



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARACTERIZACIÓN DEL RESIDUO SILICATADO DE LAS  
CALIZAS COMO MATERIAL PARENTAL DE LOS SUELOS  
DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

T E S I S

Q U E P R E S E N T A :

JORGE FEDERICO ARTURO LANDA ARREGUÍN  
PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE  
INGENIERO GEÓLOGO

DIRECTORA DE TESIS: DRA. ELIZABETH SOLLEIRO REBOLLEDO

MÉXICO, D.F.

2007



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.

## AGRADECIMIENTOS

---

A mis padres por la educación, por los valores que han forjado en mi, por el sacrificio que han hecho para darles a sus hijos lo mejor, por el apoyo incondicional que me han brindando a lo largo de mi formación, porque gracias a esto he cumplido mis metas y lo seguiré haciendo, pero sobre todo porque han creado una familia unida y humilde que vive y convive en armonía.

A mi padre Jorge Landa por inculcarme desde pequeño la responsabilidad, sensatez, dedicación, el deporte, por tus consejos y por todos esos momentos gratos que me has regalado.

A mi madre Martha Arreguín por enseñarme a disfrutar cada instante de la vida, a ser honesto, perseverante y luchar por lograr mis metas no importando cuáles puedan ser los obstáculos; por la confianza que me tienes y permitirme ser tu confidente.

A mis abuelos Barbarín Arreguín e Irma Espinosa y Jorge Landa y Lucero Fragoso porque han sido unos excelentes abuelos y padres a la vez, han enriquecido mi vida con todas sus experiencias y gracias a ellas he podido llegar hasta aquí.

A mis hermanos Rodrigo Landa y Emiliano Landa por su apoyo, cariño, tiempo, comprensión y por regalarme tan gratas experiencias a su lado.

A mis amigos Bruno Cerón, Uriel López, Diana Zavala y Leonardo Hernández por su valiosa amistad, apoyo, confianza, por regalarme excelentes momentos a su lado, por estar ahí en momentos difíciles y por compartir nuestros momentos gratos, nada ni nadie podrá olvidar y deshacer lo que hemos hecho, lo que fuimos, los que somos, lo que hemos compartido, lo que hemos vivido.

A mi novia Carolina Cortés por todo tu amor, apoyo incondicional, confianza, sinceridad, nobleza, por permitir en un principio ser tu amigo, tu compañero de clases, de prácticas, de fiestas y ahora por dejarme entrar y ser parte de tu vida.

A Betsabe Cortés, Carolina Cortés, Natalia Reyes, Jorge Monroy, Rolando Verde y Leonardo Jiménez porque más que compañeros de clase llegamos a ser verdaderos amigos, la amistad que llegamos a forjar es bastante sólida y envidiable; por hacer más amenas las clases, prácticas, tareas, proyectos y mi paso por la facultad pero sobre todo por demostrarme su cariño y comprensión en momentos gratos y difíciles.

A Eduardo Velázquez Peña, Verónica Ituarte, Maru Ruíz, Jessica de la Cruz, Saida Majul, Adrián Iturriaga, Fernando Ortega, Libertad Márquez, por brindarme su amistad y regalarme momentos de felicidad.

A todos mis tíos, primos y demás familia que me han brindando su cariño, apoyo incondicional siempre.

## AGRADECIMIENTOS

---

A la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo por aceptar ser mi directora de tesis y ser parte de su equipo de trabajo, por toda su paciencia, apoyo y orientación que me ha brindando a lo largo de esta investigación, que ha servido para complementar mi formación académica.

A mis sinodales: Dr. Baldomero Carrasco Velázquez, Dr. Víctor Manuel Malpica Cruz, Dr. Arturo Carranza Edwards y al Dr., Emérito de nuestra “Máxima Casa de Estudios”, Barbarín Arreguín Lozano, por las enseñanzas recibidas, por su valioso tiempo invertido en la revisión de este trabajo y sus comentarios pertinentes para mejorarlo.

A la Dra. Ernestina Vallejo quién me orientó, asesoró y colaboró en la cuestión experimental de la tesis.

Al Dr. Sergey Sedov por su apoyo, paciencia y comentarios los cuales me fueron de gran utilidad para realizar una mejor y más completa investigación.

A la Dra. Teresa Pi Puig, responsable del Laboratorio de Rayos X del Instituto de Geología, por analizar mis muestras de campo, pero sobre todo por su apoyo, paciencia y asesoría.

A la Lic. Patricia Girón, perteneciente al Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X, por analizar mis muestras de campo.

A Héctor Cabadas, que por su gran experiencia y conocimiento acerca de la zona de estudio, me brindó asesoría para complementar esta investigación.

A todos y cada uno de mis maestros durante mi formación básica y estudios superiores que por sus enseñanzas me brindaron las bases para poder seguir estudiando.

A la U.N.A.M., mi “Alma Matter”, por permitirme ser parte de su comunidad, por facilitarme todo el conocimiento y experiencia para llegar muy lejos y seguir alcanzando mis objetivos, por darme la oportunidad de ser orgullosamente un egresado de una de las mejores universidades del mundo.

A la Facultad de Ingeniería y todos sus maestros que por compartir sus enseñanzas y su orientación me han permitido cerrar este ciclo exitosamente.

Al financiamiento otorgado a los proyectos PAPIIT, IX121204, “Suelos de paisajes cársticos de Yucatán como la base de la agricultura antigua de los Mayas”, y Proyecto UC-Mexus-Conacyt. “Soil Diversity in the Northern Maya Lowlands: Implications for Reconstructing Environmental Change and Ancient Maya Agricultural Practices”.

Al Instituto de Geología por otorgarme una beca económica durante la elaboración de esta tesis y por permitirme ser parte de su comunidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Pero en particular, a mi mentor, recién nombrado Investigador Emérito de la Universidad, Dr. Barbarín Arreguín Lozano, quien sigue obteniendo logros en su vida, por transmitirme su humildad, nobleza, sencillez, dedicación a la investigación; por sus consejos, enseñanzas, orientación, apoyo, confianza, paciencia y por ser un excelente abuelo, investigador, amigo, maestro, académico, ser humano...

**A TODOS Y CADA UNO DE USTEDES QUE HAN PROCURADO ESTAR CERCA Y SE HAN PREOCUPADO POR MI FORMACIÓN, GRACIAS!!!**

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

## DEDICATORIA

---

A ti abuelito Barbarín, porque siempre serás el mejor ejemplo que tendré como persona, académico, amigo, maestro, investigador y por estar siempre pendiente de mi formación, bienestar y felicidad.

A mis padres que me han guiado y acompañado a lo largo de mi vida, a ustedes que me han enseñado a luchar por mis objetivos y no darme por vencido. Este es uno de mis primeros frutos, de tantos que espero brindarles, en recompensa y agradecimiento por estar siempre ahí.

A Kro (Mor), por todo el apoyo, confianza, comprensión, paciencia, cariño, pero sobre todo por todo el amor que me has brindado, por todas esas ocurrencias y buenos momentos que me has regalado estando a tu lado y por darme tanta dicha y felicidad.

A mis amigos: Bruno (Gorda), Uriel (Creux), Leonardo (Negra) y Diana, por su apoyo, sus consejos y por esos gratos y divertidos momentos a su lado y los que nos faltan. No olviden que a pesar de la distancia siempre estaremos juntos, recuerden que los logros de cada uno son logros de todos.

A toda mi familia por su valiosa ayuda, cariño y palabras de aliento en momentos difíciles.

# Í N D I C E

## 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo

1.2 Hipótesis

## 2. ANTECEDENTES

2.1 Evolución del Karst

2.2 Procesos de disolución de calizas

2.3 Formación de suelos en calizas

## 3. ÁREA DE ESTUDIO

3,1 Localización

3.2 Geología Regional

3.3 Factores Ambientales

## 4. METODOLOGÍA

## 5. RESULTADOS

5.1 Propiedades físicas

5.2 Proporción de residuo

5.3 Relación del volumen disuelto

5.4 Difracción de Rayos X

5.5 Fluorescencia de Rayos X

## 6. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1 Volumen de roca disuelto

6.2 Composición química mineralógica

6.3 La caliza como material parental del suelo

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

## RESUMEN

La Península de Yucatán es una plataforma carbonatada donde dominan los procesos de karsticidad debido a las condiciones climáticas, litología y geomorfología.

En la actualidad el estudio de suelos en la Península de Yucatán ha sido un tema muy controvertido porque no se tiene bien definido cuáles son los procesos genéticos que condicionan su formación.

En esta investigación se comprueba si el residuo silicatado, producto de la disolución de la roca caliza, es material parental de los suelos en la Península de Yucatán, así como también se define si es responsable de rellenar las depresiones (“bolsas”) kársticas existentes en la zona de estudio.

El residuo fue analizado por diversos métodos para conocer su mineralogía y composición química total. Se compararon los resultados del residuo con los de un suelo formado en una bolsa kárstica de la zona de estudio, para sustentar la hipótesis sobre formación de suelo en la región y sobre los procesos que probablemente han condicionado su origen.

Los resultados arrojados por los análisis demuestran que el residuo representa aproximadamente el 0.5% de la composición total de la roca caliza. La disolución de los carbonatos y una erosión local son los principales factores que intervienen en la formación de suelos con un aporte menor de otras fuentes. Por lo tanto el material parental de la zona de estudio tiene un origen in situ con contribución de material alóctono. Con la difracción de rayos X se comprobó que el residuo está compuesto por una pequeña proporción de limo y en su mayoría por un mineral arcilloso muy alterado denominado vermiculita. El análisis por fluorescencia de rayos X demuestra que el residuo tiene un alto porcentaje de sílice y alúmina, sin embargo el porcentaje de calcio es escaso, ya que este elemento se pierde al realizar la disolución del carbonato. En cuanto a los elementos estables (Nb, Ti, Th y Zr), existe una similitud entre los valores obtenidos del residuo y el suelo.

Todos los análisis de laboratorio con sus respectivos resultados, sirvieron en esta investigación para demostrar la formación autóctona y alóctona del suelo en la Península de Yucatán y con los que se propone una probable hipótesis final, respecto al origen del material proveniente de fuentes externas (probable influencia de materiales volcánicos del Chichón).



## 1. INTRODUCCIÓN

Los suelos representan un aspecto fundamental en los geosistemas. Su formación es reflejo directo de las condiciones ambientales, por lo que los cambios que se presentan en el entorno son sintetizados y amortiguados por ellos. Es por eso que, en los actuales escenarios para determinar las repercusiones del cambio climático global, se debe comprender la dinámica de formación de suelo.

En los sistemas volcánicos, el conocimiento de la génesis de los suelos es más o menos claro, gracias a los trabajos de Wada (1980) y Shoji et al. (1993), entre otros. En los paisajes kársticos, este conocimiento es controversial, ya que los autores que han estudiado la formación de suelos en rocas carbonatadas no han argumentado lo suficiente y con claridad los factores y procesos involucrados en la pedogénesis en estas condiciones. Actualmente la mayor parte de los estudios y el conocimiento sobre la génesis de suelos en rocas carbonatadas proviene de regiones templadas (*Terra Rossa*, *Terra Fusca* y *Rendzinas* en el Mediterráneo). De los pocos estudios realizados en zonas tropicales, Bruce (1983) y posteriormente Scholten y Andriess (1986) reconocen una diversidad de suelos formados en rocas carbonatadas del Caribe y del Pacífico, de los principales que se distinguen actualmente en estas regiones son los Oxisoles, Mollisoles, Ultisoles, Alfisoles y Entisoles. Ortega y Sastriques (1984) define los suelos *Ferralíticos* o *Latosólicos* como suelos rojizos formados sobre calizas compuestas por arcilla caolinítica. Scholten y Andriess (1986) asocian las bauxitas kársticas de Jamaica como consecuencia de la pérdida de sílice y el enriquecimiento de Fe y Al.

En la Península de Yucatán, aún cuando se ha tratado de establecer los mecanismos de formación de los suelos (Aguilera, 1963; Bautista et al. 2005) así como los productos de intemperismo relacionados con el sustrato calcáreo (Isphording 1974), aún no está bien documentado el proceso de pedogénesis.

La Península de Yucatán está compuesta por una gran diversidad de suelos, sin embargo dado la complejidad de éstos se conoce muy poco sobre su formación y los factores que intervienen en su desarrollo, esto es de gran importancia y utilidad para comprender los ecosistemas formados en la región.

En la Península se han identificado 13 unidades de suelo (FAO et al., 2001). Las regiones centro, sur y sureste son las que tienen un mayor número de unidades de mapeo a escala 1:250,000, sin embargo la región que limita con el Mar Caribe (noreste de la Península de Yucatán) posee suelos de menor desarrollo.

En esta investigación se plantean las hipótesis sobre la pedogénesis kárstica que se han descrito para la Península de Yucatán; posteriormente se menciona y argumenta, con los resultados de los estudios y análisis realizados en el laboratorio, el origen de los suelos en la zona de estudio y su importancia (Carretera que va de Cancún a Tulúm, zona de canteras) y se definirá si el material existente después de la disolución del carbonato (residuo) es el que da origen a los suelos. Por último se realizará un ejercicio didáctico e ilustrativo donde se conocerá la relación roca-suelo, es decir la cantidad aproximada que se requerirá de caliza para que, al ser

disuelta, sólo quede la porción de residuo necesaria para rellenar una bolsa kárstica y así formar un suelo.

Esta investigación es importante porque propone una hipótesis más de formación de suelos en una zona de la Península de Yucatán, ya que en la actualidad se ha investigado poco sobre los procesos de formación y evolución de suelos en rocas carbonatadas del sureste de México y por ende se conoce muy poco sobre su génesis. Al conocer la composición mineralógica del residuo se argumentará la hipótesis mencionada y se comprobará su origen (alóctono o autóctono).

La información que se genera en este trabajo es útil para comprender la dinámica de formación de suelos, que puede emplearse en estudios de agua subterránea, ecología, manejo de recursos naturales e impacto ambiental.

### **1.1. Objetivo**

Determinar si el residuo silicatado, obtenido a partir de la disolución de las calizas de la Península de Yucatán, es suficiente y responsable para la formación de suelos en la zona de estudio.

Por lo tanto el objetivo central consiste en hacer una caracterización del residuo insoluble de las calizas de la zona de estudio y conocer si dicho material es responsable de la formación de suelos de la región.

El análisis del residuo por diferentes métodos y su relación con los suelos formados sobre caliza permitirá definir el origen alóctono o autóctono del material parental de dichos suelos y se formulará una hipótesis genética

Por último, se desea conocer la cantidad aproximada de residuo insoluble necesario para rellenar, en su totalidad, el volumen de una bolsa kárstica; y como parte complementaria a los análisis de Difracción y Fluorescencia de Rayos X, será útil para argumentar y justificar el primer objetivo.

### **1.2. Hipótesis**

Se considera que los suelos de la región estudiada pueden tener dos orígenes: alóctono o autóctono.

**Alóctono.-** El material parental de los suelos no es la caliza subyacente, y proviene de otras regiones, transportado por la denudación o viento.

**Autóctono.-** El material parental es la caliza, la cual al disolverse produce un residuo mineral, silicatado, que junto con la materia orgánica permite el desarrollo de los suelos.

## **2. ANTECEDENTES**

### **2.1. Evolución del Karst**

El karst es una forma de relieve originado por intemperismo químico de determinadas rocas (caliza, dolomía, yeso, etc.) compuesta por minerales solubles en agua. El término proviene del eslavo *krs* o del servo-croata *kras* que significa fractura en caliza.

#### **Fases de un Karst**

Desde que comienza la disolución de un macizo rocoso hasta prácticamente la desaparición del mismo se producen una serie de fases que han sido definidas de acuerdo al estado en el que se encuentra el terreno, tomando como parámetros la morfología y estructuras formadas o deformadas. Las fases son:

1. Fase juvenil.- existe una disolución superficial, comienzan a formarse lenares o también llamados lapiaces que son el inicio de la karstificación y por lo tanto la forma más sencilla. Esta fase se caracteriza por la formación de pequeños surcos, generados por flujos de agua sobre la superficie, que disuelven la roca.
2. Fase de madurez.- el nivel freático desciende debido a que las cavidades se hacen más grandes, puede haber hundimientos de terreno originándose depresiones circulares y en las que puede haber comunicación con el interior y retener agua formándose lagunas, a estas estructuras se les denomina dolinas, y también se pueden formar cenotes que se definen como depresiones, caracterizadas por su evolución y gran extensión.
3. Fase de senilidad.- el terreno poco a poco comienza a desvanecer debido a la gran erosión superficial provocando que las cavidades interiores queden al descubierto.

#### **Factores de formación**

La formación de karst está regida por la conjunción de ciertos y específicos tipos de factores:

1. Factor litológico.
2. Factor estructural.
3. Factor climático.
4. Factor tiempo.

### **Factor litológico**

Los procesos de karstificación se originan únicamente en rocas que son solubles en agua, es decir en aquellas rocas que pueden ser disueltas químicamente en agua como lo son las calizas, dolomías y rocas de ambientes evaporíticos como el yeso, la anhidrita y la sal. Sin embargo, en donde generalmente se producen estos procesos son las rocas carbonatadas (calizas y dolomías). Para esta investigación nos centraremos únicamente en carbonatos de calcio debido a que en el área de estudio (Figura 2) se tiene únicamente roca caliza. Entre más elevado sea el contenido de carbonatos de calcio, la roca es más pura y por lo tanto existe mayor karstificación.

### **Factor estructural**

Debe de existir una asociación tectónica ya que este proceso es el que ocasiona los esfuerzos de tensión y compresión y consecuentemente las fallas y fracturas que observamos en las estructuras kársticas, lugares por donde el agua se infiltrará e irá disolviendo la roca hasta formar cavidades subterráneas. Para esta investigación no se obtuvieron sistemas de fractura porque no se consideró importante para cumplir los objetivos.

### **Factor climático**

Dado la condición ligeramente ácida del agua meteórica, ésta puede contribuir al proceso de karstificación, siempre y cuando exista una temporada de constantes lluvias en la región.

Siendo indispensable el agua para la disolución, ésta debe contener bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) para que la reacción entre la roca y el agua sea más agresiva. Por lo tanto la precipitación pluvial debe ser alta y con vegetación que produzca  $\text{CO}_2$ . La reacción del  $\text{CO}_2$  con el agua meteórica produce ácido carbónico que disuelve la roca.

### **Factor tiempo**

Es evidente que para cualquier proceso geológico que ocurre en nuestro planeta se requiere de tiempo, por esto el proceso de karstificación se va desarrollando a lo largo de miles de años, tiempo que toma el proceso de disolución de la roca.

Debido a la gran cantidad de rocas carbonatadas en la Península de Yucatán, existen actualmente una serie de cenotes distribuidos en los diversos estados que comprenden esta región, y que desde la época de las culturas prehispánicas han sido factor indispensable para su poblamiento, como consecuencia de las grandes y diversas ventajas que estas estructuras geológicas representan.

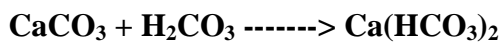
El karst de Yucatán se ha definido como de tipo con dolinas de paredes verticales (cenotes) desarrolladas en calizas de estratificación casi horizontal (Finch, 1965). Los cenotes de Yucatán son bastante variados en forma y tamaño desde cavernas, aguadas, ojos de agua, cenotes subterráneos, etc.

## 2.2. Procesos de disolución de calizas

El proceso comienza cuando el agua, proveniente de las precipitaciones pluviales, se mezcla con el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) presente en el ambiente y el que es fijado por las raíces de las plantas, esto forma un ácido muy agresivo llamado carbónico. La reacción que interviene en este proceso es la siguiente:



Este ácido comienza a infiltrarse por las grietas de un macizo de roca caliza, al unirse químicamente ambos forman un nuevo compuesto llamado bicarbonato de calcio, el cual es muy soluble en agua. Esta característica es la que provoca que se disuelva lentamente la roca y en consecuencia que se formen las diversas estructuras kársticas, como se ejemplifica en la siguiente reacción:



Esas cavidades al paso del tiempo se van haciendo cada vez más grandes y profundas llegando, en ocasiones, a alcanzar el nivel freático, provocando que éstas se llenen de agua y en consecuencia que el nivel vaya descendiendo y se formen ríos subterráneos, mientras esto sucede en el interior, el terreno expuesto a la intemperie sigue siendo disuelto por los efectos antes mencionados, dejando una morfología característica y espectacular del paisaje, siendo las más importantes e impresionantes las grutas que se definen como: cavidades naturales muy grandes con conductos de circulación subterránea por donde fluye el agua subterránea, puede haber conexión con otras grutas conectadas entre sí por los mismos conductos de circulación antes mencionados.

## 2.3. Formación de suelos en calizas

El origen de los suelos en regiones kársticas ha sido discutido por diversos autores. Las mayores investigaciones se han realizado sobre la génesis de la denominada *Terra Rossa* en regiones con clima del Mediterráneo.

La *Terra Rossa* es un material arcilloso o arcillo-limoso que libera óxidos de hierro, aluminio y sílice, producto de la alteración de la roca madre y que puede ser considerada como un suelo, un suelo relicto, un paleosuelo o un complejo pedosedimentario y se puede presentar interestratificada con calizas y dolomías, rellenando fracturas producto de karstificación o en forma de capas discontinuas que cubren a calizas o dolomías. Moresi y Mongelli (1988) han encontrado *Terra Rossa* cubierta por sedimentos de composición carbonatada.

Actualmente existen dos hipótesis sobre el origen de la *Terra Rossa*:

- 1.- A partir de los residuos insolubles de las rocas carbonatadas (autóctono) (Kispatic, 1912; Kubiena, 1953; Skoric, 1987; Bronger et al., 1983; Moresi y Mongelli, 1988, entre otros).

2.- Adición de un material externo (alóctono) (Lippi-Boncampi et al., 1955; Balagh y Runge, 1970; Yaalon y Ganor, 1973; Sinkovec, 1974; Yaalon, 1997; Durn et al., 1999, entre otros).

Ambas opciones también se han utilizado para definir la formación de suelos tropicales sobre calizas, principalmente en islas del Pacífico y del Mar Caribe, como por ejemplo en Jamaica, Cuba y en la Península de Yucatán.

Ahmad y Jones (1969) apoyan la primera hipótesis y afirman que los suelos sobre calizas pleistocénicas en Barbados son de origen autóctono, sin embargo Borg y Banner (1996) en relación a un estudio isotópico de neodimio y estroncio, y a la relación Sm/Nd apoyan la segunda hipótesis. Muhs et al. (1990) proponen que los materiales transportados por el viento desde el desierto del Sahara, junto con un aporte menor de cenizas volcánicas son los que dieron origen a los suelos de las islas del Caribe. Brückner y Schnütgen (1995) demostraron la génesis de material volcánico en suelos ubicados en terrazas arrecifales de Nueva Guinea.

El origen de los suelos de la península de Yucatán es un tema que también está en discusión porque existen diversas hipótesis de su génesis, descritas por varios autores, por ejemplo: Aguilera-Herrera (1963) y Hernández et al. (1985) evaluaron las propiedades iniciales del suelo y sus características de fertilidad; estudios más recientes realizados en el centro y sur de Yucatán por Bautista et al. (2005) mostraron evidencias de un desarrollo de suelos a partir de la disolución de la caliza. De acuerdo a los estudios realizados por estos autores, se menciona la existencia de un importante proceso de disolución en la formación de suelos.

Sin embargo, caso contrario a las hipótesis anteriores, varios autores basándose en indicadores geoquímicos y mineralógicos han descrito que el material de los suelos arcillosos, desarrollados sobre rocas calcáreas, no es consecuencia de la disolución de la roca subyacente, sino que tiene un origen alóctono y en su mayoría el material se deposita por procesos eólicos. De hecho, ni Isphording (1974), ni Bautista et al. (2005) proporcionan conclusiones contundentes al respecto.

En conclusión se puede afirmar que a nivel mundial no se ha llegado a un acuerdo en cuanto a la explicación del origen del material mineral de suelos en sistemas kársticos y sigue siendo una cuestión por resolver.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1 Localización

La Península de Yucatán se ubica en la porción sureste de la República Mexicana entre las coordenadas geográficas  $17^{\circ} 49' 00''$  y  $21^{\circ} 36' 00''$  de Latitud Norte y  $86^{\circ} 45' 00''$  y  $91^{\circ} 20' 00''$  de Longitud Oeste, abarcando una superficie de  $141,523 \text{ km}^2$  (Figura 1).

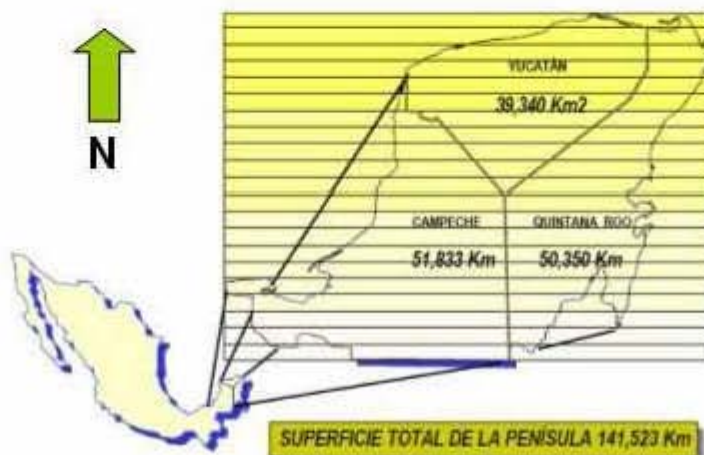


Fig. 1.- Localización de la Península de Yucatán.

#### 3.2 Geología Regional

La Península de Yucatán, según Butterlin y Bonet (1960), se compone, en su mayoría, por sedimentos calcáreos de origen marino del Terciario y Reciente. El basamento de la península está formado por rocas sedimentarias ligeramente metamorfoseadas del Paleozoico. En el Mesozoico se depositan sedimentos continentales, evaporíticos y calizas de plataforma. El límite entre el Cretácico y el Terciario está marcado por el impacto del Chicxulub (Rebolledo et al. 2000). Las rocas del Paleoceno-Eoceno, ubicadas en la parte sur de la península, son calizas que se encuentran dolomitizadas, recrystalizadas o silicificadas, dentro de las que se incluyen las evaporitas de la Formación Icaiché constituidas por yeso, anhidrita y halita, ricas en sulfatos y cloruro de sodio. Los depósitos Cuaternarios se restringen a una franja periférica, angosta, a lo largo de la costa, en un ambiente de supramarea y están formados por fragmentos de conchas de varios organismos (Figura 2).

Las rocas se encuentran prácticamente dispuestas horizontalmente, excepto en las regiones cercanas al Río Hondo, en los límites con Belice, en donde se presentan plegadas y en la porción meridional los estratos pierden su continuidad, a consecuencia de fallas normales ocasionando una superficie escalonada. Dichas fallas tienen una longitud de varios kilómetros y se manifiestan en escarpes con un desnivel de 10 a 100 m. Algunas de ellas han originado fosas convertidas en pantanos, lagos y lagunas, siendo la mayor de ellas la Laguna de Bacalar.

Los principales ejes estructurales presentan una orientación ONO-ESE y NNE-SSO, asociados a la Sierrita Ticul ubicada al SW de Yucatán y el Sistema Bacalar-Río Hondo en el estado de Quintana Roo.

La Zona de Falla de Río Hondo está compuesta por una serie de fallas normales en direcciones norte y noreste. La expresión superficial de la zona de falla se observa en el alineamiento de una serie de lagos someros y pequeñas bahías, particularmente en el sur. La continuación de la falla hacia el norte, está indicada por la orientación de la isla Cozumel, en donde se presenta un salto de falla hacia un sistema horst. Southworth (1985) propone que la expresión superficial más oriental de esta zona de falla pueden ser dos alineamientos de cenotes con orientación N21°E, aproximadamente a 15 km de la isla de Cozumel. En dicha región es probable que los sistemas de Río Hondo y Holbox se intercepten.

Las calizas más predominantes y de mejores características acuíferas de la región, pertenecen al Eoceno y Mio-Plioceno y están relacionadas con el Miembro Pisté de la Formación Chichén Itzá y la Formación Carrillo Puerto, respectivamente.

La Isla de Cancún es una barra costera representada por dunas sucesivas de arena endurecida que están por encima de calizas de la plataforma continental, existiendo entre ellas lagunas y pantanos en los que se origina un proceso de precipitación de sedimentos de origen animal y vegetal (arrecifes), este tipo de configuración es típica de la zona nororiental de la península. Sobre estas dunas de arena cementada, los procesos eólicos han acumulado una faja de arena de 11 km de longitud, 400 m de ancho y 12 m de espesor, conocida como Isla de Cancún, sin embargo en realidad constituye un cordón litoral asociada a la Laguna de Nichupté. Frente a la playa, la plataforma calcárea se prolonga hasta 1.5 km con una profundidad de 10 m, descendiendo posteriormente bruscamente al profundo Mar Caribe.



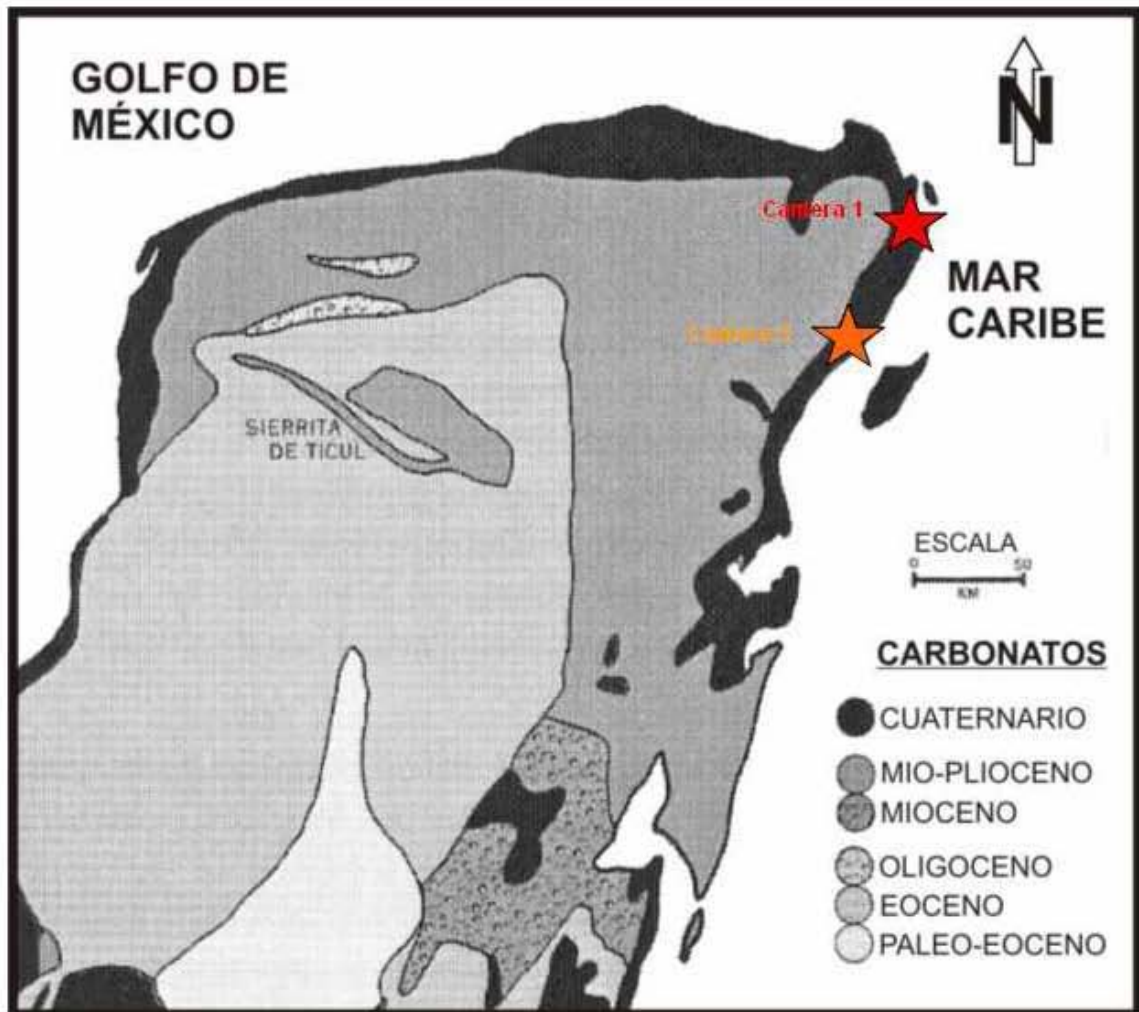


Fig 2.- Secuencias sucesivas de depósitos de carbonatos desde el Paleoceno hasta el Cuaternario. (Beddows (2004), ubicación de los sitios de muestreo.

### Provincia Fisiográfica

La región queda ubicada dentro de la provincia Fisiográfica denominada “Península de Yucatán”; debido a sus características se le ha denominado “Plataforma Calcárea de Yucatán”. En su mayoría es una superficie plana, principalmente en la parte norte, y lomeríos prolongados de gran altura (275 msnm), que constituyen la Sierrita de Ticul que limita a los estados de Campeche y Quintana Roo.

La Península de Yucatán es una plataforma parcialmente emergida, constituida por rocas carbonatadas y evaporíticas del Mesozoico Tardío y Cenozoico. Fisiográficamente ha sido dividida en dos parte principales:

1. Una gran plataforma sumergida limitada por escarpes hacia el Caribe.
2. Una plataforma emergida limitada por las costas.

## **Plataforma sumergida**

La plataforma submarina que forma el banco de Yucatán-Campeche corresponde a la porción de la plataforma masiva carbonatada de la península.

La Península de Yucatán se encuentra inclinada de norte a sur (Velázquez et al., 2007) y limitada sobre sus tres lados, por pendientes continentales y escalonadas que caen en las profundidades abisales del Golfo de México, constituida y caracterizada por arrecifes de coral y terrazas sumergidas relacionadas con antiguas líneas de costa.

## **Plataforma emergida**

Ésta ha sido caracterizada como una plataforma masiva de calizas que presentan una estratificación horizontal, subdividida por diversos autores en dos regiones fisiográficas: una planicie ubicada al norte y al sur una región de colinas extendiéndose hasta el norte de Guatemala. Dado que no existe un drenaje superficial, el agua de lluvia que no es evaporada en superficie, se infiltra en el subsuelo por las dolinas y otras aberturas, el suelo se encuentra en pequeños y delgados manchones y como relleno en las fisuras de las rocas, soportando vegetación de tipo tropical compuesta de maleza, árboles y plantas trepadoras.

## **Geomorfología**

El relieve de la península es muy uniforme, asociadas a formas kársticas de absorción. Su altitud en general es inferior a los 100 m, caracterizada por ser una superficie plana con depresiones kársticas. La colina de San Felipe se registra como el punto más alto de la zona, ésta se sitúa en las proximidades de la frontera de Guatemala alcanzando más de 400 m de altura. La altitud de la plataforma de Yucatán oscila entre los 25-35 msnm (Lugo-Hubp *et al.*, 1992). Específicamente en la zona de estudio, la altitud es menor a los 20 m.

Tanto la parte norte como oriental presenta una topografía kárstica, la cual, de acuerdo a Lugo y colaboradores (1992) ha evolucionado como consecuencia de la actividad neotectónica y las glaciaciones que producen cambios eustáticos del nivel del mar.

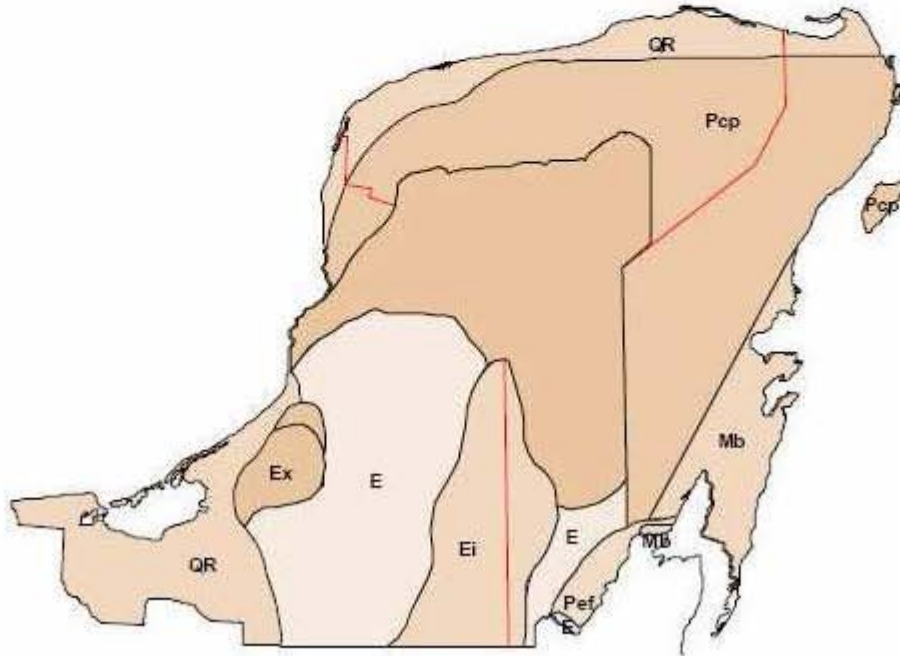
Un rasgo importante en esta zona es la presencia de cenotes, dada la alta permeabilidad de las rocas y un gradiente hidráulico pequeño o nulo que origina que el agua meteórica se acumule en el subsuelo.

## **Estratigrafía**

En la mayor parte de la península de Yucatán aflora una secuencia cenozoica, principalmente calcárea, que no presenta deformaciones y formada por capas conservadas horizontalmente (Figura 3). La secuencia cretácica, localizada en el subsuelo, y la secuencia cenozoica, no presentan mayores perturbaciones

estructurales debido a que sobreyacen a una masa cristalina que se ha mantenido estable desde el Paleozoico.

Durante la segunda mitad del Cretácico y gran parte del Cenozoico, la península de Yucatán y su plataforma marina constituyeron un banco calcáreo de una elevada profundidad, que se extendía hasta Chiapas y el sur de Veracruz.



Fuente: Carta Geológica de la Península de Yucatán, México. Según J. Butterlin y F. Bonet.

ERA	PERIODO	ÉPOCA	LITOLOGÍA	
CENOZOICA	CUATERNARIO	PLEISTOCENO HOLOCENO		QR No diferenciado
		MIOCENO PLOCENO	Mioceno Sup ? Plioceno?	Pop Formación Carrillo Pto.
	Mioceno Sup ? Plioceno?		Pef Formación Estero Franco	
	Mioceno Superior		Mb Formación Bacalar	
	TERCIARIO	PALEOCENO EOCENO	Eoceno Medio? Eoceno Sup?	Edu Miembro Chumbeo
			Eoceno Medio	Ep Miembro Pisté
			Eoceno inferior	Ex Miembro Xbacal
			Eoceno ? Paleoceno?	Ei Formación Caliché
			leoceno Sup. - Eoceno Medio	E Calcáreos Petén

Fig.3.- Estratigrafía de la Península de Yucatán según Butterlin y Bonet (1960).

### Columna Geológica de la Península de Yucatán

Las formaciones terciarias van siendo más jóvenes hacia el norte, en las Montañas Maya, en los límites entre Quintana Roo y Guatemala, las rocas más antiguas corresponden a rocas marinas del Paleozoico, que según Bonis et al. (1970) se encuentran cubiertas en discordancia por Capas Rojas del Jurásico-Cretácico Formación Todos Santos, y sobre estas mismas rocas, material sedimentario y evaporítico de la Formación Cobán.



### ***a) Cretácico Superior***

Flores (1952) hizo un reconocimiento geológico al sur de las Montañas Maya en Belice y encontró una sección del Cretácico Superior representada por una serie de calizas, calizas dolomíticas y dolomías con una capa delgada de arenisca en la sección expuesta, con fauna de tipo lagunar y depósitos post-arrecifales. Sapper (1937), encontró fragmentos de rudistas, mismos que también fueron vistos al norte de las Montañas Maya. El ambiente de depósito fue en aguas someras.

### ***b) Paleoceno-Eoceno***

#### ***Formación Icaiche – Paleoceno-Eoceno Inferior***

Está representado por rocas endogenéticas que cristalizan a partir de una solución al precipitarse en su ambiente de formación y por rocas biogénicas las cuales se forman por una acumulación de material orgánico. Estas rocas están constituidas de cristales de calcita de color blanco y pardo claro, su textura se debe a una dolomitización y silicificación. Los cristales de calcita están presentes en las rocas en gran abundancia, la sílice está en grietas y los nódulos son bastante comunes (Cuevas, 1976). Los procesos diagenéticos son muy fuertes, de modo que los fósiles no se aprecian (Álvarez, 1969).

#### ***Formación Chichen Itzá – Eoceno Medio-Superior***

Las rocas de esta formación son calizas fosilíferas, no estratificadas, que presentan ligeras variaciones litológicas que han permitido dividir las en tres miembros.

1. Miembro Xbacal
2. Miembro Pisté
3. Miembro Chumbec

##### ***1. Miembro Xbacal***

Representada por calizas, a veces blancas o grises, pero generalmente amarillentas e impuras. Se presentan en capas de espesor pequeño a mediano, a veces masivas, pudiendo pasar a verdaderas margas amarillas o a lutitas verdosas. Estas rocas forman pliegues cerrados, con echados que alcanzan 20° o más en oposición al resto de la formación. Poco afectada tectónicamente.

##### ***2. Miembro Pisté***

Representado por calizas blancas o amarillentas, generalmente de hábito masivo y de capas más o menos gruesas. A excepción del estado de Campeche, donde las calizas se encuentran plegadas en anticlinales y sinclinales, los echados son pequeños o nulos y de orientación variable. La microfauna es característica del

Eoceno Medio del Caribe y semejante al de la cima de las calizas de Petén en el norte de Belice y con un espesor de varios cientos de metros y está representada por algas calcáreas y por numerosos foraminíferos. Las calizas del Miembro Pisté cubren a las del Miembro Abacal, probablemente en concordancia, al sur de Champotón (Álvarez, 1969).

### *3. Miembro Chumbec*

Representada por calizas masivas muy cristalinas de coloración blanca, comparable en muchos aspectos con el miembro Pisté, sobre el cual descansa probablemente en concordancia.

#### *c) Oligoceno Inferior*

Se presenta como una calcarenita blanca y rosada con caliche, quebradiza, suave en partes, en bancos de 1 a 1.5 m de espesor, que subyacen a la caliza superficial alterada, mal estratificada.

#### *d) Oligoceno Superior*

Contiene una caliza y calcarenita pulvurenta, coquinoide, con abundantes restos de moluscos y briozoarios, de coloración crema y blanco que subyace a la caliza superficial alterada.

#### *e) Mioceno-Plioceno*

Cubre la mayor parte de la península de Yucatán, en algunas partes se encuentra en discordancia. Se presenta en forma de caliza blanca recristalizada con microfauna, o bien, como una caliza coquinoide, más o menos cementada con carbonato de calcio con restos de bivalvos, o también se presenta en forma conglomerática, sin embargo en ninguna se aprecia una estratificación definida y su aspecto estructural aparentemente es horizontal.

#### *f) Mioceno*

##### *Formación Bacalar – Mioceno Superior*

Localizada en el centro sur del estado de Quintana Roo; corresponde a calizas cretosas de color blanco con nódulos duros formando grandes niveles, pasando a margas blancas en la parte inferior en donde se pueden encontrar capas de yeso finas. Localmente este tipo de rocas reciben el nombre de “sashcab”. Su espesor alcanza varios centenares de metros (Álvarez, 1969).

Las rocas están formadas por coquinas presentando una coloración amarilla. Se tienen también afloramientos de rocas calizas masivas con un contenido

faunístico abundante. Suprayaciendo a éstas aparecen calizas de color variable de rojo a blanco con textura nodular y con un contenido de arcilla y óxidos de hierro (Cuevas, 1976).

Cada uno de los horizontes se encuentra alternado con margas de color amarillo y pequeños horizontes de arenisca. En la cima existen depósitos de calizas compactas de color crema alternando con arenas de color amarillo. Este afloramiento está situado al oriente de la ciudad de Carrillo Puerto.

**g) Pleistoceno-Reciente (Holoceno)**

Formada por el caliche superficial alterado que cubre gran parte de la península. Existen también pantanos, calizas alteradas, calcarenitas, calcilutitas que rodean la península y terminan en playas.

Las rocas del Pleistoceno superior están separadas por capas de caliche, las cuales son resultado de procesos superficiales durante episodios de nivel del mar bajo. Durante el último interglaciar, se depositaron sedimentos de facies de plataforma arrecifal y lagunar (Figura 5), los cuales se distribuyen en la región noreste de la península, a 3 km de la costa actual.

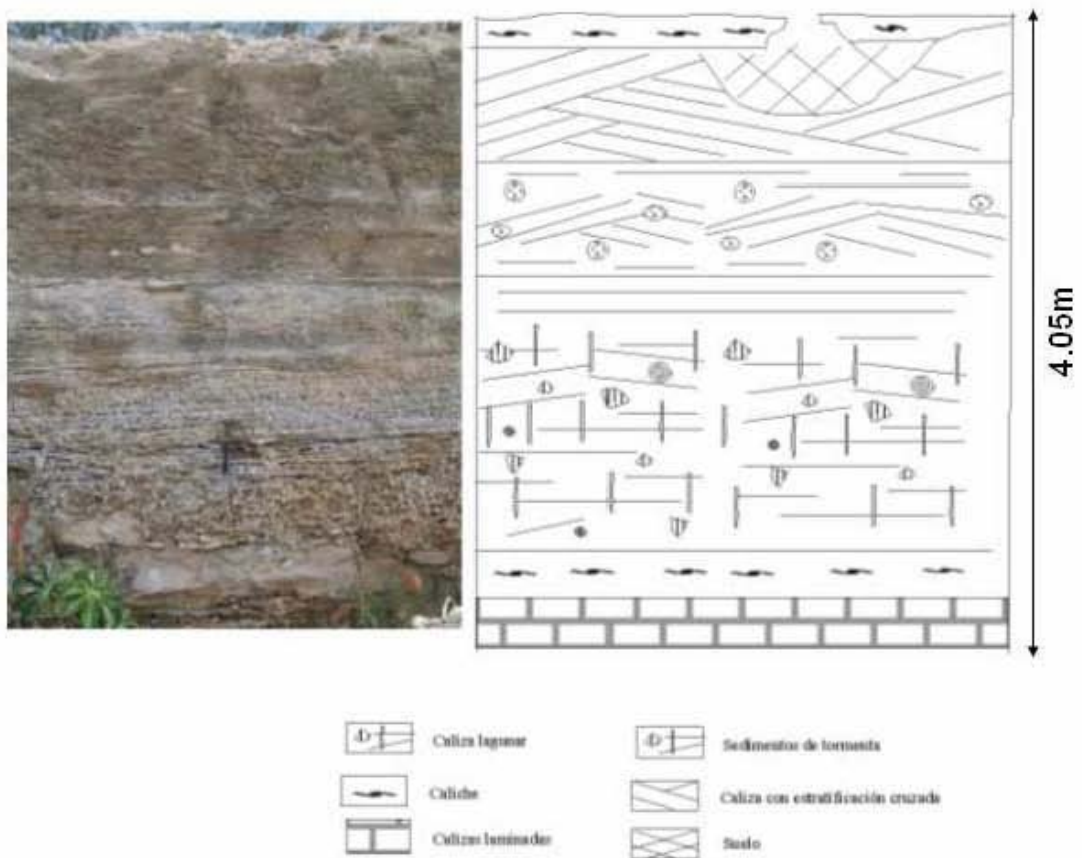


Fig. 5.- Perfil geológico que muestra la estratificación en una cantera cercana a Puerto Morelos (Velázquez et al. 2007).



Según Logan et al.(1969), en la Península de Yucatán no únicamente afloran rocas carbonatadas, en la región suroeste existe material de origen terrígeno. La bahía de Campeche es una provincia sedimentaria caracterizada por una rápida sedimentación terrígena, producto de la alta energía ocurrida durante las últimas transgresiones y regresiones. Por lo anterior, uno de los factores importantes que deben de ser considerados para estudiar la estratigrafía de la Península de Yucatán durante el Holoceno, son las fluctuaciones marinas ocurridas durante el Cuaternario. Existen evidencias que indican que la máxima regresión marina tuvo lugar durante el último periodo glaciario, aproximadamente hace 20,000 años, posterior a ésta, en un intervalo postglaciario, hubo un aumento considerable en el nivel del mar consecuencia de una transgresión marina. Estos eventos de regresión y transgresión marina ocurridos durante este periodo, está representada estratigráficamente por una discordancia erosional con sedimentos terrígenos de grano grueso no consolidados, que fueron depositados después de una inundación en la región, producto del avance del mar (Figura 6). Estos sedimentos no consolidados representan estratigráficamente el material estudiado más reciente, acumulado en condiciones de una transgresión, con una distribución en espacio y tiempo controlada por su morfología y su relativa elevación de la superficie transgredida (discontinuidad) con respecto a la elevación del nivel del mar.



Fig 6.- Mapa que muestra la relación de los depósitos de carbonatos y terrígenos en la Península de Yucatán, Golfo de México y la región norte del Caribe.

### 3.3 Factores Ambientales

#### Clima

Las variaciones de precipitación en la región son mínimas debido a las características orográficas, los valores de lluvia media anual en las diversas estaciones climatológicas varía de 1,432.3 mm y 1,107.63 mm (calculado a partir del plano de isoyetas para el periodo 1970-1996, según datos del Centro Regional de Pronóstico Meteorológico de la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de la Península de Yucatán). Las precipitaciones mínimas se presentan en la parte costera norte, las precipitaciones máximas en el sureste y suroeste, con una



distribución equitativa de la lluvia media en la zona suroeste y centro de la península.

Anualmente en verano e invierno la península se ve amenazada por nortes o frentes fríos, los meses de abril y mayo se caracterizan por ser un periodo seco. A partir del mes de mayo hasta octubre, la región se ve influenciada por presencia de ondas tropicales y por la temporada anual de lluvias, que son del tipo tropical.

Los valores medios anuales de evapotranspiración, (según datos del Centro Regional de Pronóstico Meteorológico de la Comisión Nacional del Agua, Gerencia Regional de la Península de Yucatán, 1994), calculados para toda la región son de 1,236.46 mm, con una variación con valores medios mínimos de 1,056mm, a medios máximos de 1,400 mm.

Por la ubicación geográfica de la península, ésta se ve amenazada por ciclones tropicales durante la temporada de mayo a noviembre, originados generalmente al este del Mar Caribe en el Océano Atlántico, y que viajan hacia el oeste rumbo al Golfo de México, al estado de Florida, la costa del este de los Estados Unidos de Norteamérica o se disipan al llegar a las frías aguas del Atlántico norte. La mayor parte de estos fenómenos generados en esta zona, adquieren grandes magnitudes porque se desplazan grandes distancias sobre las cálidas aguas del Atlántico tropical, que entre otros factores alimentan de energía a dichos fenómenos teniendo como consecuencia efectos devastadores para las zonas que alcanza.

## **Vegetación**

De acuerdo con Miranda (1964) la vegetación en la Península de Yucatán se encuentra relacionada con sistemas tropicales de baja altitud. La mayor parte de la península está cubierta por vegetación tropical estacional como la selva baja caducifolia, mediana subcaducifolia y mediana subperennifolia. Los bosques húmedos como las selvas altas subperennifolia y altas perennifolias sólo ocupan áreas reducidas al sur de la península. Los tipos de vegetación se caracterizan por su fisonomía, su composición florística, su fenología, por algunas peculiaridades del hábitat o por una combinación de estos atributos.

## **Hidrografía**

Esta región carece prácticamente de agua superficial, los escurrimientos superficiales son escasos o de un recorrido muy corto, éstos los encontramos en la subregión comprendida entre las coordenadas 89° 27' y 92° 05' de longitud oeste y 17° 49' y 19° 00' de latitud norte y que lleva por nombre Río Candelaria, éste colinda al norte con la Laguna de Términos, el Golfo de México y la subregión Campeche y al sur y suroeste limita con Guatemala y Tabasco; sin embargo la elevada precipitación pluvial, la gran capacidad de infiltración del terreno y la topografía casi plana, son los factores que favorecen la recarga de los mantos acuíferos.

El estado de Quintana Roo cuenta con 51 lagunas de las cuales las más significativas son la de Bacalar cuya extensión es de 50 km, la de Chichancanab y el Sistema Lagunar Nichupté que tiene 12 km de longitud.

En las rocas terciarias se ha desarrollado un acuífero de tipo kárstico (Perry et al. 1989), el cual es heterogéneo. Este acuífero es libre, excepto en la porción norte. En esta región existe un lente delgado que yace sobre el agua de mar, que penetra hasta más de 100 km. de la costa (Perry et al., 2002).

## Suelos

Bautista et al. (2005) ha identificado en la península de Yucatán 13 Unidades de suelo (FAO et al., 2001) (Figura 7). Los de mayor extensión son las *Rendzinas* con 50.3% que son suelos pedregosos, poco profundos, con roca calcárea en su parte inferior y los suelos con afloramientos rocosos, *Litosoles*, con 16.7%; los suelos que presentan condiciones reductoras o agua cercana a la superficie, *Gleysoles*, con un 15.5% distribuyéndose en las zonas costeras. Los suelos que acumulan arcilla en el horizonte B llamados *Luvisoles* con 4.44%, en las planicies kársticas; los suelos con agrietamientos profundos y facetas de fricción-presión denominados *Vertisoles* abarcando un 3.02% al sur y noreste; suelos salinos abarcan un 2.79%; los suelos con material suelto con un débil o nulo desarrollo pedológico, *Regosoles*, con 2.35%; los suelos poco desarrollados, con ligera acumulación de arcilla y susceptibles a las erosión, *Cambisoles*, con un 2.2%; los suelos con acumulación de arcilla en el horizonte B, con pocas bases, *Nitsoles*, con 1.3%; los *Histosoles* ricos en materia orgánica fresca o parcialmente descompuesta abarcando un 0.57%; los *Phaeozems* con abundante presencia de materia orgánica, de color pardo oscuro con un 0.44%; los *Fluvisoles* característicos de planicies de inundación con un 0.01% y por último los *Castañoszems* ricos en materia orgánica con un 0.06%.

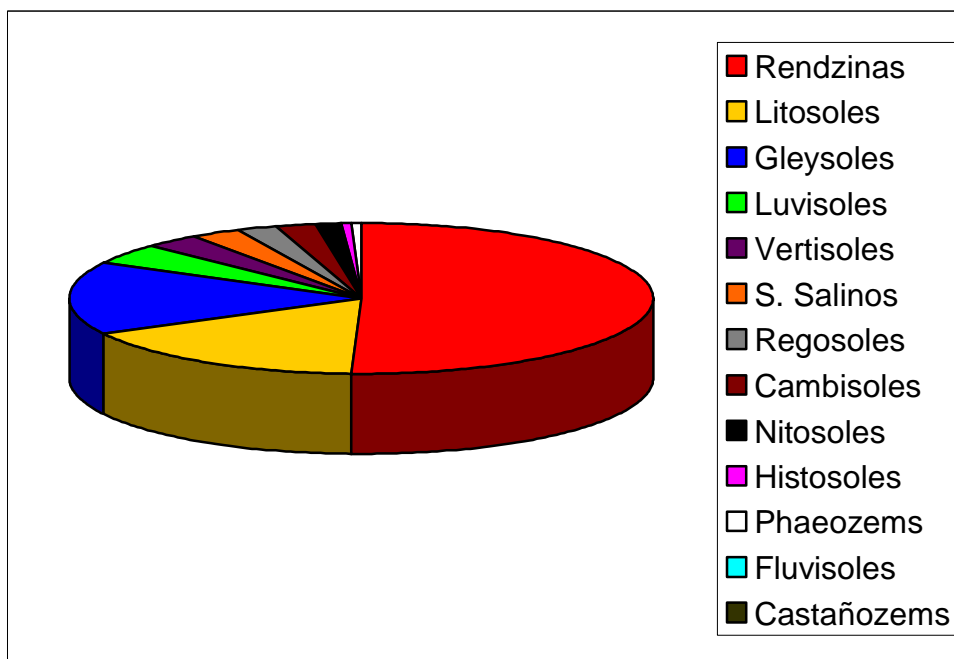


Fig. 7- Gráfica de las Unidades de suelo existentes en la Península de Yucatán.

#### 4. METODOLOGÍA

La metodología que se utilizó para llevar a cabo esta investigación se dividió en cuatro etapas:

- a) **Compilación de información.-** Consistió en la búsqueda de información bibliográfica, artículos, libros, mapas, de la zona de estudio, así como de los mecanismos de formación de suelos sobre calizas y desarrollo del karst.
- b) **Trabajo de campo.-** Se tomaron muestras de caliza de 2 canteras. En una de ellas se obtuvieron 2 calizas diferentes, la primera derivada de un sedimento laminado con estratificación cruzada, denominada de duna (C1-CD) y otra masiva (C1-CM). De la segunda cantera (cantera 3) se tomó una caliza, deleznable (C3-S1). También se tomaron muestras del suelo que sobreyace a dichas calizas, con el fin de comparar los resultados. Ambas canteras se encuentran en la zona costera entre Cancún y Tulum, de donde actualmente se extrae roca caliza para la construcción (Figura 8).



Fig. 8.- Zona de estudio. Carretera que va de Cancún a Tulum, zona de canteras.

El sitio 1 se localiza en las coordenadas  $N20^{\circ}31'40.6''$ ,  $W87^{\circ}11'47.9''$ , a 1 km de la costa actual (Figura 9). La segunda cantera se ubica a 18 km de Cancún en las coordenadas  $N20^{\circ}58'10.5''$  y  $W86^{\circ}51'57.4''$  (Figura 10).

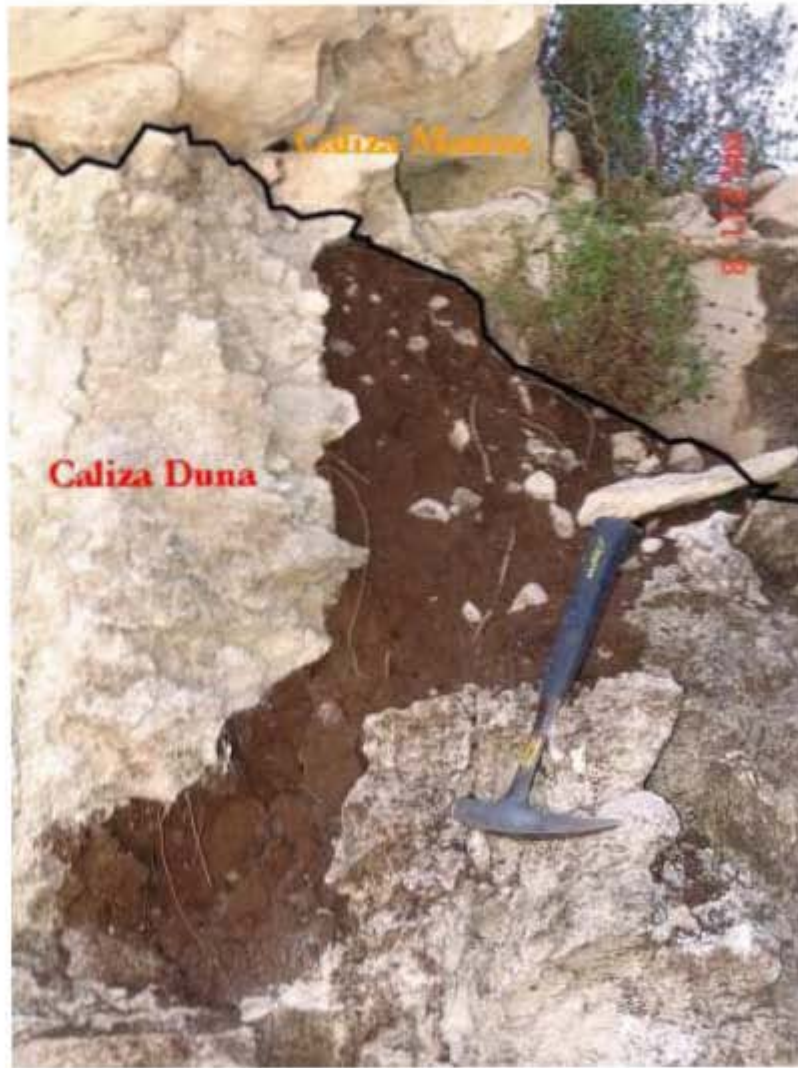


Fig. 9.- En la foto se muestra la cantera 1, en ésta encontramos en la parte superior la caliza masiva y en la parte inferior se observa la caliza denominada de duna.



Fig. 10.- En la foto se muestra la cantera 3, de ésta fue donde se obtuvo la muestra C3-S1.

c) **Trabajo de laboratorio.-** Todas las muestras de caliza se trituraron (aproximadamente 2.5 kg de cada una) y se pasaron por un tamiz para tener un tamaño de grano no mayor del de las gravas (2 mm), con el objetivo de que la velocidad de disolución fuese más rápida. El material triturado de cada muestra se introdujo en un vaso de precipitados de 2 litros, en donde se disolvió el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) poco a poco con HCl 3N, obteniéndose así el residuo final del proceso. Dicho residuo se lavó con agua destilada en repetidas ocasiones, para disminuir la acidez y alcanzar un pH de 6.0 aproximadamente. El residuo de cada muestra se colocó en una cápsula de porcelana y se dejó secar en el horno a una temperatura de  $40^\circ \text{C}$ . Ya seco, se recogió de la cápsula, se pesó y guardó en una bolsita de plástico.

- **Evaluación de la densidad.-** Para obtener el porcentaje de residuo con relación al volumen inicial de la caliza, se determinó su densidad. Para esta propiedad se obtuvo primeramente la masa de cada muestra a partir de un fragmento pequeño. Para la obtención de volumen se utilizó el Principio de Arquímedes. Se pesó el fragmento en una balanza para obtener la masa (m). Se colocó la roca en un vaso graduado con agua hasta un nivel y se determinó el volumen desplazado (V). Teniendo los datos anteriores y se utilizó la siguiente fórmula:

$$\rho = m/V ; \text{ donde: } \quad \rho = \text{densidad que se desea obtener}$$

$m = \text{masa}$   
 $V = \text{volumen}$



- **Disolución de la caliza y porcentaje de residuo.**- Para esta prueba se utilizó el mismo fragmento utilizado para la densidad. Éste se colocó en un vaso de precipitados de 300 ml. En él se agregó HCl a 3N, hasta su completa disolución. El residuo obtenido se pasó a una cápsula de porcelana, se puso a secar al horno, y se pesó.

Nota: para no perder material en el proceso, no se trituro la caliza.

Posteriormente, utilizando una regla de tres se obtuvo el porcentaje de residuo por muestra:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{100\%}{x}$$

en donde:

$m_1$ : es la misma masa del fragmento que se utilizó para obtener la densidad.

$m_2$ : es la masa del residuo obtenido al disolver el fragmento de la muestra.

El propósito de este cálculo fue evaluar el porcentaje de material no calcáreo que se encuentra dentro de la roca, es decir qué porcentaje de residuo arcilloso, silicatado, se encuentra en ella.

- d) Composición química y mineralogía del material.**- La fase final de laboratorio consistió en analizar el residuo obtenido, describiendo macroscópicamente sus rasgos característicos y sus propiedades químicas y mineralógicas.

### Difracción de Rayos X

La Difracción de Rayos X es una técnica no destructiva consistente en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal o de polvo cristalino, de la sustancia sujeta a estudio.

Los rayos X son una forma de radiación electromagnética con longitudes de onda que varían entre los 100 Å y los 0.02 Å, sin embargo los que se emplean en la investigación de los cristales tienen longitudes de onda del orden de 1 Å. En el presente estudio se utilizó dicha técnica con el objetivo de explorar e identificar la naturaleza mineralógica del carbonato y del residuo procedente de la disolución del mismo. La difracción de rayos X es una herramienta indispensable para la caracterización de minerales del grupo de arcilla (<2μ).

El fenómeno de Difracción de rayos X se lleva a cabo si se cumplen las condiciones de Ley de Bragg:  $n\lambda = 2d \sin \theta$ , de donde  $n$  es un número entero,  $\lambda$  es una constante,  $d$  es la distancia interatómica y  $\theta$  es el ángulo de incidencia del haz difractado (Figura 11).

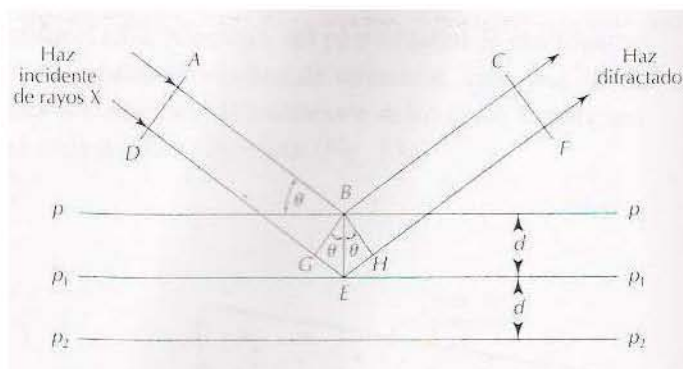


Fig.11.- Geometría de la “reflexión” de los rayos X (Cornelius y Hurlburt, 1978).

Los difractogramas fueron corridos en el Laboratorio de Rayos X del Instituto de Geología por la Dra. Teresa Pi Puig, en un difractómetro Philips Mod.1130/96 (generador) y PW 1050/25 (goniómetro), con registro digital de los datos, utilizando radiación  $\text{Cu K}\alpha$ .

### 1) *Análisis de la caliza*

Lo primero que se analizó fueron los carbonatos puros de las muestras C1-CM y C3-S1. Antes de ser corridas en el difractómetro, se trituro en un mortero de ágata alrededor de 2 g de cada una, se colocaron en un portamuestras de aluminio en fracción no orientada y se analizaron en el intervalo angular  $2\theta$  de  $4^\circ$  a  $70^\circ$  a una velocidad de  $2^\circ/\text{minuto}$ .

Se hizo un análisis semi-cuantitativo para conocer el porcentaje aproximado de los minerales existentes en las fases identificadas de ambas muestras de carbonatos. Este método consiste en ajustar el patrón teórico de difracción, calculado en base a la estructura, o producto de una combinación de los patrones de difracción estándar. Por otra parte se considera que las diferentes intensidades del patrón son causadas por factores físicos, estructurales e instrumentales que pueden ser cuantificados.

### 2) *Análisis del residuo*

El análisis del residuo se realizó en dos etapas para una identificación más clara y una clasificación más sencilla de probables fases minerales:

**Fracción no orientada.-** En principio se colocó aproximadamente 1g de residuo, producto de la disolución de cada uno de los carbonatos, en un portamuestras de aluminio, se analizaron en fracción no orientada en el intervalo angular  $2\theta$  de  $4^\circ$  a  $70^\circ$  a  $2^\circ/\text{minuto}$ ; sin embargo, dado que los resultados de los difractogramas no revelaron la información necesaria para afirmar con precisión la identificación de minerales, sólo se hicieron suposiciones, para confirmarlas fue necesario correr las mismas muestras a las siguientes condiciones: fracción orientada sin tratamiento, posteriormente fracción orientada glicolada, a  $400^\circ \text{C}$  y a  $550^\circ \text{C}$ .

**Fracción orientada.-** Para preparar fracciones orientadas, una pequeña cantidad de muestra se mezcla con agua mili-Q, disgregándose mediante un baño de ultrasonido. A continuación se preparan las fracciones orientadas (en un soporte de vidrio) de cada muestra utilizando un gotero.

Dado que los picos observados en los difractogramas de la fracción orientada pueden corresponder a diversos grupos, fue necesario tratar las muestras con etilenglicol (glicolada) y calentarlas a 400 y 550° C para determinar y caracterizar las posibles arcillas. Las muestras Cantera 3 Sitio 1 y Cantera 1 Caliza Masiva se prepararon en fracción orientada y se analizaron en el intervalo angular de 4° a 70° a 2°/minuto; en fracción orientada y glicolada en el intervalo angular de 4° a 20° a 2°/minuto y en fracción orientada y calentada (400 y 550°C) en el intervalo angular de 4° a 20° a 2°/minuto.

- **Etilenglicol (glicolación).**- Esta sustancia sirve para identificar la presencia de arcillas expandibles (esmectitas).
- **Aumento de temperatura a 400° C.**- Ayuda a discriminar entre clorita y algunas arcillas (vermiculita). La clorita no se modifica a esta temperatura y la vermiculita nos da interespaciados menores a los que presenta a temperatura ambiente
- **Aumento de temperatura a 550° C.**- Discrimina entre clorita y algunas arcillas como caolinita que se destruyen a esta temperatura.

## **Fluorescencia de Rayos X**

Esta técnica se utilizó para determinar la composición química total del residuo con el objetivo de complementar los resultados de la difracción de rayos X, ya que otra característica importante de dichos rayos es que cuando se sustituye la película fotográfica por uno de los materiales fluorescentes, como lo son el platinocianuro de bario o el sulfuro de zinc, pueden producir fluorescencia, observándose así la estructura interna. Este análisis se realizó en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Instituto de Geología por la Quím. Patricia Girón García. Desafortunadamente, este análisis sólo se pudo llevar a cabo en una muestra, porque del resto no hubo suficiente material.

### **1) Análisis de Elementos Mayores**

La muestra molida es secada en la estufa a 110°C durante 2 h. Se pesan 0.5g de muestra y se funden con 10 g de metaborato de litio y tetraborato de litio en relación 1:1, para obtener una perla, la cuál es analizada en un sistema secuencial de FRX Siemens SRS 3000, previamente calibrado con estándares internacionales. La pérdida por calcinación ( P X C) se determina pesando 1g de muestra y calcinando a 950°C por 1 hora.



## 2) *Análisis de Elementos Traza*

La muestra molida es secada en la estufa a 110°C. Pesar 5 g de muestra en base seca más 0.5 g de cera en micropolvo, usada como agente aglutinante, mezclar en mortero de ágata y prensar a 15 ton/in<sup>2</sup>, obteniendo una tableta que es analizada en un sistema secuencial de FRX Siemens SRS 3000.

- e) **Volumen de la roca disuelto y su relación con el suelo.**- De una foto sacada en campo, se determinó la relación roca – suelo por medio de la elaboración de un ejercicio matemático idealizado, práctico y sencillo donde se obtiene la cantidad necesaria aproximada requerida de residuo, producto de la disolución de la caliza, para poder “rellenar” una bolsa kárstica de la Cantera 1.

1.- Se midió la pica de geólogo que será el valor patrón y la referencia para obtener de manera aproximada la cantidad de masa requerida para el relleno de la bolsa kárstica (Figura 12).



Fig. 12.- Foto de la medición de longitud de la pica, que servirá como valor patrón.

2.- Se obtiene una relación entre el valor real de la pica y el valor medido en la foto por medio de una regla de tres.

3.- Se delimita la bolsa kárstica con figuras geométricas regulares procurando abarcar la mayor área posible con el objetivo de que el valor obtenido sea más preciso (Figura 13).



Fig. 13.- Delimitación de área de la cantera 1 con figuras geométricas regulares (triángulos).

4.- Se midieron los vértices de las figuras y con una regla de tres, utilizando la relación del segundo punto, se obtiene un valor aproximado de cada uno de los vértices a partir del valor medido en la foto, se obtiene el área de cada triángulo y para obtener el volumen se hace la suposición de que el espesor de la bolsa es de 1m.

5.- Se suman los volúmenes de todas las figuras geométricas y se obtiene el valor total.

6.- Se utilizó la fórmula de densidad ( $\rho = m/V$ ) y se despejó la masa (m) para obtener la cantidad total aproximada de masa requerida. De la fórmula anterior la

densidad ( $\rho$ ) que se utiliza es la de la Cantera 1-Caliza Masiva y el volumen (V) es el valor obtenido del punto anterior.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Propiedades físicas

#### a) *De la muestra de la roca*

##### ■ Cantera 3-Sitio 1:

La caliza obtenida en este lugar es de color blanco, de estratificación gruesa, poco consolidada, muy deleznable, con un hábito terroso, por lo que su proceso de disolución fue rápido.

La densidad calculada para esta roca es de  $2.986 \text{ g/cm}^3$ , ya que se consideró un fragmento de masa ( $m$ ) = 14.930 g, el cual desplazó un volumen de 0.005 litros.

##### ■ Cantera 1-Caliza Masiva:

Esta caliza también es de color blanco, pero con mayor consolidación, bien compactada, de aspecto masivo. En el campo presenta estratos de aproximadamente 15 cm de espesor. Su porosidad es baja, por lo que el proceso de disolución fue más lento.

Su densidad es menor que la roca anterior, de  $1.909 \text{ g/cm}^3$ , ya que se tomó un fragmento de 38.179 g que desplazó un volumen de 0.02 litros

De la caliza de duna, en esta misma cantera (C1-CD) no se tuvo más muestra, por lo que no se evaluó la densidad.

#### b) *Del residuo*

La cantidad de residuo obtenido en cada muestra es el siguiente:

C1-CM,	$m = 0.206 \text{ g.}$
C3-S1,	$m = 0.053 \text{ g.}$

El residuo en los 2 casos fue similar, con un color pardo; el tamaño de la partícula era muy fino (al tacto), principalmente constituido por arcilla y menores cantidades de limo.

Bajo el microscopio óptico, también se apreció una mayor proporción de arcilla.

### 5.2 Proporción de residuo

Con los datos de C1-CM y C3-S1, se obtuvo la proporción de material arcilloso, silicatado, presente en las calizas, aplicando una regla de 3, de tal manera que en el caso C3-S1 fue de 0.355% y en el de la caliza masiva de 0.54%. La diferencia entre ambos es pequeña y como se observa, este material constituye una proporción baja del total de la roca.

### 5.3 Relación del volumen disuelto

De acuerdo a la sumatoria de volúmenes de las figuras geométricas regulares se obtuvo un valor total de 0.293 m<sup>3</sup> y en relación a los valores, anteriormente obtenidos, de masa y densidad para la cantera 1, se requieren aproximadamente 558.960 kg de residuo silicatado para “rellenar” por completo la bolsa kárstica de la cantera 1.

### 5.4 Difracción de Rayos X

Los resultados de este análisis muestran que las fases identificadas en las rocas de C1-CM y C3-S1, son calcita y aragonita (Tabla 1). En ambos casos se trata de carbonatos muy puros que son claramente distinguibles en los difractogramas (Figura 14).

CLAVE MUESTRA	FASES IDENTIFICADAS	OBSERVACIONES
Cantera 1 Caliza Masiva	<b>Calcita</b> CaCO <sub>3</sub> (60%-70%) <b>Aragonita</b> CaCO <sub>3</sub> (30%-40%)	Carbonato muy puro
Cantera 3 Sitio 1	<b>Calcita</b> CaCO <sub>3</sub> (60%-70%) <b>Aragonita</b> CaCO <sub>3</sub> (30%-40%)	Carbonato muy puro y muy similar a la muestra Cantera 1 Caliza Masiva

Tabla 1.- Fases identificadas por difracción de rayos X en las rocas.

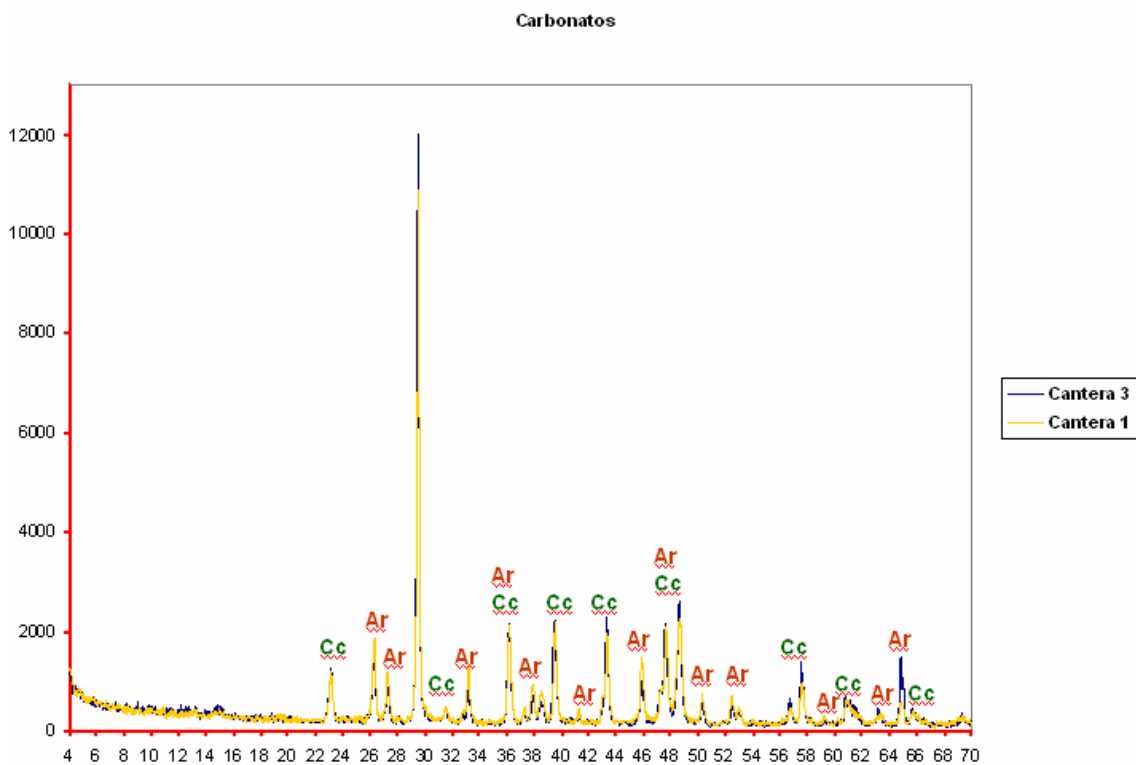


Figura 14.- Difractogramas de las muestras Cantera 1-Caliza Masiva y Cantera 3-Sitio 1.

Con respecto al residuo, los resultados no son tan claros, ya que se tienen minerales no bien cristalizados, que no dan picos contundentes en los difractogramas (Figura 16). Sin embargo, la interpretación de las diferentes pruebas (Tabla 2 y Figura 15), muestra que el mineral dominante es la vermiculita de acuerdo al diagnóstico que aparece en la Figura 17.

Muestra	Picos	Glicolación	400°C	550°C	Fases Identificadas
Cantera 1 Caliza Masiva	≈ 14.7Å  ≈ 7.2 Å	≈ 14.7Å Ligero incremento??  ≈ 7.2 Å	≈ 12Å??  Desaparece??	≈ 10.5 Å??  -----	Vermiculita
Cantera 3 Sitio 1	≈ 14.7 Å	Desaparece??	??  ??	??  ??	Vermiculita

Tabla 2.- Resultado de la difracción de rayos X del residuo insoluble.

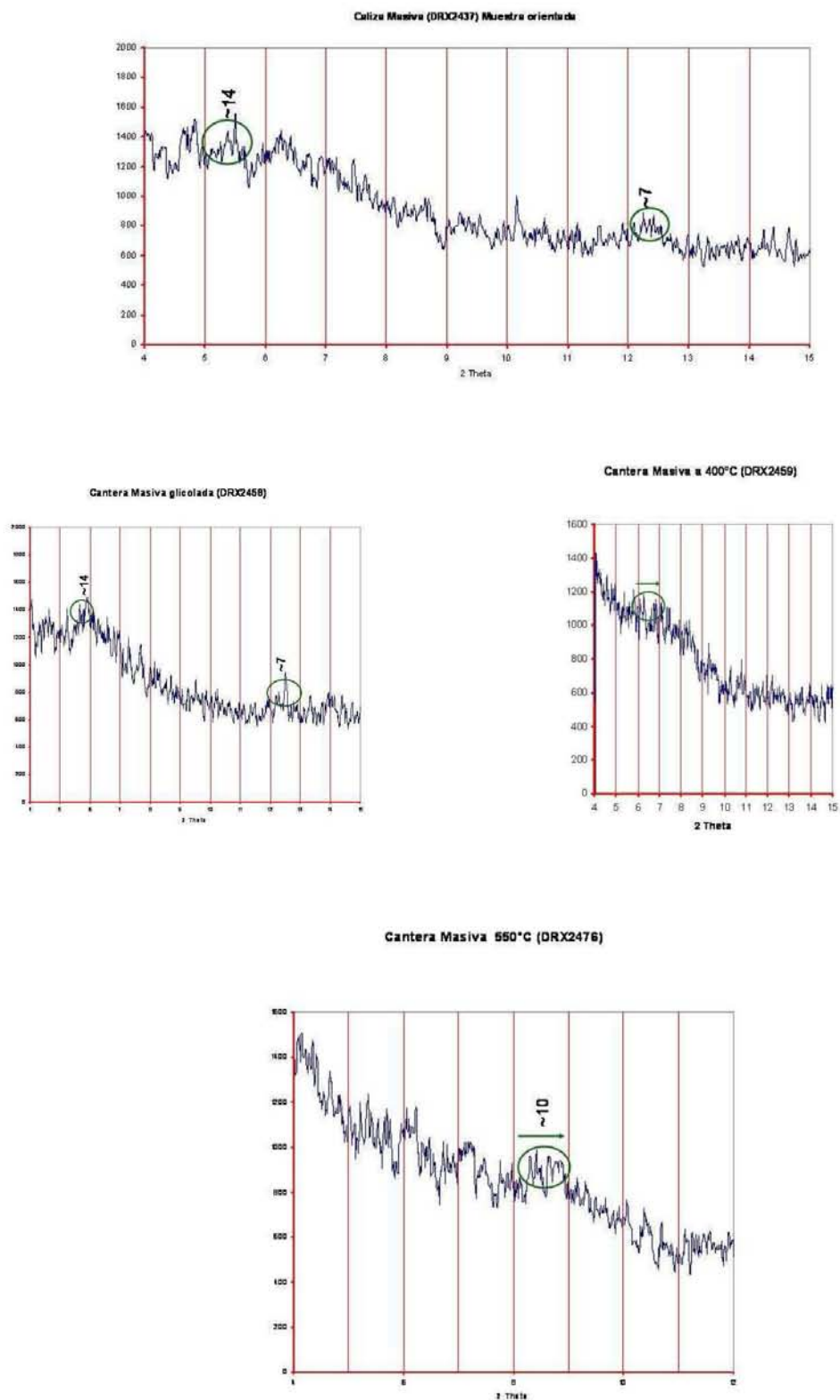
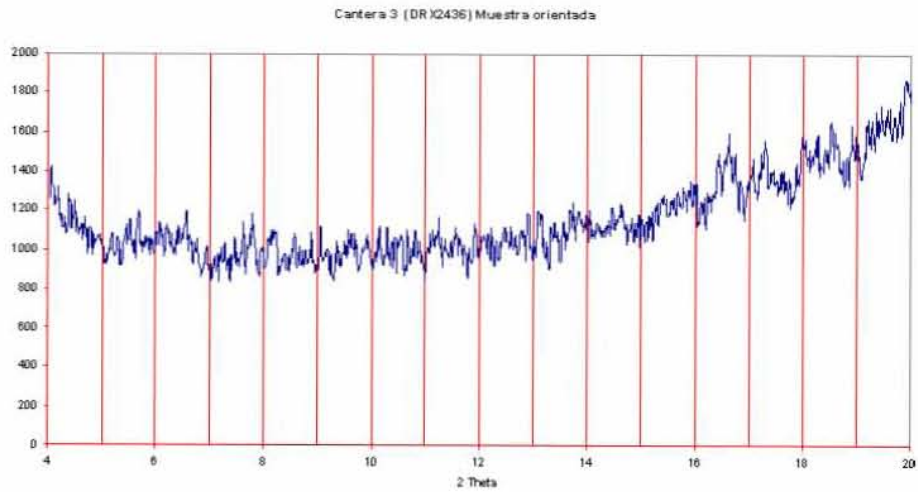
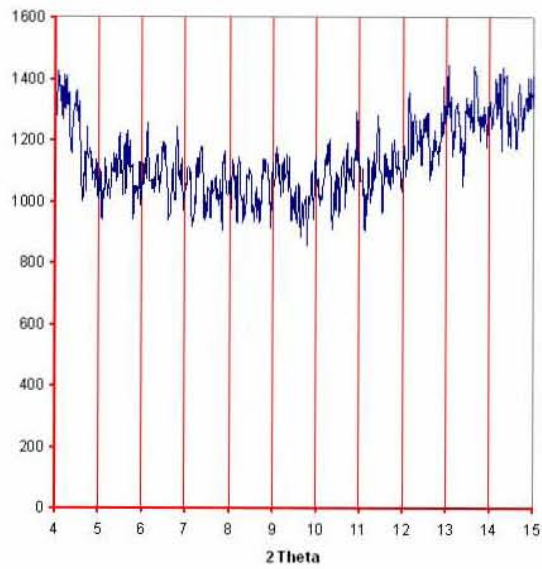


Fig. 15.- Difractogramas de la Cantera Masiva.





Cantera 3 Sitio 1 glicolada (DRX2448)



Cantera 3 sitio 1 400°C (DRX2457)

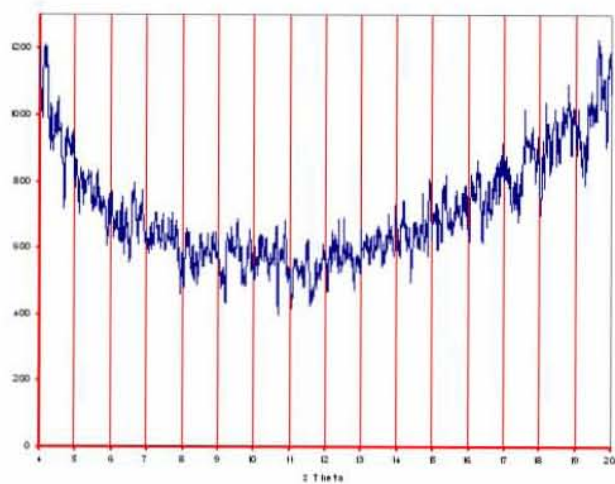


Fig. 16.- Difractogramas de la muestra Cantera 3.



Mineral	Air-dried	Ethylene glycol	300-350°C	500-600°C	Reflection disappears at	Remarks	Reference
Imogolite	20-12 Å (B)	20-12 Å (B)	19	Disappears	300-450°C	20-12 Å band replaced by sharp intense 19 Å reflection at 100-200°C; reversible in moist air	
Kaolinite	7	7	7	Disappears	500-550°C	Occasionally weak broad band at 12-14 Å at 500-550°C	(1)
Dickite	7	7	7	Disappears	550-650°C	Usually broad reflection c. 14 Å at 550-700°C	
Nacrite	7	7	7	Disappears	550-650°C		
Kaolinite, disordered	7	7	7	Disappears	500-550°C		
Halloysite 7 Å	7	7	7	Disappears	450-520°C		
Halloysite 10 Å	11	10	7	Disappears	450-520°C	Dehydrates, usually irreversibly to 7 Å form at 50-100°C	(2, 3)
Serpentine	7	7	7	Disappears	575-700°C	Broad reflection 11-14 Å region at 550-650°C; forms olivine and enstatite at 650-700°C	(3, 4)
Nepouite	7 (B)	7 (B)	7 (B)	Disappears	550-600°C	Broad reflection 11-14 Å at 550-650°C; amorphous 550-800°C; NiO-like phase 800-1000°C	(3, 4)
Berthierite (ferrous)	7	7	7	Disappears	450-500°C	Oxidized to ferric form 350-450°C	(5)
Berthierite (ferric)	7	7	7	Disappears	450-500°C	Forms hematite + spinel 650-1000°C	(5)
Cronstedtite	7	7	7	7		Spinel-like phase with 7 Å reflection persists to >700°C	(6)
Amesite	7	7	7	Disappears	550-600°C		(7)
Mica	10	10	10	10	800-1000°C+		
Kerolite-pimalite	10 (B)	10 (B)	10 (B)	10 (B)	700-800°C	Transformed to enstatite 700-800°C	(4)
Smeectite, Mg, Ca	15	17	10	10	700-1000°C	Trioctahedral varieties more stable in 700-1000°C range	
Saponite, Na	12-5	17	10	10	700-1000°C		
Vermiculite, Mg, Ca	14-5	14-5	10	10	700-1000°C		
Vermiculite, Na	12-5	14-5	10	10	800°C	14 Å intensity increased at 500-600°C; forms olivine at about 800°C	(8)
Chlorite (magnesian)	14	14	14	14	600°C	14 Å intensity much increased 500-600°C; forms olivine at 600-700°C	
Chlorite (iron-rich)	14	14	14	14			
Swelling chlorite	14	16-17	14	14			
Palygorskite	10-5	10-5	10-5 + 9-2	9-2	700°C	Marked increase in 10-5 Å intensity at 150°C	(9)
Sepiolite	12-2	12-2	12-2 + 10-4	10-4	700°C		

Fig. 17.- Diagnóstico para la identificación de mineralogía para la Difracción de Rayos X, (Brindley y Brown (1980)).

Con la muestra orientada y glicolada se observa en los difractogramas de la figura 15 dos picos característicos aproximadamente en 14 Å y en 7 Å, sin embargo este último desaparece a 400°C, por lo tanto de acuerdo a la figura 17 los únicos minerales arcillosos que tienen el pico característico en 14 Å son la vermiculita y la clorita. Con la muestra orientada, glicolada y calentada a 550°C el pico se desplaza a aproximadamente 10 Å, dicha situación es característica de la vermiculita, la clorita queda descartada ya que para este mineral el pico se mantiene en 14 Å a esta temperatura (Figura 17). Para comprobar la interpretación anterior se realiza la misma metodología para los difractogramas obtenidos a partir del suelo (Figura 18).

Con el fin de comparar los resultados de el residuo, con el suelo, que sobreyace a la caliza (Figura 18) también se hizo la difracción en este material. Los resultados se muestran en la tabla 3.

MUESTRA	MUESTRA ORIENTADA	GLICOLACIÓN	400° C	550° C	FASES IDENTIFICADAS
<b>Cantera 1 Caliza Masiva</b>	14Å 7.2 Å	14Å ↓ 7.2Å	~11Å 7.2Å		Vermiculita dioctaédrica
<b>Cantera 3 Sitio 1</b>	14 Å 7.2Å	14Å 7.2Å	~12Å 7.2Å	12Å	Vermiculita dioctaédrica

Tabla 3.- Resultado de la difracción de rayos X del suelo (bolsas kársticas).

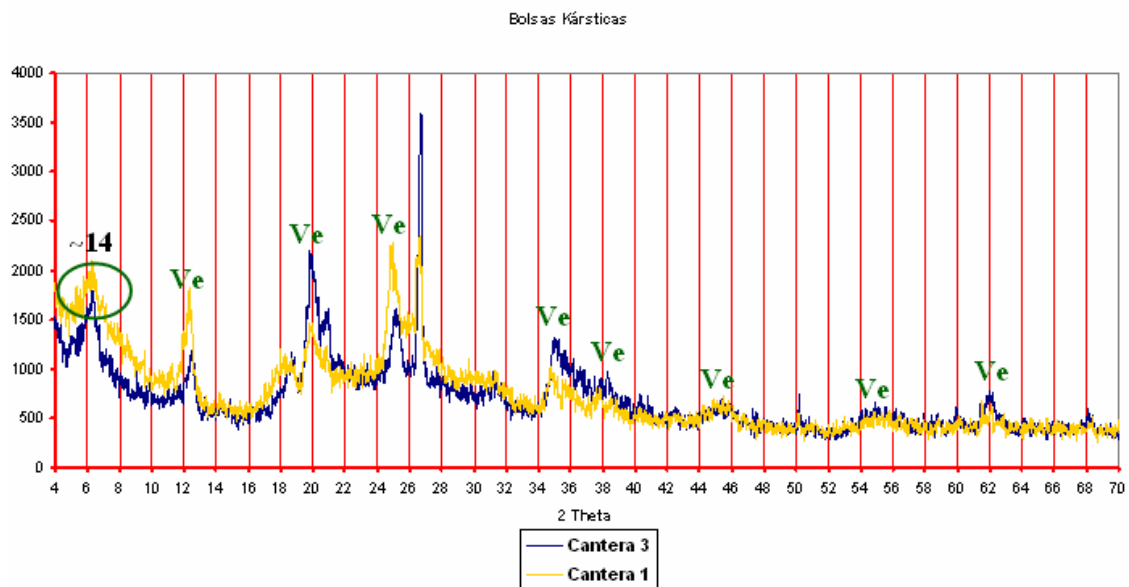


Fig. 18.- Difractogramas de las muestras de suelo de la Cantera 1 y la Cantera 3.

### 5.5 Fluorescencia de Rayos X

Como se ha mencionado, sólo fue posible hacer este análisis en la muestra C1-CM y la composición química total del residuo así como del suelo asociado se encuentran en la tabla 4.

Residuo	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P X C	Suma
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
<b>CM</b>	40.814	0.738	15.235	5.590	0.024	1.948	0.623	0.564	0.827	0.281	29.47	96.110
<b>Suelo</b>												
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
<b>C1</b>	30.075	0.805	20.133	6.083	0.153	1.283	3.385	0.015	1.220	0.662	32.52	96.364
<b>C1</b>	26.908	0.724	18.551	5.458	0.127	1.337	5.538	0.018	1.099	0.647	35.01	95.417
<b>C1</b>	32.424	0.855	21.332	6.322	0.134	1.332	2.927	0.007	1.316	0.599	29.55	96.798

<b>Residuo</b>	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
<b>CM</b>	64	87	582	17	173	13	88	182	<3	28	62	49	13	18
<b>Suelo</b>														
	Ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
<b>C1</b>	98	403	412	62	211	15	113	236	8	30	25	59	16	26
<b>C1</b>	81	453	339	47	187	9	93	209	6	27	23	54	14	23
<b>C1</b>	92	273	399	58	178	10	116	244	9	30	25	63	16	23

Tabla 4.- Resultados de fluorescencia de rayos X del residuo insoluble y del suelo de la cantera 1.

## 6. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

### 6.1 Volumen de roca disuelto

De acuerdo con los resultados de densidad, proporción de residuo y las fotos de campo, se determinó que en el caso de la cantera 1, la cantidad de roca que se disolvió y que fue “rellenado” con suelo fue de 558.960 kg.

El suelo es producto de la conjunción de 5 factores formadores: clima, organismos, relieve, tiempo y material parental de acuerdo a Dokuchaev (1967). Bajo este paradigma, la interrogante si la caliza de Yucatán puede producir suficiente material para conformar los suelos de la región queda resuelto con los resultados que se han generado en este trabajo.

Dado que el residuo silicatado representa el 0.54%, se podría interpretar que el porcentaje es insignificante para la formación de suelo, sin embargo, tomando en cuenta la gran extensión de roca caliza y la actividad kárstica en la zona de estudio, es altamente probable que el residuo insoluble forme suelo y por ende rellene las bolsa kársticas. A pesar de que la mayor cantidad de residuo es aportada de manera autóctona existe evidencia de material que procede de fuentes externas (alóctono). De hecho Cabadas y Landa (2007) (Figura 19) encontraron cristales de anfíboles en muestras de suelos de la zona de estudio.

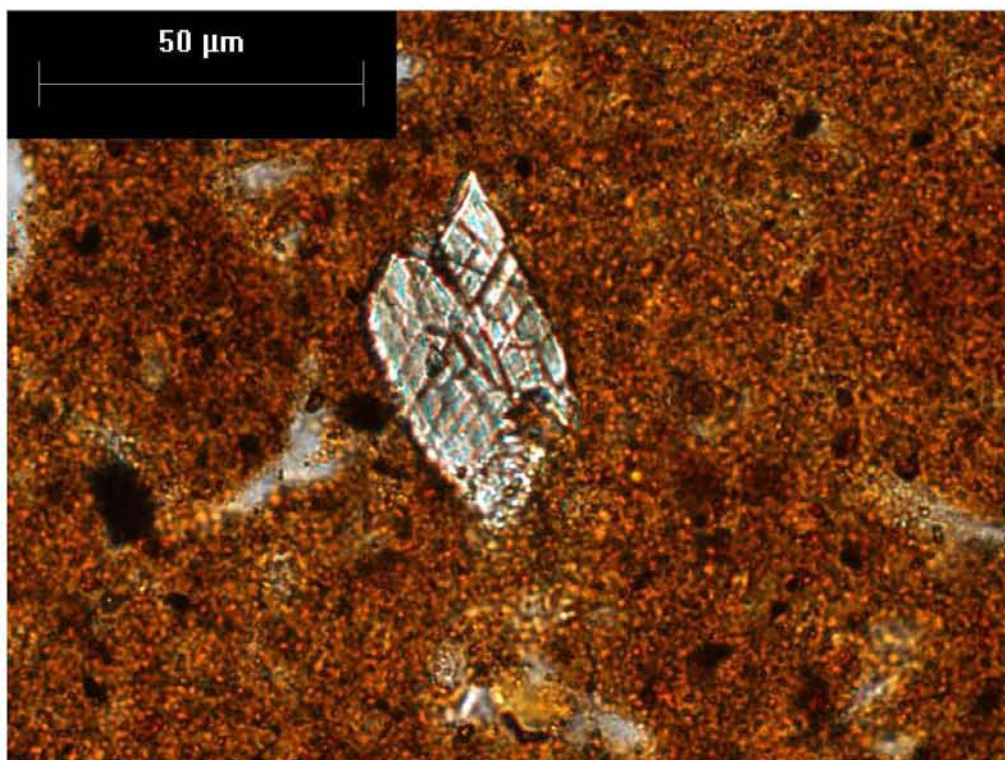


Fig. 19.- Cristal de anfíbol encontrado en muestra de suelo de la Cantera 3.

## 6.2 Composición química y mineralógica

Los resultados de la composición mineralógica muestran que el residuo está compuesto en su mayoría por vermiculita, minerales amorfos y cuarzo, y no hay minerales ferromagnesianos.

Los difractogramas obtenidos de las muestras no arrojan picos muy claros, sin embargo el que se obtuvo de la muestra de la Cantera 1-Caliza Masiva fue el que se utilizó para determinar la mineralogía debido a que éste fue el más claro de los tres. El difractograma de esta muestra indicó que el material presente en su mayoría es vermiculita (material arcilloso) y en menor proporción minerales amorfos.

Existe una relación mineralógica entre las muestras del residuo silicatado y las bolsas kársticas; se observa que en los difractogramas del suelo, los minerales están bien formados por lo tanto fue sencillo identificarlos, en contraste las muestras del residuo arrojaron resultados poco evidentes, a pesar de todas las fases del análisis por difracción de rayos X, por lo que fue muy complicado determinar su mineralogía.

Los análisis de fluorescencia muestran que el residuo posee altos valores de sílice (40.8%) y alúmina (15.23%), mientras que en el suelo en todos los horizontes la sílice es menor y la alúmina mayor. Sin embargo, en el trabajo de Aguilera (1959), las Rendzinas negras que hay en la región presentan valores más altos de sílice (40-47%) y similares de  $Al_2O_3$  (14.5%). Fragmentos de caliza analizados de la misma zona poseen valores muy bajos de ambos compuestos (3.2% y 1.2%, respectivamente).

Los valores de  $TiO_2$ , que se considera más estable que los anteriores dado su alto potencial iónico, son menores en el residuo que en el suelo, pero esto se debe a la acumulación relativa durante largos periodos.

El análisis de los elementos traza señala que los elementos como Rb, Nb, Ni, Zn y Th arrojan valores similares, sin embargo es importante mencionar que los valores de elementos traza estables como Nb, Th y Zr del residuo y el suelo tienen una ligera discrepancia, esto demuestra la naturaleza autóctona del residuo insoluble. El Sr es bastante diferente ya que en el residuo se encontraron 87 ppm y en el suelo varió de 273 a 253 ppm. El Cr presenta resultados semejantes.

La suma de las bases  $MgO+CaO+Na_2O+K_2O$  muestra porcentajes mucho menores en el residuo (~4%) que en el suelo, evidenciando su carácter alóctono en este último.

## 6.3 La caliza como material parental del suelo

De acuerdo a los resultados encontrados, parece poco probable que sólo el proceso de disolución de la caliza sea capaz de producir suficiente material de suelo, sin embargo, junto con la erosión local, representan los procesos más significativos y en menor proporción se tiene un aporte de fuentes externas. Esta observación se basa en los siguientes aspectos:

- La proporción de residuo (0.2-0.5%) producto de la disolución acelerada de la roca. Dado que esta disolución se produce por el fuerte intemperismo químico del ambiente tropical de Yucatán (Isphording, 1974), prácticamente todo el bicarbonato de calcio se lixivia, quedando in situ este residuo.
- El residuo posee una composición química similar a la del suelo sobre todo si se consideran los elementos traza estables. Los elementos mayores van sufriendo procesos de “pérdidas y ganancias” relativas en el transcurso de la pedogénesis.
- La mineralogía de la fracción arcilla es diferente, ya que en el residuo los minerales arcillosos tienen baja cristalinidad, que impide su diagnóstico correcto. En los suelos, aunque también se identificó vermiculita, ésta está mejor caracterizada, además que se presentan otras fases mineralógicas.

La fuente probable del material que conforman los suelos del área estudiada no es clara. Se puede proponer aportes eólicos, dada la presencia de ferromagnesianos cuya naturaleza, probablemente volcánica, lleva a pensar en localidades como El Chichón, Chis. o los Tuxtlas, Ver.

También es probable que en el relieve kárstico, donde los procesos de erosión y redistribución de materiales es fuerte, se acumule suficiente sedimento. De hecho, la presencia de suelo “rellenando” cavidades o “bolsas”, evidencia la acumulación de dichos materiales, que una vez estabilizados forman suelo.

De esta manera, el suelo proviene de la disolución de la caliza, con probables acumulaciones a través de las depresiones kársticas a lo largo de miles de años (Pleistoceno Superior) y de aportes de fuentes externas transportadas por el viento.

## CONCLUSIONES

Al obtener el porcentaje de residuo de cada muestra se obtuvieron valores muy bajos, menores al 1% del volumen total de la roca, a pesar de que la cantidad de masa de las muestras que se disolvieron fueron significativas.

Al hacer la caracterización química y mineralógica del residuo por medio de la difracción y fluorescencia de rayos X, se concluye que el material obtenido de la disolución de la caliza es una arcilla del tipo de la vermiculita, evidenciada por los contenidos altos de alúmina y sílice.

En los difractogramas no se tienen picos muy claros de la vermiculita, esto significa que este tipo de arcilla está muy alterada por procesos de intemperismo, por lo que su estructura mineralógica no se encuentra bien definida.

La vermiculita denota una litogénesis por lo tanto es un material procedente de fuentes de tipo continental detrítico, que fue transportado por procesos eólicos o por erosión local y después de recorrer cierta distancia, cuando el agente de transporte pierde energía, es depositado.

La cantidad de residuo presente en la roca caliza es mínima, sin embargo como la Península de Yucatán es una plataforma calcárea con gran actividad kárstica, queda demostrado que el material, producto de la disolución de la caliza, aunado a una erosión local, se pueden formar suelos en la región y por lo tanto rellenar las bolsas kársticas. Inclusive, al comparar la composición química y mineralógica del residuo y del suelo, se obtuvieron, en la mayoría de los casos, valores semejantes. Se concluye que el aporte más significativo de material en la formación de suelos se da in situ y en menor proporción por materiales provenientes de fuentes ajenas a la disolución, probablemente transportado por agentes eólicos, por lo tanto el residuo, producto de la disolución, tiene ambas génesis, es decir, alóctona y autóctona.

El cristal de anfíbol (figura 19) se considera, hipotéticamente, que es producto de las erupciones del volcán Chichón, en dichos eventos parte del material fue transportado por el viento y posteriormente depositado en la zona de estudio. Este mineral ígneo está asociado a actividad volcánica y en la lámina delgada se observa que está poco intemperizado, su crucero se encuentra bien definido, su tamaño es equivalente al de los limos y el cristal es muy angular y con escasos signos de intemperismo, lo que demuestra que podría ser producto de alguna erupción reciente del volcán.

## **RECOMENDACIONES**

Se propone ir al campo y tomar mayor número de muestras de la cantera 1 y cantera 3 con el objetivo de analizar por los métodos de difracción y fluorescencia de rayos X, el residuo producto de la disolución de la caliza, ya que el obtenido para esta investigación fue insuficiente.

También es importante realizar la misma metodología y análisis a otras canteras existentes en la zona de estudio con el objetivo de comparar, complementar y justificar los resultados obtenidos de las dos canteras estudiadas en esta investigación.

Analizar en microscopio óptico, difracción y fluorescencia de rayos X el suelo existente en otras bolsas kársticas que no pertenezcan a las canteras estudiadas en esta investigación y compararlas con los resultados obtenidos.

Comprobar de donde proviene el material parental de los suelos en la zona de estudio.

Se observó en el microscopio óptico muestras de suelo en donde se encontraron neoformaciones de carbonatos secundarios, se propone estudiar más a fondo estos carbonatos para conocer su génesis.



## REFERENCIAS

- Aguilera Herrera, N., 1963. Los recursos naturales del Sureste y su aprovechamiento: Suelos. Chapingo. Revista de la Escuela Nacional de Agricultura época II, 3 (11-12): 1-54.
- Aguilera N. (1959) Clays from some soils and calcareous sediments from the Yucatan Peninsula. In: Comité Internacional para el estudio de las arcillas, Cong. Geol. Internat, XX session, págs. 61-69.
- Ahmada, N., Jones, R.L., 1969. Genesis, chemical properties and mineralogy of limestone derived soils, Barbados, West Indies. Tropical Agriculture, 46, págs.1-15.
- Álvarez Jr., M., 1969, Exploración Geológica preliminar del Río Hondo, Quintana Roo. Bol. Asoc. Méx. de Geol. Petr. Vol. 6, págs. 207-213.
- Balagh, T.M., and Runge, E.C.A., 1970. Clay rich horizons over limestone, illuvial or residual. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 34, págs. 534-536.
- Bautista, F., E. Batllori – Sampedro, G. Palacio, M. Ortiz – Pérez y M. Castillo González (2005), “Integración del conocimiento actual sobre los paisajes geomorfológicos de la Península de Yucatán”, págs. 33-58.
- Beddows, P.A., 2004. Groundwater hydrology of a coastal conduit carbonate aquifer: Caribbean Coast of the Yucatan Peninsula, México. PhD Dissertation, University of Bristol, Bristol, Canada.
- Butterlin, J., y Bonet., F (1960), “Stratigraphy of the northern part of the Yucatán Peninsula”, New Orleans Geological Society. New Orleans, U.S.A.
- Bonis, S. Bohnenberger, H. y Dengo, 1970, Mapa Geológico de la Rep. de Guatemala, 1a. Edición, Instituto Geográfico Nacional.
- Borg, L.E., Banner, J.L., 1996. Neodymium and strontium isotopic constraints on soil sources in Barbados, West Indies. Geochimica et Cosmochimica Acta 60(21), págs. 4193-4206.
- Brindley and Brown G., 1980. Crystal Structures of Clay Minerals and their X Ray Identification, Mineralogical Society Monograph No. 5, págs. 326-327.
- Bronger, A., Ensling, J., Gutlich, P., and Spiering, H., 1983. Rubification of terrae rossae in Slovakia: a Mosbauer effect study. Clays Clay Miner., 31, págs. 269-276.
- Bruce, J.G., 1983. Patterns and classification by Soil Taxonomy of the soils of the Southern Cook Islands. Geoderma 31(4): 301-323.

- Brückner, H., Schnütgen, A., 1995. Soils on coral reef tracts –the example of Huon Peninsula, New Guinea. *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.99*, Berlin, Stuttgart, págs. 1-15.
- C.N.A. (1996), “Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento”, pág.107, Impresos Cuadrados de México, S. de R. L., de C.V., México D.F.
- C.N.A., (1994), “Manual para evaluar Recursos Hidráulicos Subterráneos”, Hidrolegro, S. C. (Editor), México D.F.
- Cabadas, H., y Landa, J., 2007. La memoria del suelo en la edafogénesis kárstica de la región noreste de la Península de Yucatán. XVII Bienal de la Real Sociedad Española de Historia Natural, Puerto Morelos, Q.R.
- Cornelius S., Hurlburt Jr., 1978. *Manual de Mineralogía de Dana*. 2a. edición, Ed. Reverte, Barcelona, págs. 110-118.
- Cuevas, L. G. 1976, Estudio Geológico del área Pucté, Quintana Roo. Tesis Profesional E.S.I.A.-I.P.N.
- Dokuchaev V. V., 1967. Selected works of V. V. Dokuchaev. Israel Program for Scientific Translations Ltd. Translated by N. Kaner, S. Monson, Jerusalem, pág. 419.
- Durn, G., Ottner, F., and Slovenec, D., 1999. Mineralogical and geochemical indicators of the polygenetic nature of terra rossa in Istria, Croatia. *Geoderma*, 91, págs. 125-150.
- FAO, ISRIC, ITC, Catholic University of Leuven and Wageningen Universiteit, 2001. *Lecture Notes on the Major Soils of the World: World Soil Resources Reports 94*. FAO. Roma.
- Finch, W.A.Jr. 1965. The karst landscapes of Yucatan. National Academy of Sciences-National Research Council Washington D.C. Foreign Field Research Program. Final Report, pág. 168.
- Flores, G., 1952, Geology of Northern British Honduras AAPG. Bull. V. 36, No. 2, págs. 404-408.
- Hernández, X. E., Bello, B. E., Levy, T. S., 1985. La roza – tumba – quema en Yucatán. In: *La milpa en Yucatán: un sistema de producción agrícola de tradición*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, págs. 35-86.
- Isphording, W.C. 1974. Weathering of Yucatan limestones: the genesis of Terra Rosas. Field Trip 2, 1974 Annual Meeting, Miami. New Orleans Geological Society, págs. 78-93.
- Kispatic, M., 1912. Bauxites des Kroatischen Karstes und ihre Entstehung. *N. Jb. Min. Geol. Pal.*, 34, págs. 513-552 .

- Kubiena, W.L., 1953. The Soils of Europe. Thomas Murby and Co., London, pág. 317.
- Lippi-Boncampi, C., Mackenzie, R.C., and Mitcheel, W.A., 1955. The mineralogy of some soils from Central Italy. Clay Mineral Bulletin, 2, págs. 281-288.
- Logan B.W., Harding J.L., Ahr W.M., Williams J.D., and Snead R.G., 1969. Late Quaternary Carbonate Sediments of Yucatan Shelf, Mexico, The American Association of Petroleum Geologist, págs 9-22.
- López Ramos E., 1979. Geología de México Tomo III, 2a. edición. Formación de la península de Yucatán, págs. 263-294.
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J.F., Espinasa-Pereña, R., 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 10(2), págs. 143-150.
- Miranda, F., 1964. Vegetación de la península de Yucatán. Rasgos fisiográficos. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México. Serie sobretiros No. 2.
- Moresi, M., and Mongelli, G., 1988. The relation between the terra rossa and the carbonate-free residue of the underlying limestones and dolostones in Apulia, Italy. Clay Minerals, 23, págs. 439-446.
- Muhs, D.R., Bush, C.A., Stewart, K.C., Rowland, T.R., Crittenden, R.C., 1990. Geochemical evidence of Saharan dust parent material for soils developed on Quaternary limestones of Caribbean and western Atlantic islands. Quaternary Research 33(2), págs. 157-177.
- Ortega Sastriques, F., 1984. El humus de los suelos de Cuba II. Suelos automórficos sobre calizas duras. Ciencias de la Agricultura, 21, Academia de Ciencias de Cuba, pp. 91-103.
- Perry, E.C., Swift, J., Gamboa, J., Reeve, A., Sanborn, R., Marín, L. and Villasuso, M., 1989. Geologic and environmental aspects of surface cementation, north coast, Yucatán, Mexico. Geology, 17, págs. 818-821.
- Perry, E.C., Velázquez – Oliman, G. and Marín, L.E., 2002. The hydrochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula, México. International Geology Review 44, págs. 191-221.
- Rebolledo, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L.E., Trejo-García, A., Sharpton, V.L., and Soler-Arechalde, A.M., 2000. U.N.A.M. scientific shallow-drilling program of the Chicxulub Impact Crater. International Geology Review 42: 928-940.

- Saaper, K. 1937, Sobre la Geografía Física y la Geología de la Península de Yucatán. Instituto de Geología de México, Bol. No. 3, Méx., D.F.
- Scholten, J.J., Andriessse, W., 1986. Morphology, genesis and classification of three soils over limestone, Jamaica. *Geoderma* 39(1):1-40.
- Shoji, S., Nanzyo, M., Dahlgren, R., 1993. Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21. Elsevier Amsterdam-London-New York-Tokyo, pág. 288.
- Sinkovec, B., 1974. Porijeklo terra rossae Istre. *Geoloski vjesnik*, 27, págs. 227-237.
- Skoric, a., 1987. Pedosfera Istre.-Project Council of Pedological Map of Croatia, Special ed., 2, Zagreb, pág. 192.
- Southworth, C.S., 1985. Application of remote-sensing data, Eastern Yucatan In W.C. Ward, A.E. Weidie & W. Back (Eds.), *Geology and Hydrogeology of the Yucatan and Quaternary Geology of Northeastern Yucatan Peninsula*. (pags. 12-19). New Orleans: New Orleans Geological Society Publications.
- Velázquez G., Malpica V., Solleiro E., Sedov S., 2007. “Guía de la excursión: Geología, Edafología y Vegetación de la Península de Yucatán”. Centro para el estudio del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán e Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, págs. 3 y 12.
- Wada, L., 1980. Mineralogical characteristics of Andisols In: Theng B. K. G. (Ed.) *Soils with variable charge*. New Zealand Society of Soil Science, págs. 87-107.
- Yaalon, D.H., 1997. Soils in the Mediterranean region: what makes them different?. *Catena*, 28, págs. 157-169.
- Yaalon, D.H., and Ganor, E., 1973. The influence of dust soils during the Quaternary. *Soil Science*, 116, págs. 233-251.

## REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- [http://elyerbamico.galeon.com/manuales/cap\\_2\\_.htm](http://elyerbamico.galeon.com/manuales/cap_2_.htm)
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Karst>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Rayos\\_X#Definici.C3.B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Rayos_X#Definici.C3.B3n)
- [http://www.conagua.gob.mx/eCNA/Espaniol/Programas/Subdirecciones/Html-GAS/disp\\_gas/pdf\\_docs/Cerros%20y%20Valles.pdf](http://www.conagua.gob.mx/eCNA/Espaniol/Programas/Subdirecciones/Html-GAS/disp_gas/pdf_docs/Cerros%20y%20Valles.pdf)

- [http://www.noticaribe.com.mx/NOTICARIBE\\_HOME/monograf%EDavegetacion.htm](http://www.noticaribe.com.mx/NOTICARIBE_HOME/monograf%EDavegetacion.htm)