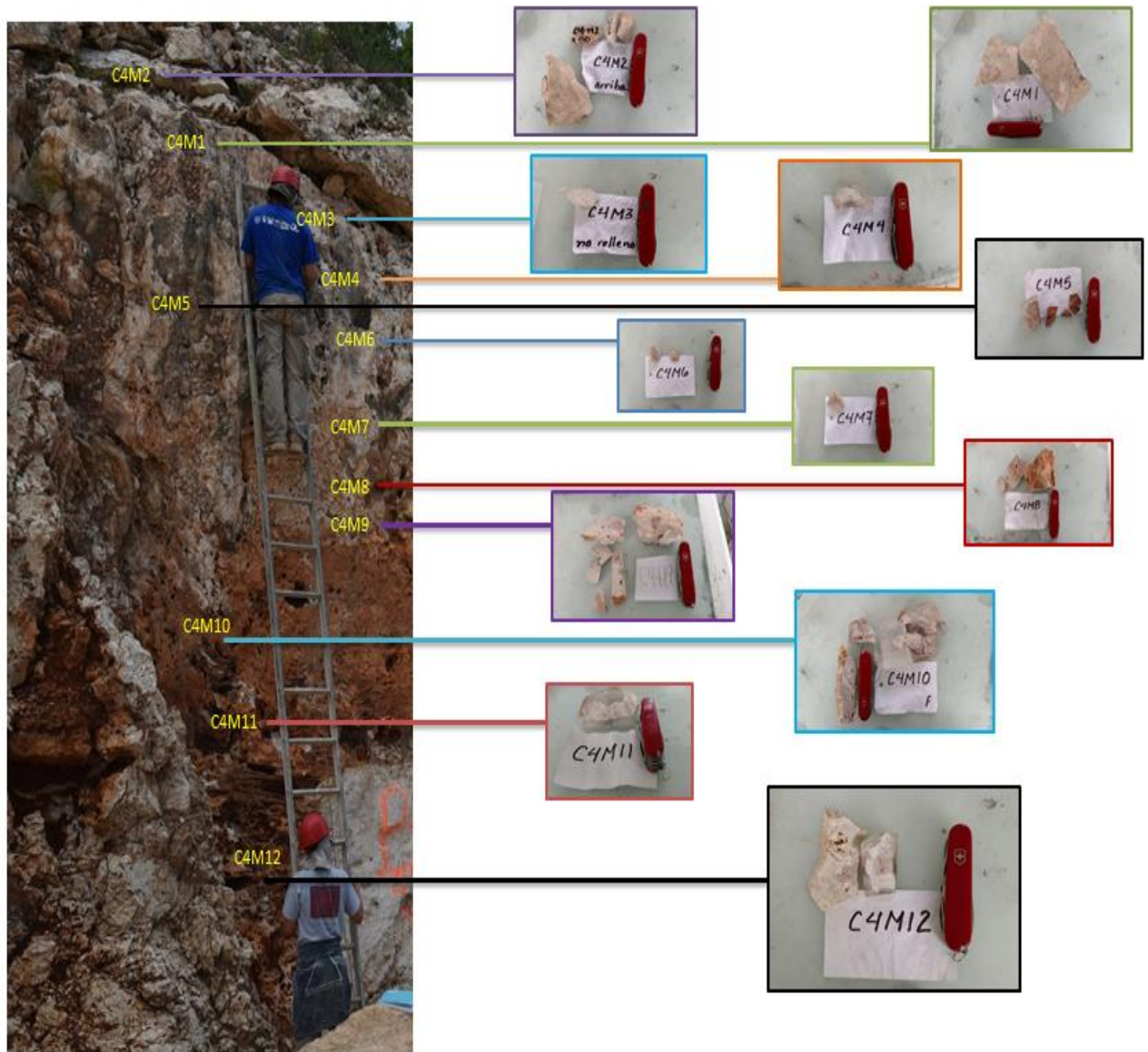


Figura 5.- Perfil C4 muestreado dentro de la cantera CALICA (Fotos tomadas por el equipo de Paleosuelos, UNAM, 2016)

De este perfil se tomaron muestras en diferentes puntos para tener una visión integral del paleosuelo y su contexto. Se tomaron 12 muestras (Figura 6), que fueron empacadas dentro de bolsas de plástico y llevadas al taller de laminación, en las instalaciones del Instituto de Geología de la UNAM para su posterior tratamiento y análisis.



Figura 6.- 2 de las 12 muestras tomadas en el perfil C4.

Las propiedades que se estudiaron, morfológicas, físicas y químicas, fueron las siguientes:

Morfología.

La morfología de las muestras se determinó por comparación con la literatura y observaciones en campo indicando su procedencia y posible génesis.

Se observaron algunos tipos de formaciones kársticas e interacciones con el suelo que se encontraba contenido y litificado en el interior de la forma kárstica.

Micromorfología

Para las observaciones micromorfológicas, se prepararon láminas delgadas. Las muestras, al ser un material consolidado, fueron cortadas con una sierra circular de diamante, modelo P4K34FZ5A, y trabajadas con una cortadora PetroThin. Las láminas delgadas fueron montadas en un porta objetos (75x50mm) para su posterior observación en un microscopio Olympus bx51 y analizadas con el software Image Pro.

La preparación de las muestras se llevó acabo de la siguiente manera:

1.- Las muestras se cortaron en la sierra circular de diamante al tamaño del porta objetos y se pulieron con carburo de silicio, siendo este último, un abrasivo utilizado para el pulido de rocas, para lograr de esta manera la superficie deseada. Si la roca era muy porosa se le agregaba algún tipo de pegamiento o resina transparente para cubrir los poros y no hubiera ninguna burbuja de aire ya que esto afecta en la observación de las láminas delgadas.

2.-Una vez que se tenía la superficie completamente lisa y los poros rellenos con alguno de los dos materiales anteriores, se le agregó pegamento de secado con luz ultravioleta, para colocar el porta objetos sobre la superficie pulida de la roca.

3.- Se desbastaba en la cortadora PetroThin para llevarla a un grosor cercano a las 30 μm para observarlo en el microscopio Olympus bx51.

4.- En caso de que las muestras pasadas por la cortadora PetroThin no se observaran bien al microscopio, se pulían con carburo de silicio hasta lograr el efecto deseado para obtener el efecto deseado.

Las descripciones de los rasgos observados, para el caso de los suelos fue realizado con el Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias (Loaiza et. al., 2014) y la descripción de las rocas carbonatadas se realizó con la ayuda del libro de microfacies de rocas carbonatadas (Flügel, 2010).

Colorimetría.

Se realizó con la ayuda de un espectrofotómetro ColorLite sph900 y posteriormente se analizaron los datos obtenidos con el software ColorDaTraBasic y Excel, para corroborar la relación de los datos con los estándares en un sistema de medidas L, a y b para el color.

El análisis de color proporciona información acerca de los elementos que constituyen al suelo los posibles procesos que sufrió la roca y el suelo analizado.

Se utilizaron las rocas sobrantes del proceso de micromorfología con lámina delgada aprovechando que las rocas tenían una superficie lisa.

Las mediciones se realizaron de la siguiente manera:

- 1.- De una roca se observaban diferentes características que se querían medir, ej: algún contacto de material edáfico con la roca.
- 2.- Se calibraba el aparato con sus diferentes blancos para el marco de referencia del mismo.
- 3.- El medidor del aparato se colocaba sobre la superficie escogida de la roca y se medía.
- 4.- Se obtenían los datos del mismo en una hoja de cálculo electrónico para hacer el análisis de estos.

Difracción de rayos X (DRX).

Esta técnica se realizó en las instalaciones del Instituto de Geología de la UNAM en el departamento de Geoquímica, laboratorio de Difracción de Rayos X, bajo la tutela de la Dra. Teresa Pi Puig, con el objetivo de la identificación del material cristalino y arcilloso de dos muestras seleccionadas previamente (C4M5 y C4M8) con observaciones micromorfológicas.

Para el análisis, se realizó una separación de la fracción arcillas de la roca que las contenía, en este caso caliza, con ácido clorhídrico (HCl) al 10%; después se lavaron las muestras con

agua destilada para llevarlas a un pH 5 y posteriormente se le agregó cloruro de magnesio (MgCl) para la lectura en el equipo de DRX.

Geoquímica de elementos mayores obtenida por fluorescencia de rayos X.

Se realizó en dos diferentes equipos:

Fluorescencia de rayos X portátil.

Este método se realizó en el laboratorio de Cromatografía del instituto de Geología de la UNAM, a cargo de la Dra. Olivia Zamora Martínez, con un equipo de Fluorescencia de rayos X portátil XRF Niton XL3t Ultra, con un espectro de medición para elementos que van desde el Magnesio (Mg) hasta el Uranio (U) con el objetivo de cuantificar el porcentaje de estos elementos dentro de la muestra.

Debido a que este método es puntual se utilizaron los mismos puntos escogidos para la colorimetría haciendo concordar estas dos propiedades para la misma muestra.

Se colocaba la muestra dentro de la cámara de medición con la cara que se iba a medir orientada hacia el lector y así se obtenía la medición.

Los datos se analizaron mediante una hoja de cálculo.

Fluorescencia de rayos X convencional.

El estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Fluorescencia de rayos X de la UNAM a cargo del Químico Rufino Lozano, en un espectrómetro secuencial de rayos X (Rigaku Primus II), el cual cuenta con un tubo de rodio y berilio de 30 μm para el análisis de muestras.

Se realizó una prueba de elementos mayores para dos muestras, C4-M5 y C4-M8, anteriormente molturadas en un mortero de ágata y pasadas por una maya de 60 μm .

Los elementos se midieron en una muestra fundida con tetraborato de litio (LiBO_2), usando una concentración al 10% de muestra en base seca.

Se realizó una prueba de pérdida por calcinación en 1 g de muestra a 950°C durante dos horas, calculando la diferencia de masa en porcentaje para hacer la correlación con los demás elementos y obtener la totalidad de la muestra.

Capítulo 4.- Área de Estudio

Localización del área de estudio.

El presente estudio se realizó en el estado de Quintana Roo, al oriente de la península de Yucatán, abarcando los municipios de Solidaridad y Tulum.

El sitio de muestreo está cercano al poblado de Xcaret sobre la carretera Cancún-Tulum (307), dentro de una cantera para la extracción de roca caliza. (Ver Figura 7)

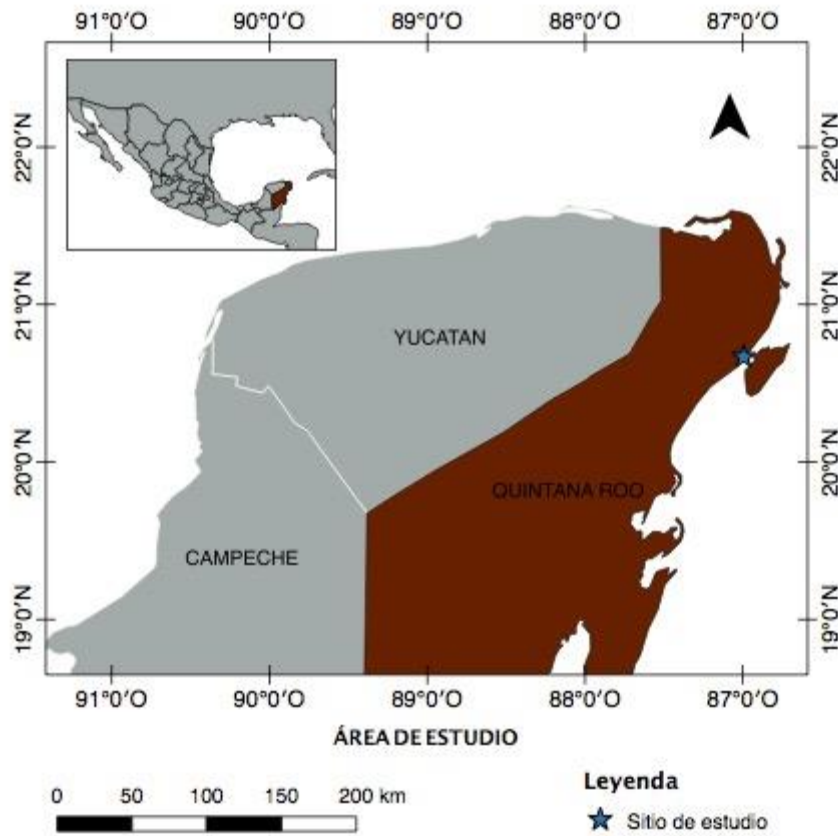


Figura 7.- Zona de estudio.

Geología.

La península de Yucatán se caracteriza por la presencia de rocas carbonatadas evaporíticas y clásticas tales como calizas, dolomías, yeso y areniscas (López, 1979), del Paleoceno hasta el Cuaternario (Ver Figura 8). El sitio de estudio se encuentra dentro de las formaciones Carrillo Puerto y Bacalar, constituidas principalmente por calizas blancas, con echados muy bajos o prácticamente nulos y una orientación NNE (Pozo et. al., 2011), con una edad correspondiente al Plioceno-Mioceno, lo cual está asociado a un paisaje kárstico (Butterlin & Bonnet, 1963) (Ver Figura 9).

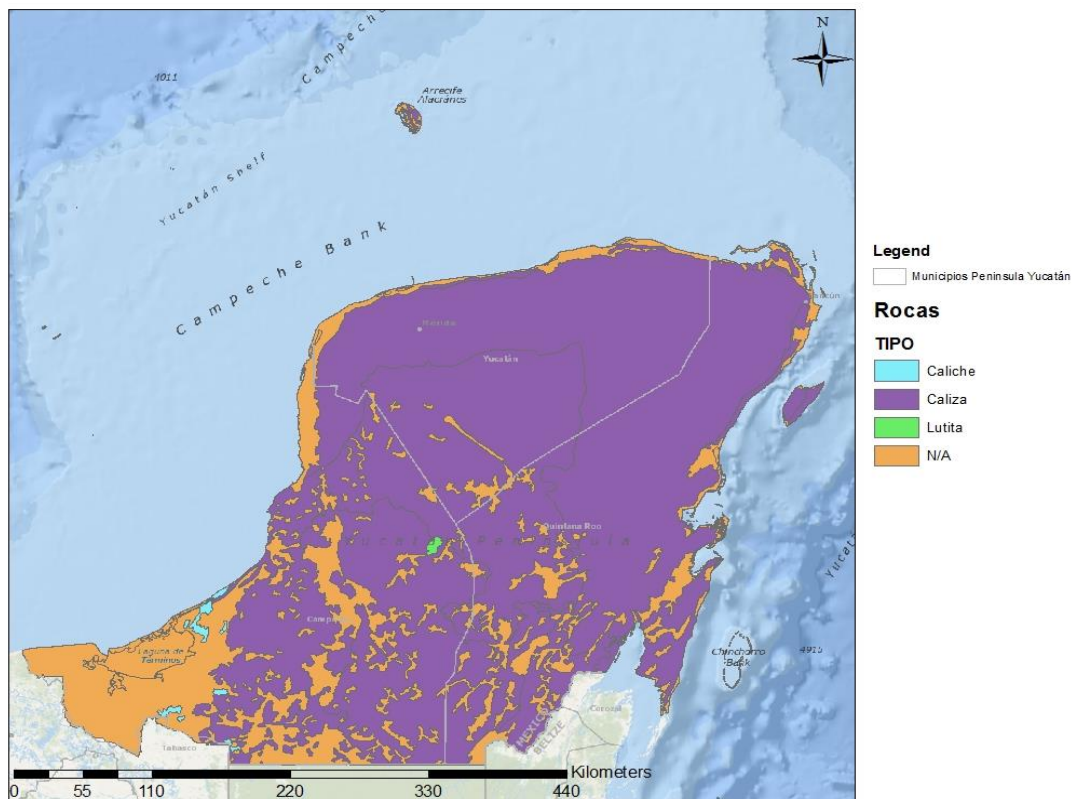


Figura 8.- Mapa geológico de la Península de Yucatán (Datos, INEGI 2010.).



Figura 9.- Rocas carbonatadas y forma kárstica (Foto tomada por el equipo de Paleosuelos, UNAM, 2016)

Geomorfología.

La península es una plataforma carbonatada, cuya topografía está caracterizada por tener muy poca o nula pendiente, llegando a una altura máxima de 300 msnm, en el centro de la península (Sierra de Ticul). La poca pendiente, así como los procesos de karstificación hacen que la red fluvial superficial sea muy pobre (Lugo et. al., 1992).

Los procesos kársticos llevan a que las calizas se disuelvan cuando el agua que se precipita, se infiltra a través de las fracturas, enriquecida con dióxido de carbono, formando ácido carbónico. De esta forma, el agua adquiere un pH ácido y actúa como agente de intemperismo potente sobre las rocas carbonatadas (Pozo et. al., 2011).

Las geoformas que genera el agua cuando disuelve las rocas, la reprecipitación de los carbonatos y las oquedades que deja a su paso la disolución del agua se llama karst, este es

un paisaje común dentro de plataformas carbonatadas como es el caso de la península de Yucatán. (Ver Figura 10).



Figura 10.- Formas de disolución hechas por el agua al disolver la roca carbonatada (Foto tomada por equipo de Paleosuelos, UNAM, 2016).

Clima.

Según INEGI 2015, el estado de Quintana Roo, dentro de la Península de Yucatán, presenta un clima cálido subhúmedo en el 99 % de su territorio y el 1 % cálido húmedo, con temperaturas medias anuales de 26°C, máxima anual de 33°C y mínima de 17°C

Las precipitaciones se presentan a lo largo de todo el año con una abundancia mayor en los meses de julio a octubre, con un promedio anual de 1300 mm, (INEGI 2015).

Vegetación.

La vegetación depende de muchos factores como el clima, el tipo de suelo, la precipitación, entre otros factores regionales. En el caso de Quintana Roo, la vegetación es de tipo selva mediana subperenifolia mayor al 50% y, en menor proporción (25%), se encuentra la selva alta. La selva baja subcaducifolia se encuentra en menor proporción que las anteriores (Pozo et. al., 2011). (Ver Figura 11.)



Figura 11.- Vegetación típica Quintana Roo (Foto tomada por equipo de Paleosuelos, UNAM, 2016).

Hidrología.

Según INEGI 2002, existen dos regiones hidrológicas (RH), las cuales están a cargo de la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), la RH32 Yucatán Norte (Yucatán) y la RH33 Yucatán Este (Quintana Roo).

Al tener precipitaciones mayores a 1000 mm, tiene una gran abundancia de agua, pero por las rocas carbonatadas y el relieve, de poca o nula pendiente, la red de agua que se forma es de tipo subterráneo, muy compleja.

Se tiene un solo río que está al sur de esta región, llamado el río Hondo, el cual llega hasta la parte norte de los estados de Belice y Guatemala. (INEGI, 2002).

Suelos.

INEGI reporta principalmente Leptosoles (Ver Figura 12), ocupando el 70% del territorio (INEGI, 2002, Bautista & Palacios 2011), Además de los Leptosoles o también llamados Rendzinas, se tienen Luvisoles, Gleysoles, Vertisoles, Solonchaks y Regosoles.



Figura 12.- Suelo réndzico (Foto tomada por el equipo de Paleosuelos, UNAM, 2016)

Capítulo 5. -Resultados.

Durante el trabajo de campo en la cantera, se levantó una sección que contiene un suelo rojo dentro de una bolsa kárstica, rocas carbonatadas como materiales encajonantes y carbonatos secundarios, productos de la disolución y reprecipitación (Figura 13).

En la Tabla 2 se da una descripción de los materiales encontrados y muestreados, con la simbología empleada para designarlos.

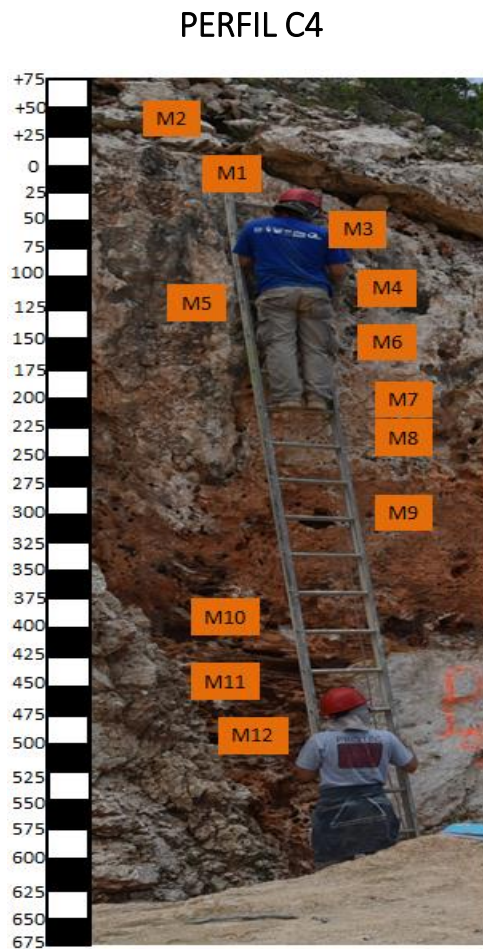


Figura 13.- Perfil C4 con las muestras marcadas en las profundidades donde fueron tomadas.

Morfología en campo.

Tabla 2.- Descripción de las muestras tomadas en campo.

Perfil C4 Clave	Profundidad (cm)	Descripción
C4M1	0	Roca masiva con presencia de estructuras coralinas fósiles que se ven a simple vista de alrededor de 3, 4 cm. Se observan algunos organismos fósiles diferentes a los corales como caracoles marinos.
C4M2	+50	Roca masiva identificada como caliche, se observa un bandeo con dos diferentes tipos de materiales de color pardo y una superficie de contacto rodeando la estructura laminada, con un tono más blanco que los otros dos materiales.
C4M3	50	Roca masiva con presencia de organismos fósiles, y una porosidad relativamente baja.
C4M4	100	Roca blanca masiva, se pueden observar manchas dentro de la roca con una apariencia cristalina.
C4M5	110	Material litificado identificado como un paleosuelo (Luvisol), de color rojizo opaco, se puede observar el contacto de este material rojizo con uno de color blanco identificado como roca caliza.

C4M6	150	La muestra presenta una estructura laminada con cambios de color de blancos a pardos.
C4M7	200	Podemos ver un cambio de color la cual nos marca una discordancia de los materiales, uno laminado y gris opaco y el otro sin estructura y color blanco.
C4M8	250	Roca masiva, presenta un contacto abrupto entre dos materiales diferentes uno con colores rojizos y pardos y otro de color blancos. Se puede observar cierta porosidad.
C4M9	300	Roca masiva con pigmentación rojiza, presenta cristales que se pueden observar a simple vista de alrededor de 0.5 cm y con algunas inclusiones de suelo rojo dentro de los huecos.
C4M10	400	Roca identificada como flowstone, con alto contenido de cristales, de aproximadamente 4, 5 cm de largo, los cuales crecen ortogonales a la superficie de precipitación.
C4M11	450	Muestra identificada como Flowstone, con cristales de aproximadamente 2 a 3 cm.
C4M12	500	Roca masiva blanca donde se observan estructuras coralinas fósiles.

Colorimetría de los materiales estudiados.

Para este análisis obtuvimos los datos de en la escala L, a y b. Donde L es la luminosidad de la muestra (datos negativos más opaco y datos positivos brillante), la variable a^* está en el rango del rojo y verde (datos negativos verde y datos positivos rojo) y la variable b^* en el rango del azul al amarillo (datos negativos azul y datos positivos amarillo). Las muestras fueron agrupadas conforme a los niveles de luminosidad que tienen y los valores de a y b respectivamente (Ver Figura 14).

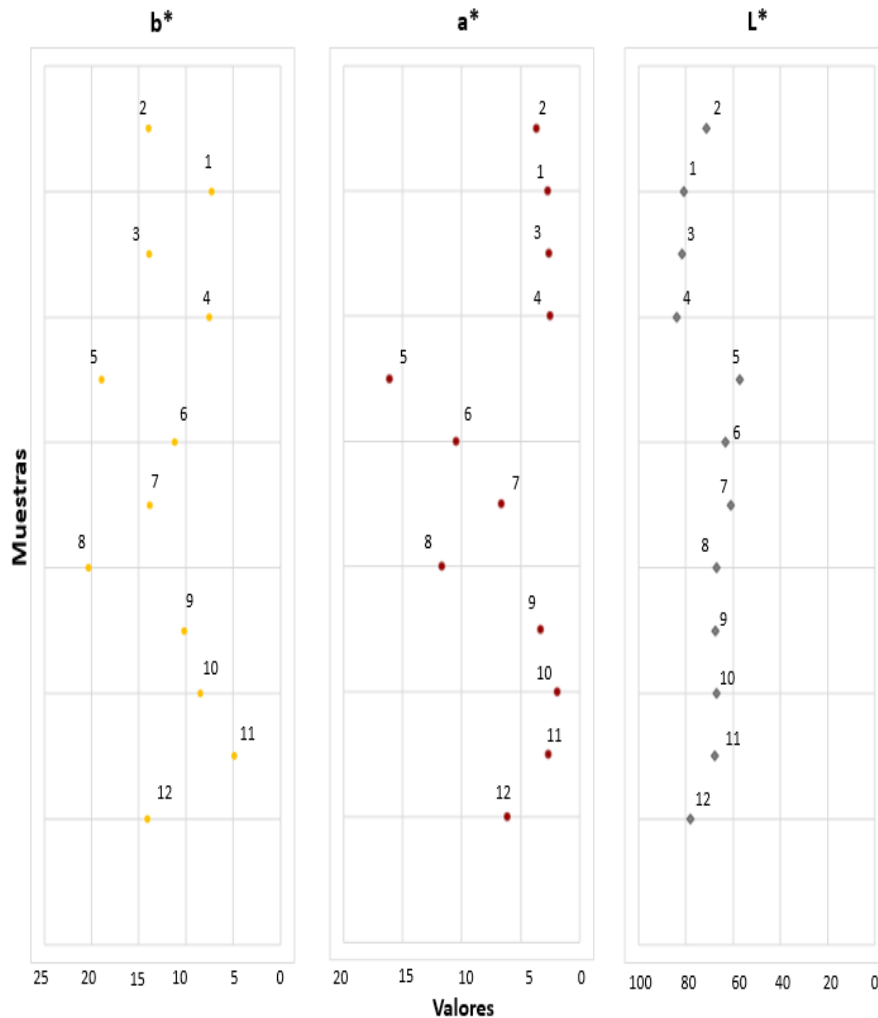


Figura 14.- Tendencia en los valores obtenidos con el espectrómetro para las variables L^* , a^* y b^* .

El grupo de muestras de rocas: 1, 2, 3 y 4 donde los valores de luminosidad son altos y a y b son bajos indica coloraciones ligeras en el rojo y más amarillentas. El grupo donde se identificó el suelo 5, 6, 7 y 8, tiene menor luminosidad y valores más altos en a y b son más rojizos y amarillos. El grupo de muestras 9, 10, 11 y 12 hay más materiales cristalinos y micrita, por lo que los colores son menos rojizos y tienen más luminosidad.

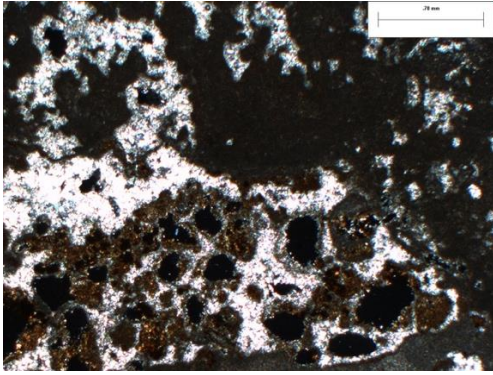
Micromorfología de los materiales estudiados

La muestra C4M6 contiene fragmentos de suelo y fragmentos de roca (Figura 15a). En C4M7 se observa un material con estructura bandeada de micrita y cristales esparíticos con apariencia de caliche, el cual tienen un contacto de disolución con el suelo (Ver Figuras 15b y 15c).

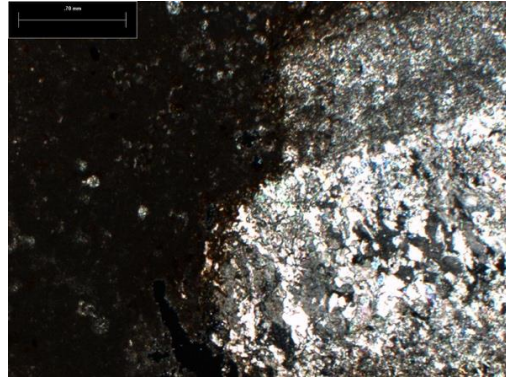
En la muestra C4M8 se encuentra el suelo con estructura granular a bloques subredondeados con un cemento esparítico (Ver Figura 15d). En C4M9 se encuentran rasgos parecidos a los descritos anteriormente: fragmentos de suelos cementados con esparita y fragmentos de caliza, y zonas de disolución-recristalización en los contactos (Figura 15e).

En las muestras C4M10 y C4M11 la estructura es de tipo flowstone con cristales esparíticos de tamaño mayor a $50\mu\text{m}$ creciendo en dirección perpendicular a la base de precipitación y cristalización (Ver Figuras 15f y 15g).

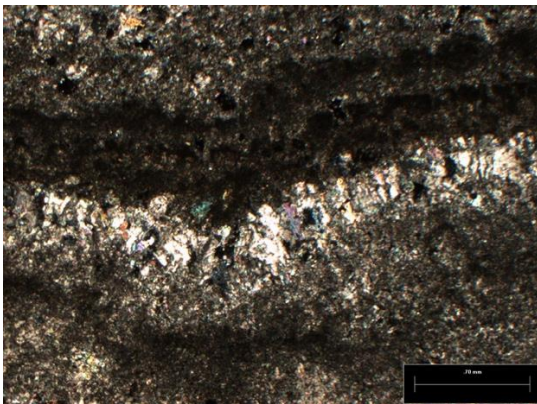
La muestra C4M12 presenta un cemento esparítico con una matriz micritica alrededor de los cristales de esparita y con un porcentaje $<10\%$ de aloquímicos (Ver Figura 15h).



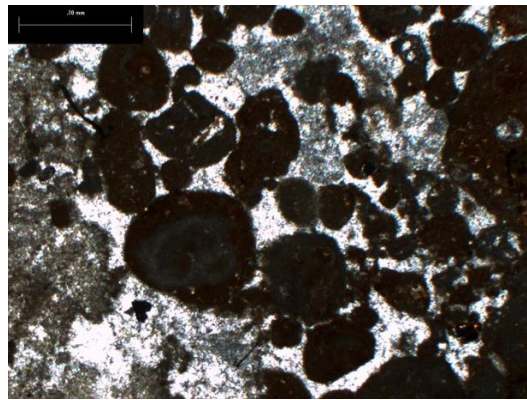
a. Matriz micritica y suelo rodeado por una matriz esparitica en C4M6: NX.



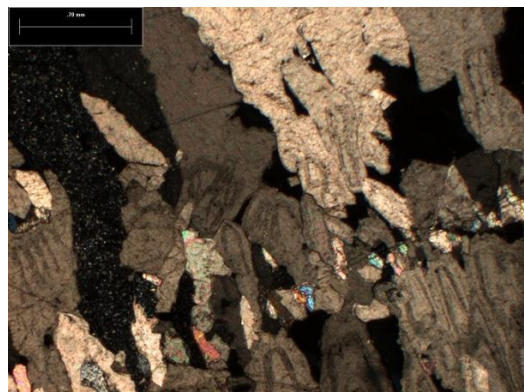
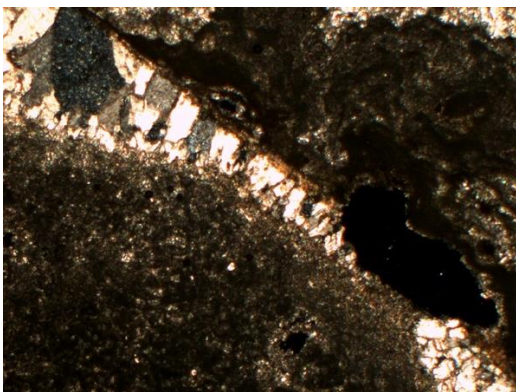
b. Contacto del suelo con un material bandeado en C4M7: NX.



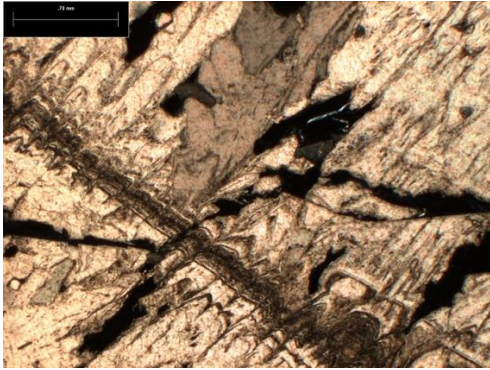
c. Material bandeado, micrita y esparita, C4M7: NX.



d. Suelo con estructura granular, dentro de una matriz esparitica y en contacto con un material micritico en C4M8: NX.

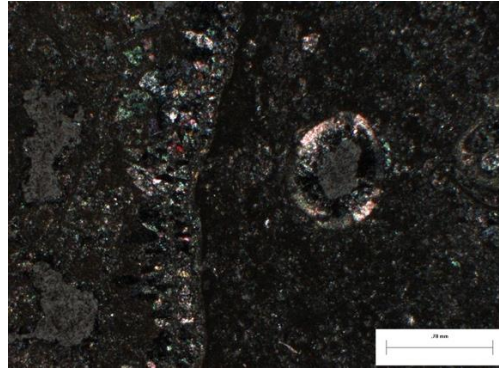


e. Matriz micritica y en los espacios un cemento esparitico en C4M9: NX.



g. Flowstone con micrita C4M11: LR.

f. Cristales que crecen perpendiculares a la superficie sugieren un flowstone en C4M10: NX.



h. Matriz micritica con algunos aloquimicos y un cemento esparitico C4M12: NX.

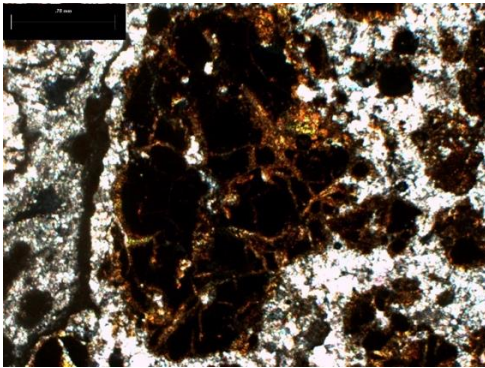
Figura 15.- Fotomicrografías de láminas delgada de la muestra C4M6, C4M7, C4M8, C4M9, C4M10, C4M11 y C4M12. LPP – luz de plano polarizada; NX – Nícoles Cruzados ; LR – luz reflejada

La muestra C4M5 presenta otro tipo de arreglo. Se observan fragmentos de suelo con estructura en bloques subangulares, con un grado moderado de separación entre los agregados. Estos están rodeados con un cemento acicular de carbonatos de calcio, algunos de los agregados están flotando sobre carbonatos espariticos (Ver Figuras 16a y 16b). La microestructura secundaria presente tiene una forma subangular de los agregados, fuertemente separados y fuertemente agregados por una matriz esparitica con pocas concreciones de hierro. (Figura 16a).

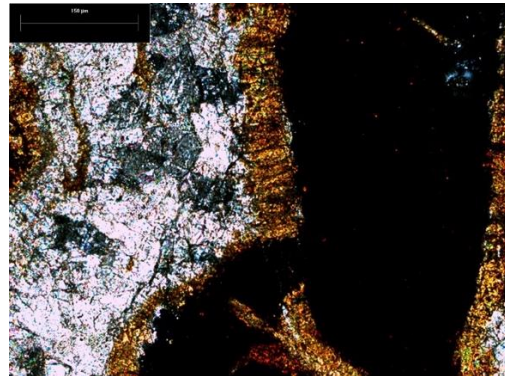
Otro componente presente consiste en fragmentos de suelo que tienen estructura en bloques subangulares, con un moderado grado de separación entre los agregados y fuertemente agregado con micrita. Además, de esta morfología, se identifican áreas con

estructura granular moderadamente separada y cementadas con calcita esparítica, en donde también ocurren concreciones de hierro dentro de este suelo (Ver Figura 16c y 16e). Por su parte, la roca encajonante de esta muestra tiene una textura granosoportada por miliolides, y con cemento esparítico, con una fábrica geopetal. (Ver Figura 16f).

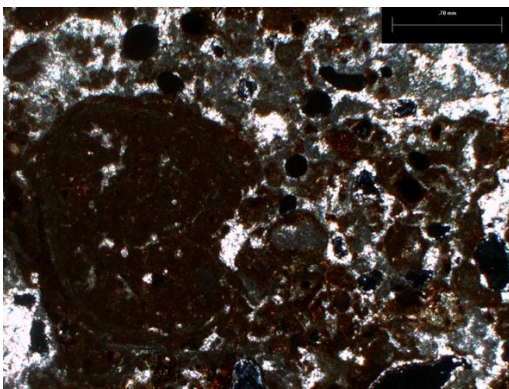
Podemos observar los dos contactos, uno son los diferentes tipos de suelo, (Ver Figura 16d), y la otra es el contacto de un suelo con la roca, (Ver Figura 16f).



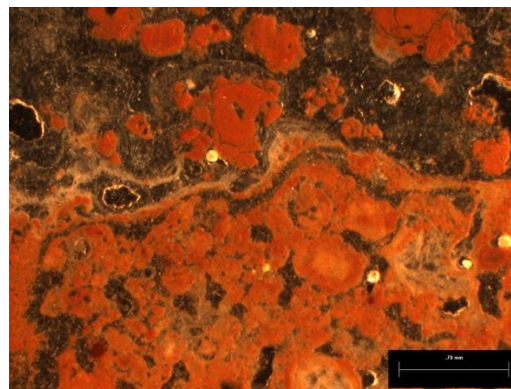
a. Suelo con estructura subangular y matriz esparítica: NX



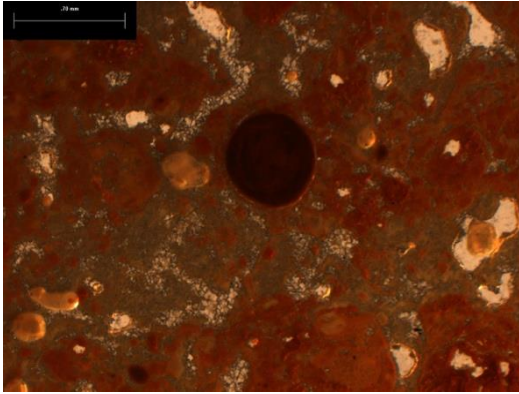
b. Matriz de cemento esparítico y cemento acicular alrededor de los agregados: NX.



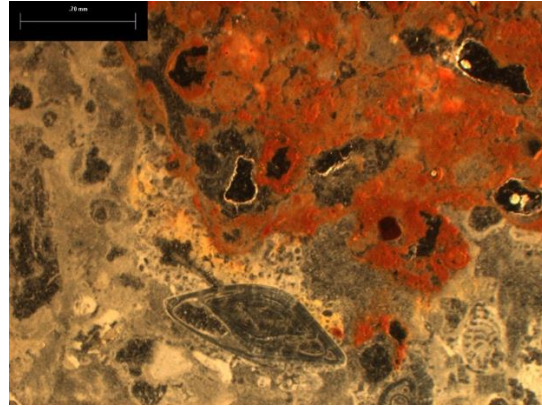
c. Suelo con estructura subangular y granular, agregados con micrita y esparita: NX.



d. Dos tipos de suelo y el contacto entre estos: LR.



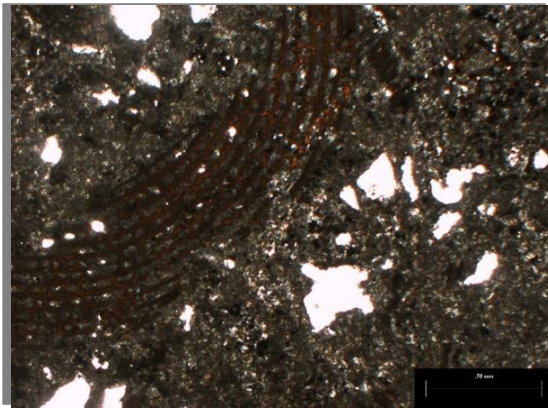
e. Concreción de hierro: LR y LPP.



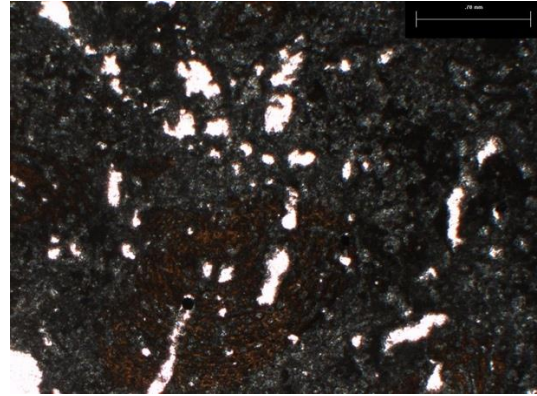
f. Contacto entre la roca y el suelo:
LR.

Figura 16.- Fotografías de láminas delgada de la muestra C4M5. . LPP – luz de plano polarizada; NX – Nícoles Cruzados ; LR – luz reflejada

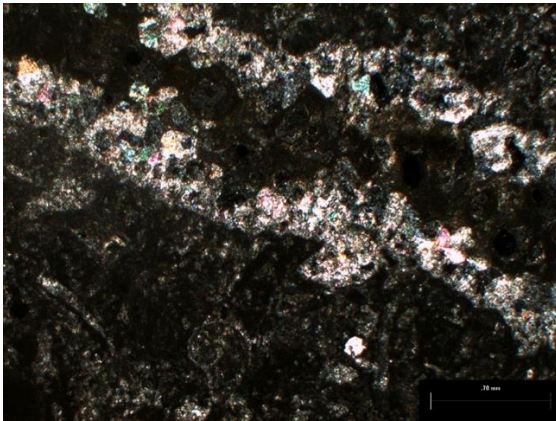
Las muestras C4M1 a C4M4 son de calizas caracterizadas por presentar diferentes facies. En C4M1 y C4M2 se observa una matriz lodosoportada por micrita con una fábrica geopetal y con un contenido de aloquímicos como algas y algunos foraminíferos, menor al 10 % (Figura 17a y 17b). Por su parte, en la muestra C4M3 se observa una textura granosoportada con un porcentaje de aloquímicos mayor al 10 % y con micrita sobre los granos aloquímicos. En los bordes de los de los poros se tienen cristales esparíticos (Ver Figura 17c.). La muestra C4M4 tiene una textura granosoportada por organismos miliolides y micrita en los bordes de estos organismos y algunas algas azules. (Ver Figura 17d).



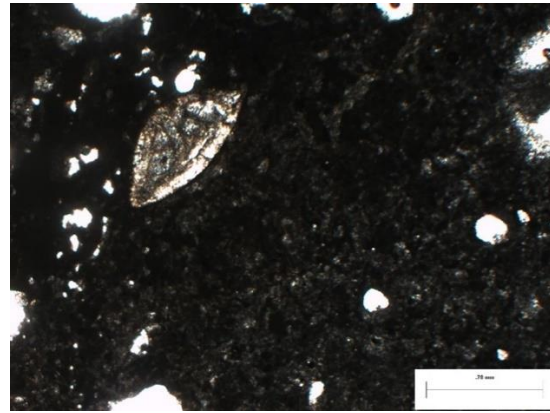
a. Matriz lodosoportada con foraminíferos y algas en C4M1: LN



b. Matriz lodosoportada con foraminíferos y algas en C4M1: LN



c. Matriz granoportada y micrita sobre los granos en C4M3, LP



d. Matriz granoportada con miliolides en C4M4, LP

Figura 17.- Fotografías de láminas delgadas de las muestras C4M1, C4M2, C4M3, C4M4. LN – luz natural; LP – luz polarizada; LR – luz reflejada

Análisis mineralógico por difracción de rayos X.

Para este método se utilizaron principalmente dos muestras, C4M8, la cual representa el contacto de la roca encajonante con el suelo rojo dentro del perfil; y C4M5, la cual es del suelo.

Los patrones de difracción de C4M8 muestran minerales de baja cristalinidad, en donde destaca una alta proporción de bohemita ($\text{AlO}(\text{OH})$) y restos de esmectita, siendo este último un mineral arcilloso del tipo 2:1 (Tabla 3 y Figura 18).

En el suelo rojo, C4M5, se observan, al igual que en C4M8, bohemita ($\text{AlO}(\text{OH})$) y esmectita, pero también se presenta caolinita y hematita (Fe_2O_3), y con una mayor cristalinidad en relación a C4M8 (Ver Tabla 3 y Figura 19).

Tabla 3.- Mineralogía de las muestras C4M8 y C4M5

Muestra	Clave	Fases Identificadas
DRX1	C4M8	Bohemita: $\text{AlO}(\text{OH})$ Filosilicatos a $\sim 14\text{\AA}$ pbb esmectita
DRX2	C4M5	Bohemita: $\text{AlO}(\text{OH})$ Hematita: Fe_2O_3 Filosilicatos a $\sim 7\text{\AA}$ pbb caolinita Filosilicatos a $\sim 14\text{\AA}$ pbb esmectita

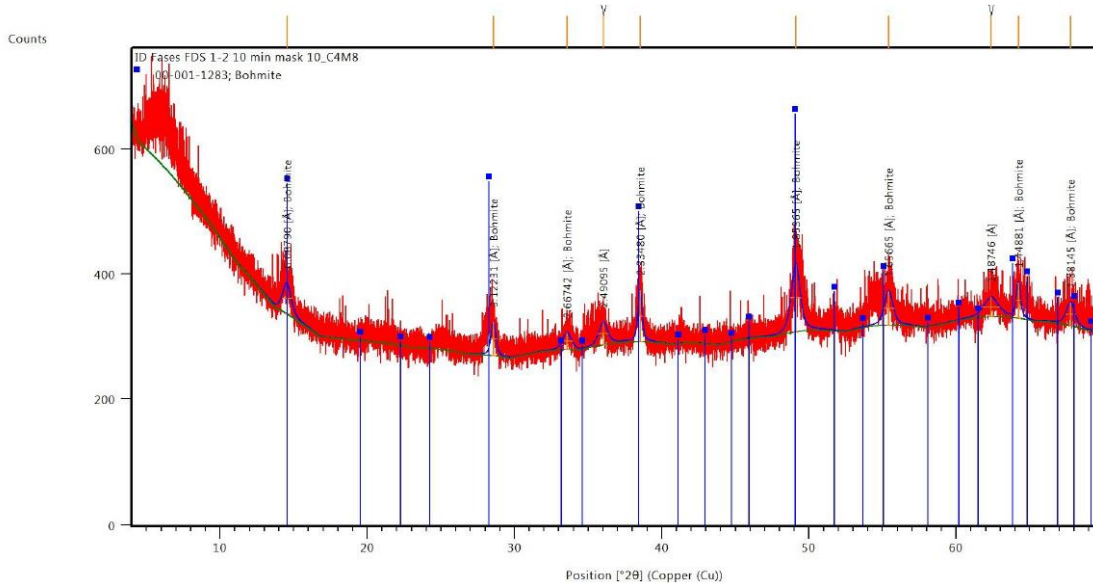


Figura 18. -Difractograma de C4M8 que muestra el espectro de bohemita y esmectita

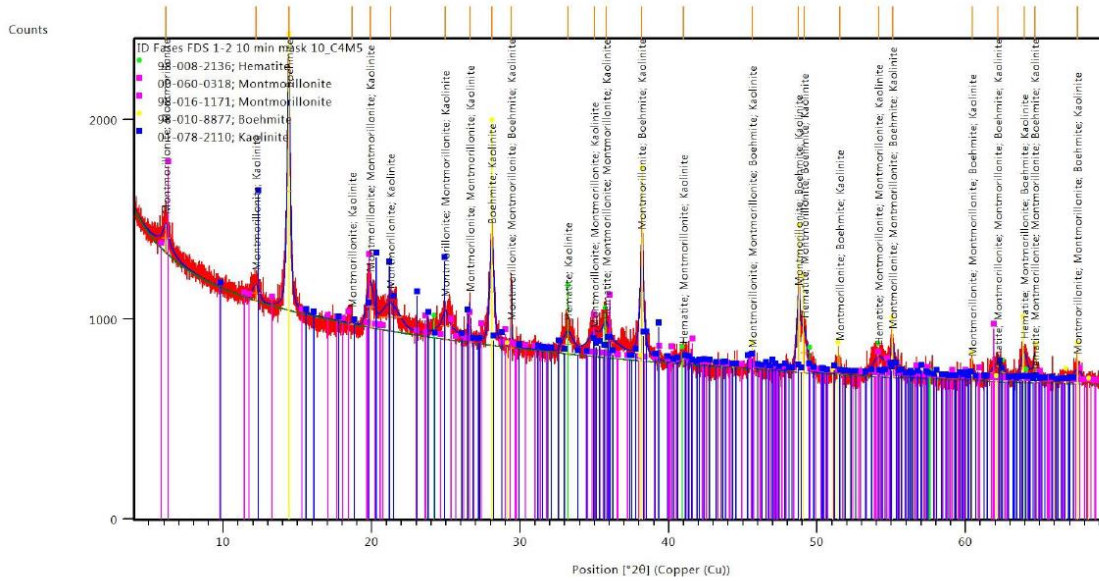


Figura 19. -Difractograma C4M5 que muestra los picos de bohemita, hematita, caolinita y esmectita (los últimos dos son filosilicatos de 7 y 14 Å respectivamente).

Composición química por fluorescencia de Rayos X (equipo portátil).

Este análisis se llevó a cabo en todas las muestras para determinar de una manera preliminar la composición. De esta forma, se observó que el Ca oscila entre 44.3 y 47.7 mg/g, (Ver Figura 20), en todas las muestras de rocas carbonatadas, el suelo rojo (C4M5) presentó valores más bajos de este elemento, 32.3 mg/g.

Con respecto al resto el Fe y el Ti tuvieron los valores más altos en los suelos rojo y en la roca que está en su contacto (C4M8), en el resto de las muestras, las cantidades son muy bajas (Ver Figura 21).

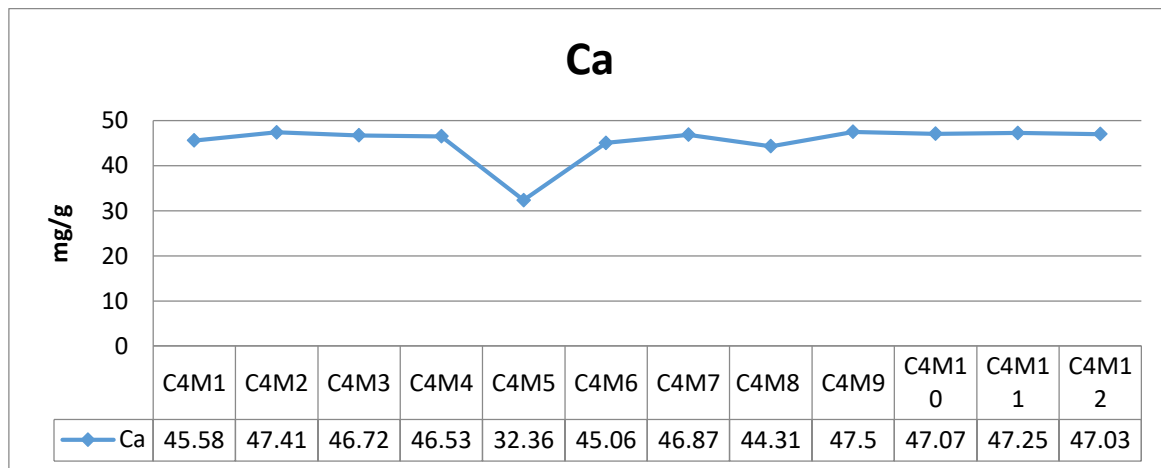


Figura 20.- Concentraciones de Ca dentro del perfil C4.

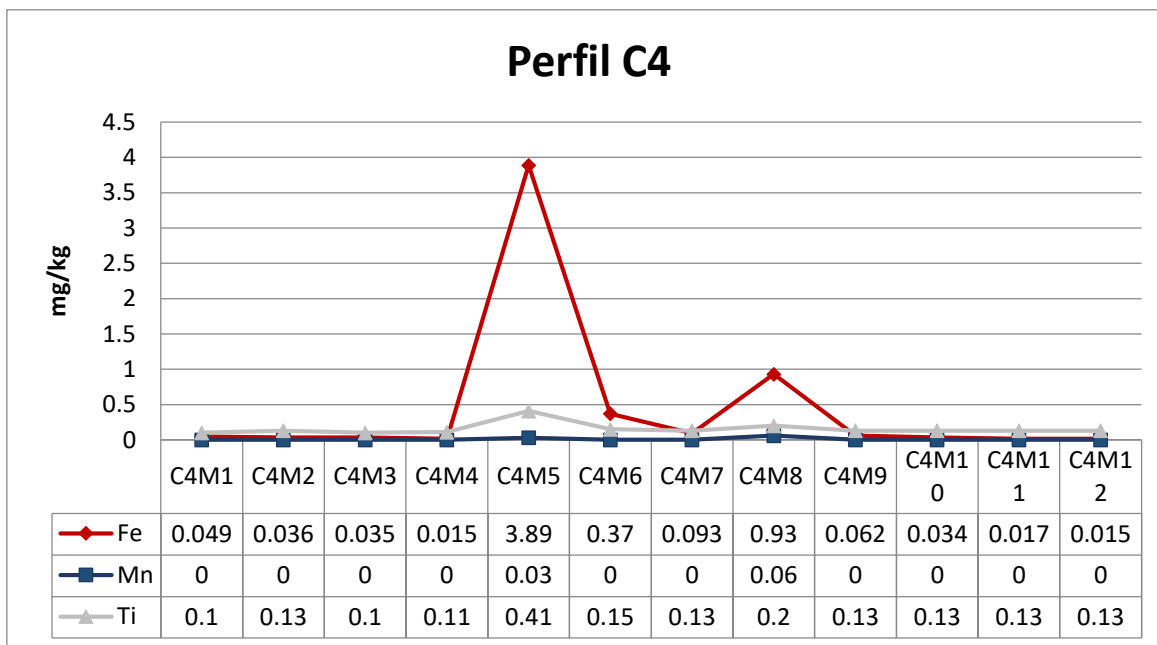


Figura 21.- Concentraciones de Fe, Mn, Ti dentro del perfil C4.

Fluorescencia de rayos X (convencional).

Con el objetivo de hacer más fino el análisis obtenido con el equipo de fluorescencia portátil, el cual tiene un nivel de detección más bajo comparado con el convencional, se seleccionaron dos muestras, la del suelo rojo (C4M5) y la de su roca encajonante (C4M8).

Es así que en C4M8, que el 42.82 % de la masa total representa la pérdida por calcinación (PXC), en donde los compuestos de carbono se descomponen a una temperatura de 900°C.

Dado que el 56.64 % de la masa está compuesta por CaO, entonces se puede relacionar esta pérdida con carbonato de calcio, lo que es normal, ya que se trata de una caliza. Estos dos elementos conforman el 99.46 % de masa de la muestra total. (Ver Tabla 4).

Otros elementos que destacan son el MgO, Fe₂O₃ y Al₂O₃ conformando el 0.494% de masa total de la muestra. (Ver Figura 22).

Para la muestra C4M5, el estudio refleja una composición de 34.24 % masa para el carbono (PXC) dentro de la muestra, con 39.79 % de CaO, teniendo así el 74.03% de la muestra total, con carbonatos. (Ver Tabla 4).

El Al_2O_3 tiene un valor alto, de 12.47 % de masa que está relacionado con la presencia de los minerales arcillosos como la esmectita y kaolinita, pero también con la bohemita; el Fe_2O_3 es también alto, 5.38 % (Ver Figura 23).

Aplicación empleada: Rocas		
Componente	C4M5	C4M8
<i>SiO₂</i>	6.498	<0.1
<i>TiO₂</i>	0.649	0.033
<i>Al₂O₃</i>	12.47	0.109
<i>Fe₂O₃</i>	5.388	0.142
<i>MnO</i>	0.029	0.003
<i>MgO</i>	0.741	0.243
<i>CaO</i>	39.797	56.642
<i>Na₂O</i>	<0.01	<0.01
<i>K₂O</i>	0.172	<0.002
<i>P₂O₅</i>	0.016	0.007
<i>PXC</i>	34.24	42.82
<i>Suma</i>	100	99.999

Tabla 4. - Resultados en %Masa del contenido de dos muestras procesadas con la técnica de Fluorescencia de Rayos X.

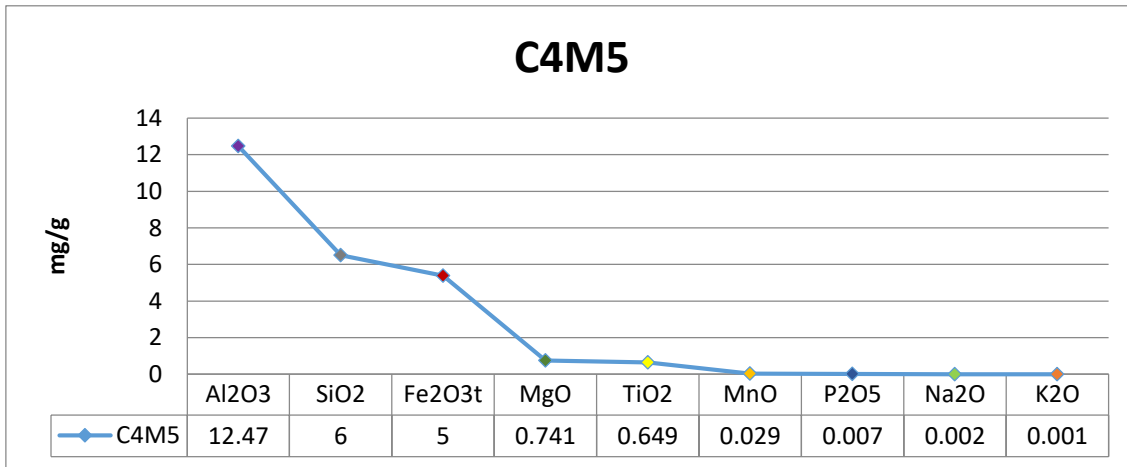


Figura 22.-Contenido de elementos dentro de la muestra C4M8, con excepción de CaO.

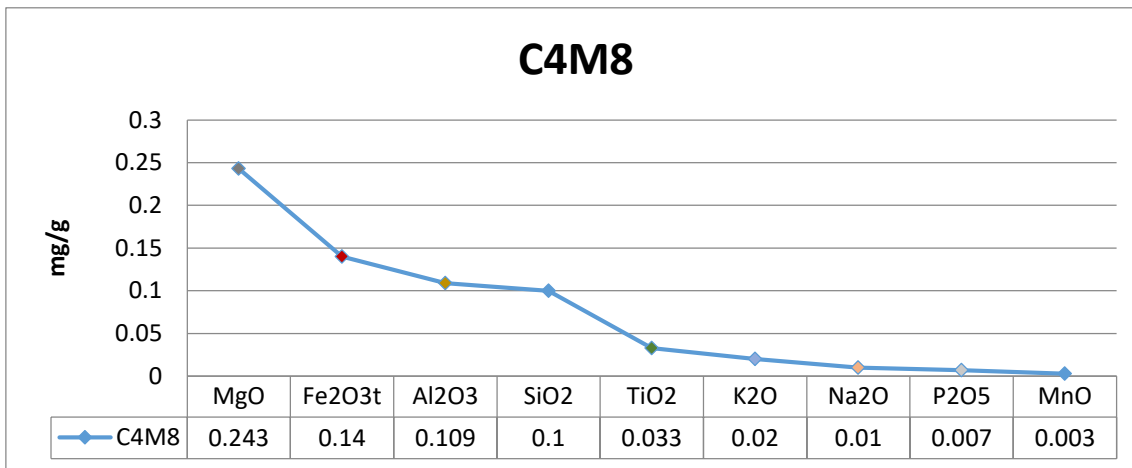


Figura 23.-Contenido de elementos dentro de la muestra C4M8, con excepción de CaO.

Capítulo 6. –Discusión de Resultados.

Comparación del suelo en la bolsa con los suelos actuales de la Península de Yucatán.

El trabajo realizado por Vargas (2018) muestra que el suelo actual de la Península de Yucatán y particularmente en la zona de estudio, es delgado con horizontes de color oscuro, estructura granular, un alto contenido de materia orgánica y presencia de raíces y hojarasca. Este tipo de suelo, denominado Rendzina o Leptosol réndzico, según la clasificación de WRB (2014), conforma la cubierta edáfica de la península y representa el suelo dominante en un 70% (Bautista & Palacios, 2011). Al analizar los resultados encontrados en este trabajo, no se tiene una coincidencia con el tipo de suelo presente en las formas kársticas estudiadas. El suelo muestreado tiene contenido de arcilla, Fe y Mn, una estructura subangular y angular y no encontramos materia orgánica.

Sin embargo, Cabadas et al. (2010) reportan la presencia de suelos rojos, fuertemente intemperizados en algunas regiones de Yucatán, similares a los investigados. Entonces surgen varias preguntas: ¿Cuál es la génesis de los suelos encontrados en la bolsa? ¿Proceden de la cubierta edáfica actual, que está “perdida” por erosión en el paisaje kárstico? ¿Estos suelos representan suelos formados en el pasado? Si esto es así, podríamos decir que los procesos físicos y químicos dirigidos por el clima y el material parental, que afectan la génesis del suelo estudiado (paleosuelos) eran diferentes en el momento de su génesis a las que se tienen actualmente.

Cabadas et al. (2010), Wiesbeck (2012) y Solleiro et al. (2015) también describen la presencia de pedosedimentos que rellenan las depresiones kársticas en el paisaje actual de la península. Estos pedosedimentos tienen diferentes características dependiendo del tamaño de la bolsa. Wiesbeck (2012) señala que las bolsas pequeñas están constituidas por suelos negros, tipo Rendzinas, mientras que en las grandes se observan suelos rojos. Cabadas et al.

(2010) señala que los suelos que “caen” en las depresiones son suelos “inmaduros” y que dentro de la bolsa sufren intemperismo y llegan a conformar suelos muy intemperizados.

La diferencia importante con los suelos estudiados aquí es que han sufrido diagénesis, por lo tanto, están litificados (cementados por carbonatos) y cubiertos por calizas de facies lagunares (muestras C4M1 a C4M5) tal como lo muestran las láminas delgadas (Figura). Flügel (2010) nos indica que la diagénesis es un proceso en donde ocurre un cambio en la estructura del material de forma que origina su litificación.

La evidencia de la diagénesis está claramente marcada en la micromorfología, ya que los agregados de suelo están separados por los cementos esparíticos, en tanto que en la matriz del suelo no hay carbonatos. De hecho, los resultados de DRX revelan el mínimo contenido de Ca en el suelo rojo, muestra C4M5 (Figura 18). Se debe anotar que los suelos rojos en la superficie actual no poseen carbonatos (Cabadas, 2011).

Encontramos dos tipos de cementos, esto posiblemente se refiera a que existieron dos fases de litificación, el primero lo identificamos como un cemento de tipo acicular alrededor de los agregados de suelo y el otro es un cemento esparítico que sirve como matriz de soporte de todos los agregados de suelo.

Procedencia de los materiales encontrados dentro del objeto de estudio.

Los suelos de tipo Ferralsol son suelos que se caracterizan por desarrollarse en un clima mediterráneo, de color rojo, bien desarrollados, con alto contenido de Fe, Al y arcillas de tipo caolinita y boemita y se desarrollan principalmente sobre las rocas carbonatadas. (IUSS, 2007)

La Península de Yucatán también tiene suelos denominados como Terra Rosa. Este tipo de suelos. Diferentes autores como Quiñones (1975), Flores (1974), sugieren que los Terra Rosa son suelos formados a partir de materiales arcillosos que se encontraban en el fondo marino y después afloraron y quedaron expuestos para su posterior pedogénesis.

Pero otros autores como Aguilera (1959), proponen un desarrollo *in situ* del suelo por materiales heredados de la roca (residuo solicitado), pero dichos elementos provenientes de la roca conforman solo el 2% de la roca misma.

Entonces, se ha explicado la génesis por dos tipos de fuentes del material parental: un origen autóctono, que nos indica que están presentes en el sitio donde se desarrolla el suelo, y por lo mismo procede directamente de la caliza; y un origen alóctono, lo cual nos indica que son materiales que provienen de otras regiones han sido transportados y depositados en el sitio. (Cabadas, 2011).

Sabemos que los materiales encontrados dentro del suelo tienen diferentes orígenes y la cantidad de materiales de Fe, Al y arcillas sugiere un largo periodo de intemperismo, que se traduciría como un tiempo prolongado de exposición sobre la superficie.

En este caso encontramos minerales de tamaño arcillas y algunos filosilicatos como: boemita, caolinita, esmectita y hematita:

- Boemita: Se forma a partir de aluminosilicatos intemperizados en ambientes tropicales, por lavado de horizontes ricos en estos. Un mineral el cual puede estar ligado a cationes como el Fe y Ti.
- Caolinita: Es un filosilicato formado a partir del intemperismo de materiales ricos en aluminio y silicio. Se forma en ambientes con procesos hidrotermales y por el lavado de horizontes por la precipitación de aguas meteórica.

- Esmectita: la cual pertenece al grupo de las arcillas trilaminares 2:1 en donde puede existir una saturación de cationes como Al y Mg.
- Hematita: Es una mineral de tamaño arcilla con alto contenido de Fe^{+3} que se forma por la alteración de rocas con alto contenido de hierro, el ambiente de formación principalmente en ambientes edáficos secos y cálidos. (Anthony, *et al.*, 2003)

Todos estos minerales indican un ambiente de intenso lavado a excepción de la hematita y la esmectita las cuales se forman en ambiente edáficos más secos, o estacionales. Esperaríamos por consiguiente que se hayan formado en momentos diferentes.

También podemos ver que todas sin excepción presentan asociaciones con cationes como Al, Fe, Ti, Mg, Mn. Lo cual se corresponde con nuestro análisis de Fluorescencia de Rayos X, este nos muestra el contenido elementos dentro de la muestra analizada.

Pedosedimentos.

Los elementos erosivos, como el agua y el viento, remueven el material edáfico de la superficie y lo lleven ya sea hacia el interior del sistema kárstico o hacia otros ambientes.

Dentro del sistema kárstico se acumula en los diferentes geoformas que han sido moldeadas por el movimiento del agua y la disolución de los carbonatos que propicia la misma.

A estos materiales removidos de los sistemas edáficos se denominan pedosedimentos, los cuales conforman un registro de estos ambientes que han sido guardados en las bolsas.

Según Cabadas (2011), los suelos que se encuentran dentro de las formas del karst se pueden utilizar como un registro de los suelos que cubrían la superficie en el momento en que el suelo se encontraba en superficie y de los procesos que regían dicha superficie.

La composición de estos materiales contiene principalmente elementos como Al, Si, Fe, Ti, los cuales son elementos que tienen alta resistencia a los factores que intemperizan al suelo, y ya que la materia orgánica se “pierde” fácilmente por estos procesos erosivos, no tenemos presencia de ella. Estos dos factores nos sugieren que es un suelo que ha estado sujeto a mucho tiempo y factores de intemperismo.

Modelo de formación de los suelos/pedosedimentos en la bolsa.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede proponer una evaluación del paisaje de la zona de estudio. Si bien, no contamos con edades para determinar cuándo ocurrieron los eventos, la hipótesis es que ocurrió en el Pleistoceno tardío, cuando el nivel del mar fluctuaba como consecuencia de los cambios globales. La secuencia de eventos es la siguiente:

1. Depositación de los sedimentos carbonatados en ambiente marino (Figura 24).
2. Karstificación – desarrollo de las geoformas cársticas y el desarrollo de suelos (Figura 25).
3. Movimiento del suelo a la depresión kárstica - sufusión (Figura 26).
4. “Maduración” o evolución del suelo en la depresión (Figura 26).
5. Ascenso del nivel del mar, inundación, generación de facies flowstone (Figura 27).
6. Depósito de sedimentos marinos carbonatados, facies lagunares (Figura 27).
7. Litificación de los suelos y sedimentos carbonatados (Figura 27).

Transgresión Marina

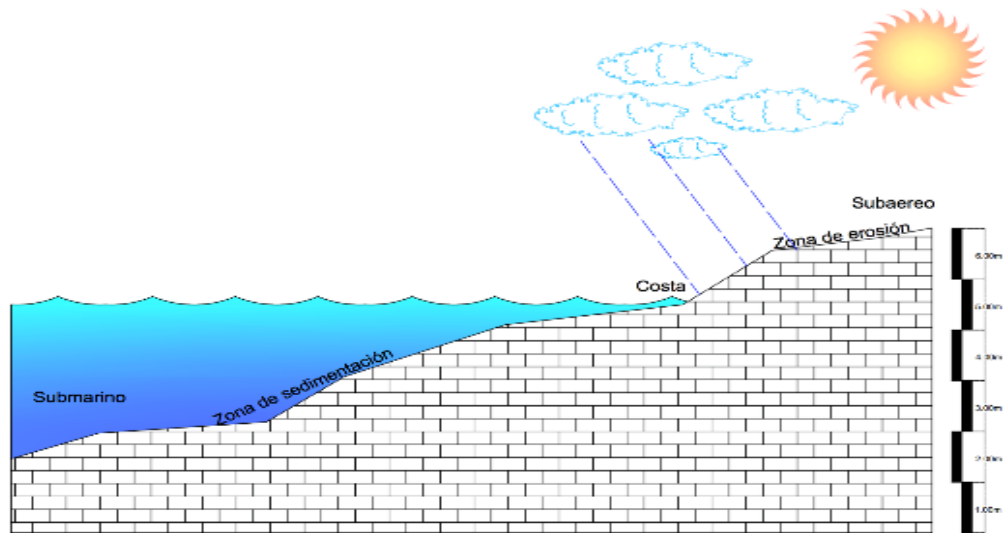


Figura 24.- El nivel del mar está alto y se depositan las capas sedimentarias.

Regresión Marina

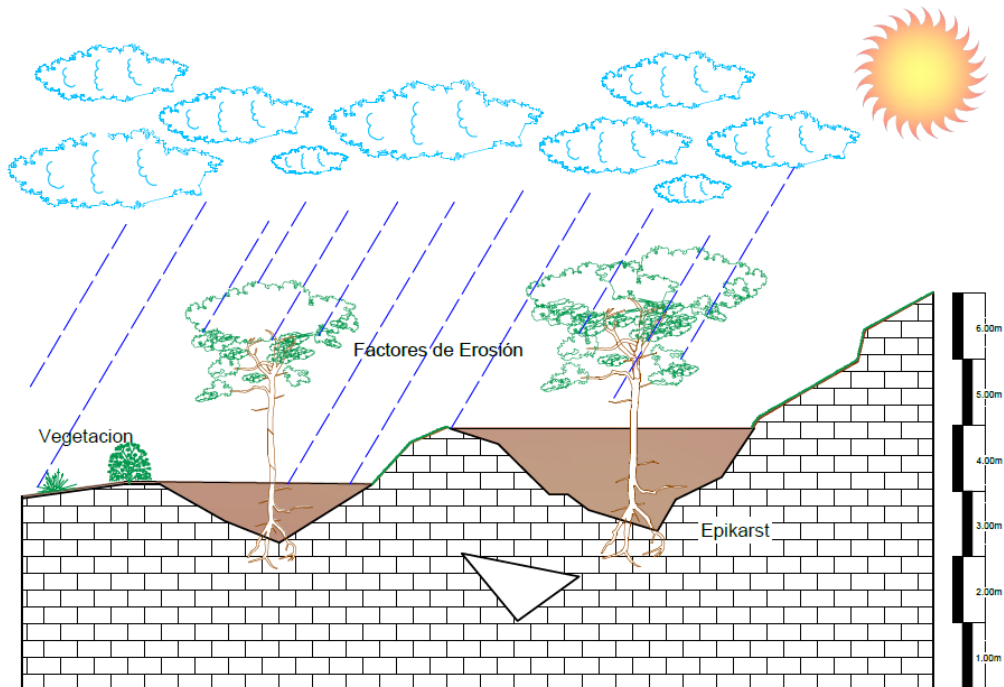


Figura 25.- Baja el nivel del mar y se exponen las capas sedimentarias, comienza la colonización vegetal, la formación y desarrollo del suelo y del karst.

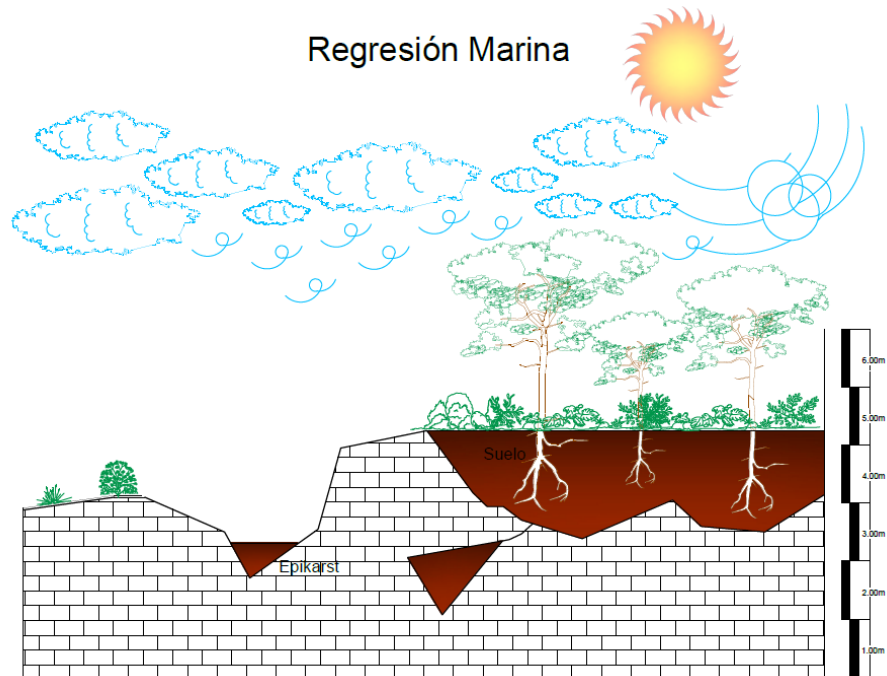


Figura 26.- Transporte del suelo a la forma kárstica y maduración del mismo dentro de ella.

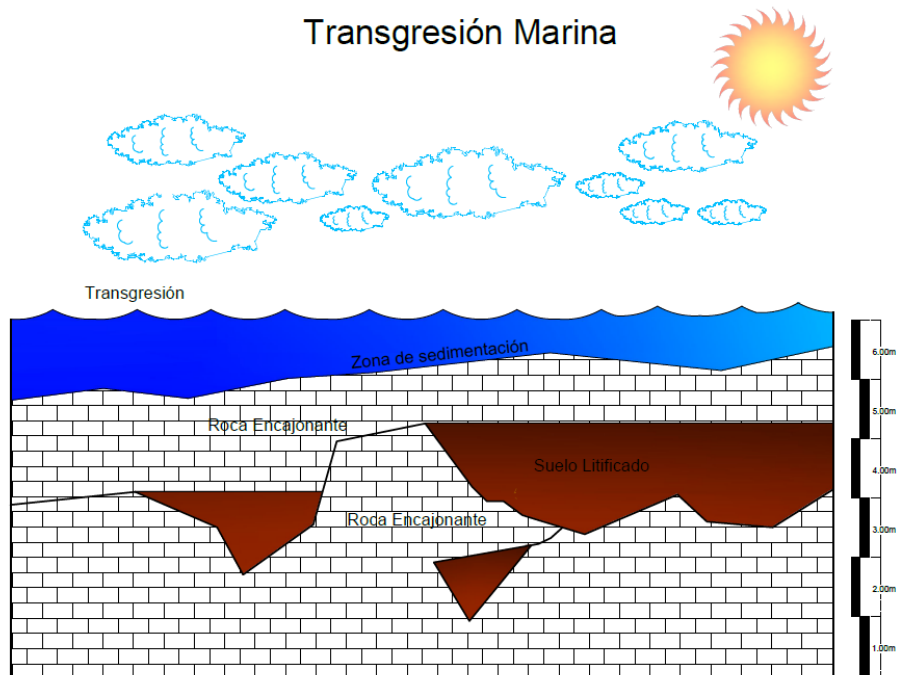


Figura 27.- Transgresión marina, litificación de la forma kárstica y formación de capas sedimentarias sobre la misma.

Capítulo 7.- Conclusiones

Sabemos que el material edáfico encontrado dentro de las formas kárstica tiene rasgos diferentes a la cubierta edáfica que se encuentra en la zona actualmente, por lo tanto, podemos decir que son materiales de diversas procedencias.

Los suelos encontrados en las depresiones kársticas fueron originalmente formados en la superficie, en el epikarst. Es probable que originalmente la cubierta edáfica consistiera de Leptosoles réndzicos, similares a los que hoy en día se encuentran en la zona. Sin embargo, con un mayor tiempo de exposición, estos suelos evolucionan a suelos rojos, tipo Ferralsoles y Terra Rossa. El suelo de la superficie es transportado hacia las formas kársticas y dentro de ésta, probablemente sufre transformaciones que lo llevan a un alto grado de desarrollo.

La presencia de las arcillas descritas dentro de la forma kárstica nos sugiere un ambiente de formación de alto grado de intemperismo con un clima tropical y alto lavado de la superficie edáfica. El alto contenido de Al y Fe nos indica que es un ambiente edáfico con mucho tiempo de estabilidad, que permite la evolución del suelo, logrando así la pérdida de los elementos lábiles y la acumulación de los más perdurables.

Al acumularse en el interior y continuar los procesos de pedogénesis realizados por los factores biológicos, físicos y químicos dentro del sistema, derivó en cambios en su estructura logrando un mayor grado de complejidad de los elementos edáficos de esta forma kárstica.

A través de los eventos geológicos a nivel global y local, la estabilidad edáfica cambió, tornándola a un sistema inestable, inundándose por completo la forma kárstica y depositando sedimentos calcáreos sobre los suelos. Es así que estos últimos son cementados por carbonatos, los cuales litifican, tanto los sedimentos como los suelos, conservándolos como registro de la cubierta de suelos antigua.

Bibliografía

- Aguilar, N., (1959), *Clays from the some soils and calcareous sediments from the Yucatan Peninsula*, Comité Internacional para el estudio de las arcillas, Congreso Geológico Internacional, XX Sesión, 61-69 p.
- Anthony, J., W., Bideaux, R., A., Blath K., W., & Nichols, C., M., (2003), *Handbook of Mineralogy*. Chantilly, USA: Mineralogical Society of America. 458 p.
- Bautista, F. (2005), *Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la península de yucatán*, Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán, Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán., 282 p.
- Bautista, F., & Palacios, A., (2011), *Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatan, México*. *Geomorphology* 135: 308–321 p.
- Butterlin, J, & Bonet, F., (1960), *Información básica para la interpretación geohidrológica de la Península de Yucatán*, Secretaría de Recursos Hidráulicos, Mexico, D.F, 28 p.
- Butterlin, S., & Bonnet, F., (1963), *Mapa Geológico de la Península de Yucatán.*, Bol. A. M. P. G. Méxco., Orellana R., El clima de la Península de Yucatán: presente, pasado y futuro, Manuscrito., Vo X Nos 9 -10p.
- Cabadas, H. (2011), *Pedogénesis y Dinámica Ambiental en el Paisaje Kárstico de la Región noreste de Quintana Roo, México, Durante el Cuaternario Tardío.*, PhD Dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México Mexico, D.F., 211 p.
- Cabadas, H., Solleiro, E., Sedov, S., Pi, T., & Gama, 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*, 323-327p.

- Clemente, L., (1973), *Propiedades, Genesis y Clasificación de Suelos de Terrazas del Guadalquivir*, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Cuarto (CEBAC), España, 299 p.
- Durn, G., (2003), *Terra Rossa in the Mediterranean region: Parent materials, composition and origin*, *Geologia Croatica*, 56, 83-100 p.
- Esteban, M., & Klappa, C. F., (1983), *Subaerial Exposure Environment.*, Scholle P. A., Bebout D.G. and Moore C.H., eds, *Carbonates depositional environments*, The American Association of Petroleum Geologists.,Tulsa, Ok., U.S.A., Memoir 33, 1-54p.
- FAO, (2016), *Base referencial mundial del recurso suelo 2014*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, Italia, 218 p.
- Ford, D., & Williams, P., (2007), *Karst Hidrogeology and Geomorfology*, John Wiley & Sons, Ltd., Great Britain, 562p.
- Flores, A., (1974), *Los Suelos de la República Mexicana*. México, D.F., El escenario geográfico. Recursos Naturales, Secretaria de Educación Pública/Instituto Nacional de Antropología e Historia. .
- Flügel, E. (2010). *Microfacies of Carbonates Rocks, Analysis, Interpretation and Application*, Springer, Londres, Segunda edición, 984p.
- Gillieson, D., (1996), *Caves: Processes, Development and Management.*, Blackwell Publishers., Oxford, Primera edición, 323p.
- Imbrie, J., & Imbrie K. P., (1979), *Ice Ages. Solving the mystery*, University Press, Cambridge, Cambridge, Vol. 117, 224p.
- INEGI., (2002), *Estudios hidrológicos del estado de Quintana Roo*. INEGI, Aguascalientes, Ags. México.: Primera edición, 96p.
- INEGI. (2015). *Cuéntame, Información por entidad*, Tomado de:
<http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/clima.aspx?tema=me&e=23>

IUSS Grupo de Trabajo WRB., (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma, 117p.

Loaiza, J., Stoops, G., Poch, R., M., Casamidjana, M., (2014), *Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias.*, Fondo editorial Pascual Bravo, Medellín, Colombia, 384 p.

López, E., (1979), *Geología de México*, Edición escolar, Tomo III. México, D.F.445 p.

Lugo, J., Aceves J.,F., Espinasa, R., (1992), *Rasgos Geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán*. Revista Mexicana de la Ciencia, Instituto de Geología, UNAM, 10, 143-150 p.

Priore, S., & Constantini, E., (2008), *Pedostratigraphy of Terra Rossa and Quaternary geological evolution of a lacustrine limestone plateau in central Italy*, J. Plant Nutr. Soil Sci., 509-523 p.

Pozo, C., Armijo, N., Calmé, S., (2011), *Riqueza Biológica de Quintana Roo. Un análisis para su conservación*, El 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, 342 p.

Quiñones , H., (1975), *Soil study area 4 Intrazonal soil of northern Yucatan Peninsula*. México: de Pablo, L. (Ed). Guidebook FT-4, Internacional Clay Conference, Instituto Nacional de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 70-93 p.

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.

Vargas, D. F., (2018), *Suelos y edafosedimentos en bolsas kársticas: Evidencia de pedogénesis y actividad antrópica*, Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, 53 p.

Wiesbeck, C. (2012), *The influence of mayan land use on soils and pedosediments in carstic depression in Yucatan, Mexico.*, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades einer Diplom-Geographin. Julius-Maximilians Universität Würzburg, Institut für Geographie.