

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

**OBTENCIÓN DEL CONTENIDO INSOLUBLE, CARACTERIZACIÓN
DE ARCILLAS EN CALIZAS–MARGAS DE LA FORMACIÓN
TAMABRA Y SU INFLUENCIA EN LA DEFORMACIÓN
SINSEDIMENTARIA.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN GEOLOGÍA APLICADA

PRESENTA:

ING. KARLA JAZMÍN HERRERA RICO.

ASESOR:

DR. RUBÉN ALFONSO LÓPEZ DONCEL.

ALUMNA BECADA POR

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CLAVE 760640

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P. ENERO DE 2018

Agradecimientos.

Agradezco a mis padres Ma. del Carmen Rico Mayorga y Osiel Herrera Báez, a mis hermanas Carmen Paulina Herrera Rico, Guadalupe de Jesús Herrera Rico y a Toto, por el apoyo incondicional, risas, etc. que me han brindaron a lo largo de este camino, no lo hubiera logrado sin ustedes.

Al Dr. Rubén López Doncel, por brindarme su apoyo y amistad a lo largo de este recorrido.

Al Dr. Alfredo Aguillón Robles, que ha sido para mí un amigo durante estos años, que me ha brindado su apoyo incondicional. A todo el equipo del laboratorio de geoquímica.

Al ing. Erasmo Mata Martínez, que me prestó y enseñó a utilizar el equipo del laboratorio de preparación de muestras. Un especial agradecimiento a Juan Carlos Guel Casillas y a Efrén Román Guerrero Nava; por su amistad y apoyo brindado.

A todos los catedráticos del Instituto de Geología, en especial al Dr. Margarito Tristán González.

A mi equipo del posgrado, Irene y Juan Esteban; gracias por su amistad y apoyo incondicional en estos dos años de trayecto. A todos mis amigos, en especial a Emmanuel, Nico, Chío y Kari.

Y un especial agradecimiento a la persona que me ha brindado todo su apoyo, amistad y comprensión, Edwin Rivera Olgúin; estuviste conmigo desde mi primer día en la carrera y mi último día en la maestría, gracias.

Índice

Resumen.....	iii
Introducción.....	1
1. Generalidades.....	3
1.1. Hipótesis.....	3
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Metas.....	3
1.4. Antecedentes.....	4
1.5. Materiales y equipo.....	6
1.6. Metodología.....	6
1.6.1. Recopilación y análisis bibliográfico.....	6
1.6.2. Trabajo de campo.....	7
1.6.3. Procesamiento químico y difracción de rayos X.....	7
1.7. Localización y vías de acceso.....	8
1.8. Fisiografía.....	9
1.9. Geología Regional.....	11
1.10. Estratigrafía.....	14
2. Marco geológico de las zonas de muestreo.....	18
2.1. Sección Cerro del Toro.....	18
2.2. Zona Sierra del Meco.....	24
2.3. Zona Cerro de Calabacillas.....	27
3. Procesos químicos y difracción de rayos X.....	34
3.1. Laboratorio.....	34
3.2. Difracción de Rayos X.....	42
4. Resultados químicos de difracción de rayos X y petrográficos.....	45
4.1. Zona de muestreo Cerro del Toro.....	47
4.2. Zona de muestreo Sierra del Meco.....	52
4.3. Zona de muestreo Cerro de Calabacillas.....	59

5. Aspectos deposicionales en secuencias calizas-margas y su influencia en la deformación sinsedimentaria.....	66
6. Interpretación y discusión.	74
6.1. Interpretación estadística de las estructuras sinsedimentarias de falla, laminada y pliegue; en base a sus porcentajes de material insoluble y arcilloso.	74
6.2. Interpretación del tipo de depósito de las zonas de muestreo.	94
6.3. Interpretación mineralógica y procedencia.	96
Conclusiones.....	101
Bibliografía.	105
Anexos.....	111
Anexo 1.....	111
Anexo 2.....	118
Anexo 3.....	126

Resumen.

El presente estudio se realizó en la porción noroccidental del Estado de San Luis Potosí, en la parte central de la zona de transición entre la Plataforma Valles - San Luis Potosí (PVSLP) y la Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM), donde se depositaron durante el Cretácico (Albiano –Maastrichtiano), secuencias sedimentarias características de un ambiente de talud, las cuales son comparables en génesis con las rocas carbonatadas de la Formación Tamabra del margen oriental de la Plataforma Valles San Luis Potosí.

Este trabajo tiene como finalidad, por medio de la recolección de muestras que contengan estructuras sinsedimentarias de falla, laminación y pliegue, en la Formación Tamabra superior, la creación de una base de datos para determinar la relación de la deformación sinsedimentaria frágil a dúctil, respecto a su contenido de arcillas; establecer la cantidad necesaria o porcentaje de arcilla requerido para cambiar de un régimen frágil a dúctil.

Para obtener esta información, se utilizaron cinco gramos de material pulverizado que fue disuelto en ácido clorhídrico, lavado y secado; para obtener el porcentaje de material insoluble arcilloso y calcular su peso. El material insoluble fue caracterizado en el difractor de rayos x, para definir el tipo y la composición de las arcillas o material insoluble. También se realizaron estudios en microscopio, para determinar por medio de las microficies de las muestras en que parte de la plataforma o talud fueron depositados. Debido a que este tipo de análisis no se había realizado anteriormente en esta forma, fue necesario igualmente validar el

método de disolución de CaCO_3 , conservando la fracción no carbonatada, para poder ser analizada con el método de difracción de rayos x.

Con el mejoramiento del método de digestión en ácido clorhídrico, se pudieron conservar mejor los minerales arcillosos. Esto es con una concentración del 10 N de ácido clorhídrico, y sólo dejando el ácido 30 minutos en la placa de calentamiento; para inmediatamente decantar el ácido y lavar las muestras, dejando al final las muestras en evaporación con agua desionizada a 90 °C.

La estructura sinsedimentaria de falla tiene un máximo de 11% de insolubles y 2% de arcillas. Las muestras que tienen estructura sinsedimentaria laminada tienen más porcentaje de insolubles (> 11 %) y arcillas (> 2 %), pero tienen su límite en 6% de arcillas. Con un mayor porcentaje de insolubles (> 5 %) y arcillas (> 3 %) se tienen las estructura de pliegue.

Los minerales encontrados por medio de los difractogramas de rayos x en las tres zonas de muestreo o límite poniente de la Formación Tamabra superior, fueron los siguientes minerales no arcillosos; cuarzo, anortita, albita, calcita, biotita y pirita. Los minerales arcillosos encontrados fueron; illita, montmorillonita caolinita, dickita y hectorita.

Las arcillas estudiadas tienen dos orígenes, existen las arcillas creadas posiblemente por el paleo arco volcánico nazas. Estas arcillas provienen del poniente de la Plataforma Valles – San Luis Potosí. Los depósitos de este arco son del Jurásico temprano a medio, por lo tanto, los sedimentos al momento del depósito ya estaban de cierta manera alterados. Posiblemente esta unidad se encontraba

aflorando y se encontraba en proceso meteorización química; por medio de la hidrólisis, los minerales de feldespato (comunes en rocas félsicas) se transformaron en arcillas.

Al momento del depósito de las arcillas, las zonas de muestreo del Cerro de Calabacillas y Cerro del Toro, se encontraban en zonas de facies superiores (Plataforma marina abierta (ZF 7) y margen de plataforma (ZF 5)), lo que explica porque en la zona de muestreo de Sierra del Meco no se encontrara tanta illita.

En la zona de muestreo de la Sierra del Meco, se encontraron montmorillonita y caolinita, al igual que en una parte de Cerro de Calabacillas; esta zona y una parte de la anterior, fueron depositadas en ambientes más profundos (ZF 2, plataforma profunda), por lo tanto, al momento de su depósito, se sugiere que el origen de estos sedimentos hayan sido por la acreción del Terreno Guerrero, ya que coinciden cronoestratigráficamente y composicionalmente. Mientras se estaba depositando la Formación Tamabra superior, llegaban sedimentos volcánicos y arcillas de la acreción del Terreno Guerrero.

Introducción.

Los sedimentos en la parte occidental del Estado de San Luis Potosí son de edad y génesis comparables con las rocas de talud de la Formación Tamabra en la porción oriental de la Plataforma Valles – San Luis Potosí. En la parte central del margen occidental, los sedimentos de la Formación Tamabra se encuentran dados por una serie de rocas carbonatadas, compuestas por intercalaciones de carbonatos reabajados de aguas someras provenientes de la plataforma, junto a sedimentos de aguas profundas. En los depósitos alóctonos dominan los del tipo rítmicos de turbiditas calcáreas y en menor grado, secuencias con pliegues sinsedimentarios por deslizamiento.

Cruz–Márquez (2005), separa la Formación Tamabra en tres miembros y añade la Formación Soyatal, como el miembro superior arcilloso. La unidad margosa se compone de calizas que van desde arcillosas a margas en capas delgadas a medianas de color gris claro, que intemperizan a un color amarillento. Esta unidad se caracteriza por su alto contenido de estructuras sedimentarias, gracias al alto contenido de arcillas. Aquí se reconoció bioturbación, así como “*slumps*” o pliegues sinsedimentarios en algunas zonas.

Trabajos previamente realizados (Herrera–Rico, 2015), demostraron que se puede hacer un modelo aproximado de la cantidad de arcillas necesarias para que una muestra de caliza pase de una deformación sinsedimentaria frágil a dúctil.

La práctica de disolución de carbonato de calcio en rocas que contienen arcilla, ha sido ampliamente discutida a lo largo de los años. Ya que a cierta cantidad de ácido,

temperatura y concentración; puede haber un cambio en la estructura de los minerales arcillosos.

1. Generalidades.

1.1. Hipótesis.

El tipo de deformación sinsedimentaria en sedimentos carbonatados es dependiente del porcentaje de arcillas.

A menor contenido arcilloso, la deformación sinsedimentaria será de manera frágil. Esto es; una caliza muy pura con un contenido determinado de material insoluble mostrará una deformación frágil.

A mayor contenido arcilloso, la deformación sinsedimentaria será de manera dúctil. Por lo tanto; a determinada cantidad mínima de material insoluble, la deformación pasa de un régimen frágil a uno dúctil.

1.2. Objetivos.

- Proponer un método analítico efectivo y repetible, para conservar la fracción insoluble, con base a la disolución del material carbonatado.
- Comprobar el porcentaje de arcillas y otros materiales insolubles en calizas, calizas arcillosas, en margas y en lutitas calcáreas, para determinar la cantidad necesaria en la que la roca pase de ser frágil a dúctil.
- Identificar el tipo de arcillas y materiales insolubles.
- Definir la procedencia de las arcillas.

1.3. Metas.

- Definir los tipos de arcillas que se encuentran en las calizas por medio de difracción de rayos x.

- Crear una base de datos de la cantidad de arcillas necesarias para que haya una deformación sinsedimentaria, mediante de la digestión química de calizas, calizas arcillosas, margas y lutitas calcáreas.

1.4. Antecedentes.

El nombre Tamabra proviene de la unión de las tres primeras letras de Tamaulipas y de todo el nombre de Abra, fue propuesto por Heim (1940) como Caliza Tamabra para designar a las rocas que se encuentran debajo de las Formaciones San Felipe o Xilitla (Agua Nueva) en el área de Ciudad Victoria – Tamazunchale.

Los sedimentos en la parte occidental del Estado de San Luis Potosí son de edad y génesis comparables con las rocas de talud de la Formación Tamabra en la porción oriental de la Plataforma Valles – San Luis Potosí. En la parte central del margen occidental, los depósitos de sedimentos de la Formación Tamabra se encuentran dados por una serie de rocas carbonatadas, compuestas por intercalaciones de carbonatos retrabajados de aguas someras, provenientes de la plataforma, junto a sedimentos de aguas profundas. En los depósitos alóctonos dominan los del tipo rítmicos de turbiditas calcáreas y en menor grado, los pliegues sinsedimentarios por deslizamiento, (López–Doncel, 2003).

Cruz–Márquez (2005), separa la Formación Tamabra en tres miembros y añade la Formación Soyatal como el miembro superior arcilloso.

Los flujos ricos en arcilla son comunes en muchos entornos sedimentarios, desde ríos con altas concentraciones de sedimentos suspendidos y lodos fluidos en las plataformas continentales, hasta las corrientes de densidad en los océanos profundos. Dichos flujos cargados de sedimentos tienen características fluido-

dinámicas que son radicalmente diferentes de sus contrapartes de aguas claras. Los experimentos de laboratorio demuestran que una concentración de caolinita, da lugar a un cambio distinto en la turbulencia en los flujos de transición entre el comportamiento *Newtoniano* y no- *Newtoniano*. (Baas *et al.*, 2002). Estos flujos ricos en arcillas son los responsables de distintas estructuras sinsedimentarias en *slumps*. Las estructuras sinsedimentarias estudiadas en este trabajo son las del tipo de falla, laminada y pliegue.

Herrera–Rico (2015), elaboró una técnica para la digestión en rocas carbonatadas con ácido clorhídrico, con esto obtuvo la parte insoluble y arcillosa de la Formación Tamabra superior. La parte insoluble consta de minerales arcillosos y otros minerales que no fueron disueltos por la acción del ácido. Los minerales fueron analizados con difracción de rayos x; y se definió un porcentaje de material insoluble en donde las rocas al momento de su depósito pasaron de ser frágiles a dúctiles.

La técnica antes mencionada (Herrera–Rico, 2015) fue ligeramente mejorada en este trabajo, para conservar lo mejor posible la fracción arcillosa; sin que esta sufriera ningún cambio mineralógico o destrucción de su estructura.

Se cuentan con tres zonas de muestreo en la parte poniente de la Plataforma Valles – San Luis Potosí. En los cuales se trabajó con los artículos de Barboza-Gudiño, *et al.*, (2004) sobre el Cerro de Calabacillas, CRM (2002) sobre el Cerro del Toro, López-Doncel (2003) y Cruz–Márquez (2005) sobre la Sierra del Meco.

1.5. Materiales y equipo.

- Personal. Brújula Brunton azimutal, lupa de aumentos 5x, *Baush & Lomb*; martillo de campo *Estwing*; Flexómetro 50 m.
- Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geología, cortadora *Hillquist*, desvastadora *Hillquist*, microscopio petrográfico *Olympus*.
- Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, molino mecánico marca *Restch* con mortero de ágata, balanza electrónica marca *Ohaus* modelo *Adventure* con cubierta de cristal, estufa de laboratorio marca *SHELLAB* con microprocesador para control de temperatura modelo CE5G, desecador, campana de laboratorio, placa de calentamiento marca *Thermo Scientific* modelo *Cimarec Hotplate*, centrifuga.
- Instituto de Metalurgia, difractómetro de rayos x marca *Rigaku* modelo DMAX-2200.

1.6. Metodología.

La metodología consiste en tres etapas.

1.6.1. Recopilación y análisis bibliográfico.

Se cuenta con una serie de trabajos desarrollados en las zonas de muestreo tales como; López-Doncel (2003), Barboza-Gudiño (2004), Cruz-Márquez (2005), Zavala-Arriaga (2013); así como las cartas topográficas F14-A24 (Real de Catorce), F14-A54 (Llanos del Carmen), F14-A74 (Villa de Hidalgo). Donde se investigarán las tres zonas de muestreo de la Formación Tamabra superior, ya que en esta bibliografía hacen mención de las estructuras sinsedimentarias de falla, laminada y pliegue.

1.6.2. Trabajo de campo

Consistió en varios recorridos en las zonas de muestro, mediante caminamientos previamente programados en donde se identificaron las diferentes unidades litológicas que se encuentran aflorando. Se hizo la descripción de los afloramientos, así como su descripción en muestra de mano, se identificaron estructuras sinsedimentarias presentes; así como la recolección de muestras para su estudio en el laboratorio. Obteniendo los siguientes resultados:

- Una sección del Cerro del Toro de 217.7 m.
- Descripción de afloramientos en Sierra del Meco y Cerro de Calabacillas.
- Recolección de 76 muestras de las tres zonas de muestreo.
- Archivo fotográfico de las muestras pulidas.
- 47 muestras para difracción de rayos x.
- 11 láminas delgadas.

1.6.3. Procesamiento químico y difracción de rayos x.

Las muestras de rocas carbonatadas fueron pulverizadas a un tamaño aproximado de 400 μm , disueltas bajo el método modificado de Herrera–Rico (2015). Anteriormente las muestras eran disueltas y dejadas en placas de calentamiento con el ácido clorhídrico al 10 N, hasta que este se evaporaba, esto puede generar que algunas arcillas presenten algunas modificaciones importantes en los picos de difracción de rayos x. Para que esto no sucediera, las muestras sólo fueron dejadas 30 minutos en la placa de calentamiento con el ácido clorhídrico al 10 N, después lavadas con agua desionizada tres veces para que quedaran con un Ph neutro (7); y al final colocadas en la placa de calentamiento (90° C) con el agua desionizada.

La parte insoluble de las rocas carbonatadas es la fracción donde el ácido no actúo, esta consta de minerales arcillosos y otra clase de minerales o mineraloides. La parte insoluble fue analizada en el difractor de rayos x del Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, bajo el procedimiento del manual de laboratorio de difracción de rayos x en polvo (Poppe *et al.*, 2002).

Un total de 11 láminas delgadas fueron analizadas con la clasificación de Dunham y catalogadas en facies y microfacies carbonatadas (Flügel, 2010).

1.7. Localización y vías de acceso.

Partiendo desde la capital de San Luis Potos, las tres zonas de muestreo se localizan de la siguiente manera; el Cerro del Toro se encuentra al norte de la capital de San Luis Potosí, sobre la carretera federal número 57 a 67 km, en el municipio de Villa de Hidalgo.

La Sierra del Meco se encuentra más al norte de la zona de muestreo del Cerro del Toro, sobre la carretera federal número 57, tramo San Luis Potosí-El Huizache, se llega hasta el entronque a Villa de Arista en el km 64, de ahí se toma la carretera estatal que va a hacia el municipio de Moctezuma, se cruza el pueblo de Villa de Arista; se llega a la desviación al poblado San Francisco, se toma la terracería que comunica a los poblados San Francisco, El Epazote y La Luz; a lo largo de ésta terracería existen varias veredas hacia el NE que dan acceso a la Sierra El Meco, este punto se encuentra a 146 km de la capital.

La última zona de muestreo se ubica en el Cerro de Calabacillas en el poblado de Viborillas a 196 km de la ciudad de San Luis Potosí, tomando la carretera federal número 57, se toma un camino con dirección al oeste a unos 7 km antes de llegar a la ciudad de Matehuala, pasando el poblado las Palmas se gira a la izquierda hasta llegar a al poblado de Viborillas (Figura 1).

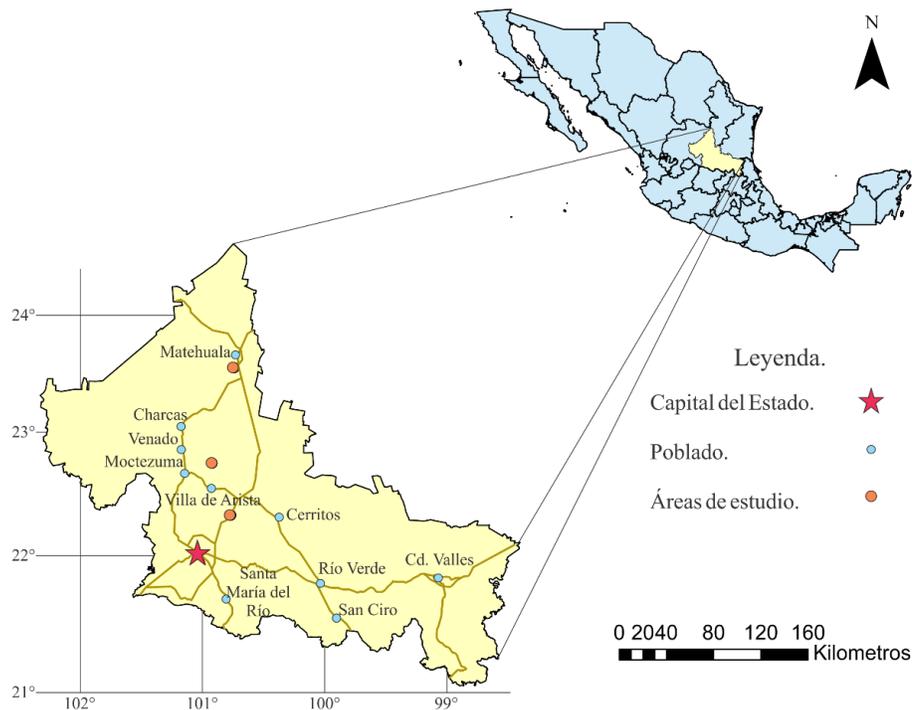


Figura 1. Localización de las tres zonas de muestreo partiendo de la capital de San Luis Potosí. Modificado de CRM (2002).

1.8. Fisiografía.

Las tres zonas de muestreo se encuentran comprendidas en la zona limitrofe de las provincias de la Mesa Central al poniente y la Sierra Madre Oriental, específicamente dentro de la subprovincia de Las Sierras Bajas.

La Provincia de la Sierra Madre Oriental comprende toda la parte nororiental del Estado de San Luis Potosí. En general, está conformado por un conjunto de sierras sedimentarias marinas calcáreas y clásticas con altitudes que varían entre los 2000 y 3000 m. s. n. m.

Una porción del territorio del estado queda comprendida dentro de la subprovincia de las Sierras y Llanuras Occidentales, que consta de sierras plegadas, con orientación predominante norte – sur, que generalmente están unidas entre sí por conjuntos de cerros menores o llanuras cubiertas por aluviones.

La Provincia de la Mesa del Centro, ocupa la parte noroccidental del territorio del estado, colinda al norte y oriente con la Sierra Madre Oriental, al este con la Sierra Madre Occidental, y al sur con la provincia del Eje Neovolcánico. Los rasgos fisiográficos que caracterizan esta provincia están representados por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas (CRM, 1992) (Figura 2).

Provincias Fisiográficas de México.

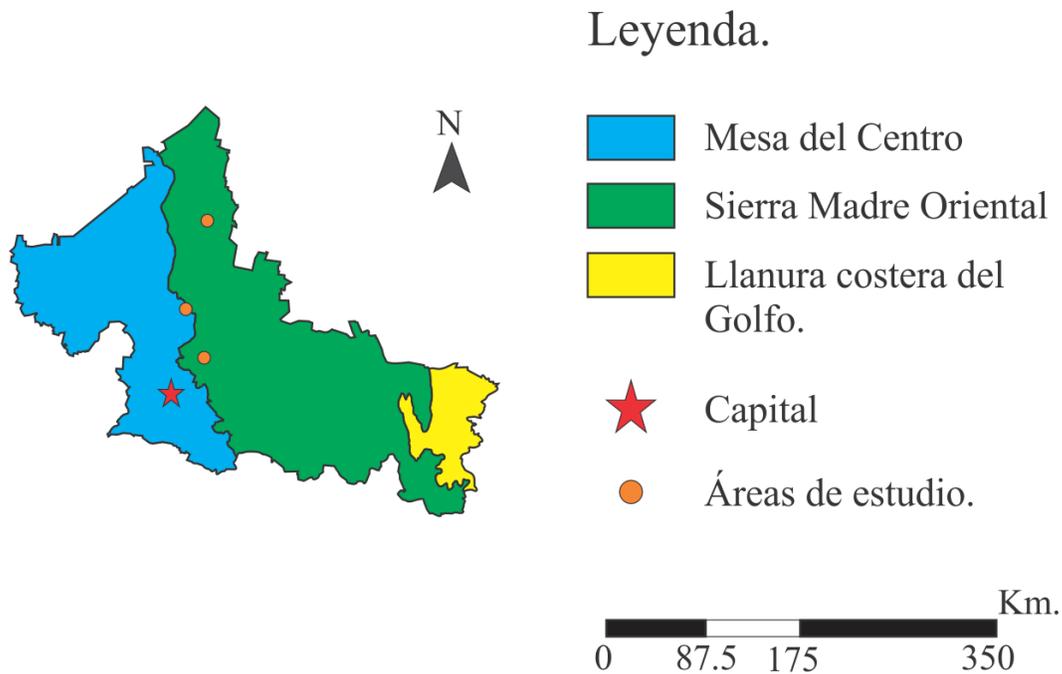


Figura 2. Mapa de las provincias fisiográficas comprendidas en el estado de San Luis Potosí. Modificado de CRM (1992).

1.9. Geología Regional.

En la región existen escasos afloramientos de una secuencia siliciclástica marina del Triásico tardío (Formación Zacatecas), sobreyacida por rocas volcánicas y sedimentos clásticos del Jurásico temprano a medio (Formación Nazas), así como sedimentos clásticos continentales (Formación la Joya), sobre los que se observan depósitos correspondientes a la transgresión marina del Jurásico tardío (Formación Zuloaga), para continuar con la potente secuencia de capas marinas esencialmente carbonatadas del Jurásico tardío y Cretácico, ampliamente distribuidas en todo el noreste de México.(Barboza-Gudiño *et al.*, 2004). Esta secuencia es sobreyacida

en aparente concordancia por un paquete de sedimentos marinos calcáreos del Cretácico en prácticamente todo el estado.

Durante el Cretácico, específicamente durante el Albiano – Cenomaniano, se depositaron secuencias sedimentarias características de un ambiente de talud en el área del margen occidental de la Plataforma Valles – San Luis Potosí (PVSLP), adyacente a la Cuenca Mesozoica del Centro de México (CMCM) (Figura 3). Las cuales son comparables en edad y génesis con las rocas carbonatadas de la Formación Tamabra del margen oriental de la PVSLP (López-Doncel, 2003).

El Cenozoico cubre discordantemente en diferentes áreas y está representado por rocas volcánicas que varían en composición desde riolitas y andesitas, hasta basaltos. Los depósitos cuaternarios, se exponen en planicies aluviales y depósitos de pie de monte en las laderas de la Sierra de Álvarez, San Pedro y El Coro, (López-Doncel, 2003)

En el Estado de San Luis Potosí se conocen dos fases de deformación compresiva evidenciadas por la presencia de dos crucesos superpuestos que afectan a la unidad más antigua, que se ubica tentativamente en el Triásico tardío y sólo un cruceo que evidencia una fase de este tipo en las unidades del Jurásico y Cretácico, y que correspondería a la fase Laramídica (Barboza-Gudiño *et al.*, 2004).

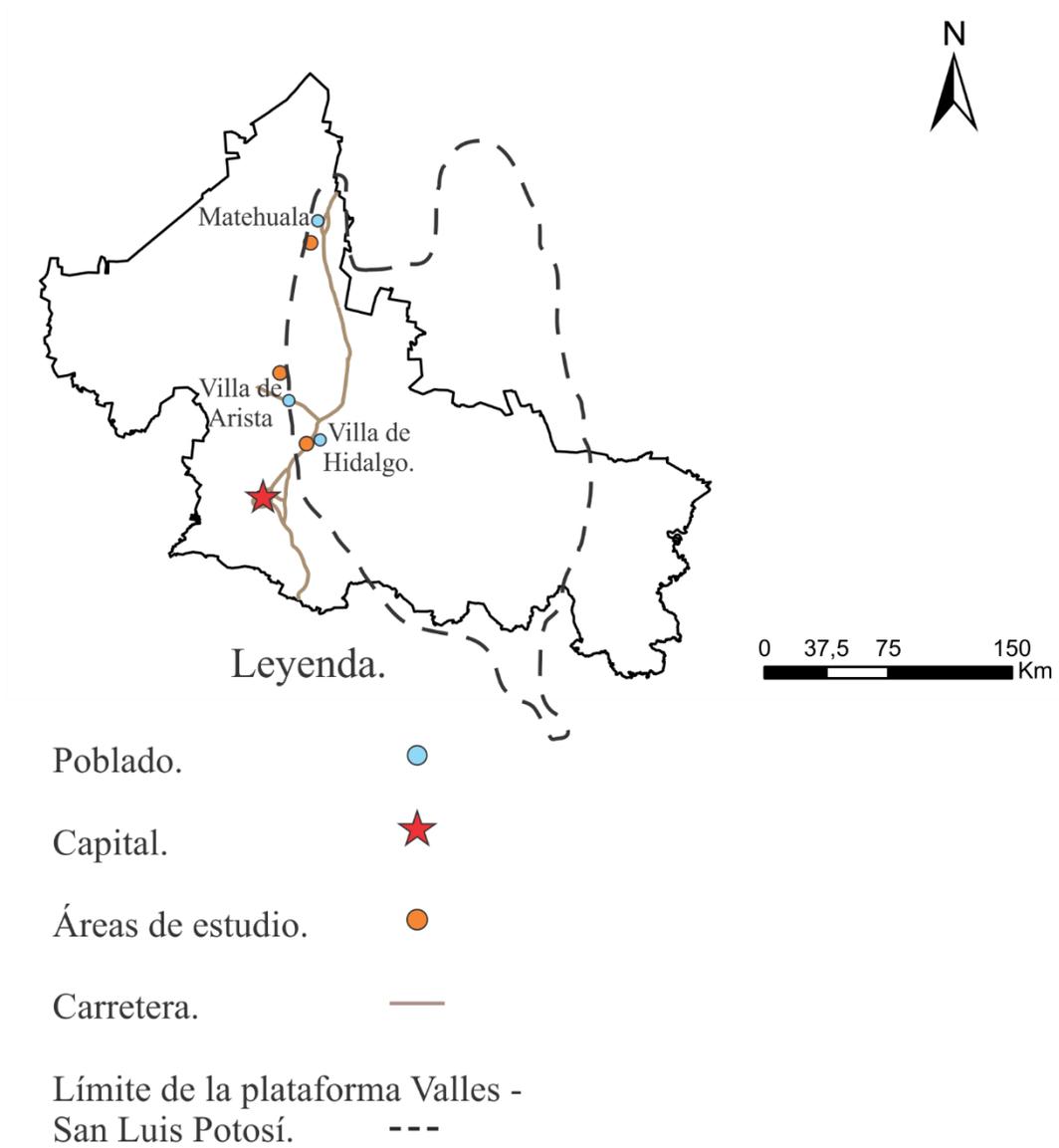


Figura 3. Mapa del límite de la Plataforma Valles San Luis Potosí. Modificado de Rodríguez – Hernández (2009).

1.10. Estratigrafía.

El nombre Tamabra proviene de la unión de las tres primeras letras de Tamaulipas y de todo el nombre de Abra, fue propuesto por Heim (1940) como Caliza Tamabra para designar a las rocas que se encuentran debajo de las Formaciones San Felipe o Xilitla (Agua Nueva) en el área de Ciudad Victoria – Tamazunchale. Heim (1940), define así al conjunto de facies calcáreas en la zona de transición entre la Plataforma Valles – San Luis Potosí (PVLSP) y la cuenca situada al oriente de la plataforma, incluyendo a las facies de interior de plataforma o Caliza El Abra, a las facies de borde de plataforma o Caliza Taninul, y a las facies de cuenca o Caliza Tamaulipas, (SGM, 2013).

Los sedimentos en la parte poniente del Estado de San Luis Potosí son de edad y génesis comparables con las rocas de talud de la Formación Tamabra en la porción oriental de la PVSLP. La Formación Tamabra aflora como una franja con un rumbo general NW – SE, de aproximadamente 4 a 5 km de ancho. En la parte central del margen occidental, los depósitos de sedimentos de la Formación se encuentran dados por una serie de rocas carbonatadas, compuestas por intercalaciones de carbonatos retrabajados de aguas someras provenientes de la plataforma, junto a sedimentos de aguas profundas. Se compone de *mudstone* y *wackstone* con fauna pelágica, producto de una sedimentación autóctona de las facies de cuenca hasta pie de talud, que se interestratifican con facies de *packstone*, *floatstone* y *rudstone* con gran contenido de bioclastos y litoclastos provenientes de ambientes de aguas someras, producto de una sedimentación alóctona, las cuales fueron transportadas a lo largo del talud por procesos gravitacionales y de suspensión. En los depósitos

alóctonos dominan los del tipo rítmicos de turbiditas calcáreas y en menor grado, los pliegues sinsedimentarios por deslizamiento, (López–Doncel, 2003).

Cruz–Márquez (2005), separa la Formación Tamabra en tres miembros y añade la Formación Soyatal como el miembro superior arcilloso (Figura 4).

La unidad calcáreo – lutítica se compone hacia la cima por calizas de color gris oscuro en capas delgadas y medias, intercaladas con capas de calcarenitas y lutitas laminadas que intemperizan a un color rojizo y en ocasiones amarillento, es común encontrar fallamiento sinsedimentario, presentan gradación y en ocasiones llegan a formar turbiditas calcáreas.

La unidad de microbrechas – brechas presenta hacia la base, brechas en bancos delgados a medianos lenticulares de color gris oscuro compuestas de litoclastos calcáreos subangulosos a subredondeados de 5 a 15 cm de diámetro, y bioclastos subangulosos de pedazos de rudistas, gasterópodos y coral soportados en una matriz calcáreo - arcillosa. Las microbrechas de esta unidad se encuentran contenidas en capas medianas a gruesas, que llegan a ser masivas de calizas bioclásticas, se componen de *grainstone* con fragmentos de rudistas y nódulos de pedernal, la masa básica generalmente es esparítica y en ocasiones micrítica; suele presentar dolomitización en algunas partes y puede encontrarse cárstica.

El contenido de material arcilloso en esta unidad disminuye hacia la cima, aumentando considerablemente el contenido de carbonatos en donde la matriz de las microbrechas es predominantemente calcárea.

La unidad margosa se compone de calizas que van desde arcillosas a margas en capas delgadas a medianas, de color gris claro que intemperizan a un color amarillento y alternan con capas delgadas de lutitas laminadas color rojizo. La laminación de las lutitas se presenta un poco distorsionada por el contenido de algunos fragmentos de roca en forma de pequeños nódulos.

Esta unidad se caracteriza por su alto contenido de estructuras sedimentarias, gracias al alto contenido de arcillas. Aquí se reconocieron estructuras tipo “*slumps*” o pliegues sinsedimentarios en algunas zonas. El contacto superior de esta unidad no aflora, por lo que su espesor se estima de aproximadamente 60 m (Figura 4).



Figura 4. Columna estratigráfica de la formación Tamabra (Tomado de Cruz-Márquez, 2005)

2. Marco geológico de las zonas de muestreo.

2.1. Sección Cerro del Toro.

CRM (2002), describe el afloramiento de la zona de muestreo Cerro del Toro como la Formación Indidura, su litología está constituida por calizas arcillosas en estratos de espesor medio a delgado, de color gris, gris oscuro y café rojizo, que alternan con lutitas calcáreas de color gris claro e interperizan a gris con tonalidades violáceas y rojizas.

Se realizó una sección de la Formación Tamabra superior en la zona de muestreo en las coordenadas UTM (324324, 2482780) (Figura 9), cuenta con un total de 217 m de espesor (Figura 8). Esta inicia en su base con un paquete de calizas de 44.3 m, de color gris con tonalidades oscuras, contiene intercalaciones de lutitas de color gris con tonalidades verdes y algunas estructuras sinsedimentarias, entre ellas algunas estructuras tipo *slumps*.

Se tiene un cambio de litología en los siguientes 11.4 m, donde se tienen horizontes de tamaño de 80 cm con pequeños clastos de 3 cm a 4 cm (Figura 5) y estructuras tipo *slumps*.

Posterior a este paquete, se tiene uno de lutitas (Figura 6), con un espesor de 10.63 m. En los próximos 8.94 m las calizas poseen estratos más delgados de 3 a 7 cm, con horizontes de lutitas de 1 a .4 cm.

En los siguientes 11.66 m, se presentan calizas de color gris con tonalidades claras en forma masiva. Se tiene un paquete de 67.6 m de calizas arcillosas con fracturas rellenas de calcita perpendicular a la estratificación, las calizas son de color gris con

tonalidades cafés, se encuentran algunas estructuras tipo *slumps*. Algunos horizontes de caliza estan recristalizados. Después de las calizas masivas hay 15.62 m de *slumps* masivos (Figura 7), los estratos son de color gris con tonalidades claras a cremas, en muestra de mano fresca son de color gris oscuro. Los estratos tienen un espesor de 4 cm a 40 cm, algunos tienen clastos pequeños de .3 cm a 3 cm. Se detectaron algunas capas pequeñas de lutitas menores a 1 cm.

Existe un cambio en los siguientes 20.25 m, donde los estratos se hacen más gruesos. La roca es de color gris con tonalidades medias, presenta menos contenido de clastos, es una roca más calcárea, de grano más fino y con menos contenido de arcillas.

El último paquete de la sección posee aproximadamente 1 m, donde la secuencia tiene horizontes de calizas más delgados de 4 cm a .1 m. Tiene más contenido de arcillas, el color de la roca es gris con tonalidades cafés, posee algunas láminas de lutitas menores a 1 cm. La porción superior de la secuencia, cuenta con una gran cantidad de arcillas, el afloramiento es de color gris con tonalidades cremas, los horizontes van de un tamaño de 3 cm a 50 cm. En conjunto esta parte del afloramiento se presenta de manera masiva con mucho contenido de *slumps*, usualmente posee capas de lutitas con espesores de hasta 5 cm, que intercalan a las calizas, no contiene intraclastos, esta parte mide en total 27.3 m (Figura 8) (Anexo 1).

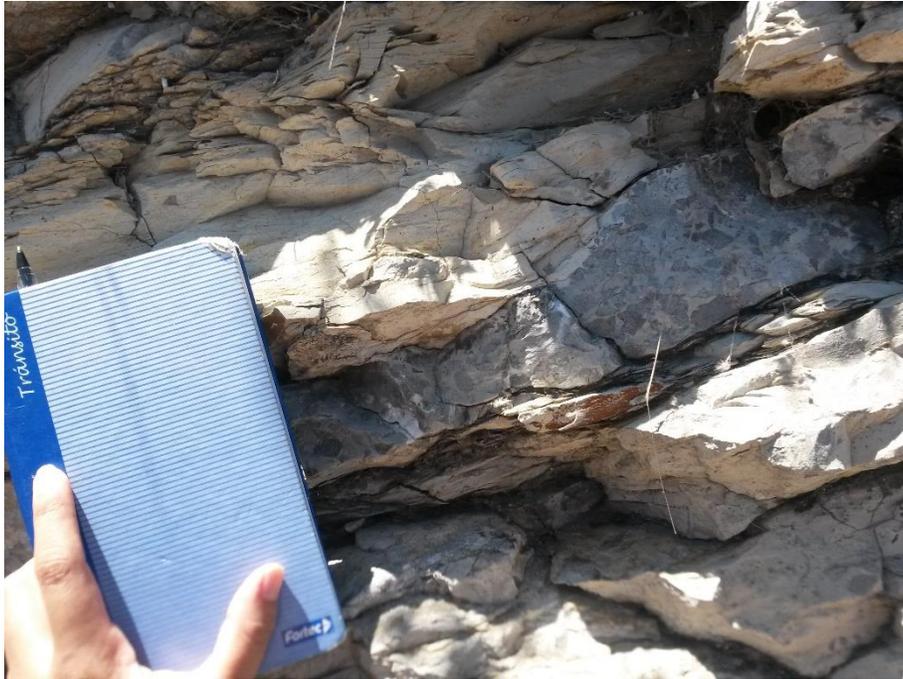


Figura 5. Horizonte con clastos menores a 3 cm.



Figura 6. Estratos de lutitas de la Formación Tamabra superior.



Figura 7. Afloramiento de la Formación Tamabra superior en zona de muestreo Cerro del Toro.

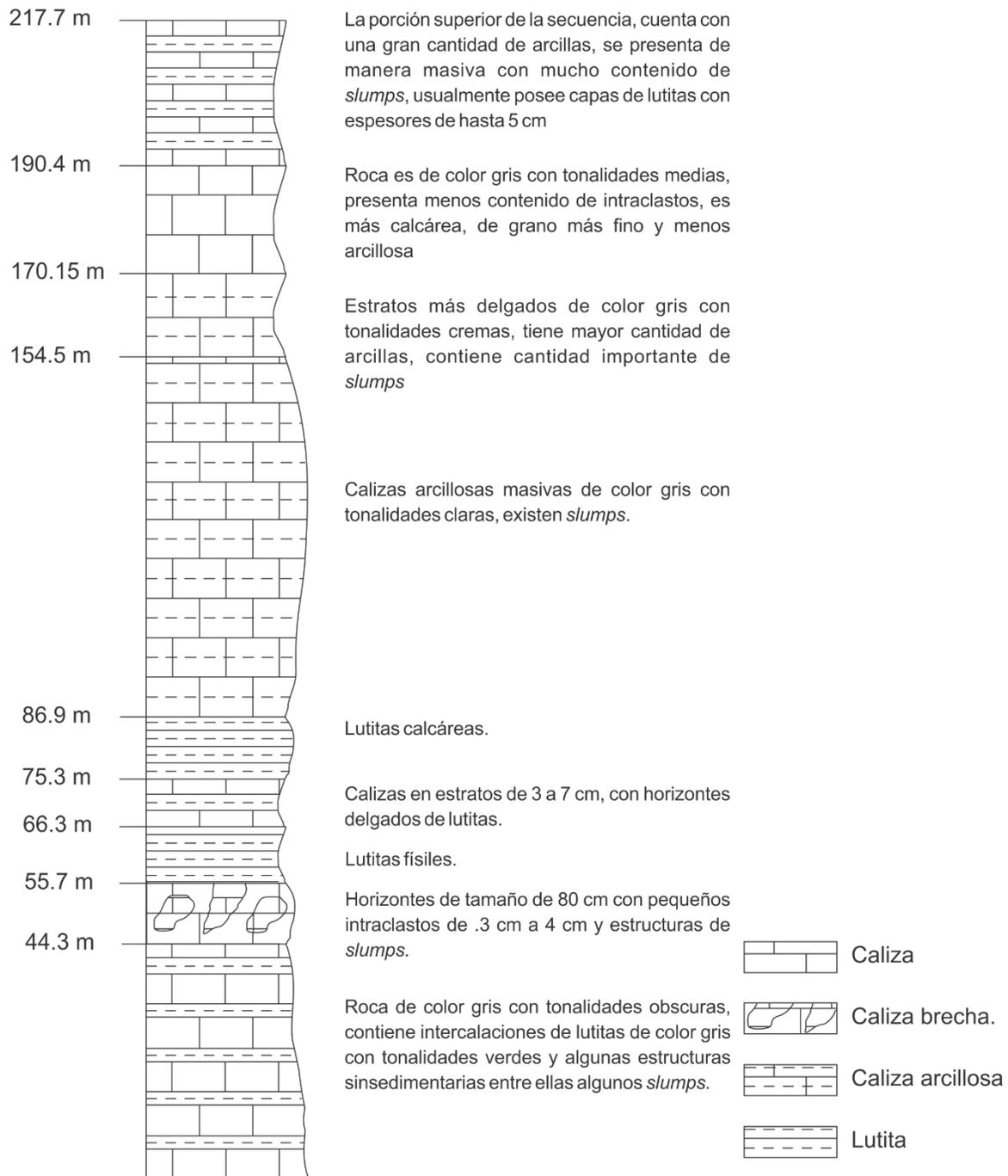


Figura 8. Sección medida de la Formación Tamabra superior en la zona de muestreo Cerro del Toro.

2.2. Zona Sierra del Meco.

En la zona Sierra del Meco se trabajó sobre la unidad calcárea – lutítica, en las coordenadas UTM (308050, 2524300) (Figura 11). Se compone hacia la cima por calizas de color gris oscuro en capas delgadas y medias, intercaladas con capas de calcarenitas y lutitas laminadas que intemperizan a un color rojizo y en ocasiones amarillento. Es común encontrar fallamiento sinsedimentario (Figura 10 B), presentan gradación y en ocasiones llegan a formar turbiditas calcáreas.

El contacto inferior de la unidad calcáreo - lutítica no aflora, subyace irregularmente a la unidad de microbrechas y brechas. En las partes norte y sur de la Sierra del Meco la unidad calcáreo – lutítica, subyace transicionalmente a la unidad margosa, debido a que la unidad de microbrechas y brechas se presenta a manera de lentes y lateralmente llegan a encontrarse restringidas. La unidad es sobreyacida discordantemente por depósitos de coluvión en el flanco oeste de la Sierra del Meco y por sedimentos aluviales hacia el norte de la misma. (Cruz–Márquez, 2005) (Anexo 2).

Las muestras estudiadas en esta zona de muestreo se caracterizan por tener las estructuras sinsedimentarias, falla (Figura 10 B), laminada (10 A) y pliegue (10 C)



A) Foto de afloramiento de rocas calizas con contenido de arcillas, es apreciable la estructura sinsedimentaria laminada.



B) Foto de afloramiento en campo, se puede observar la estructura sinsedimentaria de falla.



C) Foto de afloramiento en campo, se observa la estructura sinsedimentaria de pliegue.

Figura 10. Afloramientos en campo de estructuras sinsedimentarias de la Formación Tamabra superior en la zona de estudios Sierra del Meco.

Zona de muestreo Sierra del Mecco

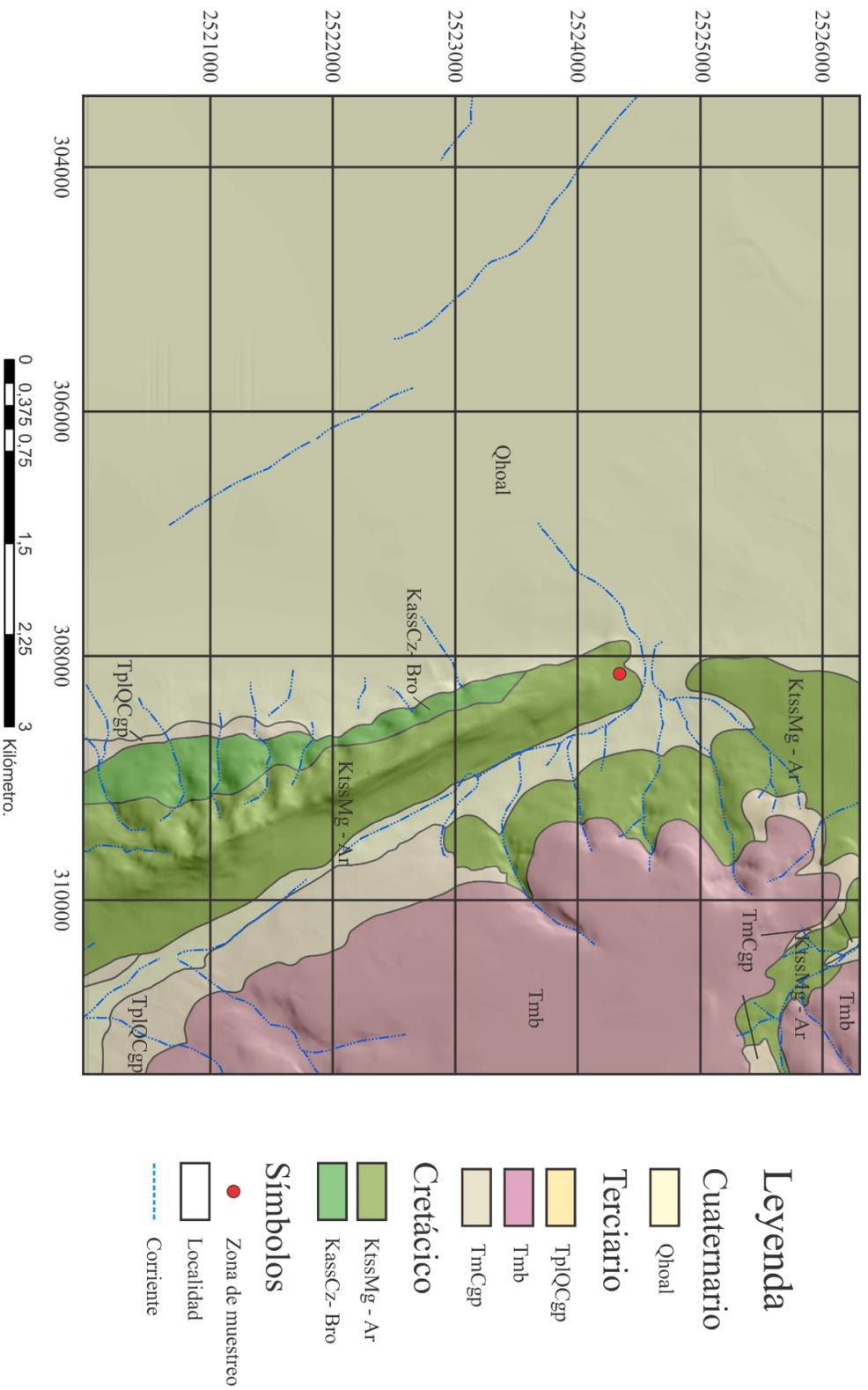


Figura 11. Mapa de la zona de muestreo Sierra del Mecco. Modificado de SGM.

2.3. Zona Cerro de Calabacillas.

En la zona de muestreo del Cerro de Calabacillas, Barboza–Gudiño *et al.*, (1998); describe la Formación Tamabra como una secuencia de espesor muy variable, entre unos metros, hasta 200 m debido a su carácter de facies de talud que se interdigita con unidades de la Cuenca Mesozoica del Centro de México. Contiene turbiditas calcáreas en parte interdigitadas a nivel de laminación, con lodos calcáreos pelágicos de cuenca. Se cuenta con la descripción de una serie de afloramientos en la zona de muestreo (Figura 17).

Afloramiento coordenada UTM 327229, 2605954.

El afloramiento de rocas se presenta de forma masiva, con algunos lentes de pedernal, se pueden observar estructuras sinsedimentarias. Las rocas presentan en muestra de mano un color gris con tonalidades oscuras, tienen estructura sinsedimentaria laminada (Figura 12, CC01), presentan vetilleo de calcita de forma secundaria (Figura 12, CC02 y CC05). Se puede observar que contiene microfósiles y su tamaño de grano oscila de arena fina a media, es un *grainstone*. Las muestras tomadas en este punto fueron: CC01, CC02, CC04 y CC055, (Figura 12).

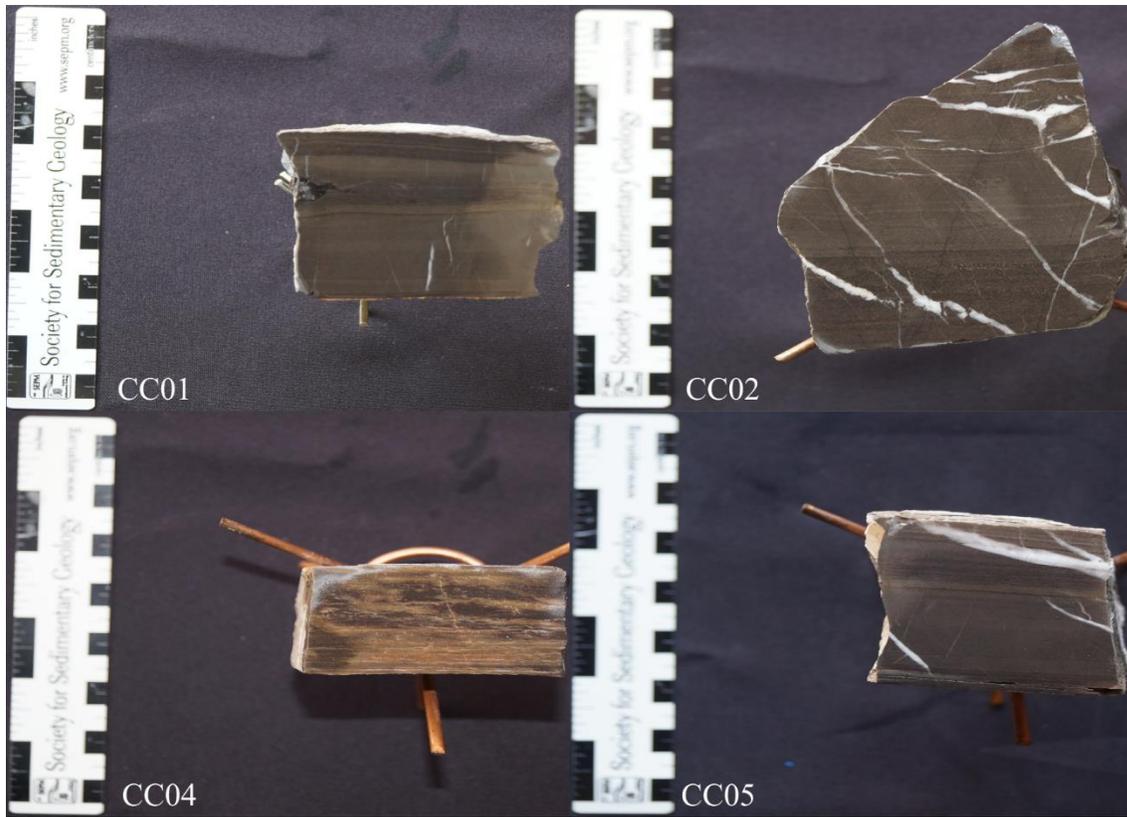


Figura 12. Muestras tomadas del afloramiento uno de la Formación Tamabra superior de Cerro de Calabacillas (Explicación en el texto).

Afloramiento coordenada UTM 327225, 2606019.

En este afloramiento las rocas presentan varios nódulos de pedernal muy alterados, se encuentran muchas estructuras en forma de *slump*. En muestra de mano se pueden observar estructuras de grano creciente y grano decreciente en forma de turbiditas de aspecto bandeado (Figura 13, CC07), una de las muestras presenta pliegues sinsedimentarios con una lámina de pedernal (Figura 13, CC06), las muestras tienen grano de tamaño de arena media, contienen un alto contenido de microfósiles, es un *grainstone*. Las muestras tomadas en este punto fueron: CC06, CC07, CC08, CC09 y CC10 (Figura 13 y Figura 14).

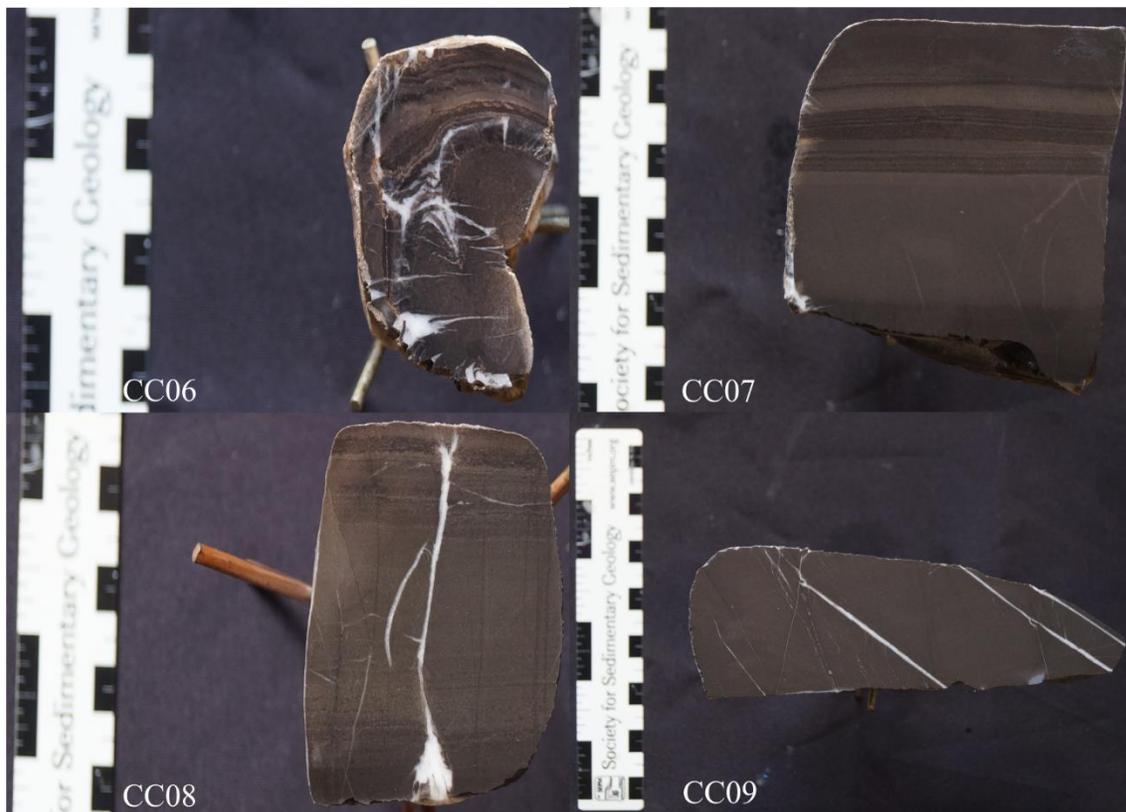


Figura 13. Muestras del afloramiento dos de la Formación Tamabra superior de Cerro de Calabacillas (Explicación en el texto).

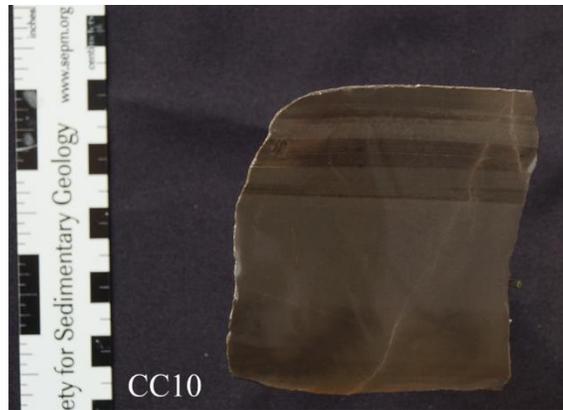


Figura 14. Muestra tomada del afloramiento dos de la Formación Tamabra superior de Cerro de Calabacillas (Explicación en el texto).

Afloramiento coordenada UTM 327226, 2606011.

Las rocas se presentan en un color gris con tonalidades cafés, presentan nódulos de pedernal y estructuras tipo *slumps*; aumenta el contenido de arcillas en este punto. Hay crecimiento en el grano de la muestra de medio a grueso. Una de las muestras contiene pirita, también en esta zona se encontraron muestras con las tres estructuras sinsedimentarias, falla (Figura 15, CC12 y CC14), laminada (Figura 16, CC15) y pliegue (Figura 15, CC11 y CC13) (Anexo 3).



Figura 15. Muestras tomadas del afloramiento dos de la Formación Tamabra superior de Cerro de Calabacillas (Explicación en el texto).

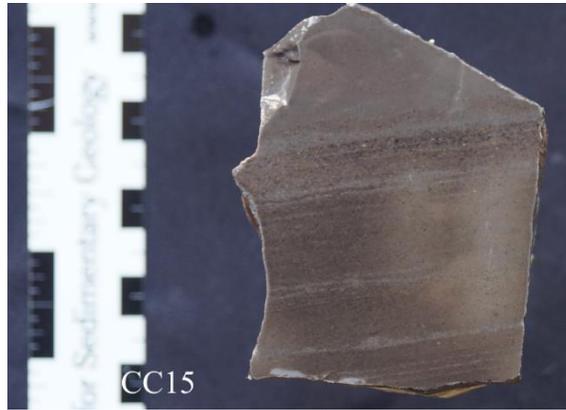


Figura 16. Muestra tomada del afloramiento dos de la Formación Tamabra superior de Cerro de Calabacillas (Explicación en el texto).

Zona de muestreo Cerro de Calabacillas

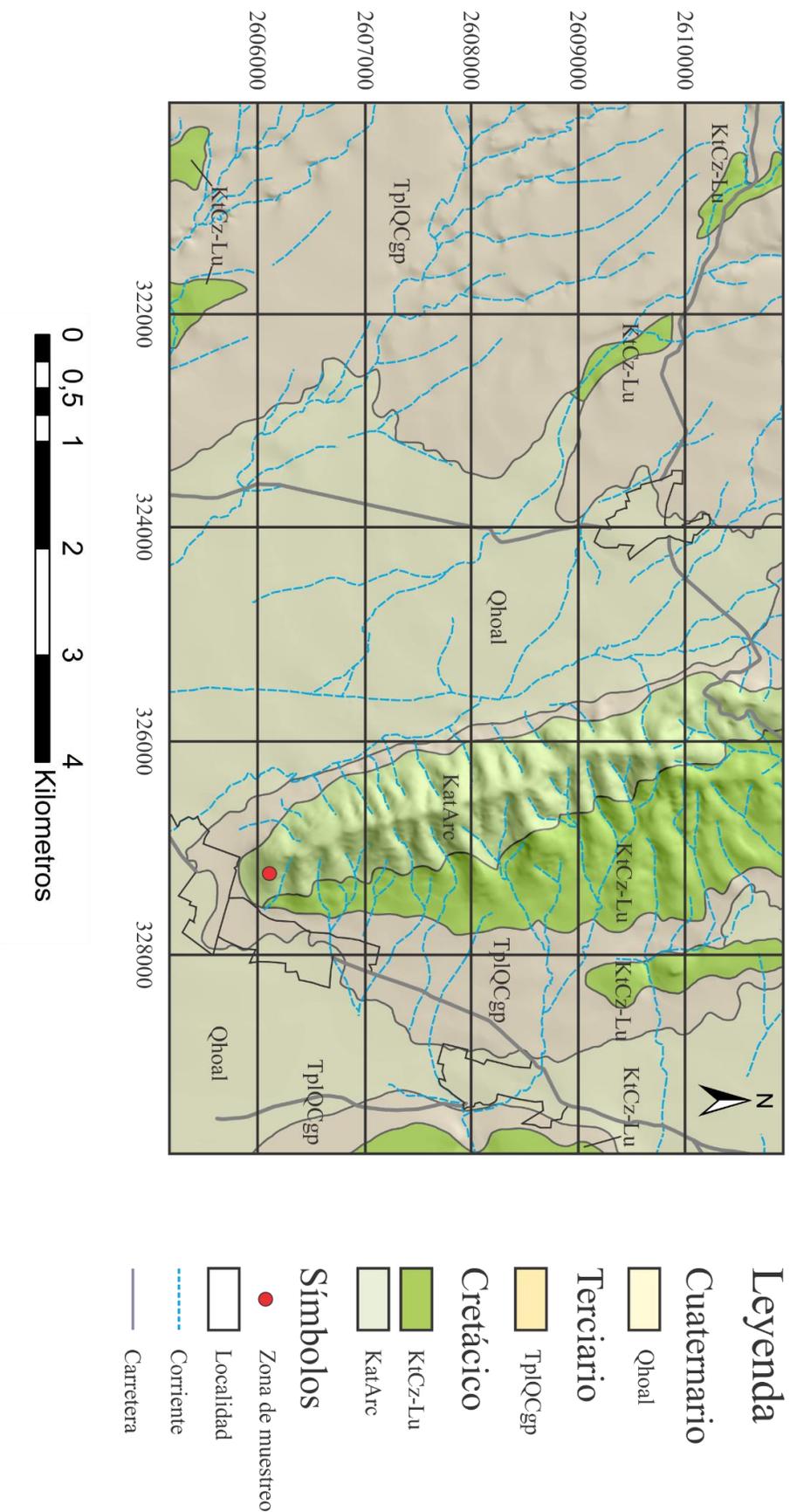


Figura 17. Mapa de la zona de muestreo Cerro de Calabacillas. Modificado de SGM.

3. Procesos químicos y difracción de rayos X.

3.1. Laboratorio

La práctica de disolución del carbonato de calcio en rocas que contienen arcilla, ha sido ampliamente discutida a lo largo de los años. Ya que a cierta cantidad de ácido, temperatura y concentración; puede haber un cambio en la estructura de los minerales arcillosos.

Mathers *et al.*, (1954), reporta que la montmorillonita, beidelita y nontronita, cambian espontáneamente en arcillas enriquecidas en Al. Las tasas de conversión de arcillas enriquecidas en H a Al, eran lentas a una temperatura de 0° C. Pero a una temperatura alrededor de 100°C, la mayoría de las montmorillonitas enriquecidas en H cambiaban a montmorillonitas saturadas de Al dentro de 24 h. El tratamiento de montmorillonitas con soluciones de ácido clorhídrico a 80°C, resultó en la remoción de una gran cantidad de Fe, Mg y Al. Los residuos del tratamiento en ácido caliente, actúan como una mezcla esencialmente de montmorillonita inalterada y SiO₂, en lugar de un nuevo mineral.

Los minerales expansivos o aquellos con constituyentes expansivos, son los más susceptibles a reacciones por ácido. Aparentemente ninguna reacción apareció en las curvas de la difracción de rayos x entre los minerales arcillosos no expansivos en soluciones de ácido acético de 16.6 M y en soluciones de ácido clorhídrico con concentraciones de 10 M, por 72 h (Ostrom, 1961).

Carrol (1971), experimentó con muestras estandarizadas de minerales arcillosos, montmorillonita, illita, caolinita y haloisita. Tamizó las muestras con una malla 0.053

mm, secó en un horno a 80°C por algunas horas y las almacenó en un desecador. Colocó ácido clorhídrico al 6.45 N por 10 días. Las curvas de difracción de rayos x de los minerales arcillosos tratados con ácido clorhídrico permanecen casi inalteradas comparándolas con los minerales arcillosos sin tratar.

Cook (1992), propone que con 80 ml de ácido clorhídrico, dejando a una hora a temperatura ambiente demuestra tener menos efecto en la disolución en las arcillas, esto se comprueba con los difractogramas de rayos x, ya que en las gráficas sólo existe un pequeño afilamiento en los picos 001 y no una desaparición de estos.

Herrera-Rico (2015), hizo digestión ácido en ácido clorhídrico al 10 N, en cinco gramos de muestra de caliza pulverizada. Las muestras fueron evaporadas sobre el ácido clorhídrico en las placas de calentamiento a 85°C durante varias horas, hasta que solamente quedara el sedimento. Las muestras fueron dejadas a enfriar durante 20 minutos y después se les volvió a verter ácido clorhídrico. Esto se hizo hasta que las muestras dejaron de tener efervescencia. Las muestras fueron colocadas en la centrifuga durante 10 minutos a 3000 revoluciones por minuto y luego decantadas; fueron lavadas con agua desionizada y centrifugadas hasta que tuvieron un pH básico (7), que fue verificado con las tiras de pH. Las muestras que fueron mandadas al laboratorio para difracción de rayos x de este método, eran de roca total, no del material insoluble.

Posiblemente hubo un cambio o destrucción de algunos minerales con este método, por esta razón en este trabajo se hicieron algunos cambios a la metodología.

A partir de estas metodologías, se elaboró una que sirviera mejor al propósito de este trabajo; ya que es necesario remover la parte de CaCO_3 de las muestras para analizar la fracción insoluble en difracción de rayos x.

Se prepara el ácido necesario para las muestras, esto se hace con la siguiente fórmula.

$$g = \frac{N(ml)(Pm)}{1000}$$

Fórmula 1.

g= Gramos

N= Normal

ml= Mililitros de la Muestra (1000 ml)

Pm= Peso molecular del ácido clorhídrico (36.46097)

$$g = \frac{10 (500ml)(36.46097)}{1000}$$

Fórmula 2.

g = 182.30485.

Pureza del ácido clorhídrico = 37.25 %

La densidad del ácido clorhídrico = 1.16 g/ml

$$182.30485 \text{ g} = 37.25\%$$

$$X = 100\%$$

X = 489.4089 g.

$$V = \frac{m}{d}$$

Fórmula 3.

v = volumen

m = masa

d = densidad

$$V = \frac{489.4089g}{1.16g/ml} = 421.9042 ml$$

Fórmula 4.

Con la fórmula general (Fórmula 1 y 2), se sacan los gramos necesarios de ácido clorhídrico. En la Fórmula de volumen (Fórmula 3) se despejan los valores para tener los mililitros de ácido clorhídrico (421.9042 ml) que se necesitan en medio litro de solución (Fórmula 4), el restante es del agua desionizada.

Después de esto, las muestras son cortadas (Figura 18 A), y pulidas (Figura 18 B), para crear un archivo fotográfico para la caracterización de las estructuras sinsedimentarias. Las muestras se vuelven a cortar y son golpeadas con un marro; para dejarlas en un tamaño esquirta menor a 8 mm. Las muestras son introducidas a un molino mecánico (Figura 18 C), donde serán pulverizadas a un tamaño menor de 10 μ m. Se ponen las muestras en vasos de precipitado y en una balanza electrónica, para obtener un total de muestra aproximado a cinco gramos (Figura 19 A).

Las muestras son introducidas a una estufa de secado durante cuatro horas a 60 °C (Figura 18 D); las muestras contienen arcillas y estas tienden a tomar humedad del ambiente e hidratarse. Al finalizar las cuatro horas, se ponen en un desecador durante 15 minutos (Figura 20 A). Se vuelven a introducir a la báscula, si existe un cambio de peso, se vuelve a repetir el procedimiento. Si el segundo pesaje no difiere mucho del tercero, se hace un promedio para tomar esto como el peso final.

Las muestras son dejadas en una campana (Figura 19 C), para verterles 10 ml de ácido clorhídrico (Figura 19 C). Después, son puestas en una plancha de calentamiento a 90 °C (Figura 19 B), durante media hora. Pasado el tiempo, las muestras se verterán en los tubos de ensaye (Figura 20 B) y serán colocados en la centrifuga, por un plazo de 10 minutos a 3000 revoluciones por minuto (Figura 20 C). En el primer centrifugado, las muestras son decantadas para quitar el excedente de ácido clorhídrico, en los siguientes dos centrifugados, se hacen los lavados de la muestra; estos se realizan colocando agua desionizada dentro de los tubos de ensaye, para después agitarlos. Posterior a esto, son decantados y vaciados en los vasos precipitados. Las muestras son colocadas en las planchas de calentamiento, hasta que quede completamente seco el sedimento. Este procedimiento se repetirá hasta que dejen de tener efervescencia las muestras.

El material que no hizo efervescencia será tomado como material insoluble, este consiste de minerales arcillosos y minerales no arcillosos, se anexará en las tablas y algunas de las muestras serán mandadas al laboratorio del Instituto de Metalurgia, para hacer el estudio de difracción de rayos x.

Trabajos previamente realizados (Herrera–Rico, 2015), demostraron que se puede hacer un modelo aproximado de la cantidad de arcillas necesarias para que una muestra de caliza pase de una deformación frágil a dúctil. Con el análisis de un numero mayor de muestras y con un el estudio del material insoluble con difracción de rayos x, se procura dar valores mucho más certeros en cuanto a la eficacia del método.



Figura 18. Aparatos utilizados en el proceso de preparación de las muestras. A) Cortadora, B) Pulidora, C) Molino de ágata, D) Horno

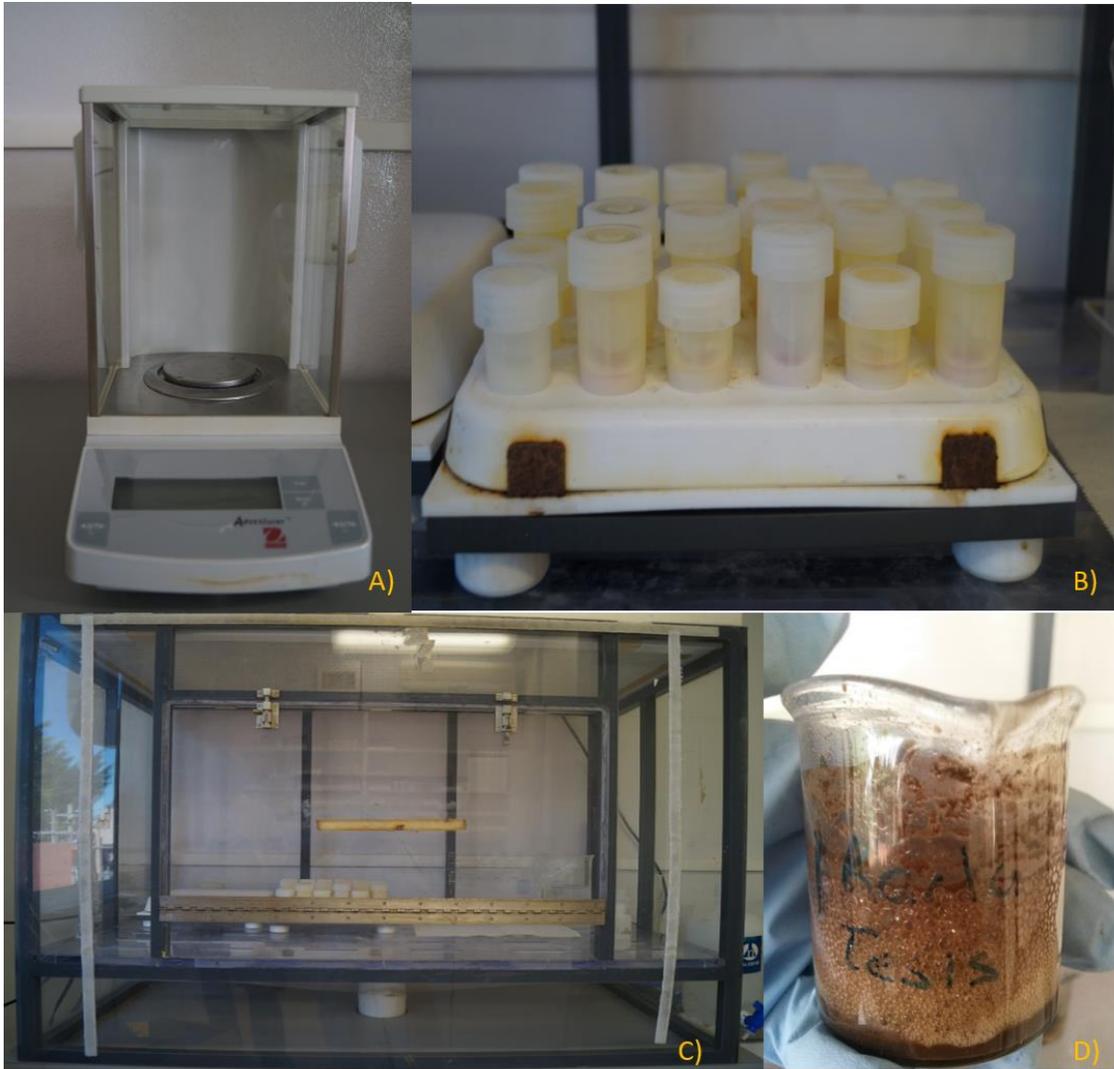


Figura 19. A) Balanza electronica, B) Placa de calentamiento, C)Campana de laboratorio, D) Muestras haciendo efervecencia.

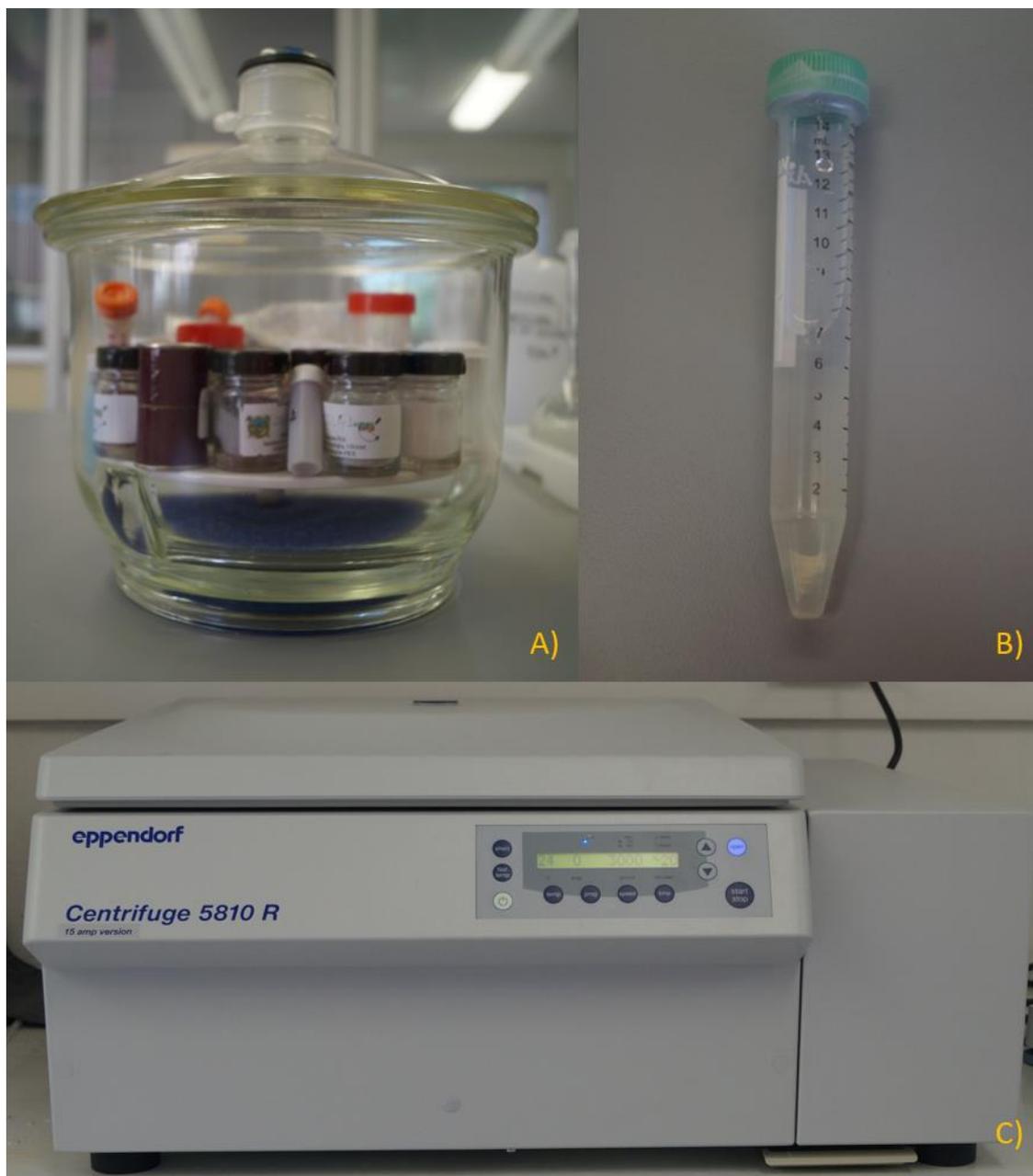


Figura 20. A) Desecador, B) Tubos de ensaye, C) Centrifuga.

3.2. Difracción de rayos x.

La difracción de rayos x, es la técnica más común utilizada para estudiar las características de la estructura cristalina y para determinar la mineralogía de sedimentos de grano fino, especialmente arcillas. Como técnica, la difracción de rayos x es atractiva debido a su velocidad y facilidad de rendimiento, y porque requiere solo pequeñas cantidades de material, no es destructiva, y puede usarse para análisis semicuantitativos de mezclas polimineraleas. (Poppe *et al.*, 2002)

La difracción de rayos x es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de x, de una determinada longitud de onda (10 – 0.01 nanómetros), con una sustancia cristalina. La difracción de rayos x se basa en la dispersión coherente del haz de rayos x por parte de la materia (se mantiene la longitud de onda de la radiación) y en la interferencia constructiva de las ondas que están en fase y que se dispersan en determinadas direcciones del espacio. (SGM, 2017).

El fenómeno de la difracción puede describirse con la Ley de Bragg (Ecuación 1), que predice la dirección en la que se da interferencia constructiva entre haces de rayos X dispersados coherentemente por un cristal:

$$n \lambda = 2 d \text{ sen } \theta$$

Ecuación 1.

λ : longitud de onda del haz incidente de rayos x.

d: distancia entre los planos difractantes en cuestión, e. d. la distancia interplanar o el espacio del grupo de planos reticulares sobre el cual incide la radiación.

θ : ángulo de incidencia (también ángulo BRAGG) medido entre los planos en consideración y el haz incidente.

La difracción de rayos x en muestra policristalina permite abordar la identificación de fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico) tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo

Los rayos x se generan en el tubo, que es una ampolla al vacío que alberga al electrodo positivo (ánodo) y el negativo (cátodo). El cátodo contiene un filamento de tungsteno por donde viajan los electrones producidos por una diferencia de potencial de 45,000 voltios, que chocan con el blanco de cobre (puede ser de Mo, Fe, Co, etc.). Los electrones que chocan con el blanco producen los rayos x de fondo que atraviesan por una ventana de berilio que, debido a su bajo número atómico, permite el paso de los rayos x. La información que se obtiene a partir de los difractogramas permite determinar el sistema cristalino al que pertenece el compuesto, así como los parámetros de celda, es decir, la unidad mínima con que se organiza un cristal. Con las intensidades de las reflexiones es posible determinar la distribución de los átomos dentro de la celda (análisis estructural). La geometría de los perfiles en los “picos” o máximos de difracción, permite determinar el tamaño de los cristales. (Aparicio–Ceja *et. al.*, 2010).

Las muestras fueron montadas en un difractómetro de rayos x *Bruker D8 Advance* (Figura 21) con la metodología del Manual de laboratorio de difracción de rayos x en polvo (Poppe *et al.*, 2002). La orientación aleatoria del montaje de muestra en polvo asegura que el rayo x incidente tenga una oportunidad equitativa de difractar cualquier cara del enrejado cristalino de los minerales en la muestra.

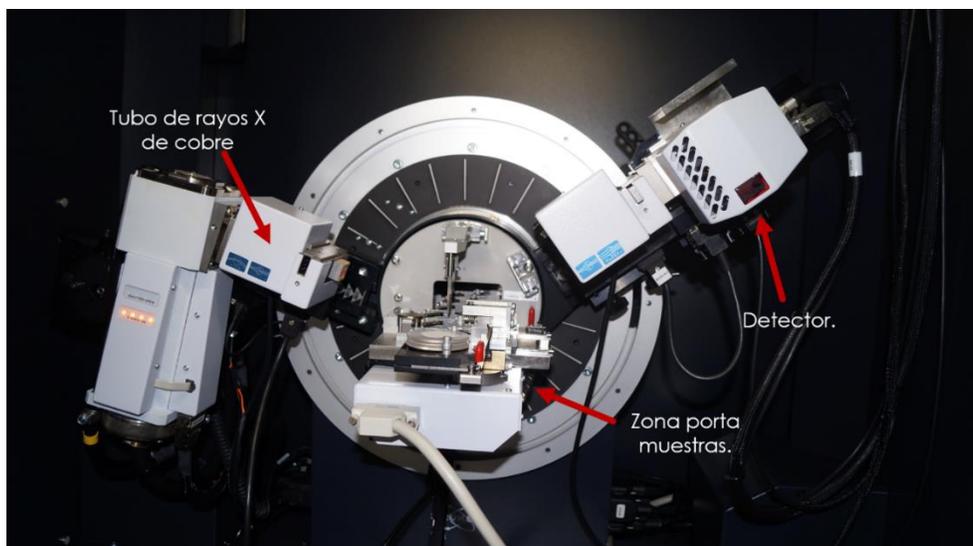


Figura 21. Difractor de rayos X utilizado para analizar las muestras.

Primeramente se muele la muestra en un mortero de ágata. La muestra es pasada en una malla de 0.062 mm. Se coloca la muestra en el porta muestras a presión con una lámina (aproximadamente 100 mg) y finalmente se monta en el aparato (figura 19).

Los difractogramas fueron analizados y refinados con el *software Match 3!* y el método de Rietveld. El método Rietveld refina los parámetros seleccionados por el usuario para minimizar la diferencia entre un patrón experimental (datos observados) y el de un modelo basado en la estructura cristalina hipotética y los parámetros instrumentales (patrón calculado). Puede refinar la información sobre una estructura monocristalina, la información sobre una muestra sola y refina la información sobre una muestra multifase; determina las cantidades relativas de cada fase. (Will, 2006).

4. Resultados químicos de difracción de rayos X y petrográficos.

En total se analizaron 76 muestras de tres diferentes zonas de muestreo; de las cuales, en su totalidad se hizo una descripción del tipo de estructura sinsedimentaria y digestión con ácido clorhídrico. De las 76 muestras, se seleccionaron 47 para elaborar análisis de difracción de rayos x en el material insoluble; y se tomaron 11 muestras para descripción de láminas delgadas.

La primera columna es para el nombre que se le asignó en el laboratorio a las muestras. La segunda columna es el peso inicial de la muestra de caliza pulverizada en el molino de ágata. La tercera columna es el peso final, después de la metodología de digestión ácida. La cuarta columna es el porcentaje de insolubles y este se saca por medio de una regla de tres.

$$\text{Peso inicial} = 100\%$$

$$\text{Peso final} = \% \text{ Insolubles (X)}$$

Fórmula 4.

El peso inicial es el 100 % del material y se necesita el porcentaje del peso final (Fórmula 4); el porcentaje de insolubles es igual al Peso final multiplicado por 100 (%) y dividido por el Peso inicial (Fórmula 5).

$$\% \text{ Insolubles} = \frac{\text{Peso final} * 100}{\text{Peso inicial}}$$

Fórmula 5.

% Insolubles: Porcentaje de material que no se disolvió en ácido clorhídrico.

Peso inicial: Peso total en gramos de la muestra.

Peso final: Peso del material después de la digestión en ácido clorhídrico.

La quinta columna o porcentaje de arcillas está proporcionado por el programa Match 3! En base al refinamiento de Retvield. El programa proporciona una cantidad porcentual a los minerales que se encuentran en la muestra del material insoluble, esto quiere decir, que cada mineral tiene un porcentaje del total de la muestra. De esta manera sólo se toman en cuenta los minerales arcillosos del material insoluble teniendo la siguiente fórmula (Fórmula 6).

$$\% \text{ Insolubles} = 100 \% (\Sigma \text{ Minerales insolubles}).$$

$$\% \text{ Arcillas (X)} = \Sigma \text{ de Minerales Arcillosos}.$$

Fórmula 6.

Se efectúa una regla de tres, en donde el porcentaje de arcillas es igual a la multiplicación de la sumatoria de los minerales arcillosos por el porcentaje de material insoluble dividido entre el 100 % de los minerales insolubles o sumatoria porcentual de minerales insolubles en la muestra.

$$\% \text{ Arcillas} = \frac{\Sigma \% \text{ Arcillas} * \% \text{ Insolubles}}{100}$$

Fórmula 7.

% Arcillas: Porcentaje de arcillas contenido en el material insoluble.

% Insolubles: Porcentaje de material que no se disolvió en ácido clorhídrico.

La sexta columna nos indica si las muestras fueron mandadas al laboratorio de difracción de rayos X. La séptima columna nos define la arcilla predominante por medio de la difracción de rayos x y el programa Match 3! y el refinamiento de Retvield. La última columna es la estructura sinsedimentaria encontrada por medio de la caracterización visual en muestra de mano.

En cuanto a los microfósiles que se encontraron por el análisis de microscopio fueron principalmente fauna plantónica, foraminíferos *globotruncanas* (GL), *globigerinas* (GLO), *heterohelix* (H), *miliólidos* (M), *calcisferas* (C), espinas de equinodermos (E), granos no esqueléticos *peloides* (P), *Ooides* (O).

Los resultados de los cinco gramos que fueron digeridos en ácido y después mandados al laboratorio de metalurgia, con su respectiva descripción de la estructura son los siguientes.

4.1. Zona de muestreo Cerro del Toro.

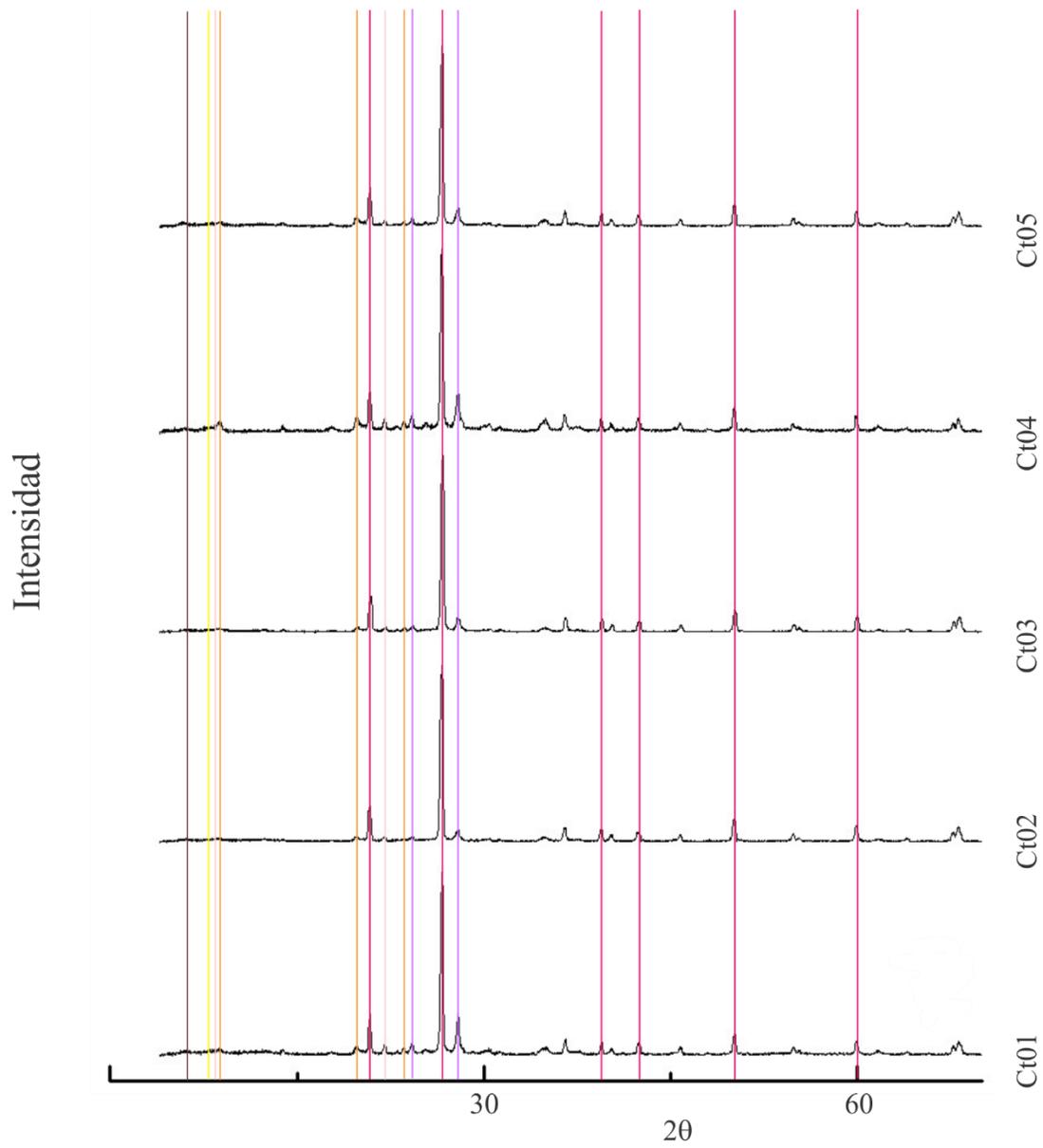
Muestra	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% Insolubles	% Arcilas	XRD	Arcilla predominante	Estructura
CT01	5.312	0.644	12.096	1.572	SI	llita	Laminada
CT02	5.583	1.100	19.648	2.240	SI	llita	Laminada
CT03	6.054	1.783	29.231	9.676	SI	llita	Pliegue
CT04	5.279	1.563	29.492	6.636	SI	llita	Pliegue
CT05	5.088	0.822	16.118	2.305	SI	llita	Laminada
CT06	5.230	0.593	11.192	1.981	SI	llita	Falla
CT07	5.474	0.587	10.870	1.478	SI	llita	Falla
CT08	5.249	0.749	14.132	2.784	SI	llita	Pliegue
CT09	5.743	0.620	10.879	2.143	SI	llita	Pliegue
CT10	5.451	1.502	27.811	2.948	SI	llita	Laminada
CT11	5.458	0.788	14.593				
CT12	5.512	0.927	16.853	1.753	SI	llita	Laminada

Tabla 1. Resultados de la digestión ácida de la zona de muestreo Cerro del Toro

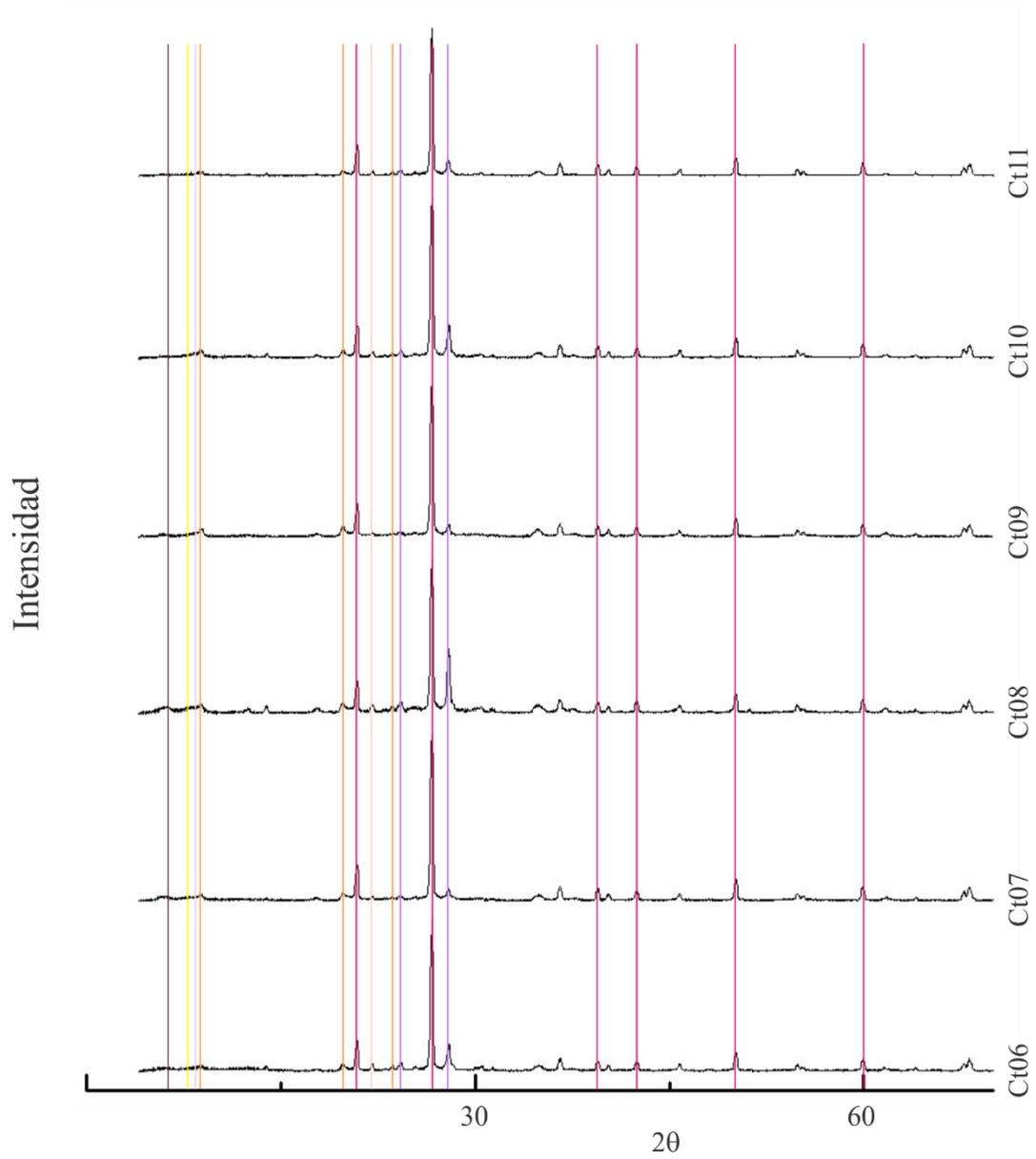
Las muestras de esta zona de muestreo inician con las letras CT para distinguirlas más adelante (Tabla 1). El peso inicial fue el primer pesaje en gramos de la muestra pulverizada. El peso final es el peso de la muestra después de la digestión con ácido clorhídrico; que oscila entre 0.6 g y 1.5 g. Del peso final se sacó el porcentaje de insolubles, que en esta zona de muestreo tiene como valor mínimo 10.87 % a 29.5 % como máximo; esto indica que en esta zona se disolvió aproximadamente una cantidad mayor del 70 % del CaCO_3 de la roca caliza. La arcilla predominante en esta zona es la illita, pero también se tienen minerales arcillosos como caolinita y montmorillonita (Anexos 1), y minerales no arcillosos como cuarzo, calcita, biotita, albita y anortita. La estructura sinsedimentaria predominante es laminada, pero también es considerable la cantidad de muestras con estructura sinsedimentaria de pliegue.

Las láminas delgadas de la zona fueron las muestras CT01, CT06 y CT09 (324324, 2482780), (Anexo 1) cuentan con matriz micrítica (70 % - 80 %) y una masa básica microesparítica / esparita (45 %), los bioclastos se encuentran en porcentaje del 20 % al 55%. En cuanto a los microfósiles se encontró principalmente fauna plantónica, abundancia en foraminíferos *globotruncanas* (GL), *globigerinas* (GLO), *heterohelix* (H), *miliólidos* (M), *calcisferas* (C), espinas de equinodermos (E), granos no esqueletales *peloides* (P), *Ooides* (O). Las muestras tienen estructuras de *wackstone* y *grainstone*.

La parte insoluble se analizó con difracción de rayos x, los resultados son los siguientes:



Difractograma 1. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.



- Cuarzo
- Albita
- Illita
- Montmorillonita
- Biotita
- Caolinita

Difractograma 2. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.

En los difractogramas de rayos X analizados (Difractogramas 1 y 2) del material insoluble que quedó después de la digestión en ácido clorhídrico en la zona de muestreo Cerro del Toro, se tiene el cuarzo como el mineral predominante, en fracción disuelta. Otros minerales no arcillosos que también se encontraron fueron; albita y biotita. La illita se halló en mayor proporción en comparación con los otros minerales arcillosos como montmorillonita y caolinita.

4.2. Zona de muestreo Sierra del Meco.

Muestra	Peso inicial (g)	Peso Final (g)	% Insolubles	% Arcilas	XRD	Tipo de arcilla	Estructura
SM01	5.121	0.561	10.964	0.252	SI	Montmorillonita	Pliegue
SM02	5.026	0.236	4.713	0.089	SI	Montmorillonita	Falla
SM03	5.081	0.395	7.780	5.827	SI	Montmorillonita	Pliegue
SM04	5.331	0.565	10.599	0.132	SI	Montmorillonita	Pliegue
SM05	5.013	0.781	15.588	7.966	SI	Illita	Pliegue
SM06	5.175	0.815	15.762	9.914	SI	Caolinita	Pliegue
SM07	5.014	0.631	12.594	0.179	SI	Montmorillonita	Pliegue
SM08	5.072	0.515	10.155	3.465	SI	Illita	Pliegue
SM09	5.018	0.399	7.969	1.280	SI	Montmorillonita	Pliegue
SM10	5.074	0.743	14.646	2.185	SI	Montmorillonita	Pliegue
SM11	5.390	0.788	14.634	2.368	SI	Montmorillonita	Pliegue
SM12	5.082	0.269	5.293	0.709	SI	Montmorillonita	Falla
SM13	5.176	0.747	14.433	6.647	SI	Hectorita	Pliegue
SM14	5.249	1,109	21.134	6.802	SI	Dickita	Pliegue
SM15	5.019	0.836	16.666	5.861	SI	Hectorita	Laminada
SM16	5.134	0.754	14.698	3.530	SI	Montmorillonita	Pliegue
SM17	5.364	0.778	14.514	2.184	SI	Hectorita	Pliegue
SM18	5.264	1.04	19.757	3.421	SI	Caolinita	Pliegue
SM19	5.178	0.666	12.881	8.370	SI	Illita	Laminada
SM20	5.332	0.942	17.668	5.352	SI	Caolinita	Pliegue

Tabla 2. Resultados de la digestión ácida de la zona de muestreo Sierra del Meco.

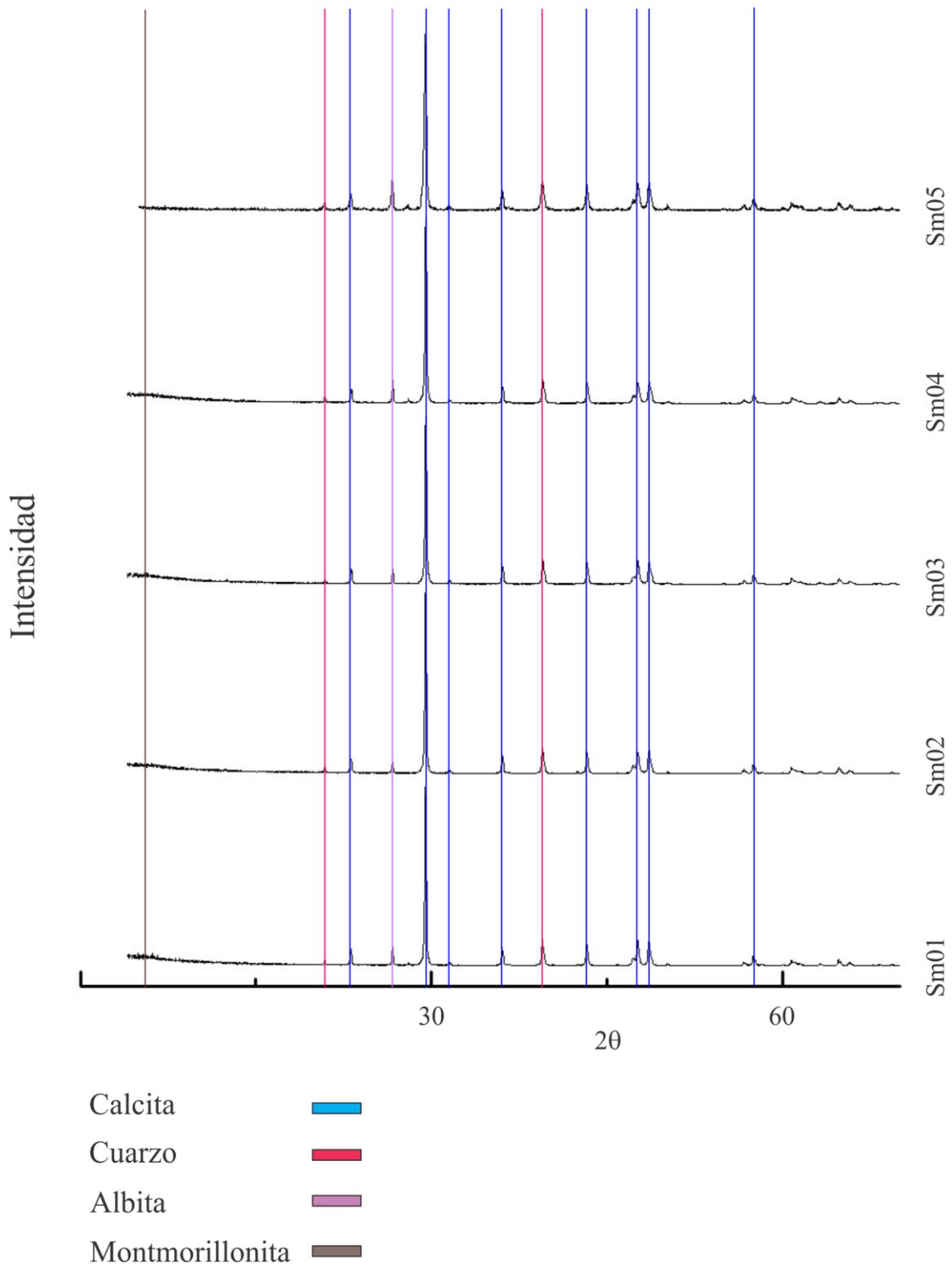
El nombre de las muestras de la zona de muestreo Sierra del Meco inician con las letras SM más el número de muestra. El peso inicial varía de 5.01 a 5.4 g mientras que el peso final va de 0.236 g a 1.10 g, lo que significa que se desintegraron aproximadamente 4 g de muestra de CaCO_3 de caliza (Tabla 2). El porcentaje de insolubles es el porcentaje del peso final y va desde 4.7 a 21.13 %; se disolvió más del 80 % del CaCO_3 de la roca caliza. El porcentaje total de arcillas de las rocas es de 0.08 % a 9.91 %; lo cual nos indica que son una calizas más puras, si sólo se toma en cuenta el porcentaje de arcillas y no el porcentaje total de material insoluble.

La arcilla predominante es montmorillonita y la estructura sinsedimentaria más común es la de pliegue.

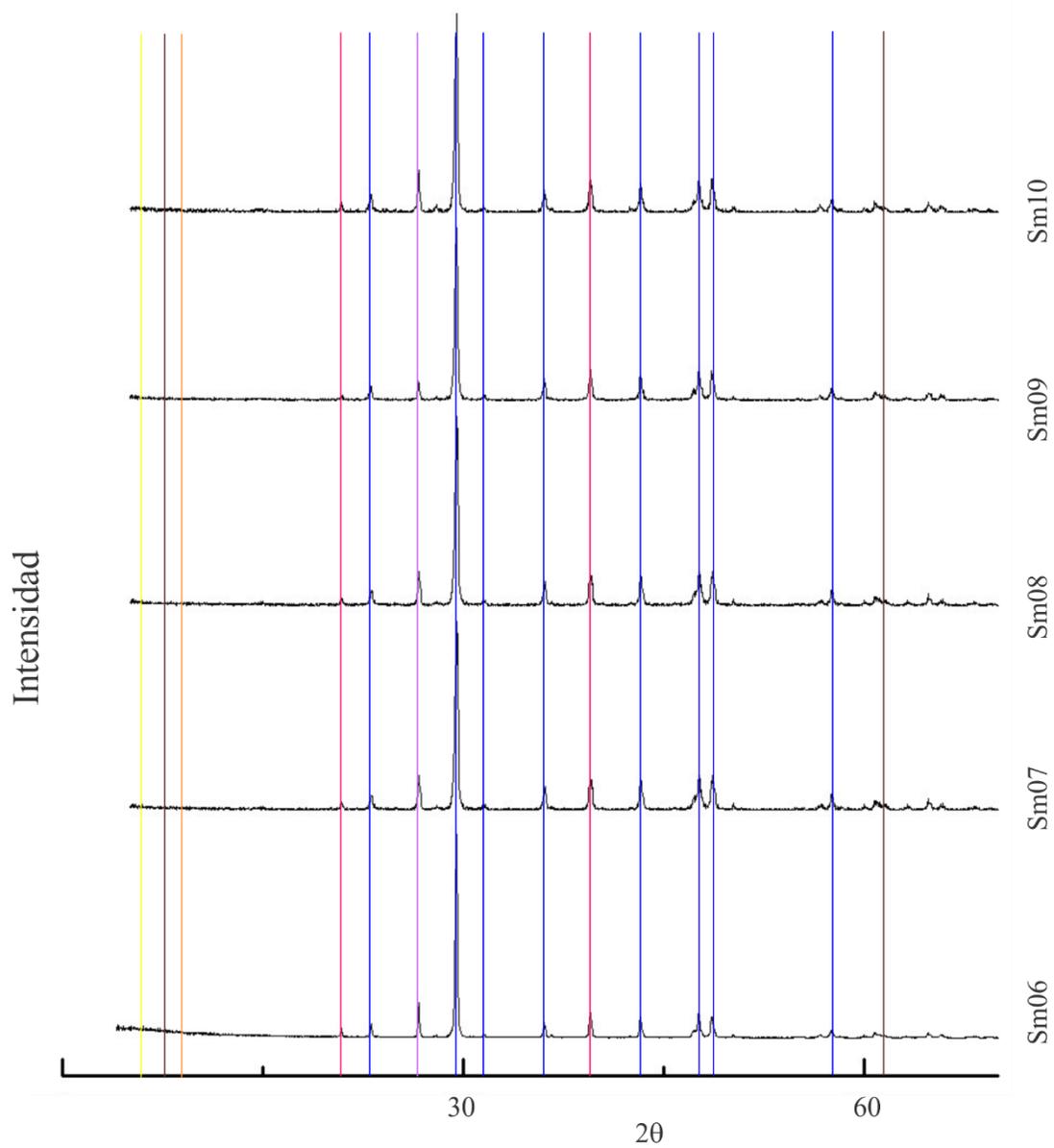
Las muestras estudiadas en láminas delgadas fueron la SM07, SM12 y la SM19.

Las láminas delgadas tenían una masa básica microesparítica en un 70 % y componentes bioclásticos en un 30% (Anexos 2). En cuanto a los microfósiles se encontró principalmente fauna plantónica, abundancia en foraminíferos *globotruncanas* (GL), *globigerinas* (GLO), *heterohelix* (H), *miliólidos* (M), *calcisferas* (C), espinas de equinodermos (E), granos no esqueléticos *peloides* (P), *Ooides* (O).

Las tres muestras son de textura *wackstone*.

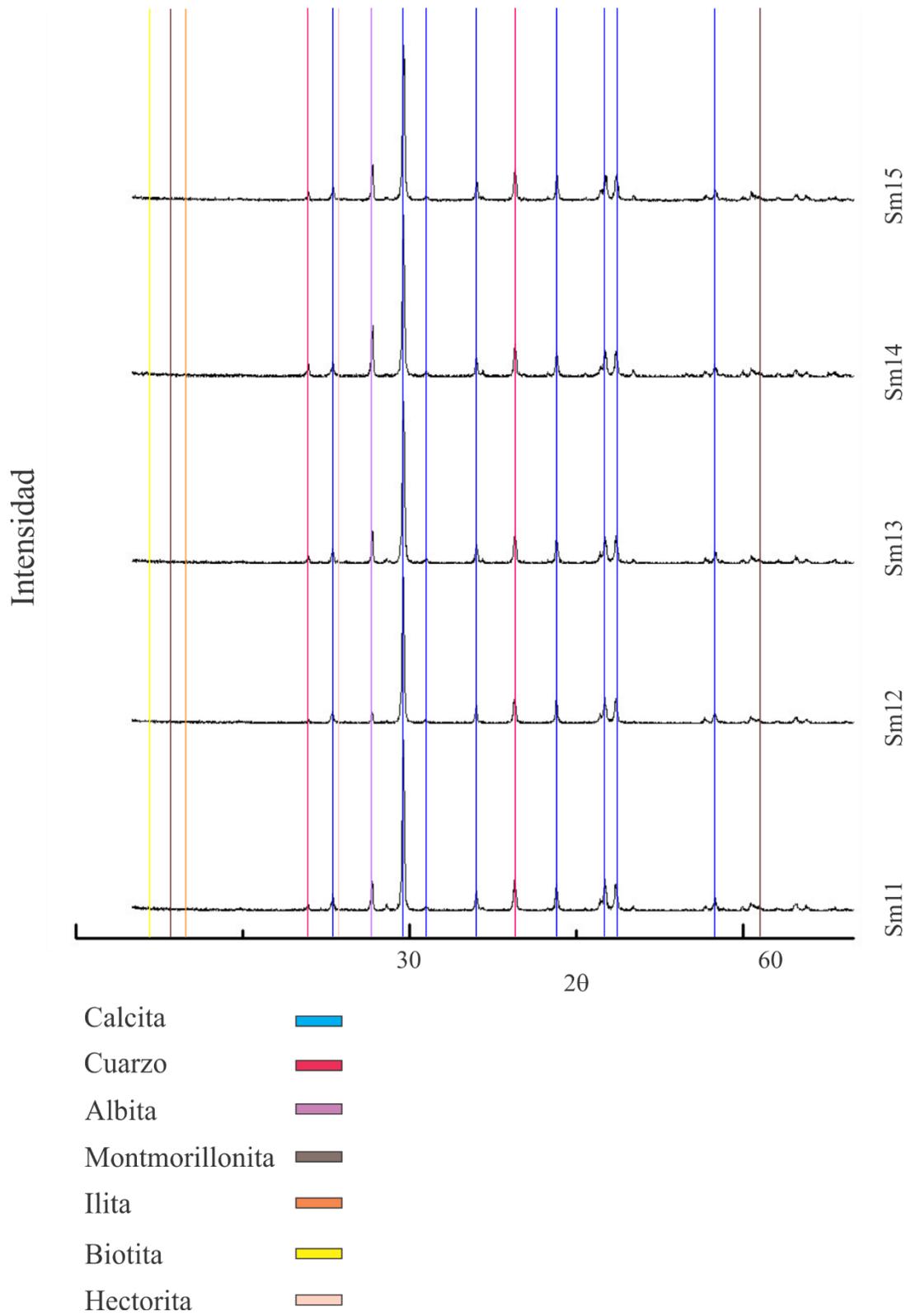


Difractograma 3. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.

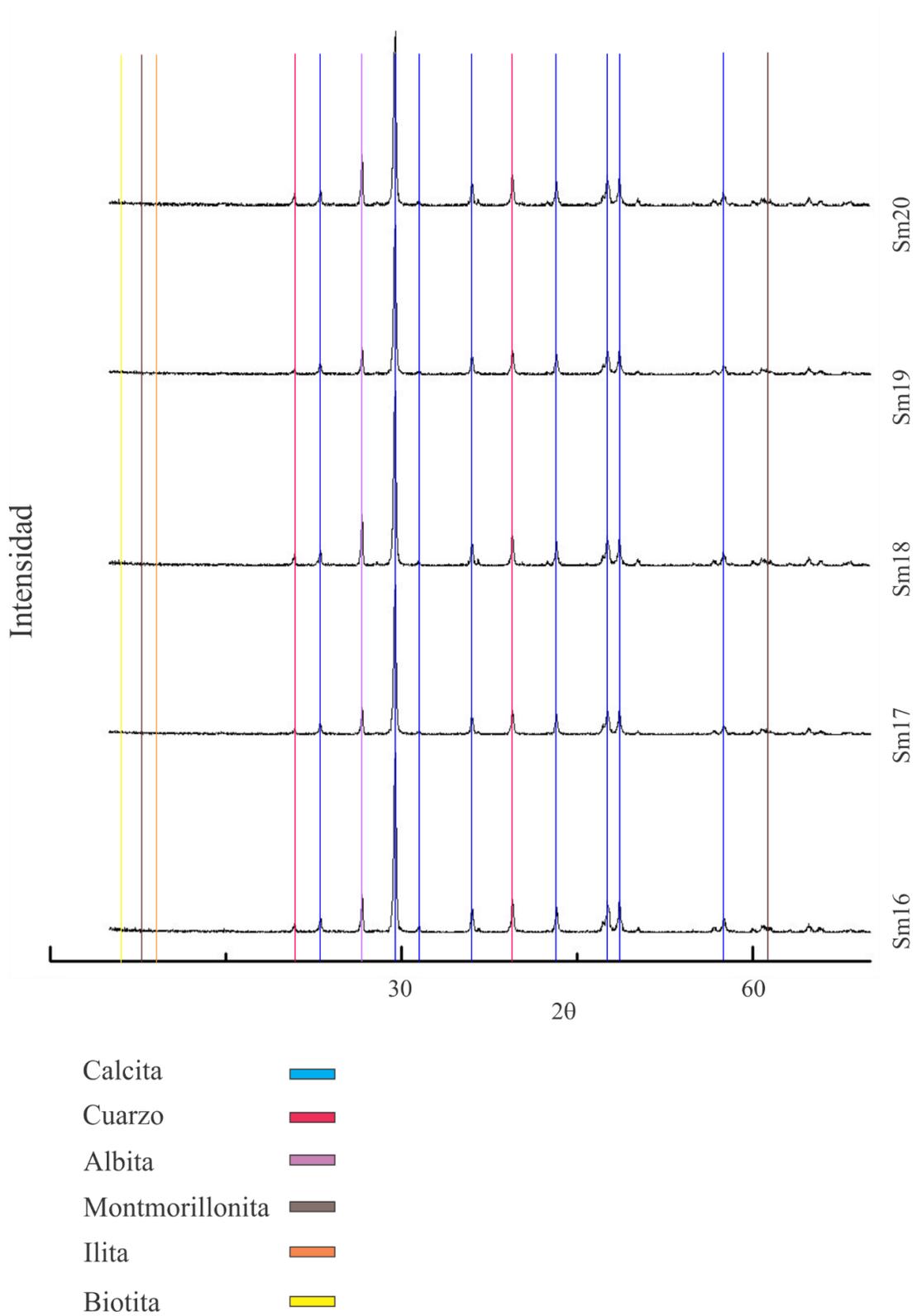


- Calcita
- Cuarzo
- Albita
- Montmorillonita
- Illita
- Biotita

Difractograma 4. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.



Difractograma 5. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.



Difractograma 6. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.

En los difractogramas de rayos x analizados (Difractogramas 3, 4, 5 y 6) del material insoluble que quedó después de la digestión en ácido clorhídrico en la zona de muestreo Sierra del Meco, se tiene la calcita como el mineral predominante. Otros minerales no arcillosos que también se encontraron fueron; cuarzo, albita y biotita. El mineral arcilloso con mayor predominancia fue la montmorillonita. Algunas muestras cuentan con illita.

4.3. Zona de muestreo Cerro de Calabacillas.

Muestra	Peso inicial	Peso Final	% Insolubles	% Arcilas	XRD	Tipo de arcilla	Estructura
CC01	5.051	0.285	5.650	0.588	SI	Ilita	Laminada
CC02	5.127	0.170	3.312	0.344	SI	Ilita	Falla
CC03	5.441	0.450	8.275		NO		Laminada
CC04	5.656	1.203	21.273	0.638	SI	Ilita	Laminada
CC05	5.190	0.350	6.746	0.270	SI	Caolinita	Laminada
CC06	5.168	3.195	61.817	1.360	SI	Ilita	Pliegue
CC07	5.529	0.386	6.991		NO		Laminada
CC08	5.596	0.366	6.546	0.700	SI	Ilita	Laminada
CC09	5.129	0.116	2.266		NO		Cz Pura
CC10	6.779	0.583	8.596	1.977	SI	Ilita	Laminada
CC11	5.219	0.791	15.167		NO		Pliegue
CC12	5.305	0.385	7.252	1.958	SI	Ilita	Falla
CC13	5.038	1.112	22.080		NO		Pliegue
CC14	5.245	1.046	19.939	2.732	SI	Ilita	Laminada
CC15	5.568	0.875	15.722		NO		Laminada
CC16	5.301	1.321	24.924	1.072	SI	Dickita	Laminada
CC17	5.404	0.313	5.786		NO		Laminada
CC18	5.861	0.607	10.364	2.000	SI	Ilita	Laminada
CC19	5.729	0.269	4.697		NO		Laminada
CC20	5.394	0.474	8.788		NO		Falla
CC21	5.483	0.319	5.825		NO		Laminada
CC22	5.670	0.519	9.146		NO		Laminada
CC23	5.179	0.256	4.939		NO		Laminada
CC24	5.309	0.423	7.971		NO		Laminada
CC25	5.223	0.430	8.243		NO		Laminada
CC26	5.092	0.535	10.507		NO		Laminada
CC27	5.172	0.782	15.123		NO		Pliegue
CC28	5.658	0.539	9.534	1.239	SI	Ilita	Laminada
CC29	5.416	0.346	6.398		NO		Laminada
CC30	5.122	0.688	13.422		NO		Laminada
CC31	5.474	0.377	6.886		NO		Laminada
CC32	5.037	0.280	5.551		NO		Pliegue
CC33	5.374	0.001	0.015		NO		Laminada
CC34	5.266	0.571	10.834		NO		Laminada
CC35	5.289	0.509	9.624		NO		Laminada

CC36	5.048	0.225	4.451		NO		Laminada
CC37	5.425	0.303	5.580		NO		Laminada
CC38	5.654	1.319	23.323	2.752	SI	Caolinita	Pliegue
CC39	5.638	1.074	19.045		NO		Pliegue
CC40	5.298	0.971	18.321	2.693	SI	Caolinita	Falla
CC41	5.327	0.807	15.155	1.031	SI	Dickita	Pliegue
CC42	5.461	0.974	17.829	0.820	SI	Ilita	Pliegue
CC43	5.120	0.745	14.558		NO		Pliegue
CC44	5.470	0.212	3.874		NO		Pliegue

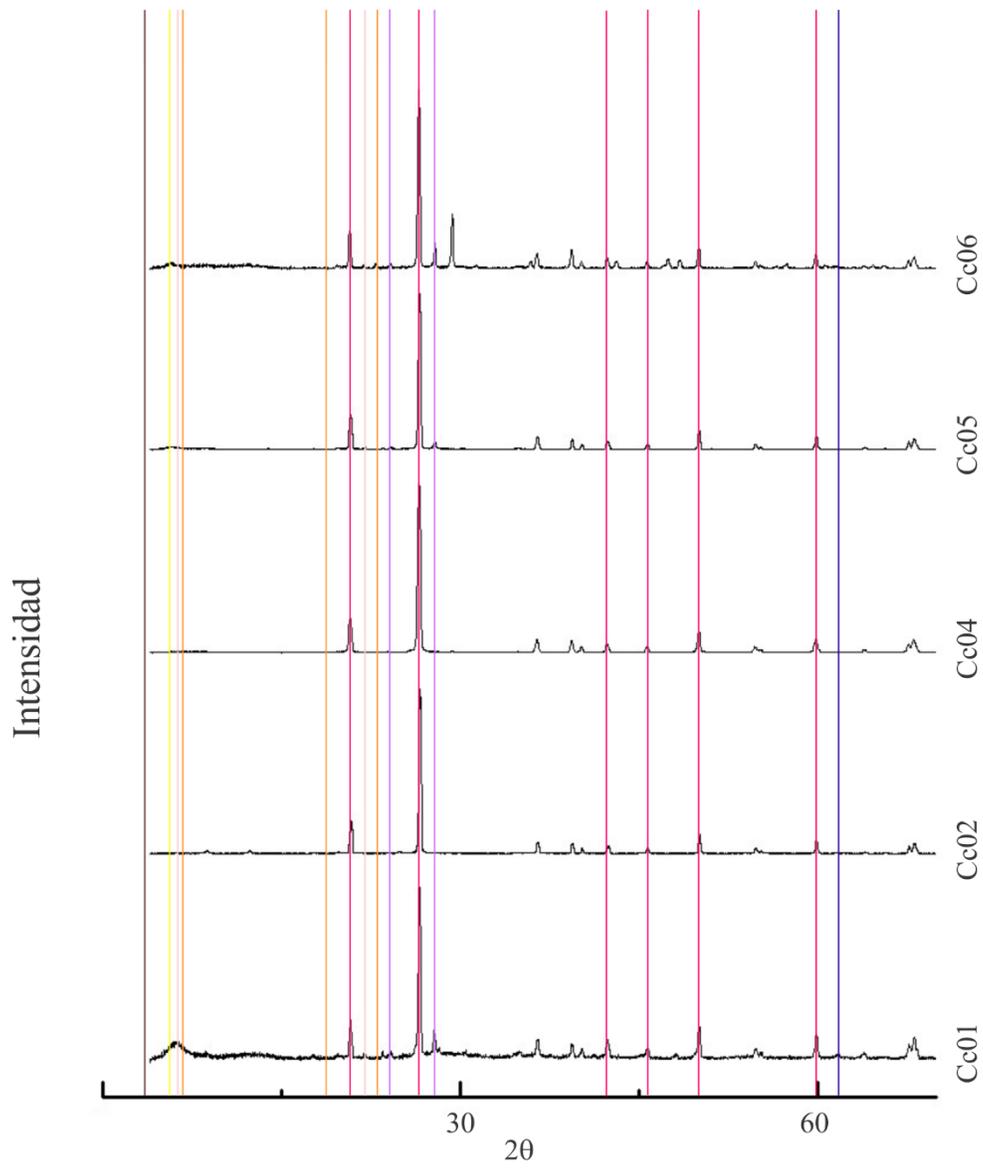
Tabla 3. Resultados de la digestión ácida de la zona de muestreo Cerro de Calabacillas.

El nombre de las muestras de la zona de muestreo de Cerro de Calabacillas inicia con las letras CC más el número que se les asignó en campo. El peso inicial de las muestras esta entre 5.03 g a 6.77 g y el peso final entre 0.001 g (CC33) y 3.2 g, por lo tanto con los pesos anteriores se puede observar que se disolvieron aproximadamente entre 0 y 2 g de muestra de caliza molida (Tabla 3). El porcentaje de insolubles de las muestras oscila de 0.015 (una caliza pura, muestra CC33) a 25 %; aunque existe una muestra con un porcentaje de 61.8 % (este ejemplar no fue utilizado, ya que se le tomó como una lutita). Un total de 16 muestras fueron seleccionadas por sus estructuras sinsedimentarias para realizarles difracción de rayos x.

Las muestras que fueron utilizadas para láminas delgadas fueron; CC02, CC06, CC07, CC29 y CC30. Las láminas delgadas de la zona de estudio en conjunto tienen una masa básica microesparítica / esparítica de 40 % al 70 %, contenido bioclástico de 30 % al 60% y cuentan con una textura que va desde el *mudstone* al *grainstone* (Anexo 3). En cuanto a los microfósiles se encontraron principalmente fauna plantónica, abundancia en foraminíferos *globotruncanas* (GL), *globigerinas* (GLO),

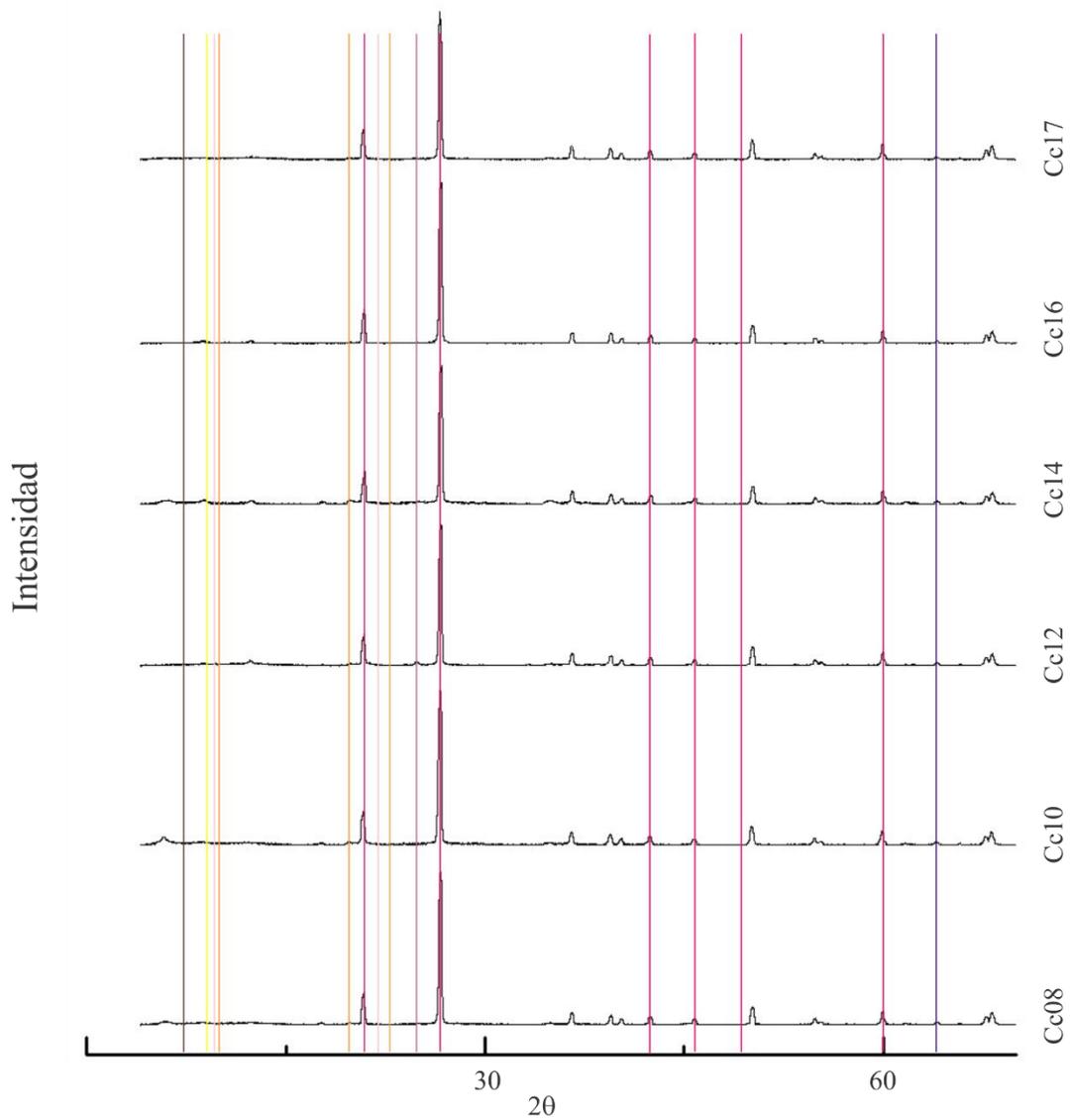
heterohelix (H), *miliólidos* (M), *calcíferas* (C), espinas de equinodermos (E), granos no esqueléticos *peloides* (P), *Ooides* (O).

La parte insoluble se analizó con difracción de rayos x, los resultados son los siguientes:



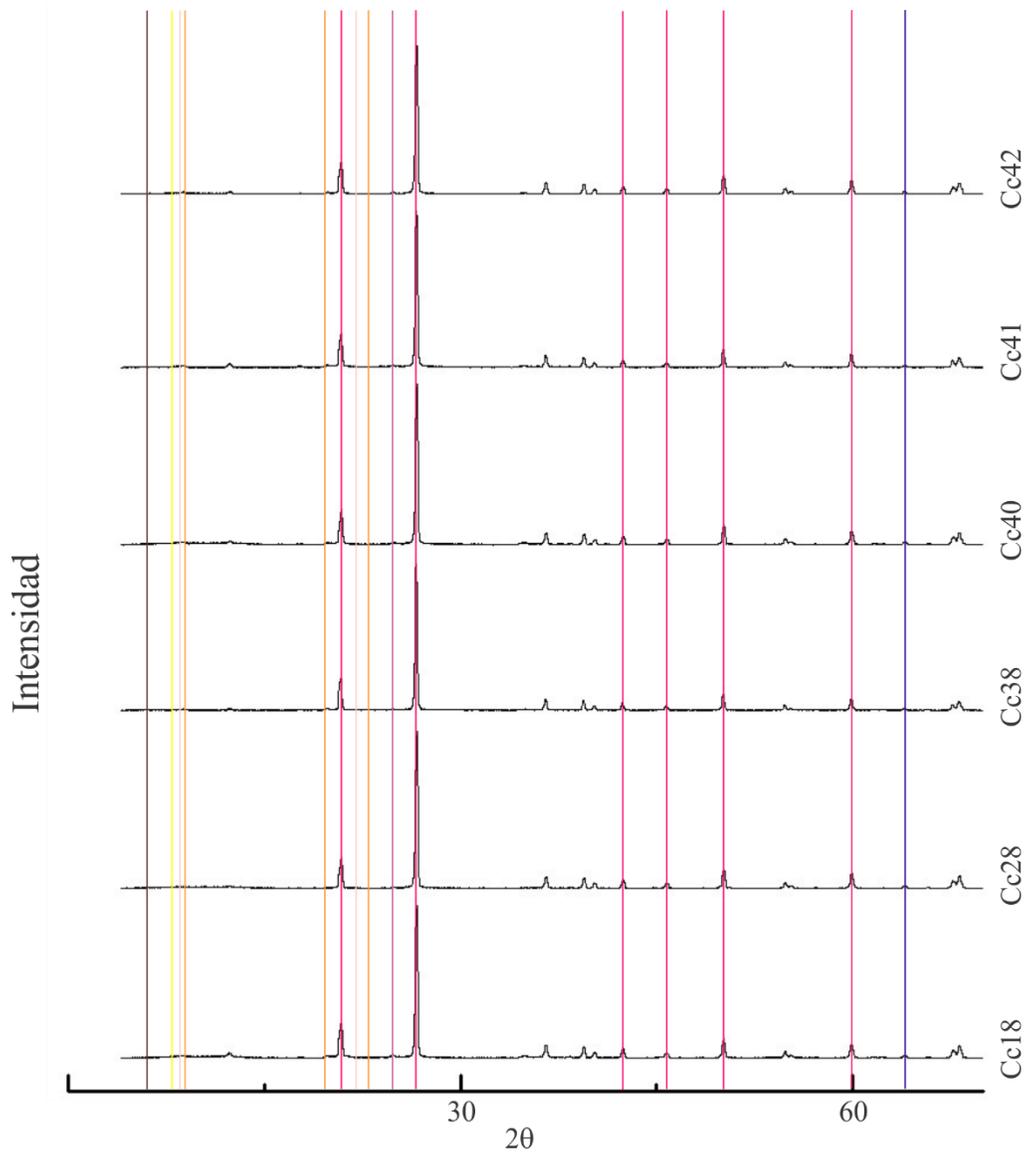
- Cuarzo
- Albita
- Ilita
- Montmorillonita
- Biotita
- Caolinita
- Pirita

Difractograma 7. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.



- Cuarzo
- Illita
- Montmorillonita
- Biotita
- Caolinita
- Pirita
- Dickita

Difractograma 8. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.



- Cuarzo
- Illita
- Montmorillonita
- Biotita
- Caolinita
- Pirita
- Dickita

Difractograma 9. Difractogramas de la zona de muestreo separados por minerales.

En los difractogramas de rayos x analizados (Difractogramas 7, 8 y 9) del material insoluble que quedó después de la digestión en ácido clorhídrico, en la zona de muestreo Cerro de Calabacillas, se tiene el cuarzo como el mineral predominante en fracción disuelta. Otros minerales no arcillosos que también se encontraron fueron; biotita y pirita. El mineral arcilloso con mayor predominancia fue la illita. También se encontraron otros minerales arcillosos como; caolinita y dickita.

5. Aspectos deposicionales en secuencias calizas-margas y su influencia en la deformación sinsedimentaria

En condiciones óptimas, los organismos que producen esqueletos rígidos y calcáreos pueden generar una gran estructura de arrecife. Éstos forman el sustrato para una serie de plantas calcáreas (por ejemplo, algas rojas y verdes) y animales con conchas o esqueletos calcáreos que contribuyen directamente al componente particulado del sedimento y pueden ser retrabajados como arenas carbonatadas.

Los sedimentos carbonatados y las calizas consisten en seis componentes principales: (I) carbonato biogénico (como material bioclástico detrítico o como organismos calcáreos *in situ* no detríticos); (II) Peloides; (III) granos revestidos (ej. Ooides); (IV) agregados; (V) clastos litificados y retrabajados sedimentarios (lito – e intraclastos); y (VI) matriz (lodo – grado carbonatado). Tales materiales sedimentarios primarios pueden ser modificados por los procesos diagenéticos sinsedimentarios.

Los controles de producción de carbonatos más importantes son temperatura, salinidad e intensidad de la luz; estos determinan el tipo y la abundancia de los organismos que producen carbonatos; y si es o no el carbonato precipitado inorgánicamente. La producción de carbonatos también es influida en ambas escalas; regionales y nivel relativo del mar. Por factores tales como el marco tectónico del lugar, comportamiento del nivel del mar, la naturaleza del sustrato, flujo de nutrientes, y el régimen de las olas y corrientes. La ausencia del aporte de terrígenos sedimentarios es también un factor.

El término plataforma carbonatada, se usa tanto morfológicamente para una estructura tridimensional, como estratigráficamente para secuencias gruesas de carbonatos de aguas poco profundas.

Las plataformas carbonatadas aisladas o no unidas (Figura 22), son morfológicamente variables. Estas varían en tamaño, de unos pocos a más raramente, cientos de kilómetros de ancho. Las plataformas más grandes pueden construir pilas de sedimentos de cientos de metros de espesor.

Los márgenes de las plataformas aisladas pueden ser de tipo rampa, pero, más típicamente, son más escarpados que 15° . Las plataformas más grandes y aisladas tienen la parte superior plana, donde el sedimento se deposita en menos de 10 m de tirante de agua. El borde de la plataforma puede estar bordeado por arrecifes, por bancos de arena esqueléticos u oolíticos, mientras que el interior está generalmente dominado por lodos y puede tener circulación restringida con el océano abierto.

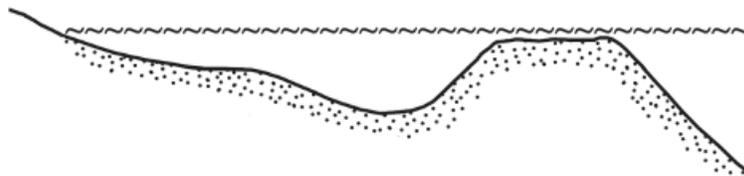


Figura 22. Plataforma aislada (Tomada de Flügel, 2010)

El alto potencial de crecimiento de los márgenes arreciales, y su extendida cementación temprana, denota que comúnmente crecen ligeramente más altos al interior de la plataforma para crear un borde de desviación de ola.

Los sedimentos de margen de plataforma son dominados por facies coralíferas, *oolitas*, zonas afectadas por la turbulencia de las olas y corrientes tidales.

Las litofacies coralíferas se producen hasta profundidades de unos 50 m, en gran parte en los márgenes de la plataforma de barlovento; comprende: arrecifes, *grainstones* de fragmentos de coral, coralinos de algas, moluscos y otros componentes esqueléticos. Los arrecifes no son continuos y son disecados por canales que permiten el intercambio de mareas entre la plataforma y el océano; facilitan la distribución de sedimentos en el interior de la plataforma.

En las plataformas carbonatadas de un alto relieve, hay una transición abrupta en el margen de la plataforma de aguas poco profundas hasta unas facies de transición de talud, en la que se ha vuelto a sedimentar la mayor parte del sedimento. Los depósitos de talud, aunque de carácter muy variable, proporcionan mucha información sobre la naturaleza de la plataforma productiva adyacente y pueden conservar un registro sensible de los cambios relativos del nivel del mar que afectaron a la plataforma.

Las alturas de los taludes de carbonato varían de decenas a miles de metros. Los ángulos de los taludes de las plataformas carbonatadas activas y fósiles, varían de aproximadamente 1° a casi verticales. Los perfiles de talud son muy variables, siendo en su mayoría cóncavos hacia arriba, aunque también pueden ser planos o convexos, con el ángulo de pendiente típicamente creciente con la altura de la pendiente. Un control crítico del ángulo del talud, es la composición del sedimento. Los sedimentos de granos no cohesivos libres de lodo, tales como arenas carbonatadas y conglomerados, son capaces de construir pendientes más empinadas que los sedimentos lodosos.

Los taludes erosivos, son generalmente escarpados ($> 25^\circ$), y representan paredes de roca submarina expuesta o pendientes truncadas por el colapso de grandes secciones del margen de la plataforma; escurridas por los flujos de gravedad sedimentarios o las corrientes de contorno.

Los taludes tipos *bypass* (Figura 23) son relativamente escarpados ($> 10-12^\circ$), y aunque pueden acumular cortinas de sedimento pelágico, el material derivado del borde de la plataforma de aguas poco profundas pasa por esta zona como flujos de gravedad sedimentarios.

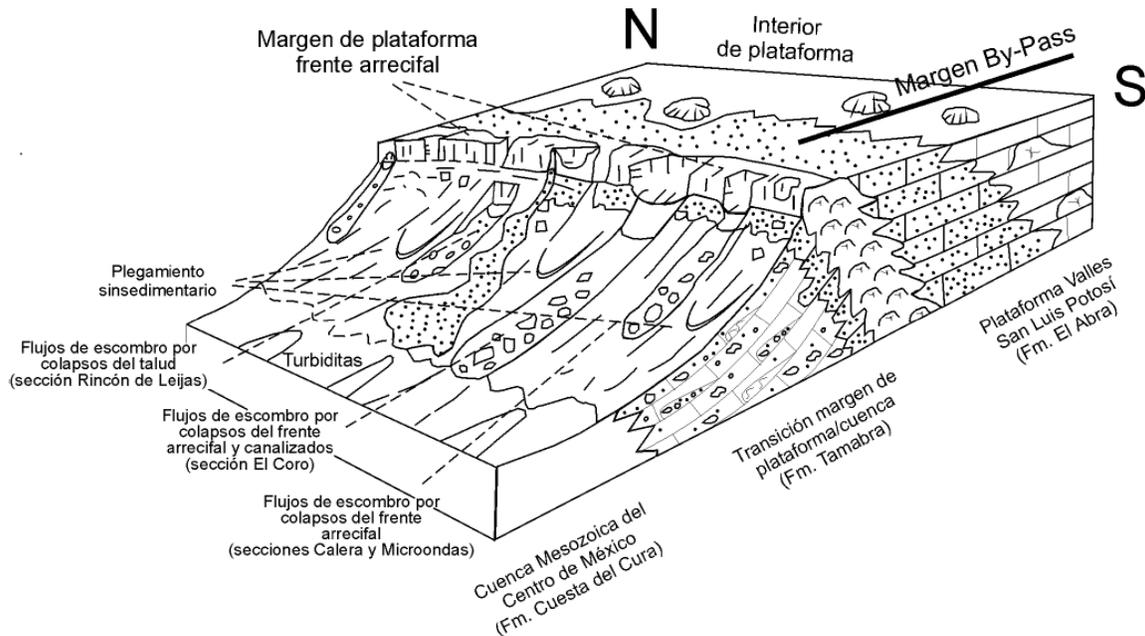


Figura 23. Modelo de depósito para el margen occidental de la PVSLP durante el Cretácico medio en el área de estudio (Tomado de López-Doncel, 2003).

Los taludes de acreción tienen ángulos bajos y están construidos con depósitos de flujo por gravedad sedimentarios.

La zona de barranca se produce a profundidades de 200 - 900 m. Las barrancas o barrancos son en forma de V o U, de 1 a 3 km de diámetro; y de 50 a 150 m de

profundidad. Terminan en la base de la pendiente superior, o más raramente continúan como anchos canales a través de la parte proximal del talud. Los sedimentos de bloques gruesos se encuentran en los pisos del barranco, mientras que las paredes se recubren con las cortezas del óxido de Fe y Mn; y son perforadas extensivamente. Los barrancos se iniciaron probablemente como deslizamientos (*slides*) y *slumps*, posiblemente durante el empinamiento del margen de la plataforma, las cicatrices resultantes son subsiguientemente cubiertas más lejos por los flujos de gravedad sedimentarios.

El mayor sitio de depósito es la parte proximal inferior del talud. Proximalmente, la sucesión consiste de flujos de escombros soportados en lodo de hasta 5.5 m de espesor; intercalados con turbiditas gruesas con un espesor de 2.5 m. (Reading, 1996).

"*Slump*" es el término generalmente aplicado al movimiento generado por gravedad de pequeños desplazamientos laterales; "Deslizamientos (*slides*)" son movimientos similares de mayor extensión lateral.

El contacto más alto del estrato deformado es afilado; los estratos que sobreyacen no deformados se encuentran directamente sobre los estratos deformados, sin ningún signo de empuje entre ellos. Las irregularidades en la superficie superior o en el horizonte de *slump*, han sido rellenadas por el estrato sobreyacente, el cuál es gradado.

Los efectos de los *slumps* son muchos y variados. Los resultados son los productos de; (1) el movimiento penetrante que implica el interior de la masa transportada,

produciendo una mezcla caótica de matriz incompetente; generalmente en lutitas, con diversos fragmentos de materiales más resistentes, como arenisca, o (2) un tipo de *décollement* en movimiento, en el que el desplazamiento lateral se concentra a lo largo de un piso. En este último caso, los estratos sobreyacentes se doblan fuertemente y se amontonan en estructuras parecidas a napas acompañadas de atenuación o incluso un *hiato* en la zona de desprendimiento superior. Muchas unidades de sedimentación pueden estar involucradas en ambos casos.

La deformación penecontemporánea o sinsedimentaria, se atribuye comúnmente a la caída o deslizamiento hacia abajo del talud; bajo la acción de la gravedad en el momento de la acumulación o poco después del depósito.

Los criterios para discriminar entre la deformación penecontemporánea y la debida a la acción tectónica; han sido formulados por Nevin (1942), Leith (1923). Ambos tipos de deformación producen pliegues, fallas y brechas. En general la "deformación en sedimentos blandos" se caracteriza por su carácter local. Su confinamiento en un horizonte individual entre estratos no deformados. El plegado es comúnmente caótico y, a diferencia del plegado por arrastre, no está relacionado con las estructuras mayores del área. Comúnmente también los estratos deformados son truncados por una superficie de erosión penecontemporánea. Las fracturas no son afiladas, no se mantienen; y no tienen conexión con fallas ni con brechas. Por tanto, a diferencia de las fracturas tectónicas post - consolidación, no hay rellenos de vetillas, ni hay ningún clivage de roca asociada o cualquier otra evidencia de recristalización y orientación de minerales (Pettijhon, 1963).

La deformación del sedimento blando es una deformación que ocurre a un sedimento no consolidado. La deformación generalmente ocurre rápidamente, cerca de la superficie, durante o poco después de la depositación, y antes de una diagénesis significativa. Los sedimentos pueden ser cohesivos o sin cohesión, pero sus propiedades físicas son distintas a las de la roca.

Muchos nombres alternativos, vinculados a definiciones más rígidas se han propuesto para esta categoría de estructuras sedimentarias, incluyendo deformación de roca blanda, estructuras deformacionales sedimentarias, deformación penecontemporánea, deformación sinsedimentaria, deformación diagenética temprana, deformación pre-litificada o estratificación retorcida.

Las capas de "*slumps*", están asociadas con el deslizamiento de una masa de sedimento, hacia debajo de una pendiente. Están dominadas por fallas inversas, y por pliegues aislados o continuos; a menudo con una inclinación consistente de superficies axiales, en las partes distales (compresión) y estructuras extensionales en partes proximales (Owen *et al.*, 2011).

Si la traslación del *slump* comienza a ralentizarse y cesa en el margen de talud, entonces se interpreta que una onda de deformación contractiva se propaga talud arriba a través de la capa de *slump*. Esto puede generar nuevos empujes que se desarrollan secuencialmente talud arriba con la onda de propagación deformacional, a una secuencia sobrepasada, junto con la posible reactivación y resedimentación de estructuras existentes.

Estructuras asociadas con la translación de los *slumps* puede ser extensionales (en la cabeza) o de contracción (en el margen de talud) y éstos pueden ser resedimentados por estructuras asociadas con el cese extensional (si el sistema de *slump* bloquea primero la cabeza), o cese contractivo (si el sistema se bloquea primero en el margen de talud) (Alsop *et al.*, 2011).

Los flujos ricos en arcilla son comunes en muchos entornos sedimentarios, desde ríos con altas concentraciones de sedimentos suspendidos y lodos fluidos en las plataformas continentales hasta las corrientes de densidad en los océanos profundos. Dichos flujos cargados de sedimentos tienen características fluido-dinámicas que son radicalmente diferentes de sus contrapartes de aguas claras. Los experimentos de laboratorio demuestran que una concentración de caolinita, da lugar a un cambio distinto en la turbulencia en los flujos de transición entre el comportamiento *Newtoniano* y no- *newtoniano* (Baas *et al.*, 2002).

Flujos transicionales idénticos se alcanzan a concentraciones de arcilla inferiores en los flujos de bentonita, debido a que la bentonita alcanza mayores viscosidades y límites de elasticidad a concentraciones volumétricas de arcilla mucho más bajas, demostrando un efecto aún más dramático sobre las propiedades de flujo. Los presentes experimentos sugieren que los flujos de bentonita sólo deben ser completamente turbulentos a concentraciones de sedimento suspendidas por debajo de c. 2%. (Baas *et al.*, 2016).

6. Interpretación y discusión.

6.1. Interpretación estadística de las estructuras sinsedimentarias de falla, laminada y pliegue; en base a sus porcentajes de material insoluble y arcilloso.

En base a los resultados obtenidos durante la digestión química, difracción de rayos x; se llegó a la siguiente interpretación y gráficas de los datos. Se utilizaron las gráficas con el porcentaje de insolubles en las abscisas y el porcentaje de arcillas en las ordenadas, ya que estas muestran patrones más contundentes en las muestras de las tres zonas de muestreo y de las estructuras sinsedimentarias (falla, laminada y pliegue). Se le llamará índice de estructura o índice, al porcentaje de insolubles y porcentaje de arcillas dónde se encuentren ubicadas las estructuras sinsedimentarias.

En las tablas anteriores de la zona de muestreo del Cerro del Toro, existían dos columnas con porcentajes, una de ellas con el porcentaje del material insoluble y la otra con el material arcilloso, definido por la difracción de rayos x. Ambos porcentajes fueron ordenados de menor a mayor, colocando el tipo de estructura a un lado de este; y también con su respectiva gráfica (figura 24).

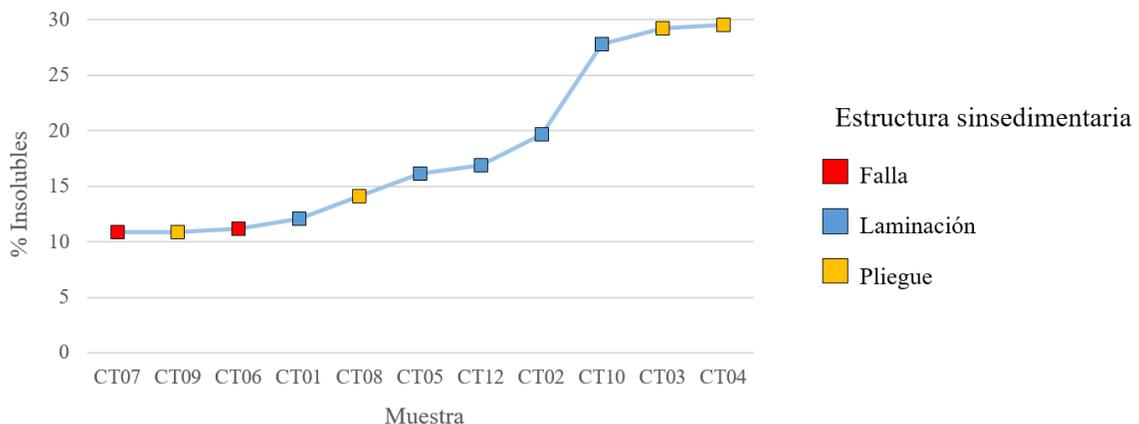


Figura 24. Gráfica con el nombre de la muestra contra el porcentaje de insolubles y sus respectivas estructuras sinsedimentarias.

Se puede observar en la gráfica (Figura 24), que el porcentaje de insolubles en la zona de muestreo del Cerro del Toro es mayor al 10 % en todas las muestras, además que el índice de falla se encuentra comprendido entre el 10 % y el 12 %, mientras que el índice de estructura laminada está comprendido entre el 12 % y el 28 %, después del 28 % inicia el régimen de deformación sinsedimentaria de pliegue.

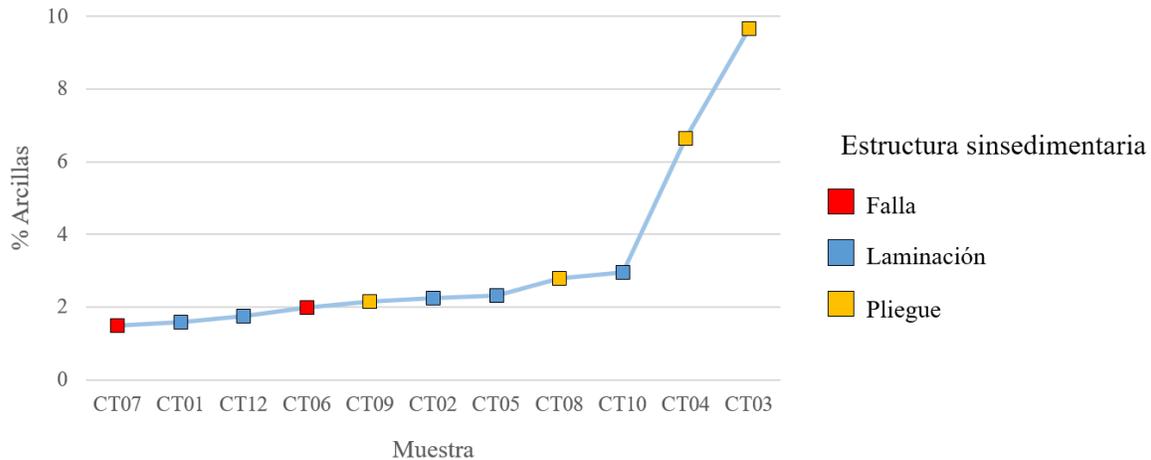


Figura 25. Gráfica del nombre de las muestras contra el porcentaje de arcillas y sus respectivas estructuras sinsedimentarias.

En la gráfica (Figura 25), se tienen las muestras de una forma un poco más dispersas, ya que, las muestras que tienen estructura sinsedimentaria de falla están localizadas en un rango menor al de 2 % de arcillas; pero, en medio de las dos muestras de estructura de fallada, se encuentran dos muestras con estructura laminada, que tienen un porcentaje entre 1.5 % y 1.7 %. Las estructuras sinsedimentarias laminada y pliegue, se encuentran intercaladas entre 2.1 % al 2.9

%. Después de estos porcentajes se mantienen las muestras en estructura de pliegue.

En ambos casos el índice falla, está entre los porcentajes menores de insolubles y arcillas, en insolubles es de 10.87 % al 11.19 %, y en el porcentaje de arcillas es de 1.47 % al 1.57 % (Figura 24). El índice laminar se encuentra en los lugares medios, en insolubles es del 12.09 % al 16 %, en arcillas está entre el 2 % y 3 %; y el índice de pliegue, en los porcentajes más elevados de insolubles que son del 17 % al 30 % y porcentaje de arcillas 3 % a 10 %.

A partir de estas dos gráficas individuales, donde se muestra el porcentaje de insolubles y el porcentaje de arcillas contra el número de muestra, parte la siguiente gráfica.

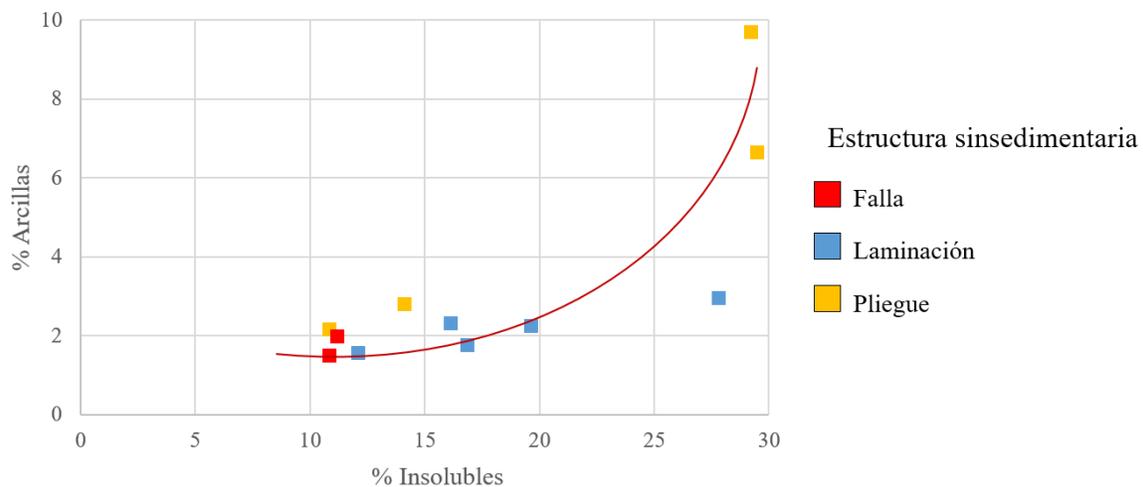


Figura 26. Gráfica del porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas.

En la gráfica (Figura 26), se muestra el porcentaje de insolubles con respecto al porcentaje de las arcillas. Ciertas tendencias en el comportamiento de las muestras

empiezan a aparecer; mientras que las muestras con estructura sinsedimentaria de falla en la zona de muestreo del Cerro del Toro tienen límites menores al 11 % de insolubles y 2 % de arcillas (CT07); las muestras laminadas tienen límites más amplios, ya que van desde el 12 % de insolubles y 1.5 % de arcillas en el límite inferior (CT01), y en el límite superior de las muestras se encuentra en 27.8 % de insolubles y 2.94 % de arcillas (CT10). En lo que respecta a las muestras con estructura sinsedimentaria de pliegue, estas tienen una tendencia de acomodarse hacia las partes superiores de la gráfica, con límites que van del 10.87 % de insolubles y 2.14 % de arcillas en la parte inferior (CT09); en la parte superior tienen 29.23 % de insolubles y 9.67 % de arcillas (CT03). Las muestras de estructura sinsedimentaria de falla, tienden a estar en la parte inferior izquierda de la tabla, donde se tiene menos contenido de porcentaje de insolubles y porcentaje de arcillas. Las muestras de estructura sinsedimentaria laminadas se comportan hacia la parte media de la gráfica, donde se tiene un porcentaje no tan bajo de insolubles (12 %) y arcillas (> 1 %) y no tan altos porcentajes de los mismos (insolubles > 27 % y arcillas > 2.9 %). En cambio las muestras con estructura sinsedimentaria de pliegue en la zona de muestreo, tienden a tener porcentajes altos de insolubles (> 10.87 %) y arcillas (> 2.14%) y se colocan en la parte superior de la gráfica.

En las tablas anteriores de la zona de muestreo de la Sierra del Meco existían dos columnas con porcentajes, una de ellas con el porcentaje del material insoluble y la otra con el material arcilloso, definido por la difracción de rayos x. Ambos porcentajes fueron ordenados de menor a mayor, colocando el tipo de estructura a un lado de este; y también con su respectiva gráfica.

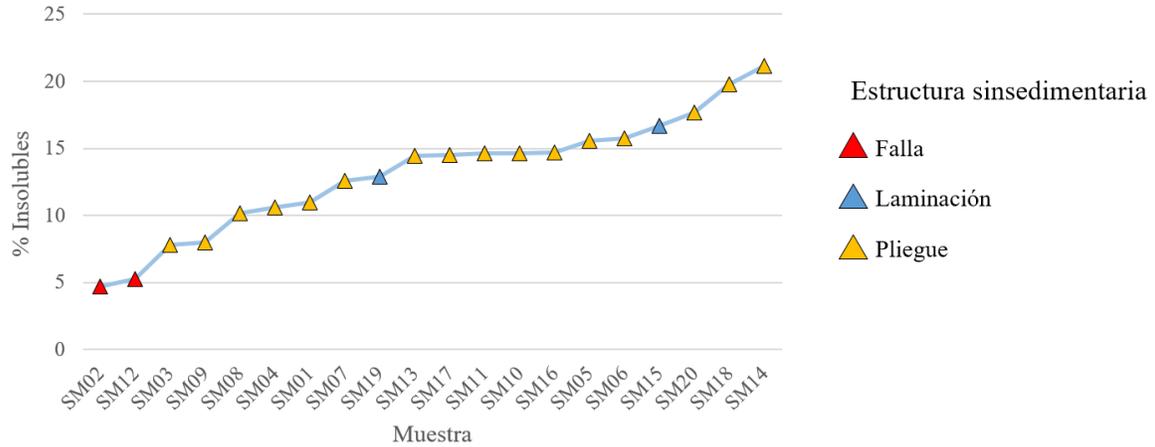


Figura 27. Gráfica del nombre de las muestras contra el porcentaje de insolubles y sus respectivas estructuras sinsedimentarias.

El índice de falla se encuentra localizado entre los porcentajes de 4.71 % al 5.30 % de insolubles, en cambio el espectro de estructura de pliegue es muy amplio, va desde 7.78 % al 21.13 % de insolubles. Entre las estructuras de pliegues, se encuentran localizadas las estructuras laminadas, las dos muestras están localizadas entre un porcentaje del 12.88 % al 16.66 % de insolubles. (Figura 27).

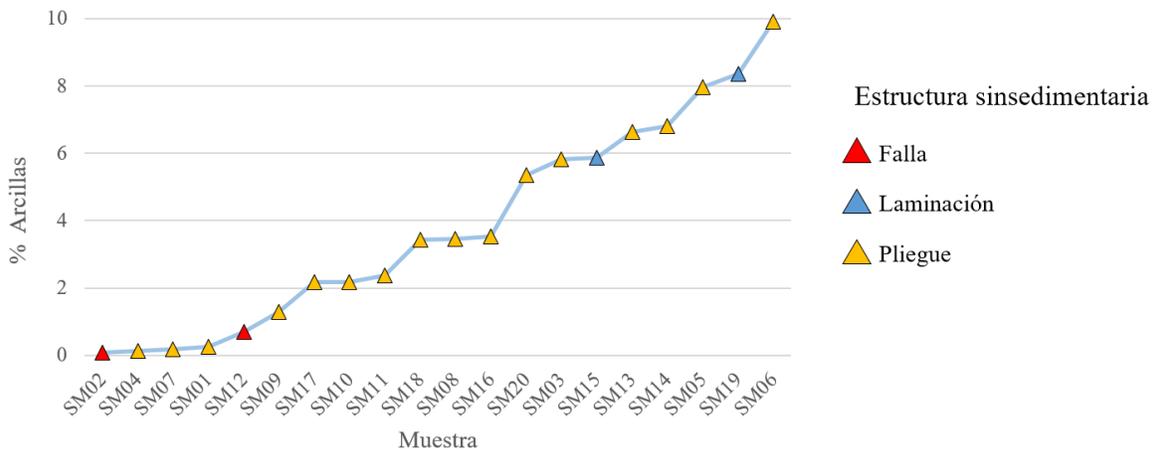


Figura 28. Gráfica del nombre de las muestras contra el porcentaje de arcillas y sus respectivas estructuras sinsedimentarias.

En la gráfica (Figura 28) del nombre de la muestra contra el porcentaje de arcillas de la zona de muestreo de la Sierra del Meco, se obtuvieron los siguientes datos. El porcentaje de arcillas de la estructura sinsedimentaria de falla, se encuentra localizado en la parte inferior izquierda con 0.08 % al 0.7 % de arcillas, entre estos porcentajes se encuentran localizadas tres muestras que presentan estructura sinsedimentaria de pliegue. Al incrementarse las arcillas en un > 1.28 % se tienen estructuras de pliegue con algunas excepciones de dos muestras laminadas (5.86 % y 8.36 % de arcillas).

Al juntar estas dos gráficas interponiendo porcentaje de insolubles contra arcillas se tiene la siguiente gráfica.

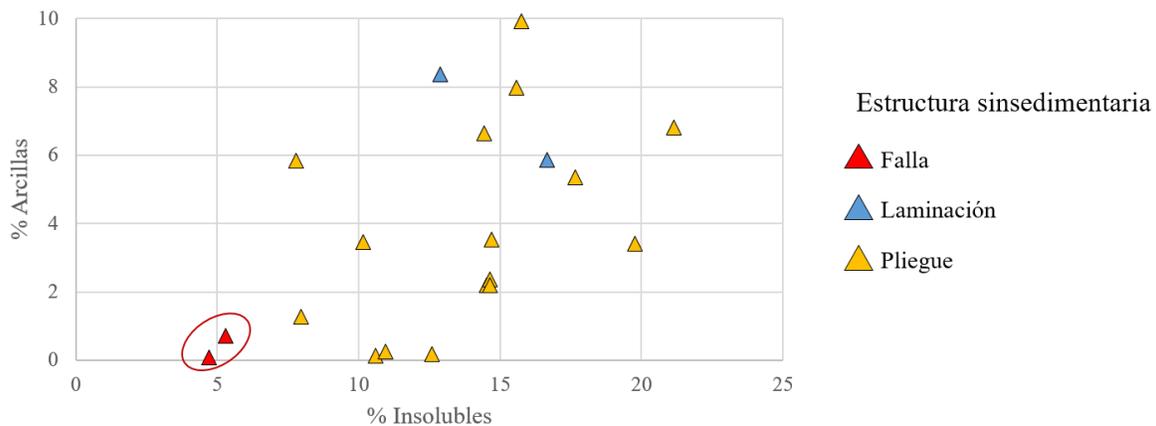


Figura 29. Gráfica del porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas.

En la gráfica (Figura 29), se tiene el porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas. Las muestras que tienen estructura sinsedimentaria de falla se localizan en la parte inferior izquierda de la gráfica, teniendo porcentajes menores de insolubles de 5.30 % y de arcillas de 0.7 % (SM02 Y SM12). Aumentando los dos

porcentajes (insolubles y arcillas) se tiene estructura de pliegue (con excepción de dos muestras), con insolubles en 7.78% y arcillas en 5.82%. Las muestras de esta zona tienden a comportarse más de forma dúctil.

En las tablas anteriores de la zona de muestreo del Cerro de Calabacillas, existían dos columnas con porcentajes, una de ellas con el porcentaje del material insoluble y la otra con el material arcilloso, definido por la difracción de rayos X. Ambos porcentajes fueron ordenados de menor a mayor, colocando el tipo de estructura a un lado de este; y también con su respectiva gráfica.

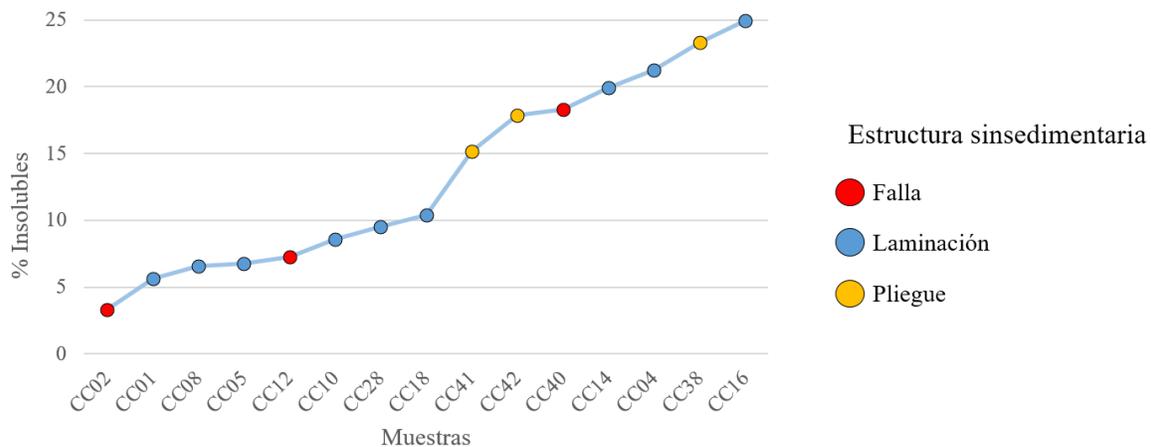


Figura 30. Gráfica del nombre de las muestras contra el porcentaje de insolubles y sus respectivas estructuras sinsedimentarias.

En los resultados obtenidos y ordenados de menor a mayor, después de las digestiones con el material insoluble, se puede observar que las muestras con estructura sinsedimentaria de falla (Figura 30), se encuentran espaciadas entre ellas en porcentajes y conteniendo las otras dos estructuras sinsedimentarias de por medio (laminada y pliegue). El porcentaje mínimo es de 3.31 % y el máximo porcentaje de falla es de 18.21 % (Figura 30). Después del 20 % de material

insoluble, las muestras se comportan de manera laminar, hasta el 23.3 %, que es donde inicia el dominio dúctil.

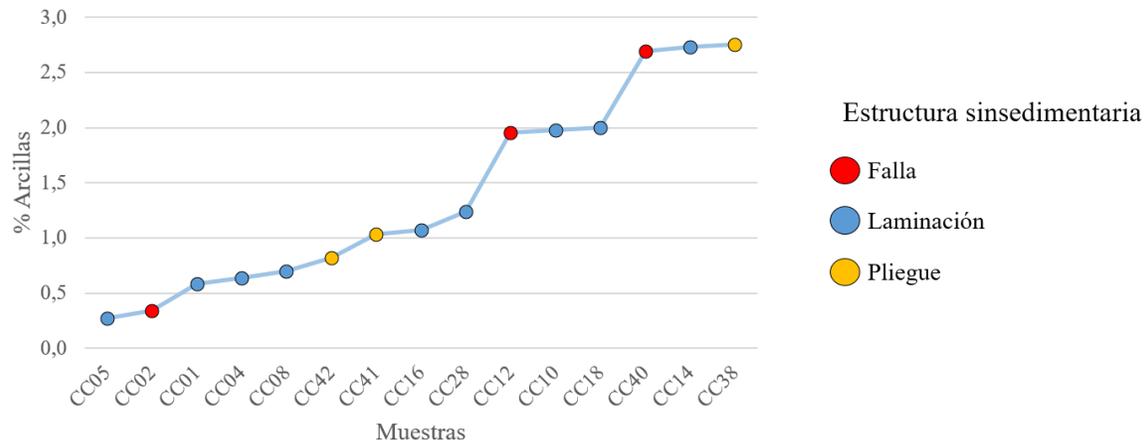


Figura 31. Gráfica del nombre de las muestras contra el porcentaje de arcillas y sus respectivas estructuras sinsedimentarias.

En la gráfica (Figura 31), se trabaja con el nombre de las muestras contra el porcentaje de arcillas. La estructura sinsedimentaria de fallo va desde 0.34 % hasta 2.69 %, las otras estructuras se encuentran contenidas entre estos porcentajes. Después del 2.7 % de arcillas, hasta el 2.75 %, se tienen comprendidas las muestras con estructura sinsedimentaria laminada; y del 2.75 % en adelante, se encuentran las muestras con estructura sinsedimentaria de pliegue.

Al juntar estas dos gráficas interponiendo porcentaje de insolubles contra arcillas se tiene la siguiente gráfica.

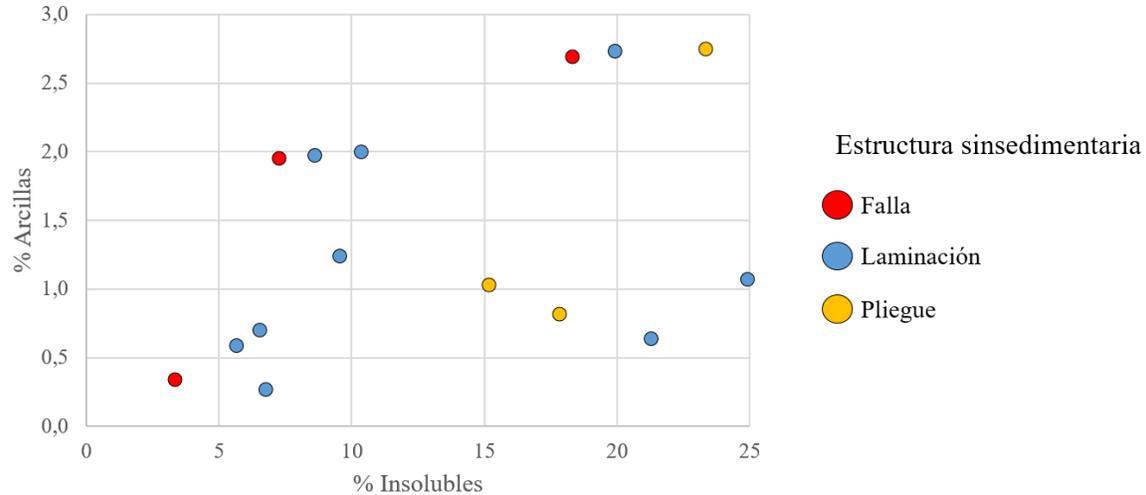
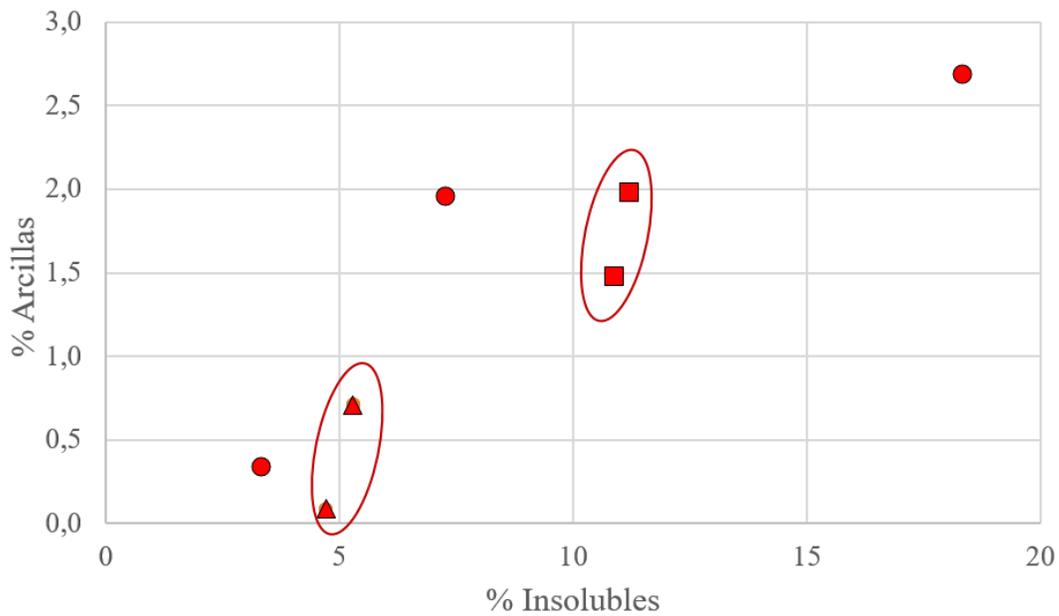


Figura 32. Gráfica del porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas.

En la zona de muestreo de Cerro de Calabacillas se tiene una cantidad menor de porcentaje de minerales arcillosos (3 %) en comparación con las otras zonas de muestreo (Cerro del Toro y Sierra del Meco); por lo tanto es comprensible que las muestras con estructura sinsedimentaria de falla se comporten de manera inusual comparándolas con las otras dos zonas de muestreo (Figura 32). Los valores de las estructuras sinsedimentarias de falla tienen un porcentaje de 3.31 % de insolubles y 0.34 % de arcillas, como valores mínimos; como valores máximos se tienen porcentajes de 18.32 % de insolubles y 2.69 % de arcillas. Con valores similares, pero teniendo un aumento en el porcentaje de arcillas, se comporta la estructura sinsedimentaria laminada, que tienen un porcentaje mínimo de 6.74 % de insolubles y 0.26 % de arcillas; y porcentajes máximos de 20 % de insolubles y 2.73 % de arcillas. Por último, las estructuras sinsedimentarias de pliegue siguen teniendo tendencia a tener más contenido de porcentaje de material insoluble y arcilloso;

teniendo porcentajes mínimos de 15.15 % de insolubles y 1.03 % de arcillas, y porcentajes máximos de 23.32 % de insolubles y 2.75 % de arcillas.

Juntando todas las muestras con estructura sinsedimentaria de falla de las tres zonas de muestreo, se tiene la siguiente gráfica de porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas.



Estructura sinsedimentaria.

- Falla
- Laminación
- Pliegue

Zona de muestreo.

- Cerro del Toro.
- Sierra del Meco.
- Cerro de Calabacillas

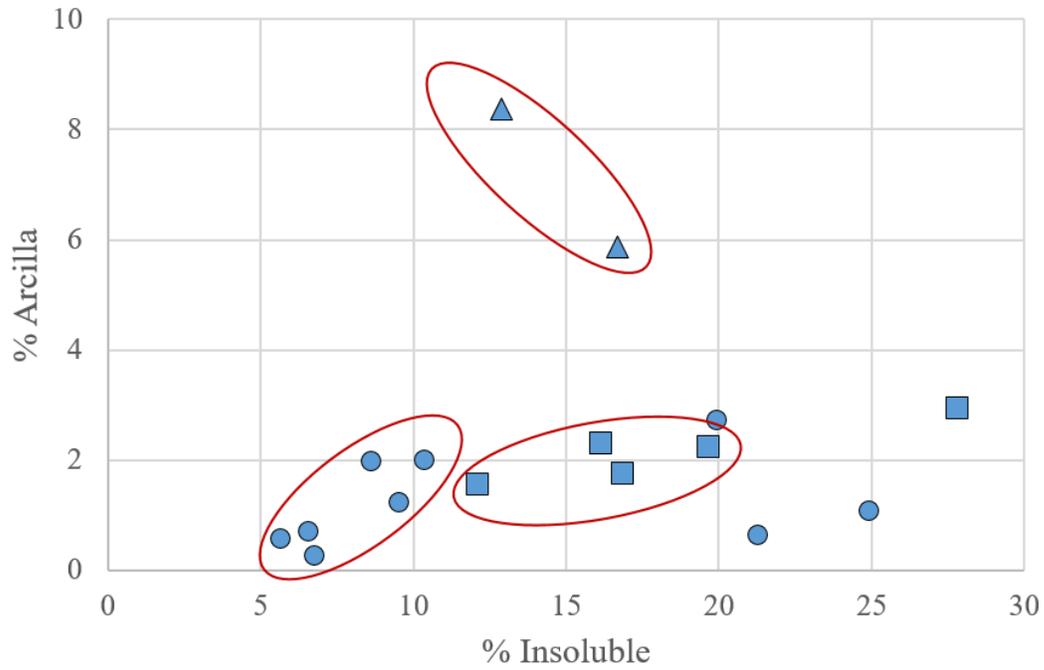
Figura 33. Gráfica del porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas de las tres zonas de muestreo con la estructura sinsedimentaria de falla.

Muestra	% Insolubles	% Arcilas	Estructura	Arcilla
CC02	3.312	0.344	Falla	Ilita
CC12	7.252	1.958	Falla	Ilita
CC40	18.321	2.693	Falla	Caolinita
CT07	10.870	1.478	Falla	Ilita
CT06	11.192	1.981	Falla	Ilita
SM02	4.713	0.089	Falla	Montmorillonita
SM12	5.293	0.709	Falla	Montmorillonita

Tabla 4. Tabla de las tres zonas de estudio con estructura sinsedimentaria de falla.

En la gráfica (Figura 33), se pueden separar bien las muestras por medio de su zona, ya que estas tienden a estar juntas. Si se observa la tabla 4, la arcilla predominante de la zona de muestreo de Sierra del Meco es montmorillonita. Las muestras de la zona de muestreo Cerro del Toro, tienen una cantidad mayor de porcentaje de insolubles (10.8 % - 11.20 %) y porcentaje de arcillas (1.47% - 1.98 %), estas dos muestras tienen como arcilla predominante la illita. Las tres muestras de la zona de muestreo Cerro de Calabacillas tienen diferentes tipos de arcillas, las dos muestras que se encuentran más cercanas entre ellas tienen como arcilla principal la illita. La muestra más distal en porcentaje de insolubles (18.32 %) y porcentaje de arcillas (2.69 %), tiene como arcilla principal caolinita.

Al tomar todos los datos de la estructura sinsedimentaria de laminación, de las tres zonas de muestreo, se tiene la siguiente información.



Estructura sinsedimentaria.

■ Falla

■ Laminación

■ Pliegue

Zona de muestreo.

□ Cerro del Toro.

△ Sierra del Meco.

○ Cerro de Calabacillas

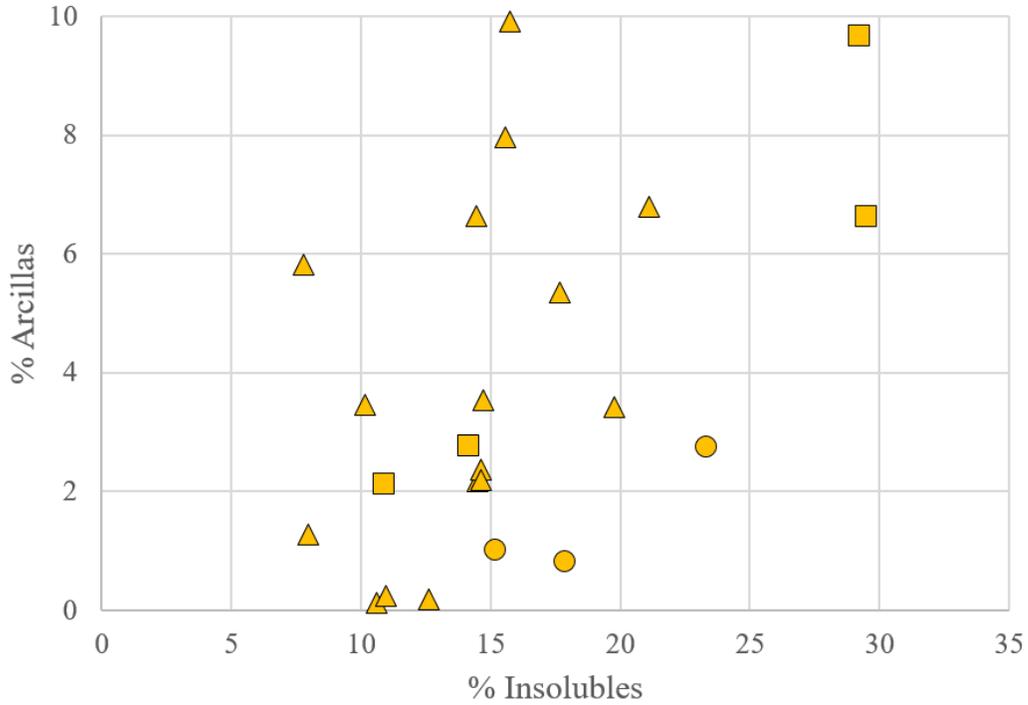
Figura 34. Gráfica del porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas de las tres zonas de muestreo con la estructura sinsedimentaria laminada.

Muestra	% Insolubles	% Arcillas	Estructura	Arcilla
CC01	5.650	0.588	Laminada	Ilita
CC08	6.546	0.700	Laminada	Ilita
CC05	6.746	0.270	Laminada	Caolinita
CC10	8.596	1.977	Laminada	Ilita
CC28	9.534	1.239	Laminada	Ilita
CC18	10.364	2.000	Laminada	Ilita
CC14	19.939	2.732	Laminada	Ilita
CC04	21.273	0.638	Laminada	Ilita
CT01	12.096	1.572	Laminada	Ilita
CT05	16.118	2.305	Laminada	Ilita
CT12	16.853	1.753	Laminada	Ilita
CT02	19.648	2.240	Laminada	Ilita
CT10	27.811	2.948	Laminada	Ilita
SM15	16.666	5.861	Laminada	Hectorita
SM19	12.881	8.370	Laminada	Monmorillonita

Tabla 5. Tabla de las tres zonas de estudio con estructura sinsedimentaria laminada.

La gran mayoría de las muestras de la gráfica (Figura 34), tienden a estar en la parte inferior de la tabla con porcentajes < 4 % de arcillas y con rangos de porcentaje de insolubles entre 5 % - 25 %, estas muestras son de las zonas de muestreo de Cerro del Toro y Cerro de Calabacillas; en ambos sitios la arcilla predominante es ilita (Tabla 5). Por otra parte, existen dos muestras que se encuentran en la parte superior de la gráfica (> 10 % de porcentaje de insolubles y > 4 % de porcentaje de arcillas), estas dos muestras son de la zona de muestreo Sierra del Meco; las arcillas predominantes de estas muestras son hectorita y montmorillonita.

Discriminando los datos anteriores y solamente utilizando los datos de la estructura sinsedimentaria de pliegue; se tiene la siguiente información.



Estructura sinsedimentaria.

■ Pliegue

Zona de muestreo.

□ Cerro del Toro.

△ Sierra del Meco.

○ Cerro de Calabacillas

Figura 35. Gráfica del porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas de las tres zonas de muestreo con la estructura sinsedimentaria de pliegue.

Muestra	% Insolubles	% Arcilas	Estructura	Arcilla
CC41	15.155	1.031	Pliegue	Dickita
CC42	17.829	0.820	Pliegue	Ilita
CC38	23.323	2.752	Pliegue	Caolinita
CT09	10.879	2.143	Pliegue	Ilita
CT08	14.132	2.784	Pliegue	Ilita
CT03	29.231	9.676	Pliegue	Ilita
CT04	29.492	6.636	Pliegue	Ilita
SM03	7.780	5.827	Pliegue	Montmorillonita
SM09	7.969	1.280	Pliegue	Montmorillonita
SM08	10.155	3.465	Pliegue	Illita
SM04	10.599	0.132	Pliegue	Montmorillonita
SM01	10.964	0.252	Pliegue	Montmorillonita
SM07	12.594	0.179	Pliegue	Montmorillonita
SM13	14.433	6.647	Pliegue	Hectorita
SM17	14.514	2.184	Pliegue	Hectorita
SM11	14.634	2.368	Pliegue	Montmorillonita
SM10	14.646	2.185	Pliegue	Montmorillonita
SM16	14.698	3.530	Pliegue	Montmorillonita
SM05	15,588	7.966	Pliegue	Illita
SM06	15.762	9.914	Pliegue	Caolinita
SM20	17.668	5.352	Pliegue	Caolinita
SM18	19.757	3.421	Pliegue	Caolinita
SM14	21.134	6.802	Pliegue	Dickita

Tabla 6. Tabla de las tres zonas de estudio con estructura sinsedimentaria de pliegue.

De las tres zonas de muestreo, dos tienen como arcilla principal ilita (Cerro del Toro y Sierra del Meco) (Tabla 6), las muestras de estas zonas tienden a mantenerse por lo general en zonas intermedias de la gráfica con un porcentaje de insolubles > 10 % y un porcentaje de arcillas > 2 %. Las muestras de la zona de Sierra del Meco tienen una diferencia marcada (Figura 35), algunas de las muestras se encuentran en la parte inferior de la gráfica (< 2.5 % de porcentaje de arcillas), estas muestras tienen como arcilla principal montmorillonita; en cambio las muestras de esta misma

zona que tienen caolinita, tienden a estar en la parte superior de la gráfica (> 4 % de arcillas). Todas las muestras de la zona de estudio de Cerro del Toro contienen como arcilla principal illita, tienen una cantidad moderada de porcentaje de insolubles (> 10 %) y porcentaje de arcillas (> 2 %).

Colocando toda la información de las tres zonas de muestreo y su estructura sinsedimentaria, se tiene la siguiente gráfica.

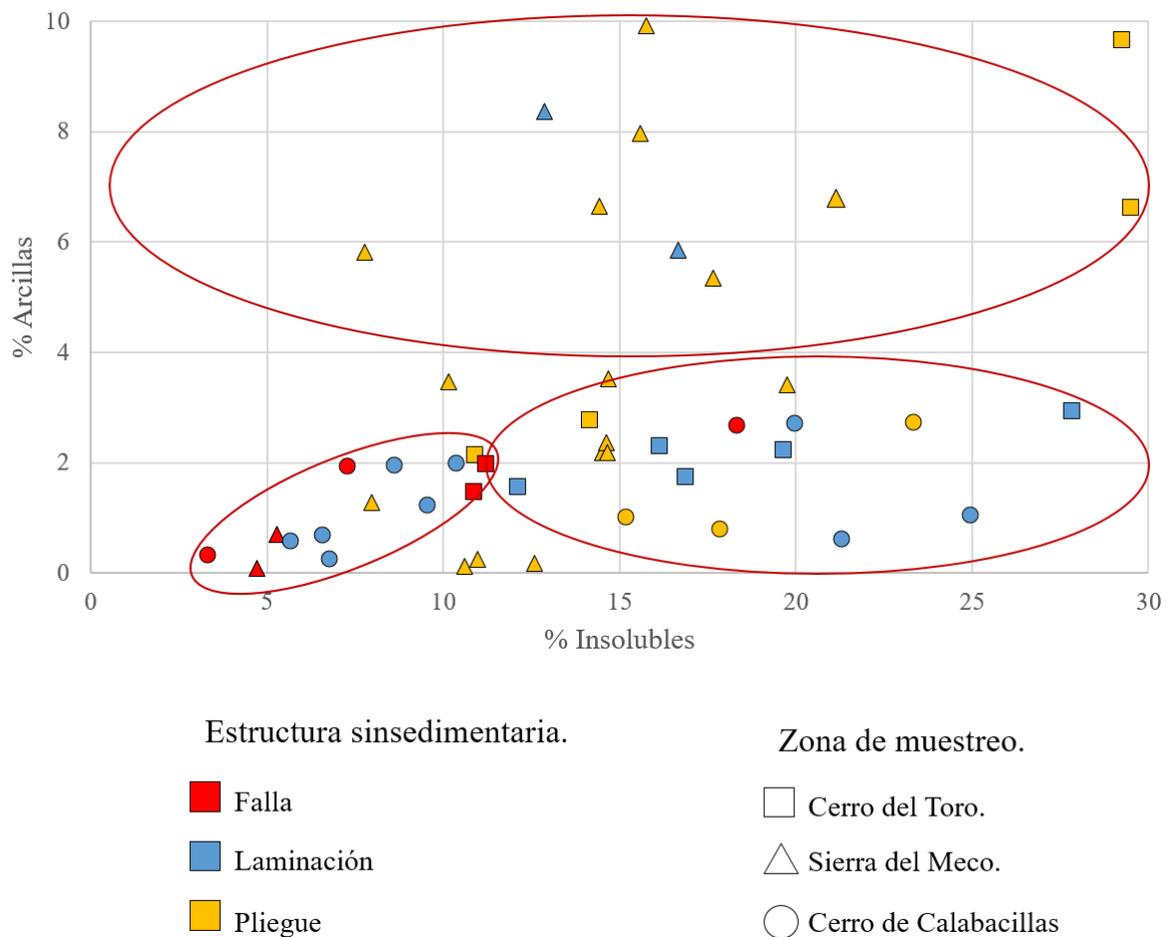


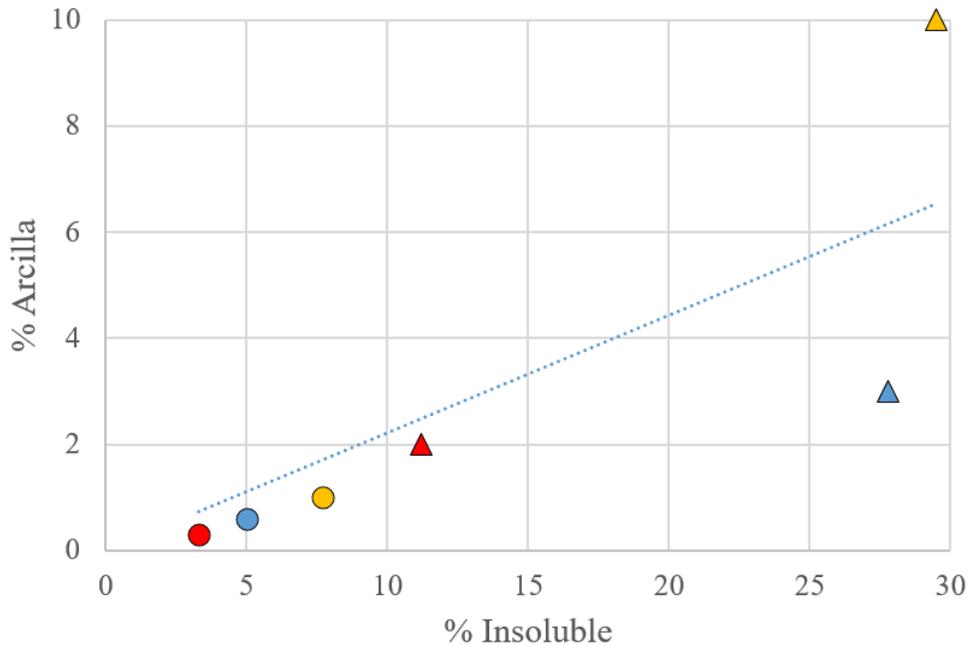
Figura 36. Gráfica del porcentaje de insolubles contra el porcentaje de arcillas de las tres zonas de muestreo.

Sin tomar en cuenta las zonas de muestreo, observando solo los datos de porcentaje de insolubles contra porcentaje de arcillas; es posible ver ciertos patrones (Figura 36).

La zona de muestreo con menor contenido en porcentaje de arcillas es el Cerro de Calabacillas, ya que la gran mayoría de las muestras se encuentran ubicadas en la parte inferior de la gráfica ($< 3\%$ de arcillas); estas se encuentran agrupadas (la mayoría) en los límites de porcentaje de insolubles ($3\% - 10.4\%$) y porcentaje de arcillas ($< 3\%$). La gran mayoría de las muestras que tienen estructura sinsedimentaria de falla, tienen predisposición a colocarse en la parte inferior izquierda, donde se tienen porcentajes mínimos de insolubles ($< 12\%$) y arcillosos ($< 2\%$). Se puede marcar un límite aproximado de la estructura sinsedimentaria de falla, con un contenido de porcentaje en insolubles que sería del 11.2% y en porcentaje de arcillas sería del 2% .

Las muestras con estructura sinsedimentaria laminada por otro lado, tienen $> 5\%$ de insolubles y $< 4\%$ de arcillas; esta estructura tiende a tener poca cantidad de insolubles (algunos casos), pero si el porcentaje de insolubles aumenta, la estructura se mantiene, mientras que no aumente el contenido de arcillas ($> 5\%$). La zona que tiene más contenido en porcentaje arcilloso es la zona de Sierra del Meco. Sin importar la cantidad de porcentaje de insolubles, la gran mayoría de las muestras de estructura sinsedimentaria de pliegue, se mantienen en porcentajes de arcillas $> 3\%$.

Sin tomar en cuenta las zonas de muestreo, se tomaron los datos que delimitan las estructuras sinsedimentarias (falla, laminada y pliegue) de menor a mayor, por su contenido de porcentaje de insoluble y porcentaje arcilloso,



Estructura sinsedimentaria.

- Falla
- Laminación
- Pliegue

Zona de muestreo.

- Cerro del Toro.
- Sierra del Meco.
- Cerro de Calabacillas

Figura 37. Gráfica de los límites porcentuales del material insoluble contra el porcentaje de arcillas de las tres zonas de muestreo con las estructuras sinsedimentarias (falla, laminada y pliegue).

Estructura	% Insolubles	% Arcillas
Falla	3.3	0.3
	11.2	2
Laminación	5	0.6
	27.8	3
Pliegue	7.7	1
	29.5	10

Tabla 7. Tabla con los contenidos máximos y mínimos (porcentaje de insolubles y arcillas) de las muestras con estructuras sinsedimentaria de falla, laminada y pliegue.

Colocando los límites porcentaje de insolubles y porcentaje de arcillas de las tres estructuras sinsedimentarias (falla, laminada y pliegue) (Tabla 7), estos crean una línea con una tendencia que va desde cero porcentaje de insolubles y arcillas, hasta un porcentaje de 30 % de insolubles y 7 % de arcillas (Figura 37).

Se puede delimitar la estructura sinsedimentaria de falla, tomando la segunda muestra (11% de insolubles y 2% de arcillas) y dibujando una línea vertical sobre esta muestra de una manera decreciente sobre el porcentaje de arcillas. De esta manera se crea un triángulo rectángulo en donde se encuentran comprendidas las muestras que van desde 0 %, 11 % de insolubles y 2 % de arcillas.

Las muestras que tienen estructura sinsedimentaria laminada, tienen más porcentaje de insolubles (> 11 %) y arcillas (> 2 %), pero tienen su límite en 6% de arcillas, estas se encuentran ubicadas en la parte inferior izquierda de las gráficas.

Con un mayor porcentaje de insolubles (> 5 %) y arcillas (> 3 %) se tienen las muestras con estructura sinsedimentaria de pliegue, que se localizan en la parte superior de la gráfica.

En base a la información anterior, se definieron gráficamente los límites para las tres estructuras sinsedimentarias (Falla, laminada y pliegue).

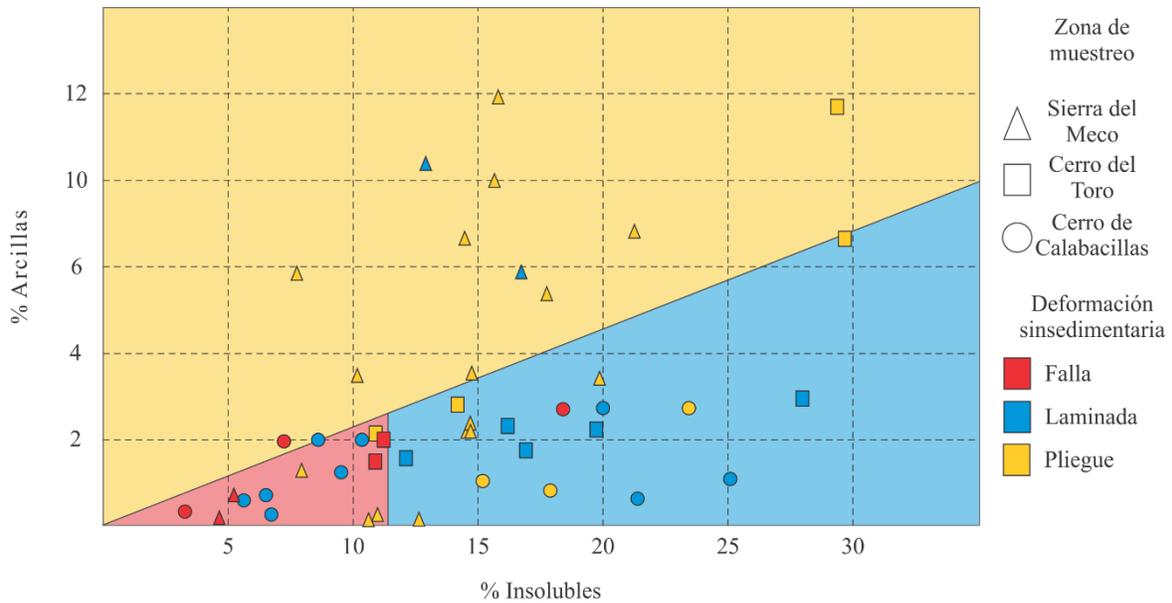


Figura 38. Gráfica final

El resultado de toda la información anterior llevo a la creación de un diagrama general de la cantidad necesaria del porcentaje de insolubles y porcentaje de arcillas para definir las estructuras sinsedimentarias de falla, laminada y pliegue (Figura 38). Las muestras en su mayoría (sin importar la zona de muestreo) caen en el sector definido (estructura sinsedimentaria).

El diagrama propuesto, sólo toma en cuenta la cantidad del porcentaje de insolubles (minerales y material que no se disolvió en la digestión con el ácido clorhídrico) y porcentaje de arcillas (arcillas que se definieron en base a los difractogramas de rayos x). No toma en cuenta el tipo de arcillas, ya que, en las tres zonas de muestreo las arcillas predominantes fueron más o menos las mismas; illita, montmorillonita y caolinta, en diferentes cantidades. No se toma en cuenta tampoco el tipo de material

insoluble, ya que en las tres zonas de muestreo, los minerales encontrados fueron los mismos (en diferentes cantidades); cuarzo, albita, anortita y pirita.

6.2. Interpretación del tipo de depósito de las zonas de muestreo.

En lámina delgada las muestras de la zona de Cerro del Toro tienen texturas que van de *wackstone* a *grainstone* (Dunham, 1969). En la clasificación de facies y microfacies de *Flugel* (2010), las muestras tienen SMF 3 y 16; los ambientes de depósito o zonas de facies (ZF), se encuentran entre plataforma marina abierta (ZF 7) y un ambiente de aguas profundas (ZF 1). Lo cual concuerda con lo descrito por Zavala–Arriaga (2013); donde demostró en su análisis microfacial que la mayor parte de las capas de la Formación Tamabra superior (en la zona de muestreo Cerro del Toro), fueron depositadas en un ambiente de cuenca profunda (ZF 1), con sedimentación lenta, con componentes y organismos de zonas pelágicas. También igualmente reconoció ambientes de depósito de zonas más someras como zonas de plataforma profunda (ZF 2), pie de talud (ZF 3) e incluso de talud (ZF 4).

Las secuencias completas de las unidades presentan influencias de sedimentos de zonas profundas y zonas someras, con sedimentos alóctonos depositados en las zonas profundas debido al cambio en la tasa de sedimentación y a las variaciones efectuadas por el cambio en el nivel del mar, en las zonas profundas surgen condiciones de baja erosión y alto aporte de sedimentos.

En la zona de muestreo de la Sierra del Meco, las muestras tienen una textura *wackstone* (Dunham, 1962). En la clasificación de facies y microfacies de *Flugel* (2010), las muestras se encuentran en un SMF 1, que es una zona de plataforma profunda (ZF 2). Esto concuerda con lo descrito por Cruz–Márquez, 2005.

En la zona de muestreo del Cerro de Calabacillas, las muestras tienen las texturas *mudstone*, *wackstone*, *packstone* y *grainstone*; (Dunham, 1969). En base a la descripción de facies y microfacies de Flugel (2010), tienen SMF 2, 3 y 16; en zonas de depósito que van del margen de plataforma (ZF 5), plataforma profunda (ZF 2) y mar profundo (ZF 1)

El límite poniente de la Plataforma Valles – San Luis Potosí, donde se depositaron las muestras estudiadas de la Formación Tamabra superior, las tres zonas de muestreo (Cerro del Toro, Sierra del Meco y Cerro de Calabacillas) se caracterizan por tener zonas de facies de plataforma profunda y ambientes de aguas profundas. Sin embargo existe cierta concurrencia del tipo de arcilla, zona de muestreo y ambiente de depósito.

Arcillas predominantes	Zona de Facies	Zona de muestreo
ilita	7, 1	Cerro del Toro
montmorillonita y caolinita	2	Sierra del Meco
ilita y caolinita	5, 2 y 1	Cerro de Calabacillas

Tabla 8. Arcillas predominantes encontradas en las zonas de facies de las zonas de muestreo.

La ilita se depositó como arcilla predominante en las zonas de muestreo del Cerro del Toro y Cerro de Calabacillas, al momento del depósito estas zonas de muestreo tenían zonas de facies de depósito cercanas al arrecife (Plataforma marina abierta (ZF 7) y margen de plataforma (ZF 5)), lo cual nos indica que la ilita se depositó en las partes superiores de la Plataforma Valles – San Luis Potosí (Tabla 8).

En cambio, las zonas de muestreo de Sierra del Meco y Cerro de Calabacillas tienen en común la zona de facies de plataforma profunda (ZF 2); también coinciden con la caolinita. La montmorillonita y la caolinita fueron depositadas en áreas profundas de la Plataforma – Valles San Luis Potosí, es posible encontrar illita en estas zonas de muestreo, pero en menores cantidades en la Sierra del Meco que en el Cerro de Calabacillas. Lo cual concuerda con lo anterior, mientras más alejada sea la fuente del mineral o del sedimento, menor cantidad de este se tendrá en partes distales. Al parecer, la zona de muestreo de la Sierra del Meco se encontraba más lejos de la zona de depósito de la illita; por eso la cantidad del mineral es mucho menor en esta zona.

6.3. Interpretación mineralógica y procedencia.

Los minerales encontrados por medio de los difractogramas de rayos x en las tres zonas de muestreo de la Formación Tamabra superior, fueron los siguientes: minerales no arcillosos; cuarzo, anortita, albita, calcita, biotita y pirita; los minerales arcillosos encontrados fueron; illita, montmorillonita caolinita, dickita y hectorita.

Según lo descrito por los estudios geoquímicos realizados por Luna–Rodríguez (2008) en la Formación el Abra, que es cronológicamente correlacionable con la Formación Tamabra. Las calizas cuentan con influencia de aluminosilicatos terrígenos dentro las calizas. Los silicatos están situando en gran parte de la fracción insoluble y esto se relaciona con la influencia detrítica durante la sedimentación. Las calizas cuentan con valores bajos de Cr y Ni, lo cual indica presencia de minerales félsicos, que derivaron probablemente de rocas graníticas y gnéisicas.

Lo anterior concuerda, ya que se encontró cuarzo. Este es uno de los minerales más abundantes de la corteza terrestre y es un constituyente principal de las rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias. En las muestras se encontraba en forma disuelta, ya que no se pudieron encontrar cristales visibles en muestra de mano o en láminas delgadas. Otros minerales volcánicos encontrados fueron anortita, albita y biotita.

La biotita es la más frecuente de las micas, con un espectro mineralógico amplio. Se encuentra como componente principal o accesorio de numerosas rocas magmáticas y metamórficas.

Las tres arcillas más comunes en las zonas de muestreo son la montmorillonita, illita y caolinita.

Las illitas se clasifican en dioctaédricas y trioctaédricas considerándose derivados de la muscovita y flogopita, diocta y trioctaédrica respectivamente. Entre la mica e illita se desarrolla una serie de transición mineralógica continua, las illitas son usualmente minerales heredados por alteración de las micas. Las illitas son los minerales de arcillas más abundantes en los sedimentos y suelos. Su abundancia se explica debido a que muchos materiales parentales del suelo son abundantes en micas, cuya fuente primaria la constituyen las rocas ígneas.

La montmorillonita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo filosilicatos y dentro de ellos pertenece a las llamadas arcillas. Es un hidroxisilicato de magnesio y aluminio, con otros posibles elementos. Se forma principalmente por alteración de

rocas eruptivas básicas, tobas volcánicas y cineritas. A veces se mezcla con otros minerales, como caolinita e illita.

La caolinita se presenta en forma de partículas muy finas con tamaño generalmente inferior a 1 μ , es una especie muy frecuente en suelos y sedimentos, generalmente producto de la descomposición de las rocas o de acciones hidrotermales; cuando se tiene acción hidrotermal por lo general se encuentra en contacto zonal con otros minerales como sericita y clorita. Frecuentemente es producto de meteorización y transporte. (Besoain, 1985).

La hectorita es una esmectita trioctaédrica que no contiene aluminio ya que este se encuentra reemplazado por Mg, y éste, a su vez, por algo de Li. Generalmente su formación está relacionada a actividad hidrotermal o alteración de cenizas volcánicas con alto contenido de vidrios

Anteriormente se mencionó, que la illita provenía muy posiblemente de las partes altas de la Plataforma Valles – San Luis Potosí; y que la montmorillonita y caolinita, provenían de lugares hacia el poniente de la Plataforma Valles – San Luis Potosí.

Al norponiente de la Plataforma Valles San Luis Potosí, existía un paleo arco volcánico (arco Nazas). Barboza–Gudiño *et al.*, (2004), describe en Real de Catorce (S. L. P.), una secuencia de lavas y materiales piroclásticos de composición intermedia y félsica, que incluyen en menor proporción rocas de composición máfica, es de edad Jurásico temprano a medio. Esta secuencia volcánica se interpreta de origen subaéreo por su carácter piroclástico, con frecuentes flujos de cenizas. Posiblemente esta unidad se encontraba aflorando y se encontraba en

proceso meteorización química; por medio de la hidrólisis, los minerales de feldespato (comunes en rocas félsicas) se transformaron en arcillas. La gran mayoría de las arcillas tienden a transformarse a ilitas, posiblemente al momento del depósito en las zonas de muestreo de Cerro de Calabacillas y Cerro del Toro, la ilita se haya depositado como otra arcilla y por medio de la diagénesis transformado en esta. Las arcillas creadas posiblemente por el arco Nazas, son más antiguas y más propensas a ser transformadas por agentes externos, por eso, es muy posible que las ilitas de estas dos zonas de muestreo tengan una procedencia del paleo arco Nazas que se encontraba al norponiente de la Plataforma Valles – San Luis Potosí. También es importante mencionar, que se encontró evidencias de que al momento de depósito, estas dos zonas de muestreo se encontraban en zonas de facies superiores (plataforma marina abierta (ZF 7) y margen de plataforma (ZF 5)), lo que explica porque en la zona de muestreo de Sierra del Meco no se encontrara tanta ilita (la Sierra del Meco se encontraba en una zona de facie 2 o plataforma profunda).

En la zona de muestreo de la Sierra del Meco se encontraron minerales de montmorillonita y caolinita, al igual que en una parte de Cerro de Calabacillas; esta zona y una parte de la anterior, fueron depositadas en ambientes más profundos (ZF 2, arrecife profundo), y más al poniente de la Plataforma Valles – San Luis Potosí. Tomando en cuenta la gran cantidad de cuarzo y albita disueltos, y que la montmorillonita y la caolinita no fueron encontradas en las partes superiores de las zonas de facies estudiadas, la fuente del sedimento tendría que haber estado más cercana al poniente de estas zonas de muestreo, por lo tanto, al momento de su

depósito, y por la posición de las zonas de muestreo, se sugiere que el origen de estos sedimentos hayan sido por la acreción del Terreno Guerrero, ya que coinciden cronoestratigráficamente y composicionalmente. Mientras se estaba depositando la Formación Tamabra superior, llegaban sedimentos volcánicos y arcillas de la acreción del Terreno Guerrero.

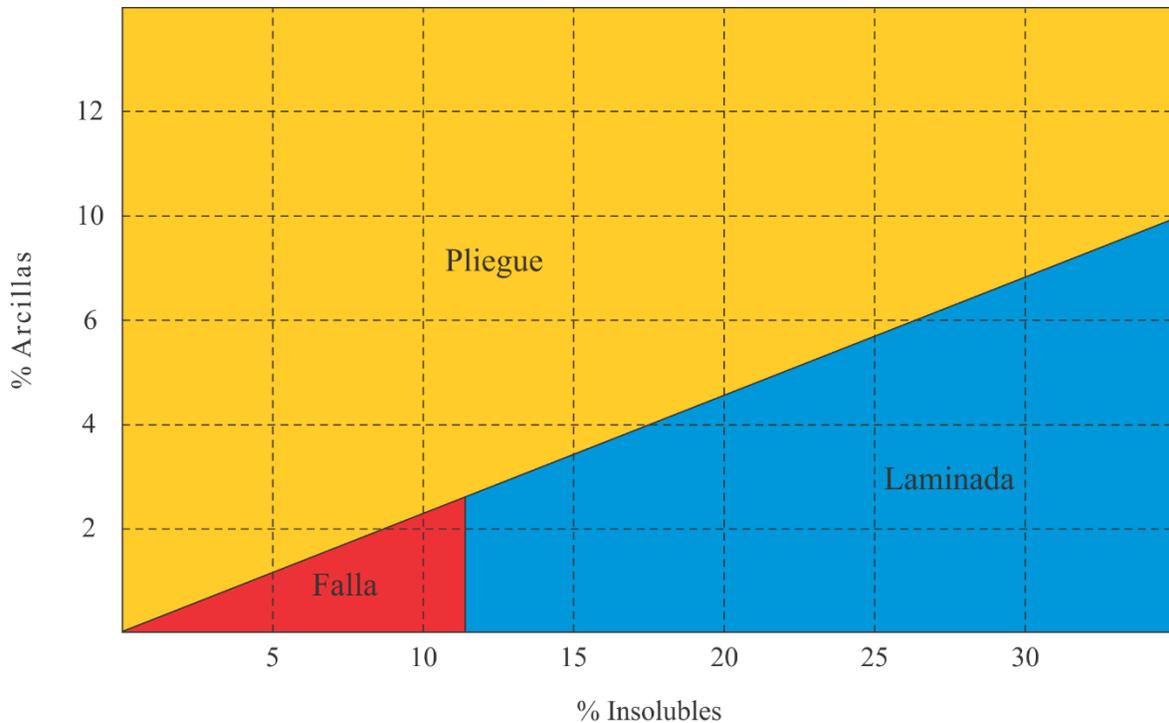
Zavala–Arriaga (2013) identificó una tendencia clara a un aumento en el contenido arcilloso y detrítico continental hacia las partes altas de la secuencia de la Formación Tamabra superior, así como un aumento en el tamaño de las partículas (granos, clastos, bioclastos, etc), lo cual evidencia mayor influencia del poniente, de donde procedía el material clástico vulcano-continental.

También definió con el análisis petrográfico que las areniscas corresponden con rocas de tipo lítico, con proporción de 5 a 25% de matriz calcárea, lo que directamente permitió definir las dentro de la clasificación de las grauwasas líticas de ambientes marinos, depositadas por lo regular por flujos de gravedad. Estas características son casi exclusivas de márgenes activos, con resultados de procedencia de orógeno reciclado, posiblemente producto de la erosión de un orógeno retrabajado (Terreno Guerrero).

Conclusiones.

Con el mejoramiento del método de digestión en ácido clorhídrico, se pudieron conservar mejor los minerales arcillosos. Esto es con una concentración del 10 N y sólo dejando el ácido 30 minutos en la placa de calentamiento; para que inmediatamente se decante el ácido y se laven las muestras, dejando al final las muestras en evaporación con agua desionizada a 90 °C.

El diagrama propuesto sólo toma en cuenta la cantidad del porcentaje de insolubles (minerales y material que no se disolvió en la digestión con el ácido clorhídrico) y porcentaje de arcillas (arcillas que se definieron en base a los difractogramas de rayos x). No toma en cuenta el tipo de arcillas, ya que, en las tres zonas de muestreo las arcillas predominantes fueron más o menos las mismas; illita, montmorillonita y caolinta, en diferentes cantidades. No se toma en cuenta tampoco el tipo de material insoluble, ya que en las tres zonas de estudios, los minerales encontrados fueron los mismos (en diferentes cantidades); cuarzo, albita, anortita y pirita. Este diagrama propuesto funciona en la gran mayoría de los casos de las muestras estudiadas, en la estructura sinsedimentaria de falla funciona el 85%, en la estructura sinsedimentaria laminada 56% de las veces y en la estructura sinsedimentaria de pliegue funciona 56%, en total el diagrama funciona un 62.33 % de las estructuras sinsedimentarias estudiadas.



La estructura sinsedimentaria de falla tiene un máximo de 11% de insolubles y 2% de arcillas.

Las muestras que tienen estructura sinsedimentaria laminada tienen más porcentaje de insolubles (> 11 %) y arcillas (> 2 %), pero tienen su límite en 6% de arcillas.

Con un mayor porcentaje de insolubles (> 5 %) y arcillas (> 3 %) se tienen las estructura de pliegue.

Los minerales encontrados por medio de los difractogramas de rayos x en las tres zonas de muestreo, fueron los siguientes minerales no arcillosos; cuarzo, anortita, albita, calcita, biotita y pirita. Los minerales arcillosos encontrados fueron; illita, montmorillonita caolinita, dickita y hectorita.

Las arcillas estudiadas tienen dos orígenes, existen las arcillas creadas posiblemente por el paleo arco volcánico Nazas, estas arcillas vienen del norponiente de la Plataforma Valles – San Luis Potosí. Los depósitos de este arco son del Jurásico temprano a medio, por lo tanto, los sedimentos al momento de depósito ya estaban de cierta manera alterados. Posiblemente esta unidad se encontraba aflorando y se encontraba en proceso meteorización química; por medio de la hidrólisis, los minerales de feldespato (comunes en rocas félsicas) se transformaron en arcillas. La gran mayoría de las arcillas tienden a transformarse a illitas, al momento del depósito en las zonas de muestreo de Cerro de Calabacillas y Cerro del Toro, la illita se depositó como otra arcilla y por medio de la diagénesis se transformó en illita.

Al momento del depósito de las arcillas, las zonas de muestreo del Cerro de Calabacillas y Cerro del Toro, se encontraban en zonas de facies superiores (Plataforma marina abierta (ZF 7) y margen de plataforma (ZF 5)), lo que explica porque en la zona de muestreo de Sierra del Meco no se encontrara tanta illita.

En la zona de muestreo de la Sierra del Meco se encontraron minerales de montmorillonita y caolinita, al igual que en una parte de Cerro de Calabacillas; esta zona y una parte de la anterior, fueron depositadas en ambientes más profundos (ZF 2, Plataforma profunda), por lo tanto, al momento de su depósito, se sugiere que el origen de estos sedimentos hayan sido por la acreción del Terreno Guerrero, ya que coinciden cronoestratigráficamente y composicionalmente. Mientras se estaba depositando la Formación Tamabra superior, llegaban sedimentos volcánicos y arcillas de la acreción del Terreno Guerrero.

Bibliografía.

Aparicio–Ceja, M. E., Carbajal–Arizaga, G. G., 2010, Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias, *Mundo Nano*, v 3 (2), 62 – 72.

Aslop, G. I., Marco, S., 2011, Soft – sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin, *Journal of Structural Geology*, 33, 433-457.

Besoain, E., 1985, *Mineralogía de Arcillas de Suelos*, Segunda Edición, Serie de Libros y Materiales Educativos, 1216 p.

Barboza-Gudiño, J. R., Markus, H., Gómez–Anguiano, M., Martínez–Macías, P., 2004, Aportaciones para la interpretación estratigráfica y estructural de la porción noroccidental de la Sierra de Catorce, San Luis Potosí, México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v 21 (3), 299- 319.

Baas, J. H., Best, J. L., 2002, Turbulence Modulation In Clay- Rich Sediment – Laden Flows and some implications for Sediment Deposition, *Journal of Sedimentary Research*, 72 (3), 336-340.

Baas, J. H., Best, J. L., Peakall, J., 2016, Comparing the transitional behaviour of kaolinite and bentonite suspension flows, *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 (3), 1911-1921.

Carrol, D. y Starkey, H. C., 1971, Reactivity of Clay Minerals with Acids and Alkalies. *Clays and Clay Minerals*, v. 19, 321 – 333.

Consejo de Recursos Minerales (CRM), 1992, Monografía Geológico – Minera del Estado de San Luis Potosí., Primera Edición, 218p.

Consejo de Recursos Minerales (CRM), 2002, Carta Geológico Minera Villa Hidalgo, F 1 4 - A 7 4, Escala 1:50,000 Estado De San Luis Potosí, 45p.

Cook, R., J., 1992, A Comparison of Methods for the Extraction of Esmectites from Calcareous Rocks by Acid Dissolution Techniques, Clay Minerals, v. 27, 73 – 80.

Cruz – Márquez, J., 2005, Mapeo Geológico Y Estudio Sedimentológico De La Secuencia Calcáreo-Arcillosa Del Cretácico Superior De La Sierra “El Meco”, Villa De Arista, S.L.P., Trabajo Recepcional, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, 52 p.

Dunham, R.J., 1969, Classification of carbonate rocks according to depositional textures, en Ham, W.E. (ed.), Classification of Carbonate Rocks: American Association of Petroleum Geologists, Memoir 1: 108-121.

Flügel, E., 2010, Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application: Germany, Springer, 976 pp.

Grim, R., E., Kodama, H., 2017, Clay Mineral (en línea), Enciclopedia Britannica Online, Reino Unido, Global Britannica, actualizado el 20 de febrero, 2014, disponible en< www.britannica.com/science/clay-mineral > consultado el 13 de noviembre del 2017.

Harriso, D., J., 1993, Industrial Minerals Laboratory Manual LIMESTONE, British Geological Survey, Technical Report WG/92/29, 54 p.

Heim, A., 1940, The front ranges of Sierra Madre Oriental, Mexico, from Ciudad Victoria to Tamazunchale: *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 33(2), 313-352 p.

Herrera–Rico, K., J., 2015, Deformación Sinsedimentaria Frágil – Dúctil en Carbonatos, controlados por el contenido arcilloso, Trabajo Recepcional, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, 76p.

Leith, C. K., 1923, *Structural Geology*, New York, Henry Holt & Co, 390p.

López–Doncel, R., 2003, La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles – San Luis Potosí, centro – noroeste de México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 20 (1), 1 – 19.

Luna–Rodríguez, J., 2008, Petrografía y geoquímica de isótopos estables ($\delta^{18}\text{O}$ $\delta^{13}\text{C}$) en calizas de la Formación el Abra, Hidalgo, México: Implicaciones de ambientes diagénéticos. Tesis Licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, 133p.

Mathers, A. C., Weed, S. B., Coleman, N. T., 1954, The effect of acid and heat on Montmorillonoids, *Clay and Clay Minerals*, The Clay Minerals Society, v. 3 (1), 403 – 412.

Nevin, S. M., 1942, *Principles of structural geology*, 3ra edición, New York, John Wiley and Sons. 320p.

Ostrom, M., E., 1961, Separation of Clay Minerals from Carbonate rocks by using acid, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 31, (1), 123 – 129.

Owen, G., Moretti, M., Alfaro, P., 2011, Recognising triggers for soft- sediment deformation: Current understanding and future directions., *Sedimentary Geology*, 235, 133-140.

Poppe, L. J., Paskevich, V. F., Hathaway, J. C., Blackwood, D. S., 2002, *A Laboratory Manual for X- Ray Powder Diffraction*, USGS, 88p.

Pettijhon, F. J., Potter, P. E., 1963, *Paleocurrents And Basin Analysis*, Berlin, Springer - Verlag, 296p.

Reading, H. G., 1996, *Sedimentary Environmens: Processes, Facies and Stratigraphy.*, United Kingdom, Blackwell Science Ltd, 688p.

Rodríguez–Hernández, E., López–Doncel, R., Barboza–Gudiño, J., Cruz–Márquez, J., 2009, Análisis sedimentológico – facial de clastos formadores de brechas calcáreas Cretácicas de una zona transicional Plataforma – Cuenca en el centro de México, v 26 (3), 687 – 708.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2013, Ficha Unidad Litoestratigráfica (Formación Tamabra) Léxico Estratigráfico de México, 4p.

Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2017, Difracción de rayos X, actualizado 22 de marzo de 2017, disponible en <http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Difraccion-de-rayos-X.html> consultado 13 de diciembre de 2017.

Will, G., 2006, *Powder Diffraction: The Rietveld Method and the Two – Stage Method*, Germany, Springer, 223p.

Zavala–Arriaga, M., M., 2013, Análisis Microfacial de una secuencia Margosa-
Calcárea de una zona de transición Plataforma-Cuenca del Cretácico Tardío en la
Porción Central de San Luis Potosí, México, Tesis, Universidad Autónoma de San
Luis Potosí, Maestría en Ciencias de la Ingeniería, 133p.

Anexos.

Anexo 1.

Zona de muestreo Cerro del Toro.

Muestra	Minerales	Porcentaje	% Insolubles	% Real arcilla	Estructura
CT01	Cuarzo	50.1	12.096	1.572	Laminada
	Anortita	37			
	Ilita	10.7			
	Caolinita	2			
	Montmorillonita	0.3			
	Biotita	0			
CT02	Cuarzo	75.3	19.648	2.240	Plegada
	Albita	12.9			
	Ilita	7.5			
	Montmorillonita	2			
	Caolinita	1.9			
	Biotita	0.4			
CT03	Cuarzo	47.7	29.231	9.676	Plegada
	Ilita	32.6			
	Albita	18.3			
	Biotita	0.9			
	Montmorillonita	0.5			
	Dickita	0			
CT04	Cuarzo	57.7	29.492	6.636	Plegada
	Albita	19.7			
	Ilita	12.8			
	Caolinita	9.7			
	Biotita	0.1			
	Dickita	0			
CT05	Cuarzo	52.4	16.118	2.305	Laminada
	Albita	33.2			
	Ilita	12.4			
	Caolinita	1.9			
	Biotita	0.1			
	Calcita	0			

CT06	Cuarzo	69.8	11.192	1.981	Falla
	Ilita	11.1			
	Albita	11			
	Caolinita	6.3			
	Biotita	1.6			
	Montmorillonita	0.3			
CT07	Calcita	38.2	10.870	1.478	Falla
	Albita	25.4			
	Cuarzo	22.8			
	Ilita	13.4			
	Montmorillonita	0.2			
	Caolinita	0			
CT08	Cuarzo	64.6	14.132	2.784	Plegada
	Ilita	16			
	Albita	14.1			
	Caolinita	3.7			
	Biotita	1.7			
	Calcita	0			
CT09	Cuarzo	58.7	10.879	2.143	Plegada
	Albita	19.9			
	Ilita	10.5			
	Caolinita	8.7			
	Biotita	1.6			
	Montmorillonita	0.5			
CT10	Cuarzo	69.1	27.811	2.948	Laminada
	Albita	19.7			
	Ilita	6.9			
	Caolinita	3.6			
	Biotita	0.6			
	Montmorillonita	0.1			
CT12	Cuarzo	70.6	16.853	1.753	Laminada
	Albita	11.1			
	Biotita	7.9			
	Ilita	7.5			
	Caolinita	2.7			
	Montmorillonita	0.2			

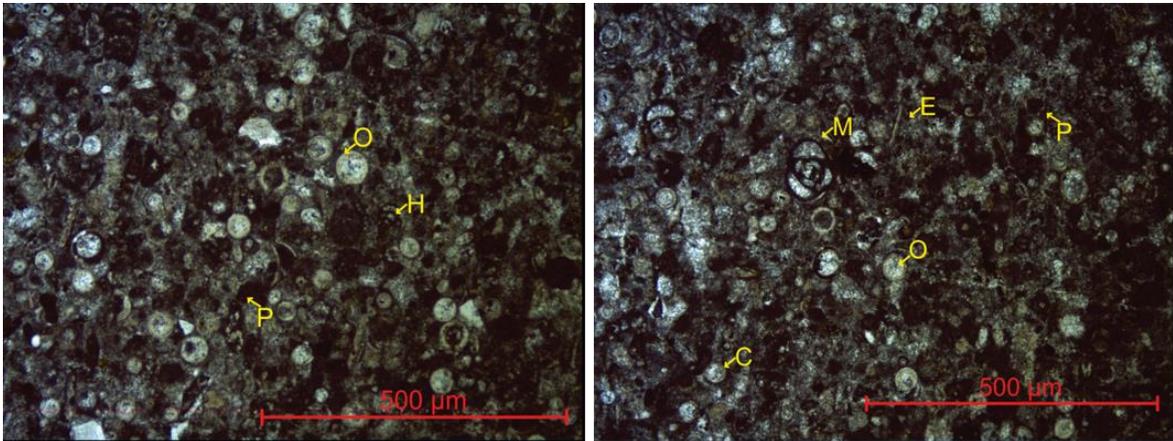


Figura 39. Lamina delgada CT01.

La muestra CT01 (Figura 39) tiene una masa básica microesparítico/ esparita en un 45%, el restante 55% de la muestra es de bioclastos de los cuales se tienen; *Pellets* con 30% (0.04-0.16mm), *Ooides* en 1% (0.04-0.2mm), que en algunos casos se ven un poco difusos y llegan a parecer *calcisferas*; *Heterohelix* 4% (0.12-0.2mm), (0.12-0.2mm), *Globorotalias* 2% (0.1mm), espículas de esponja 1% (0.2mm). La muestra se encuentra laminada.

La muestra tiene una textura de *grainstone* de grano soportado y matriz soportada en algunas partes; la muestra es una *pelleoimicroesparita*.

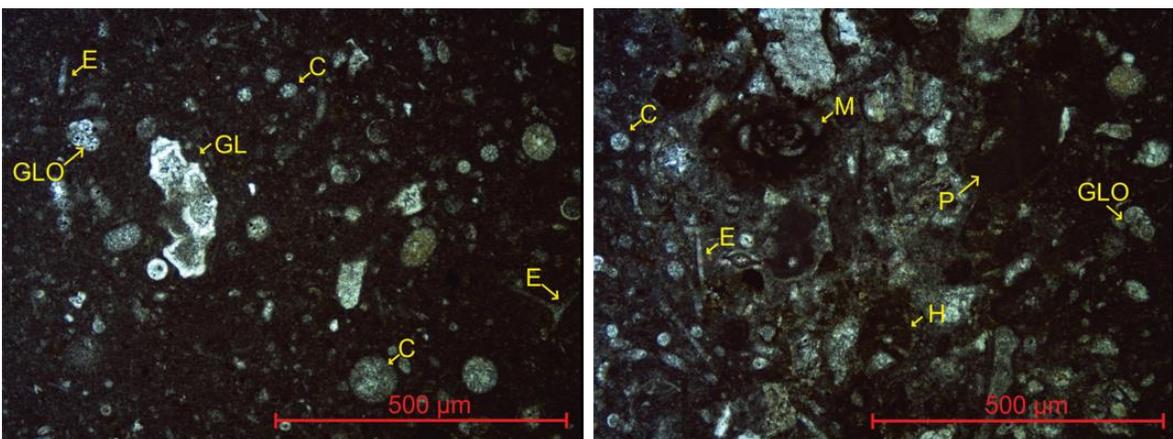


Figura 40. Lámina delgada CT09.

Muestra CT09 (Figura 40) tiene matriz micrítica con un 70% de la muestra, el restante 30%, es de bioclastos. La muestra se encuentra laminada y plegada; en una de sus láminas se encuentra fauna de extraclastos con algunos *peloides* y *miliolidos*. Los *peloides*, *globigerinas*, *heterohelix* y *miliolidos* eran muy pocos para ser considerados en los porcentajes totales. *Calcisfera* 15%, *Globotruncanas* 5%, espículas 5%, *heterohelix* 5%. La muestra cuenta con pirita. Es un *wackstone* / *biomicritico*

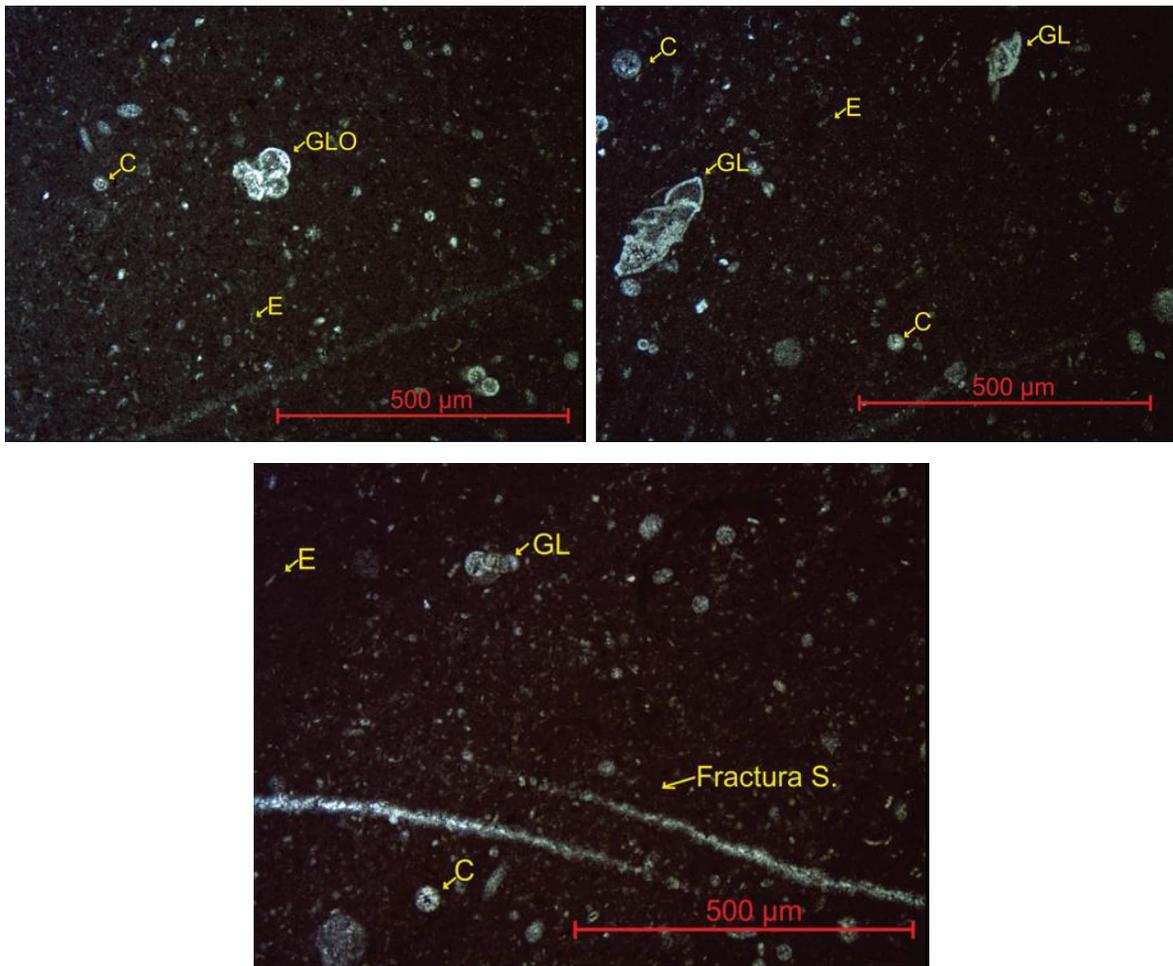
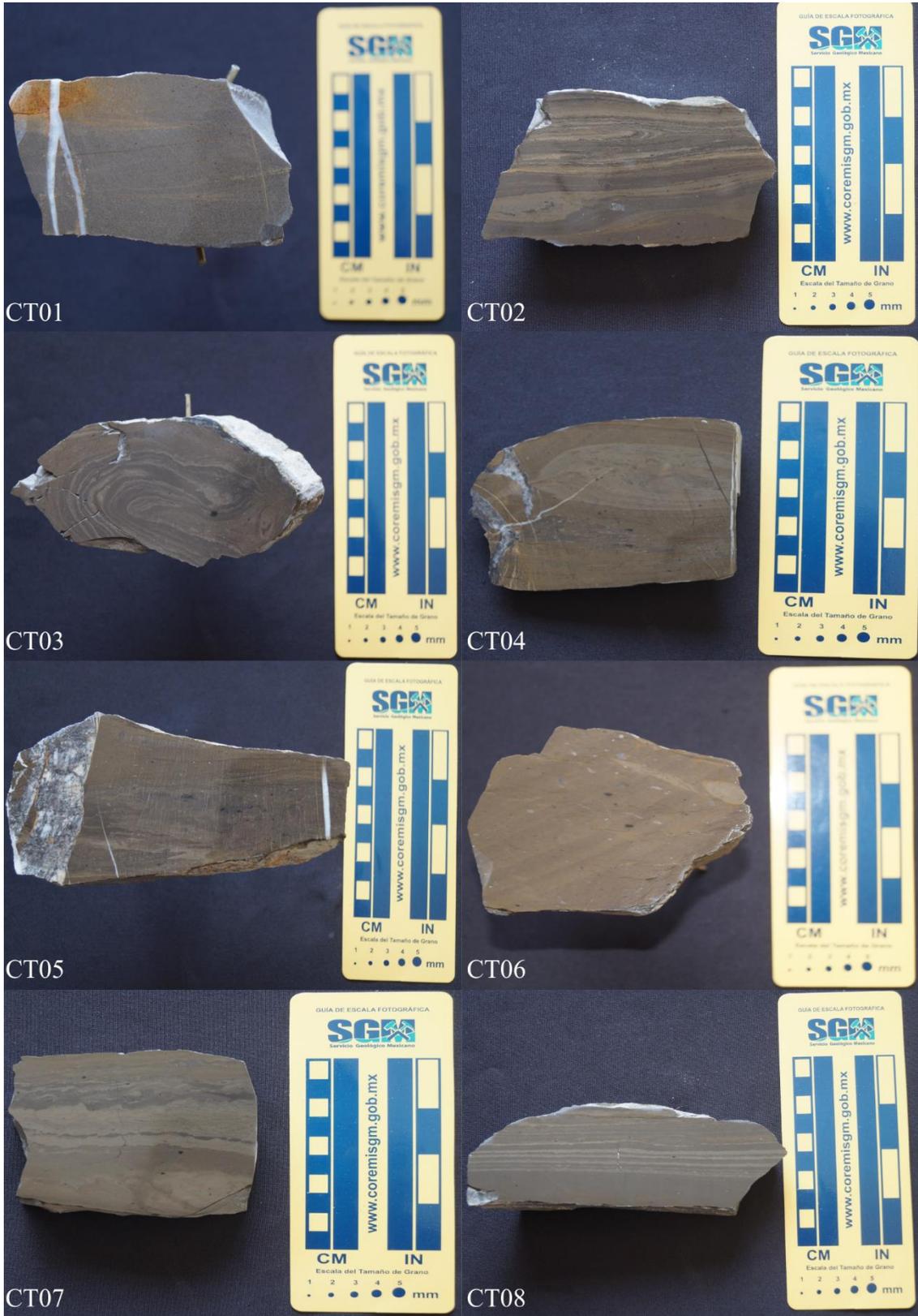


Figura 41. Lámina delgada CT06.

Muestra CT06 (Figura 41) con matriz micrítica con un 80% de la muestra, el restante 20% es de bioclastos; de los cuales, *Calcisferas* 7%, *Globotruncanas* 6%, *Globigerinas* 2% y espiculas 5%. Se puede observar en la muestra una fractura sinsedimentaria con movimiento. Es un *wackstone / biomicritico*.





CT09



CT10



CT11



Anexo 2.

Zona de muestreo Sierra del Meco.

Muestra	Minerales	Porcentaje	% Insolubles	%r Real de arcilla	Estructura
SM01	Calcita	91.3	10.964	0.252	Plegada
	Cuarzo	6.6			
	Albita	1.9			
	Montmorillonita	0.2			
SM02	Calcita	75.5	4.713	0.089	Falla
	Cuarzo	16.7			
	Moscovita	4.8			
	Pirita	4.5			
	Montmorillonita	0.5			
SM03	Calcita	77.3	7.780	5.827	Pliegue
	Illita	16.8			
	Cuarzo	4.7			
	Biotita	1			
	Montmorillonita	0.2			
SM04	Calcita	92	10.599	0.132	Pliegue
	Cuarzo	7.3			
	Biotita	0.6			
	Montmorillonita	0.1			
	Albita	0			
SM05	Calcita	87.9	15.588	7.966	Pliegue
	Illite	9.3			
	Cuarzo	4.3			
	Biotite	3.8			
	Pirita	0.8			
SM06	Calcita	77.9	15.762	9.914	Pliegue
	Caolinita	13.9			
	Cuarzo	8			
	Albita	0			
	Biotita	0.1			
SM07	Calcita	71.8	12.594	0.179	Pliegue
	Biotita	15			
	Albita	6.9			
	Cuarzo	5.9			
	Montmorillonita	0.4			

SM08	Calcita	70.4	10.155	3.465	Pliegue
	Biotita	13.6			
	Illita	10			
	Cuarzo	5.9			
	Montmorillonita	0.1			
SM09	Calcita	80.7	7.969	1.280	Pliegue
	Biotita	7.5			
	Albita	4.6			
	Cuarzo	4.1			
	Montmorillonita	3.1			
SM10	Calcita	70.4	14.646	2.185	Pliegue
	Biotita	11.3			
	Cuarzo	6.4			
	Albita	7.4			
	Montmorillonita	4.4			
SM11	Calcita	69.1	14.634	2.368	Pliegue
	Biotita	13			
	Albita	7.5			
	Cuarzo	5.4			
	Montmorillonita	5			
SM12	Calcita	80.5	5.293	0.709	Falla
	Muscovita	8.5			
	Biotita	6.5			
	Montmorillonita	2.6			
	Cuarzo	1.8			
SM13	Calcita	69.6	14.433	6.647	Pliegue
	Hectorita	9.7			
	Biotita	8.3			
	Cuarzo	8.1			
	Montmorillonita	4.3			
SM14	Calcita	73.9	21.134	6.802	Pliegue
	Cuarzo	15.7			
	Dickita	8			
	Biotita	2			
	Montmorillonita	0.4			

SM15	Calcita	72.6	16.666	5.861	Laminada
	Cuarzo	10			
	Hectorita	8.6			
	Biotita	7.7			
	Montmorillonita	1			
SM16	Calcita	72.1	14.698	3.530	Pliegue
	Cuarzo	13			
	Biotita	7			
	Montmorillonita	6.7			
	Pirita	1.2			
SM17	Calcita	58.9	14.514	2.184	Pliegue
	Biotita	27.6			
	Cuarzo	7.4			
	Hectorita	3.3			
	Montmorillonita	2.9			
SM18	Calcita	59	19.757	3.421	Pliegue
	Biotita	20.2			
	Cuarzo	9.1			
	Caolinita	7.1			
	Albita	4.6			
SM19	Calcita	52.7	12.881	8.370	Laminada
	Illita	30.5			
	Cuarzo	15.8			
	Albita	0.8			
	Montmorillonita	0.3			
SM20	Calcita	62.6	17.668	5.352	Laminada
	Cuarzo	24.6			
	Caolinita	10.3			
	Biotita	1.4			
	Montmorillonita	1			

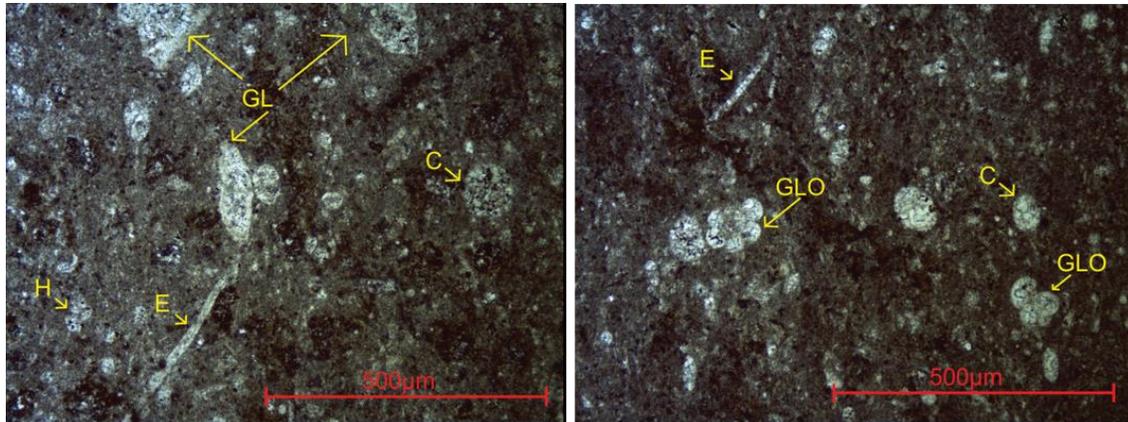


Figura 42. Lámina delgada SM19

La muestra SM19 (Figura 42) tiene una masa básica microesparítica en un 70%, el restante 30 % es de bioclastos; los bioclastos tienen textura *unwallet*, abundan las espículas de esponja 10%, *calcisferas* 10%, *globotruncanas* 7%, *globigerinas* 3%.

La muestra se encuentra laminada. Tiene textura *wakstone*.

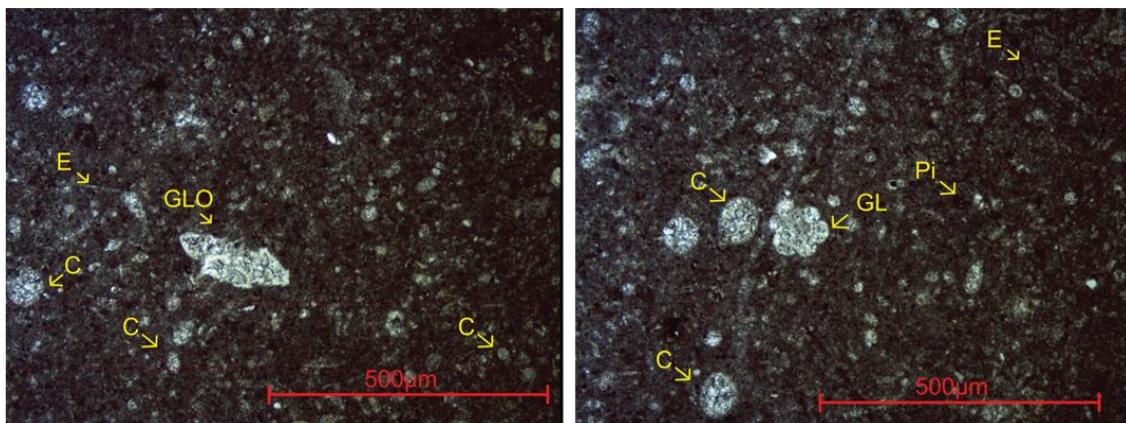


Figura 43. Lámina delgada SM07

La muestra SM07 (Figura 43) contiene masa básica microesparítica 70%, bioclastos 30%; los bioclastos tienen textura *unwallet*, contiene espículas de esponja 10%, *calcisferas* 15%, *globigerinas* 5%, *estracodo* 5% *pellets* 5%. La muestra se encuentra plegada. Tiene textura *wakstone*.

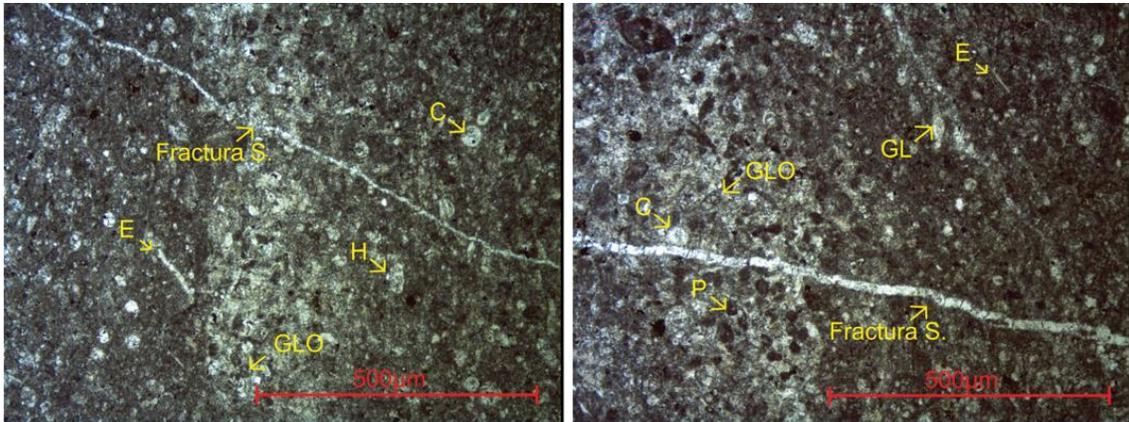


Figura 44. Lámina delgada SM12.

La muestra SM12 (Figura 44) tiene masa básica microesparítica 70%, bioclastos 30%; los bioclastos tienen textura *unwallet*, espículas de esponja 12%, *calcisferas* 10%, *globigerinas* 2%, *pellets* 3%, *globotruncanas* 3%. Las laminaciones oscuras están dadas por lamminas de *pellets*, contiene una fractura sinsedimentaria, donde se puede observar movimiento. Tiene textura *wakstone*.



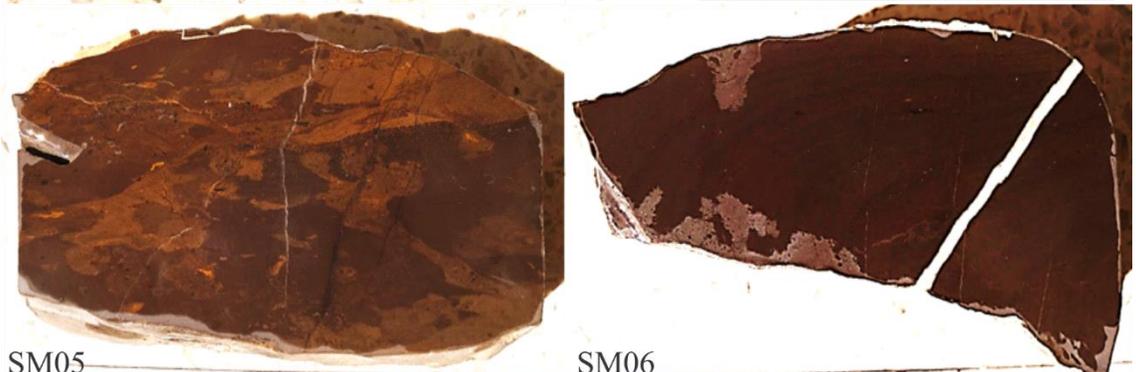
SM01

SM02



SM03

SM04



SM05

SM06



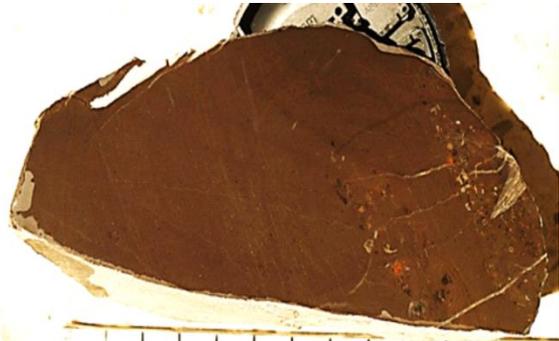
SM07

SM08

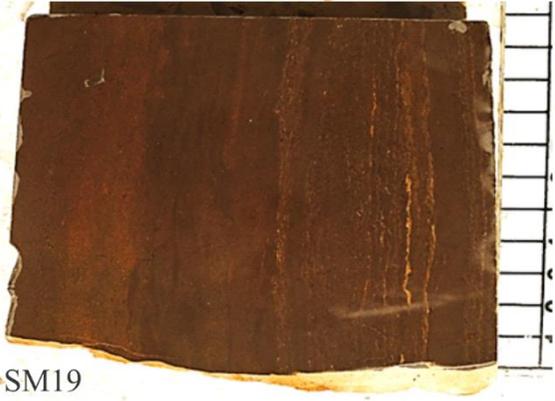




SM17



SM18



SM19



SM20

Anexo 3.

Zona de muestreo Cerro de Calabacillas.

Muestra	Minerales	Porcentaje	% Insolubles	%Real de arcillas	Estructura
CC01	Cuarzo	68	5.650	0.588	Laminada
	Albita	24.1			
	Ilita	8.8			
	Caolinita	5.3			
	Pirita	2.3			
	Calcita	2.3			
	Montmorillonita	1.6			
CC02	Biotita	0.5	3.312	0.344	Falla
	Cuarzo	88.6			
	Ilita	5.2			
	Caolinita	3			
	Dickita	2.1			
	Montmorillonita	0.1			
CC04	Biotita	6.2	21.273	0.638	Laminada
	Cuarzo	93.5			
	Ilita	2.7			
	Montmotillonita	0.1			
	Caolinita	0.2			
CC05	Ilita	1.4	6,746	0.270	Laminada
	Moscovita	1.7			
	Caolinita	2.6			
	Albita	10			
	Cuarzo	76.5			
CC06	Biotita	0.2	61.817	1.360	Pliegue
	Montmotillonita	0.4			
	Ilita	1.8			
	Calcita	4.4			
	Anortita	26.8			
	Cuarzo	66.4			

CC08	Cuarzo	88.4	6.546	0.700	Laminada
	Ilita	6.5			
	Caolinita	2.2			
	Dickita	1.6			
	Biotita	1			
	Montmotillonita	0.4			
CC10	Cuarzo	63	8.596	1.977	Laminada
	Ilita	17.6			
	Calcita	13.5			
	Caolinita	5.3			
	Pirita	0.8			
	Montmotillonita	0.1			
CC12	Cuarzo	72.2	7.252	1.958	Falla
	Ilita	16.5			
	Caolinita	7.5			
	Montmotillonita	3			
	Biotita	0.8			
	Calcita	0			
CC14	Cuarzo	83.8	19.939	2.732	Laminada
	Ilita	7.4			
	Caolinita	6.3			
	Moscovita	1.4			
	Biotita	1.1			
CC16	Cuarzo	86.5	24.924	1.072	Laminada
	Calcita	8.5			
	Dickita	2.7			
	Caolinita	1.2			
	Biotita	0.6			
	Montmotillonita	0.4			
CC18	Cuarzo	80.7	10.364	2.0	Laminada
	Ilita	10.4			
	Caolinita	5.8			
	Dickita	2.9			
	Montmotillonita	0.2			
	Biotita	0			

CC28	Cuarzo	87.1	9.534	1.239	Laminada
	Ilita	7.2			
	Dickita	5.8			
	Moscovita				
	Biotita				
	Caolinita				
CC38	Cuarzo	87.4	23.323	2.752	Pliegue
	Caolinita	4			
	Montmotillonita	3.5			
	Ilita	2.6			
	Dickita	1.7			
	Biotita	0.7			
CC40	Cuarzo	84.7	18.321	2.693	Falla
	Caolinita	7			
	Montmotillonita	3.9			
	Ilita	3.8			
	Biotita	0.6			
	Calcita	0			
CC41	Cuarzo	56.5	15.155	1.031	Pliegue
	Calcita	36.5			
	Dickita	6.7			
	Biotita	0.3			
	Montmotillonita	0.1			
	Caolinita	0			
CC42	Cuarzo	85.9	17.829	0.820	Pliegue
	Ilita	7.7			
	Caolinita	4.4			
	Biotita	0.4			
	Montmotillonita	0.2			

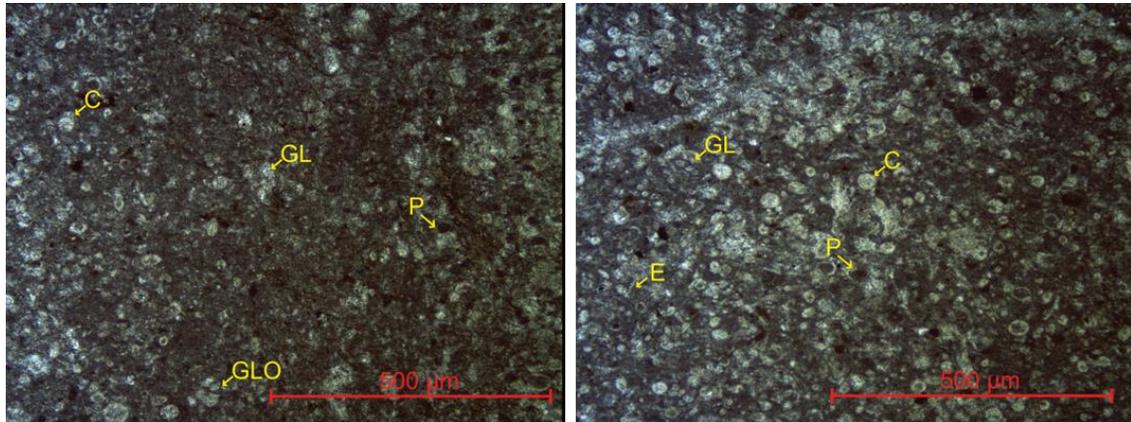


Figura 45. Lámina CC07.

La muestra CC07 (Figura 45) cuenta con láminas, de las cuales algunas tienen una masa básica microesparítico (60%) y las demás con matriz micrítica (40%); la muestra cuenta con un total de 60% entre cementante y matriz, y el restante está contenido por componentes bioclásticos (40%). La muestra contiene una fractura que presenta movimiento. El 60% de los componentes bioclásticos son *Calcisferas*, con un tamaño que oscila de 0.06 a 0.1 mm. Las *Globotruncanas* tienen un 25% de la muestra y un tamaño de 0.04 a 0.1mm. Los *pellets* se encuentran en un 10% y con un tamaño de 0.06 a 0.2mm. Y el restante 5% es de cristales de Pirita. La muestra entra en la clasificación de *Dunham* como un *wackstone/packstone* o como un *Biomicroesparita* en la clasificación de *Folk*.

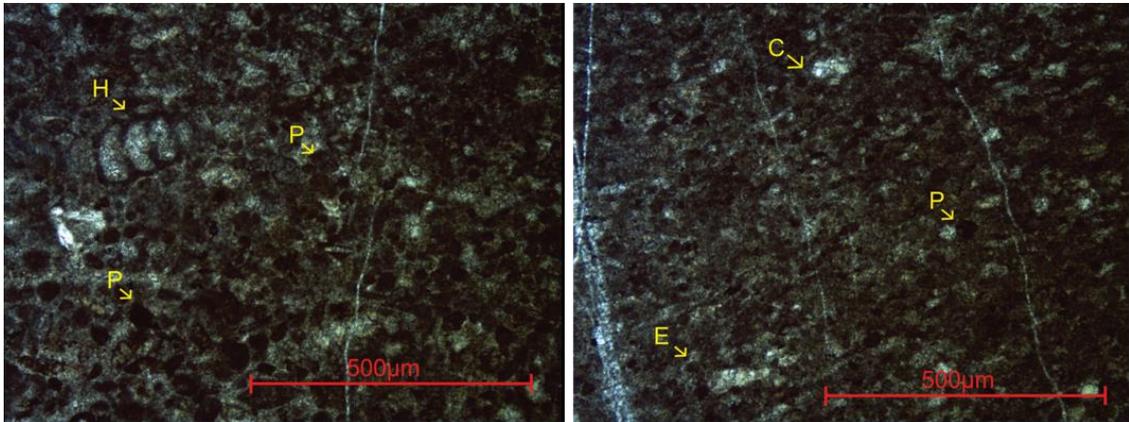


Figura 46. Lámina CC30.

La muestra CC30 (Figura 46) contiene una masa básica esparítica (40%), el restante está dado por bioclastos 60%; de los cuales tiene pellets en 48%, foraminíferos planctónicos como; *heterohelix* 6% y *globigerinas* 4.2% y el restante en *calcisferas* 1.8%. La muestra entra en la clasificación de *Dunham* como un *wackstone*

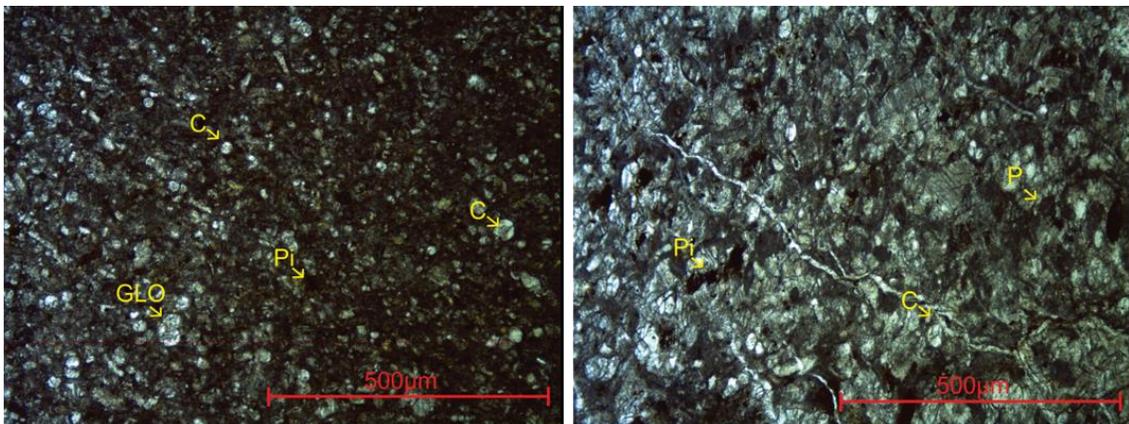


Figura 47. Lámina 29cc.

La muestra CC29 (Figura 47) tiene cementante microesparítico con un 55%, el restante son bioclastos de *calcisferas* 35% de 0.04 a 0.1mm y pirita 10% 0.02 a 0.06 mm. Altamente plegada, plegaduras rellenas de sílice y algunas con calcita. Es

una roca pelágica de limos *mudstone* y *wakstone* con abundantes microfósiles pelágicos.

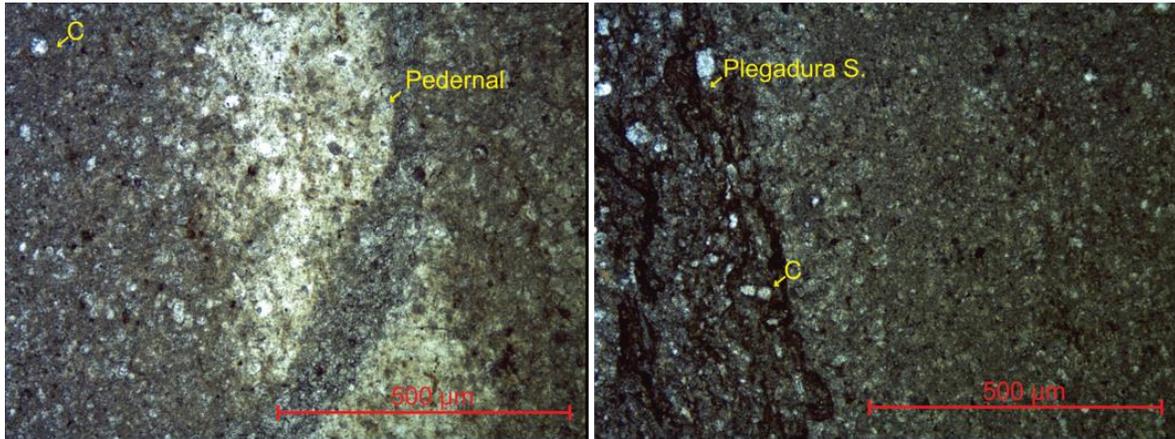


Figura 48. Lámina CC06.

La muestra CC06 (Figura 48) cuenta con un 70% de masa básica microesparítico, el restante 30% es de bioclastos con estructura *unwallet*. De los pocos bioclastos reconocibles en la muestra son de pequeñas *calcisferas*, algunos pedazos de concha de rudistas. La muestra presenta plegamiento con algo de fallamiento, tiene laminación de *mudstone* / *wakstone* intercaladas con láminas de pedernal.

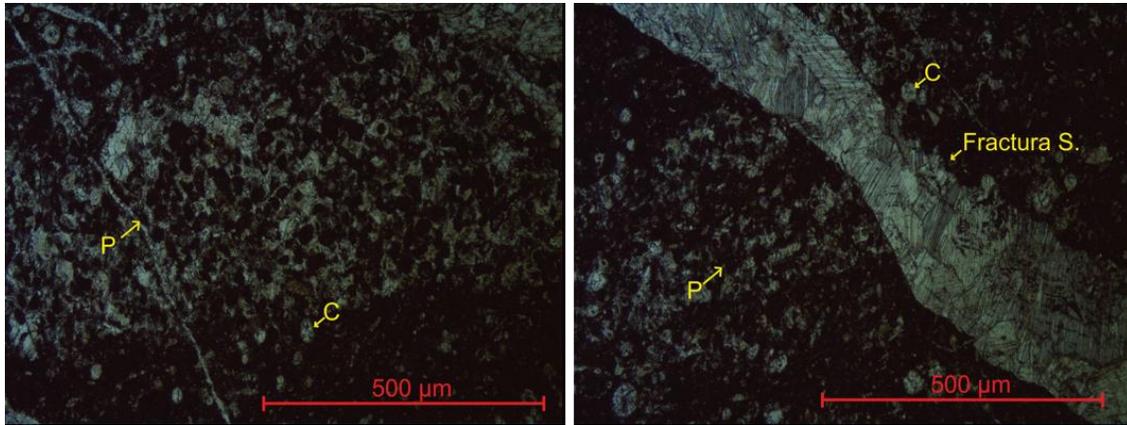


Figura 49. Lámina CC02.

La muestra CC02 (Figura 49) cuenta con láminas, de las cuales algunas tienen una masa básica microesparítica (45%) y las demás con matriz micrítica (65%). Cuenta con movimiento de fractura. En su mayoría, los componentes bioclásticos son *pellets* con un 80%, *Calciesferas* 12%, *c/P?* 5% y 3% de *heterohelix* 3%. Es un Pellmicrimicoesparita, un *packstone/grainstone*.

