

VI. RESPUESTA DE LOS RAYOS GAMMA EN LAS FACIES DE LA FORMACIÓN MORELOS

6.1 INTRODUCCIÓN

El registro de rayos gamma (RG) originalmente desarrollado para el estudio de pozos en la industria petrolera en los años 60's (Koptíková, et. al., 2010), es una técnica ampliamente utilizada como indicador litológico, particularmente útil para la identificación de unidades arcillosas debido a la concentración de elementos radioactivos de estas. Posteriormente el registro de rayos gamma naturales (NGS) que a diferencia del RG que solo mide la radioactividad total, permitió la medición de las concentraciones individuales de Potasio (K), Uranio (U) y Torio (Th), los tres isotopos radioactivos que producen la mayor parte de la radiación gamma en la Tierra. Sin embargo la técnica aplicada a rocas expuestas en la superficie ha sido utilizada recientemente (Aigner et al., 1995; Postma y Ten Veen, 1999; Ruffell y Worden, 2000; Pawellek y Aigner, 2003; Collins et al., 2006). En estas publicaciones se han documentado estudios en rocas carbonatadas y han reportado que el patrón de rayos gamma tiene una relación distintiva con las facies depositacionales.

En este estudio se analizó la respuesta de los rayos gamma en rocas carbonatadas de facies someras de la Formación Morelos y su relación con la ciclicidad en las facies.

6.2 OBJETIVO

El objetivo principal de este capítulo es observar la respuesta del espectrómetro de rayos gamma en rocas carbonatadas de facies someras. Así como observar la respuesta que tienen cada una de las curvas de K, U y Th, y su asociación con las facies analizadas.

6.3 GENERALIDADES

Los minerales son los componentes básicos de las rocas, algunas rocas están compuestas casi por completo de un solo mineral, el ejemplo más común son las calizas, constituidas básicamente por calcita, sin embargo frecuentemente contienen ciertas cantidades de otros minerales.

Un elemento químico comúnmente puede contener variaciones en su número de neutrones; estas variaciones, llamadas isótopos pueden ser de núcleos estables o inestables. Especialmente aquellos elementos químicos pesados con número atómico mayor a 83 son inestables o radioactivos (Ershova, 1967; Arroyo-Carrasco, 2007); y sufren un proceso de desintegración espontánea para formar isótopos más estables, conocido como decaimiento radioactivo.

Durante el proceso de decaimiento se presenta una liberación de energía en tres formas diferentes, como rayos alfa, beta y gamma. Los rayos alfa son partículas de carga positiva, los beta son de carga negativa, y los rayos gamma no poseen carga. Los rayos gamma se manifiestan como impulsos de ondas electromagnéticas, formadas por fotones de muy alta frecuencia (Fig. 6.1). Debido a la gran cantidad de energía que poseen, éstos pueden penetrar la materia a una mayor profundidad que los rayos alfa y beta. De esta manera la materia por la que atraviesan los fotones se excita y puede generar electrones secundarios que son

utilizados para captar o medir la radioactividad del material (Arroyo-Carrasco, 2007).

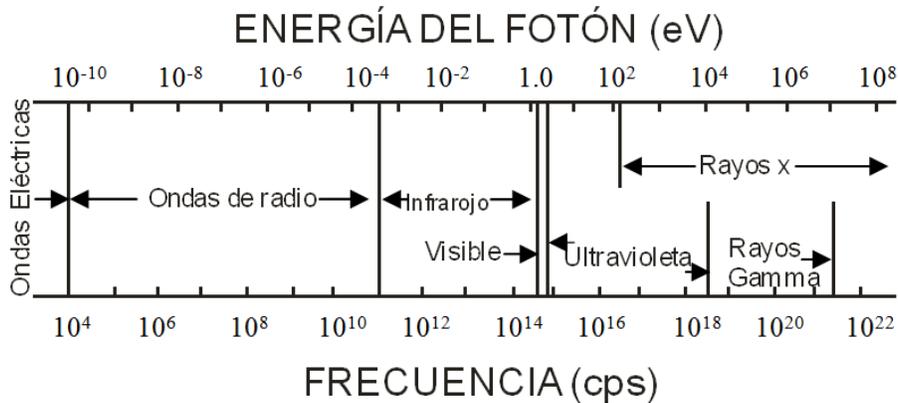


Fig. 6.1. Rayos gamma dentro el espectro electromagnético (Lapp y Andrews, 1964).

6.4 REGISTRO DE RAYOS GAMMA

El registro de rayos gamma (RG) es una medición de la radioactividad natural de las formaciones rocosas. Los RG son emitidos espontáneamente por algunos elementos radioactivos, en su mayoría por los isótopos K^{40} con una vida media de 1.3×10^9 años; el U^{238} con una vida media de 4.4×10^9 años y el Th^{232} con una vida media de 1.4×10^{10} (Bassiouni, 1994).

Los rayos gamma interactúan con la materia en tres diferentes procesos, como efecto fotoeléctrico, efecto Compton y como producción de pares (Fig. 6.2). De estos procesos solo el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton son de nuestro interés, ya que la energía de los isótopos radioactivos de K, U y Th se encuentra dentro de estos efectos.

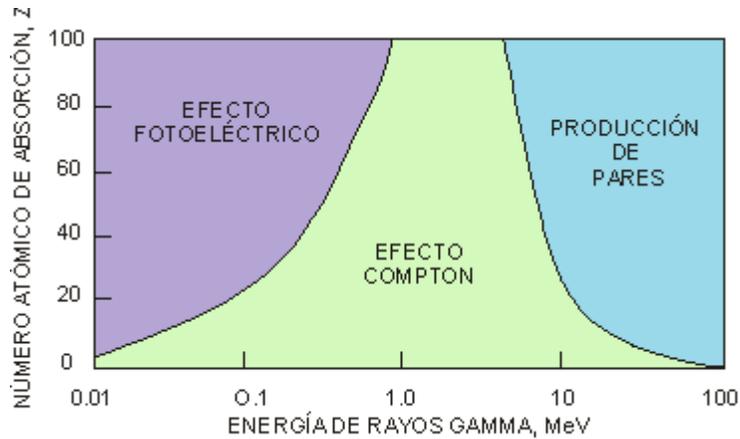


Fig. 6.2. Mecanismos de interacción dominantes en los Rayos Gamma (Evans, 1967).

El efecto fotoeléctrico se presenta cuando un fotón choca con un átomo. La energía en esta interacción es transmitida a un electrón, parte de esta energía es utilizada para expulsar al electrón, y el resto de la energía es absorbida por el propio electrón (fotoelectrón; Fig. 6.3a), así estos fotoelectrones serán eventualmente capturados por otros átomos en el medio. En el efecto Compton los fotones gamma incidentes son de mayor energía y al igual que en el efecto fotoeléctrico parte de esta energía es consumida en la expulsión del electrón, pero la energía restante da como resultado a otro fotón gamma de menor energía (Fig. 6.3b). Este nuevo fotón seguirá disgregándose al interactuar con otros átomos hasta que alcance el dominio fotoeléctrico y sea finalmente capturado (Bassiouni, 1994).

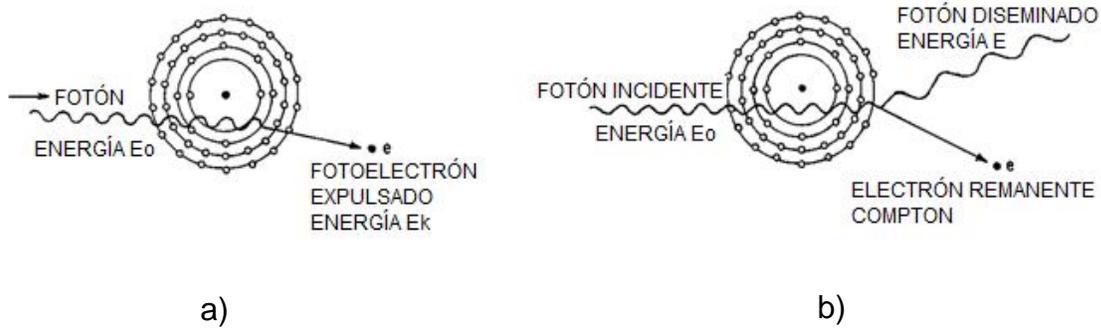


Fig. 6.3. Representación de las interacciones de los fotos con la materia a través de: a) Efecto fotoeléctrico y b) Efecto compton (Modificado de Lapp y Andrews, 1964).

La energía del decaimiento de los principales isotopos radioactivos de la Tierra se presenta dentro del efecto fotoeléctrico y del efecto Compton. El decaimiento radioactivo del isótopo K^{40} emite solo un nivel de energía (1.46 MeV) al pasar a Ar^{40} . Mientras que el U^{238} y Th^{232} emiten rayos gamma a diferentes energías (Fig. 6.4), hasta llegar a los isótopos estables de Pb^{206} y Pb^{208} , respectivamente (Bassiouni, 1994).

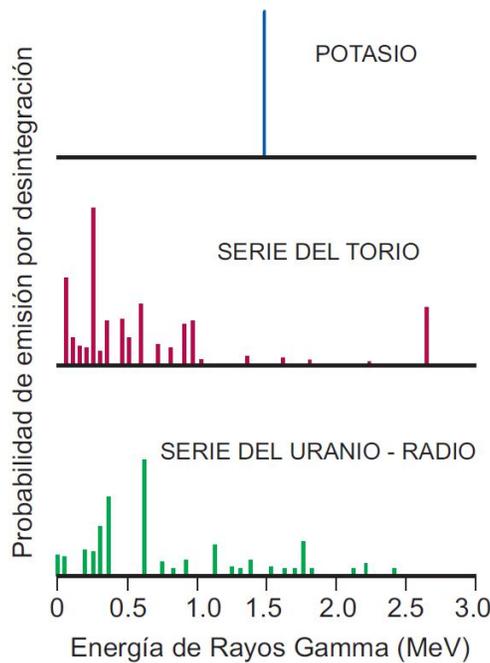


Fig. 6.4. Niveles de energía del K, U y Th durante su decaimiento radioactivo (modificado de Schlumberger, 1987)

6.5 EQUIPO DE MEDICIÓN

Para el presente trabajo se utilizó un espectrómetro de rayos gamma modelo GR-320 de la marca Exploranium®, que consiste en un sensor y una fuente equipada con un cristal de yoduro de sodio (NaI) y un tubo fotomultiplicador (Fig. 6.5).

Cuando existe una emisión de rayos gamma, estos inciden en el cristal provocando una emisión de fotones luminosos (centelleos) que golpean una superficie fotosensible conocida como fotocátodo (Arroyo-Carrasco, 2007). Esto provoca una emisión de fotoelectrones dentro de un campo eléctrico que interactúan con ánodos ubicados a potenciales cada vez más altos. En en cada ánodo los electrones se multiplican como resultado de emisiones secundarias de electrones, de esta forma un gran número de electrones es almacenado en el último ánodo donde la carga se amplifica y es grabada por el equipo (Bassiouni, 1994).



Fig. 6.5. Espectrómetro de rayos gamma, marca Exploranium®.

El espectrómetro está caracterizado por una buena sensibilidad de detección y una alta eficacia de detección entre 50% y 60% de centelleos. El equipo es capaz

de recibir RG en diferentes espectros (Postma y Ten Veen, 1999) como se muestran en la figura 6.6, estas ventanas reciben los siguientes niveles de energía:

- 1) La ventana de K que presenta toda la energía dentro de 1.36 MeV – 1.58 MeV. Indica la presencia de K^{40} , pero también fotones disgregados Compton Bi^{214} y Tl^{208} .
- 2) La ventana de U procesa toda la energía dentro 1.66 MeV – 1.86 MeV; indica la presencia de U^{238} , y también fotones disgregados Compton del Tl^{208} .
- 3) La ventana de Th que procesa 2.46 MeV – 2.78 MeV, solamente indica la presencia del Th^{232} .
- 4) La cuenta total de la ventana 1 (V1), que presenta toda la energía por arriba de 80 keV
- 5) La cuenta total de la ventana 2 (V2), que presenta toda la energía por arriba de 400 keV y aunque es más restringida que V1, los datos son más factibles para formaciones que presentan una baja radioactividad.

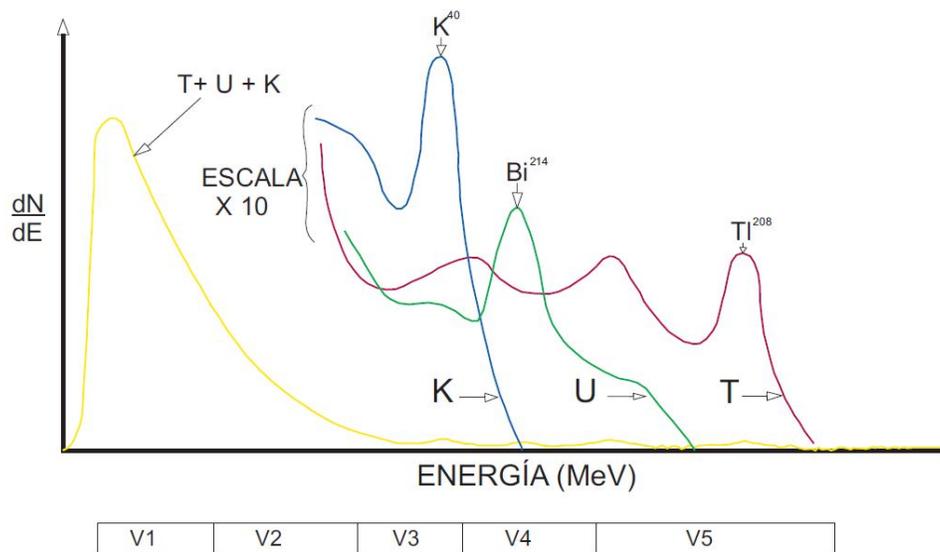


Fig. 6.6. Espectros de las series de K, U y Th (Serra et al., 1980).

6.5.1 Errores de medición

El equipo nos ofrece resultados inmediatos *in situ*, con una ventaja adicional, su fácil manejo. Sin embargo, por las condiciones del terreno se pueden presentar errores en las mediciones debido a diversos factores que distorsionan los valores reales en las lecturas y que pueden ser atribuidos a:

- Una superficie irregular; la superficie debe ser suficientemente extensa, aproximadamente 25 cm (Postma y Ten Veen, 1999) para que el ángulo de detección sea de 180° (Fig. 6.7a).
- Que el intervalo a medir sea de un radio menor al radio de medición del detector (25 cm) como se muestra en la figura 6.7b (Postma y Ten Veen, 1999).
- La presencia de espacios abiertos (Fig. 6.7c) cerca del radio de medición afecta la respuesta del detector debido a la ausencia de una fuente radioactiva específica (radioactividad del aire libre; Postma y Ten Veen, 1999).
- El grado de meteorización que puede generar irregularidades en la roca, por ejemplo fracturas en las que puede existir presencia de lixiviados con contenidos de isótopos radioactivos que afecten las lecturas (Levinson y Coetzee, 1978).
- Que las rocas no se encuentren en un equilibrio radioactivo o equilibrio secular, es decir que los isótopos padre decaigan en el mismo número de isótopos hijo (Adams y Fryer, 1964). Puede asumirse que para rocas mayores a 1 Ma se encuentran en equilibrio radioactivo (Levinson y Coetzee, 1978).

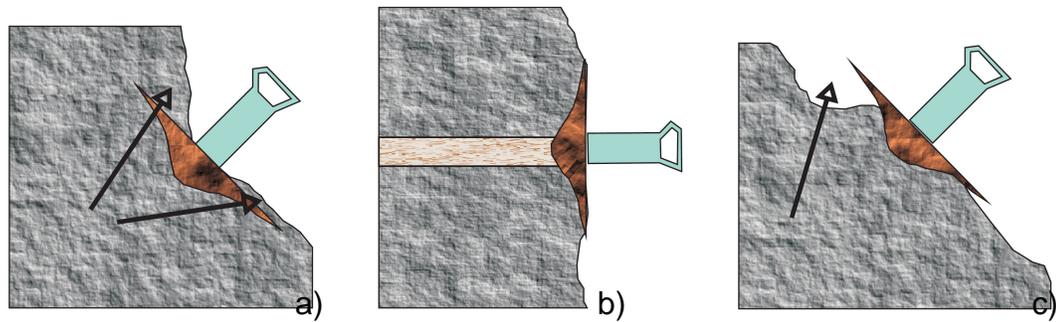


Fig. 6.7. La zona de color marrón muestra el volumen de roca detectado por el espectrómetro de rayos gamma. a) La superficie irregular provocará una sobrestimación de los valores. b) La medición de la capa intermedia se verá afectada por la radiación producida de las capas adyacentes c) La lectura de la roca se verá reducida por el espacio vacío. (Modificado de Svendsen, y Hartley, 2001).

6.6 METODOLOGÍA

Al inicio de cada jornada de medición se realizó un diagnóstico del equipo, mediante una prueba de estabilización con la finalidad de observar que la fuente (cristal de NaI) alcanzara los niveles de energía óptimos para obtener buenas lecturas, observando los picos de energía alcanzados por una fuente conocida, en este caso el isótopo Cs-137 (661.6 KeV), así como una buena conexión entre el sensor y la fuente. Los intervalos de medición se realizaron entre 30 a 40 cm aproximadamente a lo largo de la sección 2.

Con el objetivo de minimizar los errores en las lecturas se procuró a la medida de lo posible tomar las mediciones en superficies planas, descubiertas (sin suelo) y sin fracturas abiertas. Se realizó un total de 477 mediciones en la Sección 2. En cada punto de medición se tomaron 5 datos con un intervalo de exposición de un minuto para los primeros 105 datos. Sin embargo, por las pruebas realizadas y sin notar variaciones importantes en el mismo punto de medición, el tiempo de exposición se redujo a 30 segundos con la finalidad de agilizar la medición y obtener un mayor número de datos.

Los valores tomados se almacenan digitalmente por el equipo en unidades de ppm para el U y el Th, y en % para el K. A través del software GR320 Date Explore v.5, se descargaron en formato ASCII (Anexo 3).

Se consideró la metodología propuesta por Postma y Ten Veen (1999) como la más adecuada para el análisis de los RG: se eliminó el valor más alto y el más bajo de los cinco datos obtenidos en cada punto de medición, y se obtuvo el promedio de los tres valores restantes, a estos datos se les realizó una conversión a unidades, de acuerdo con la American Petroleum Institute (API), estos corresponden a 1 ppm Th = 2.54 API, 1 ppm U = 6.69 API y 1% K = 10.64 API, para finalmente obtener la suma total en unidades API, con la finalidad de utilizar datos en unidades empleadas dentro de la industria petrolera.

Finalmente se analizaron 5 muestras de la sección 2 con el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) de la marca Carl Zeiss y con el detector de longitud de onda dispersiva WDX-400, del Instituto Mexicano del Petróleo, para el análisis de 5 muestras de la sección 2.

Se realizaron mediciones con la finalidad de conocer la sensibilidad del espectrómetro al cambio de litologías entre rocas carbonatadas y rocas terrígenas. Estos datos (28 mediciones, anexo 3) fueron medidos en afloramientos de la Formación Mexcala y la Formación Morelos, cerca del poblado de Valle de Vázquez en el Municipio Tlaquiltenango, al sur del Estado de Morelos. También se tomaron muestras de roca de estos afloramientos en los puntos donde se observaba un claro cambio en las litofacies para ser observados en lámina delgada. Los resultados a su respuesta de rayos gamma se observa en la figura 6.8.

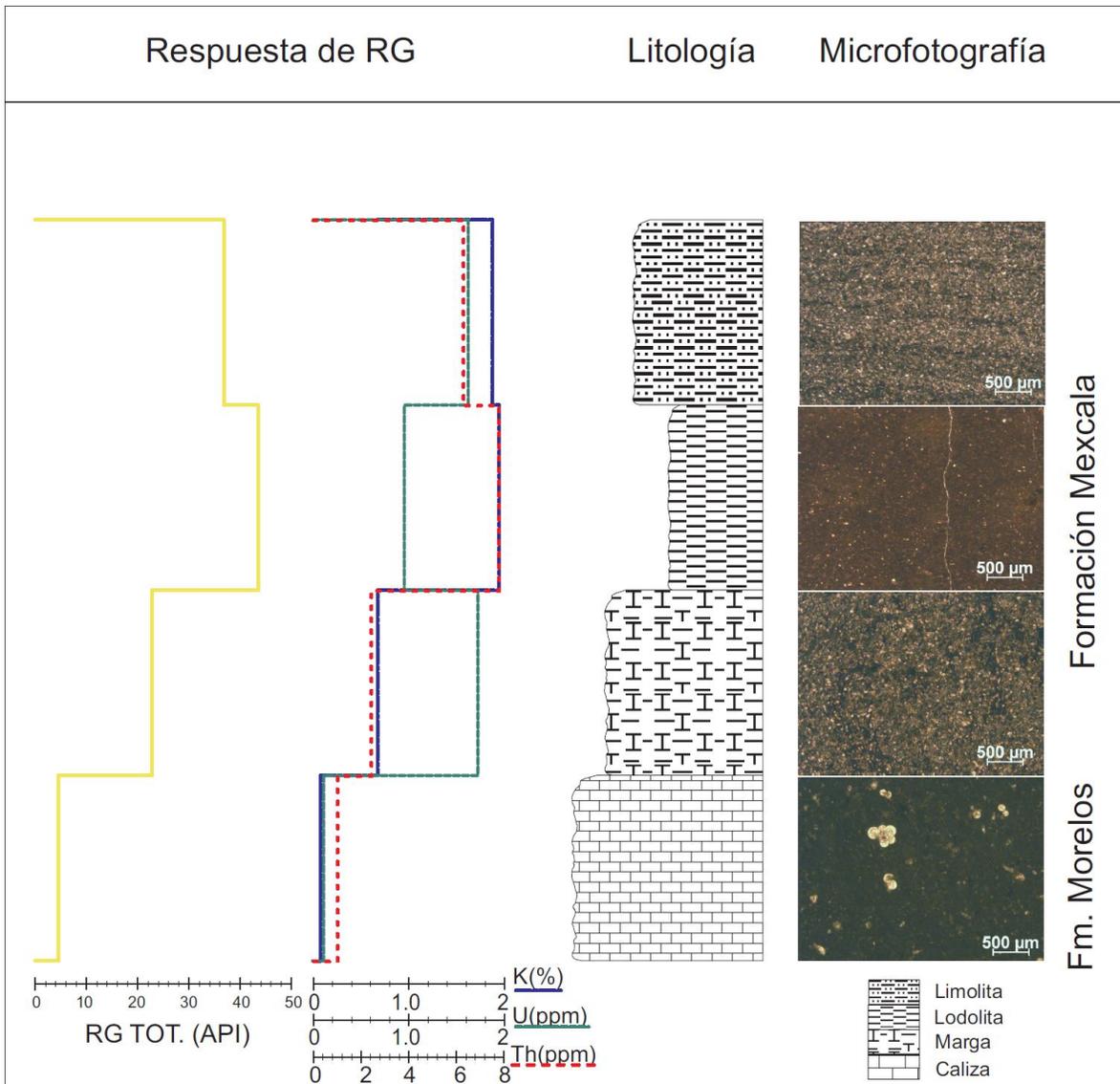


Fig. 6.8. Respuesta de los rayos gamma a litologías pertenecientes a la Formación Morelos y Formación Mexcala.

Estos datos muestran una clara respuesta al cambio de facies, para rocas de grano fino (lodolitas y limolitas), los valores de rayos gamma son muy altos (mayores a 30 unidades API) debido a su alto contenido arcilloso, mientras que para rocas de grano más grueso (arenisca calcárea) y en calizas (wackestone de

foraminíferos plantónicos), estos valores tienden a disminuir (22 y 4 unidades API respectivamente).

6.7 RESULTADOS

Con la finalidad de observar la tendencia de la respuesta de los rayos gamma totales (suma de la curva de K, U y Th) en las rocas carbonatadas de la Formación Morelos, los datos fueron ubicados dentro de la sección 2 (Fig. 6.9). Posteriormente se analizan las curvas individuales de K, U y Th, para analizar los principales picos que se presentan en la sección 2 (Fig.6.19).

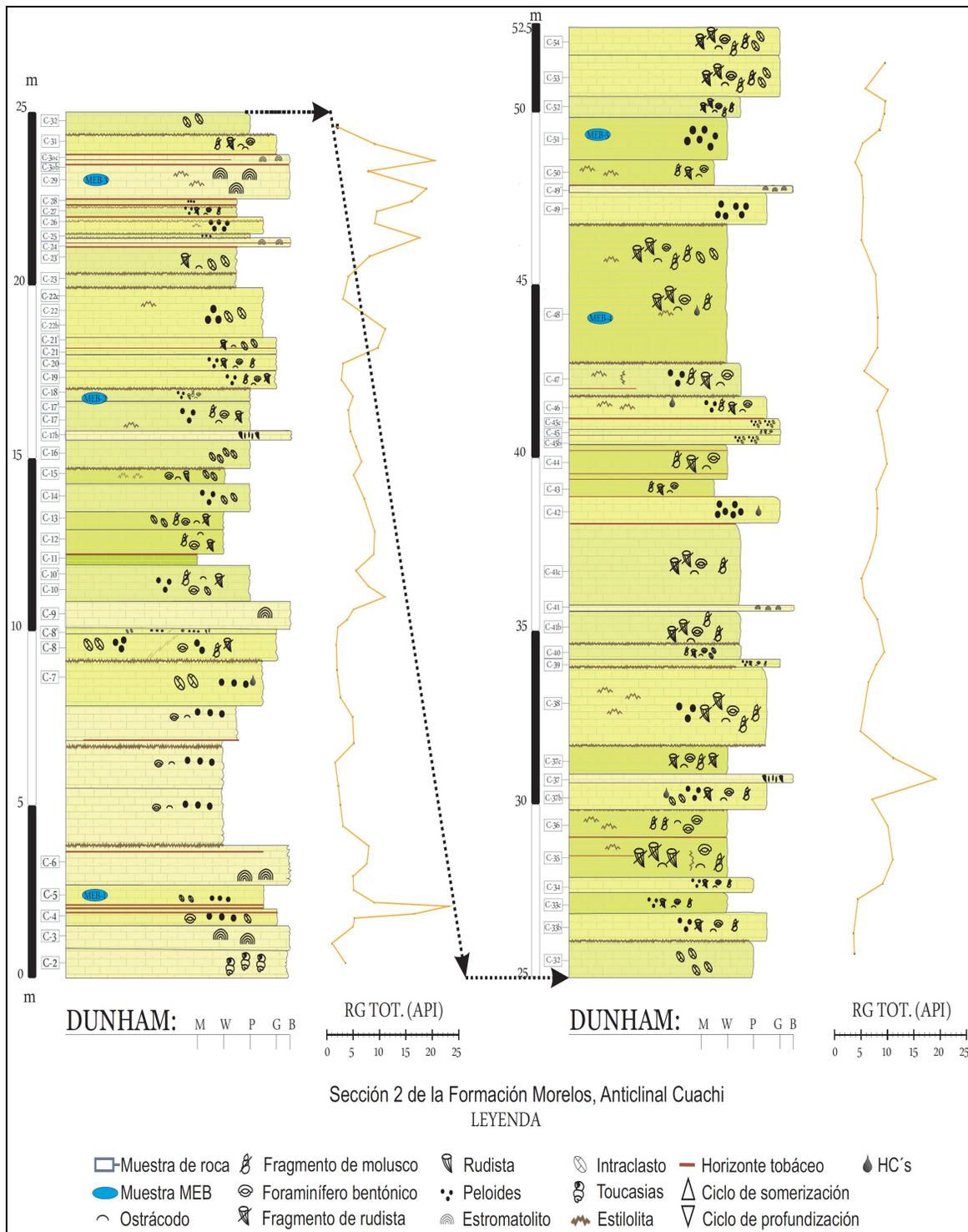


Fig. 6.9. Respuesta de los rayos gamma de las facies carbonatadas de la Formación Morelos.

6.7.1 Patrones en el espectro de RG

El análisis del perfiles de rayos gamma totales, así como las curvas individuales de K, U y Th nos indica que la mayor correlación a la respuesta total la presenta la curva de K, el U muestra una contribución moderada a lo largo de toda la sección 2, mientras que la curva del Th presenta la menor contribución a la respuesta total debido a la dispersión que se observan en los datos (Fig. 6.10).

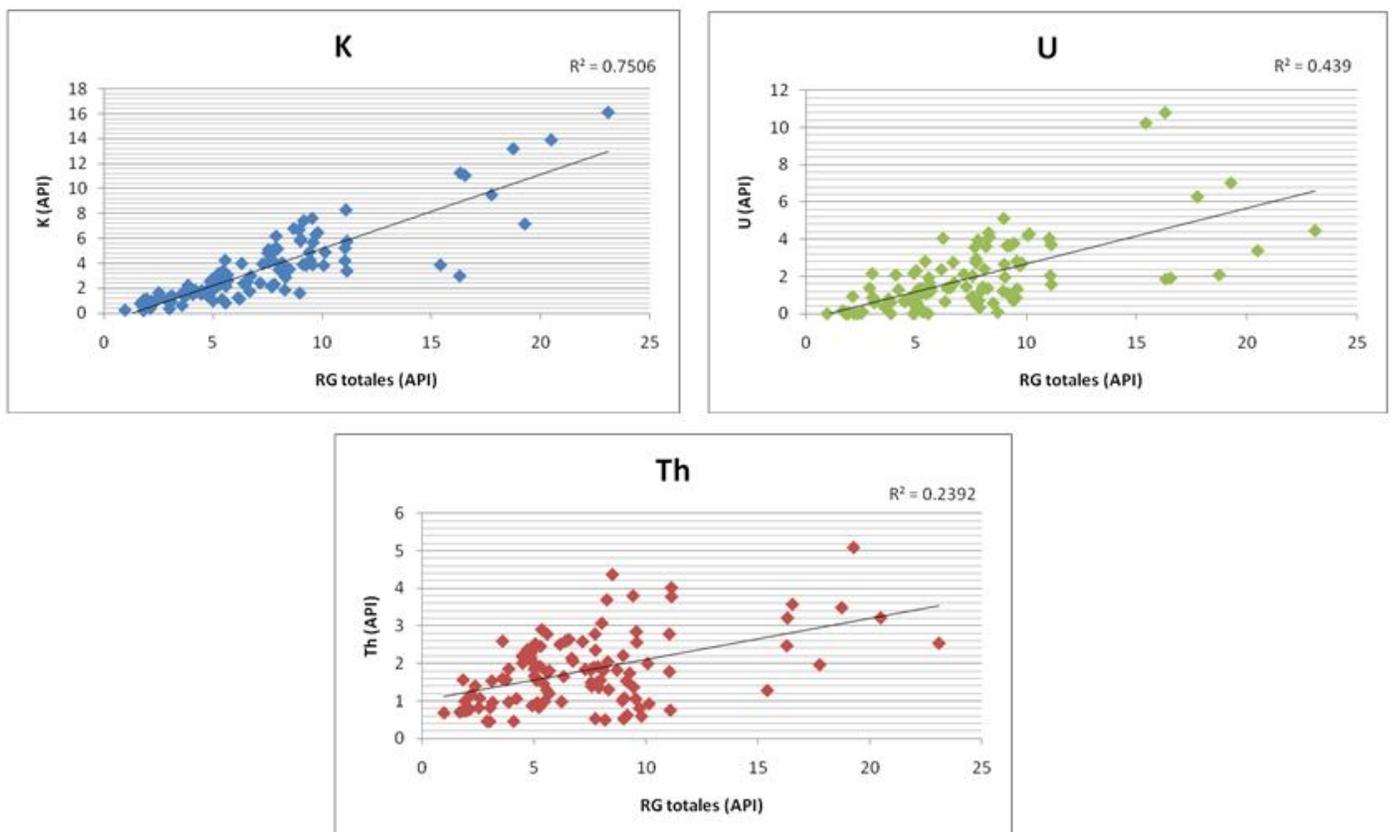


Fig. 6.10. Relación lineal de la respuesta de los rayos gamma totales con los isotopos de K, U y Th.

Esta relativa alta correlación del K se atribuye a que éste es un elemento es muy común en sedimentos (feldespatos, arcillas, micas) y por lo cual la probabilidad de presentarse en diversos ambientes aumenta. La respuesta del U es atribuida a la constante presencia de materia orgánica a lo largo de la sección 2. Mientras que la baja correlación del Th con la respuesta total de RG es posiblemente debido a que por su alta solubilidad y su rápida precipitación, este es principalmente transportado como partículas (Andersson et al., 1995), las cuales no representan un componente mayor en las facies estudiadas.

La respuesta de los rayos gamma a las facies sedimentarias presenta tres formas características, la forma de campana, de embudo y en forma de bloque o cilindro (Fig. 6.11). Estos modelos han sido principalmente aplicados para facies terrígenas, donde los valores que ofrece el registro de RG son de escala de decenas a centenas de unidades API por la cantidad de material arcilloso que contienen y por lo cual son claramente identificables. En este trabajo se hace una analogía con las rocas carbonatadas, en las calizas de textura lodo soportadas se esperan los valores más altos de RG y en calizas de textura grano soportadas los valores más bajos de RG. Es entendible que los valores de radioactividad en facies calcáreas serán registrados con escalas mucho menor respecto a rocas terrígenas.

Para facies tipo grainstone se esperan valores más bajos de rayos gamma, debido a que en su ambiente de depósito la alta energía impide el depósito de contenido fino entre sus aloquímicos (material arcilloso). Para facies tipo mudstone, donde el ambiente de aguas tranquilas permite la acumulación del material fino (entre ellos las arcillas) se esperan valores más altos de RG. De esta forma secuencias de profundización, donde las facies pasan de grano soportadas a lodo soportadas, estarían indicadas por una forma tipo campana en el registro de RG y una forma tipo embudo para una secuencia de que pasa de facies lodo soportadas a grano soportadas.

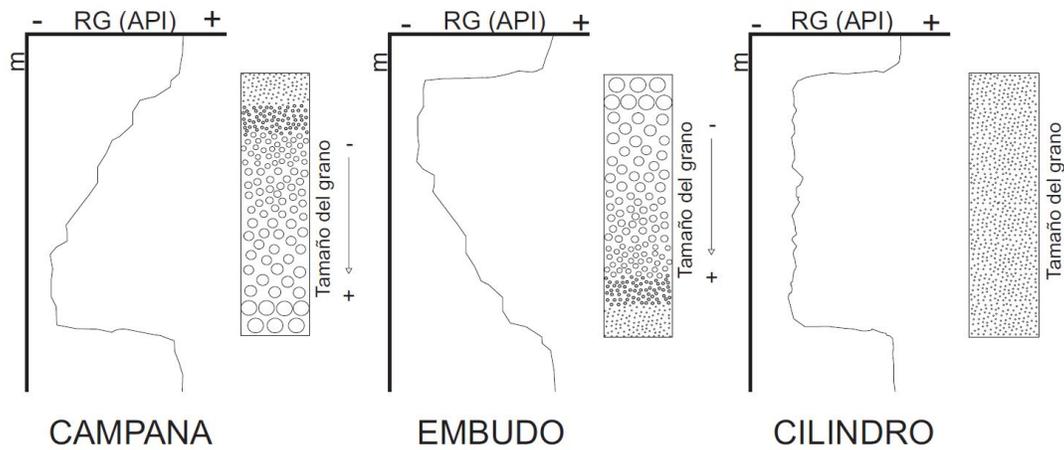


Fig. 6.11. Modelos idealizados de la respuesta de los rayos gamma al tamaño del grano. (Esquemas de valores de RG vs distancia).

6.7.1.1 Análisis de la curva de Potasio (K)

El potasio se encuentra en muchos sedimentos y es un claro indicador del contenido de aluminosilicatos, como feldespatos, arcillas y micas principalmente (Eherenberg y Svånå, 2001). En la sección 2, en las facies de ambientes tranquilos, se aprecian picos distintivos en la curva del K en el perfil de rayos gamma, con la correlación de estos valores y los datos litológicos observados en campo, estos valores con alta respuesta de radioactividad corresponden a los horizontes tobáceos presentes.

En el pico de potasio 1 (PK1, Fig. 6.12), se aprecia una respuesta alta de radioactividad con unidades de hasta 1.6 % de K, los horizontes tobáceos se encontraron distribuidos ampliamente con espesores aproximados de 2 – 5 mm, mientras que en el PK2, los valores son de aproximadamente 0.5 % de K y su abundancia y distribución era menor.

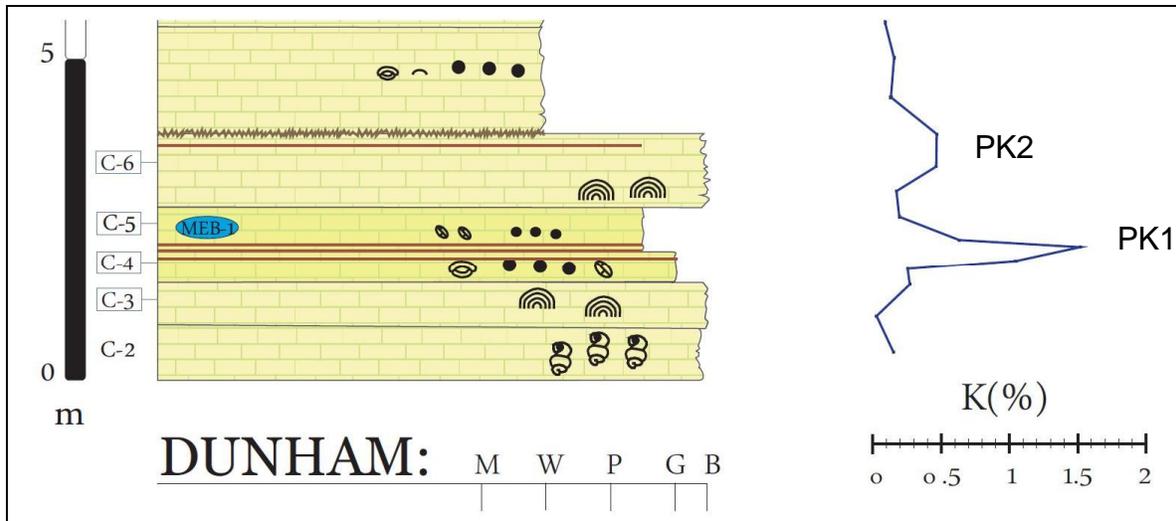


Fig. 6.12. Picos altos de la curva del potasio en respuesta a horizontes tobáceos.

En la figura 6.13 se observa en lámina delgada una toba de ceniza, y los cristales de feldespato que ocasionan estos relativos altos valores en la curva del potasio.

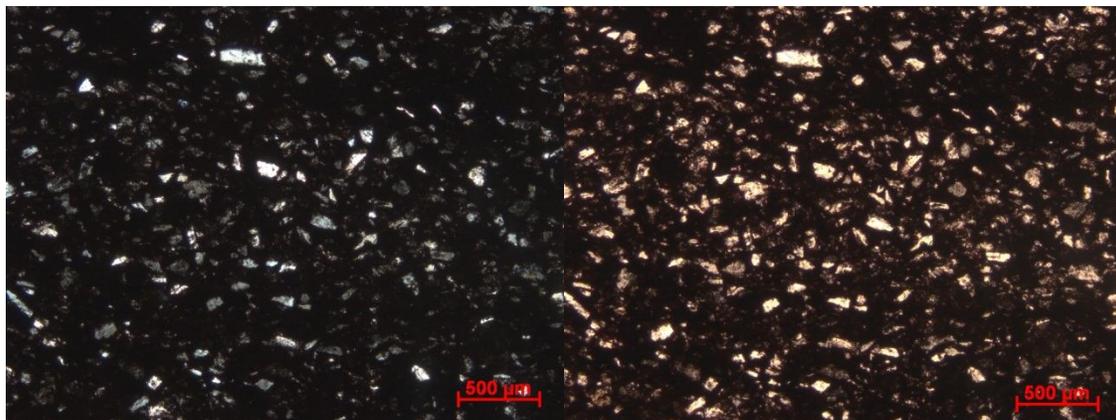


Fig. 6.13. Microfotografías en nicoles cruzados (izq.) y paralelos (der.) de una toba de ceniza con abundantes cristales de feldespato.

Los horizontes tobáceos se presentan aleatoriamente en toda la columna, en algunas áreas se presentan con espesores de hasta 5 cm, sin embargo, en estas zonas donde es más masivo (facies grano soportadas), su distribución está limitada, en esta área la medición de RG no fue puntual, por lo que el rango de registro no captó valores altos, a diferencia de zonas en donde su espesor era de escala de milímetros, pero su distribución era amplia.

El contenido arcilloso presente en la columna relacionado con el K principalmente es asociado a arcillas tipo illita, por el contenido de su composición química ($K_{1-1.5}Al_4(Si_{7-6.5}Al_{1-1.5}O_{10})$), estas variaciones permite interpretar cambios paleoclimáticos durante su depósito (Ruffell y Worden, 2000). Sin embargo a partir de los 35 m de la columna se aprecia que las variaciones de potasio tienden a disminuir uniformemente, lo que se asume como un posible ligero cambio en la humedad del ambiente que provocó que disminuyera la presencia de illita.

6.7.1.2 Análisis de la curva de Uranio (U)

El contenido de uranio en rocas sedimentarias está asociado generalmente a materia orgánica, la cual se depositó en algún ambiente reductor que favoreció su conservación, así como en otros minerales que incluyen arcillas, minerales pesados, fosfatos, feldespatos y también asociado a la illita (Ruffell y Worden, 2000). En la sección 2, se observa una buena respuesta en el perfil de Uranio en la Facies 1: boundstone de estromatolitos, estos picos altos (de hasta 1 ppm de U) está asociada principalmente a estos estromatolitos (estructuras organosedimentarias). En la figura 6.14 se observan picos correspondientes a PU1, PU2 y PU3 que se correlacionan con la Facies 1.

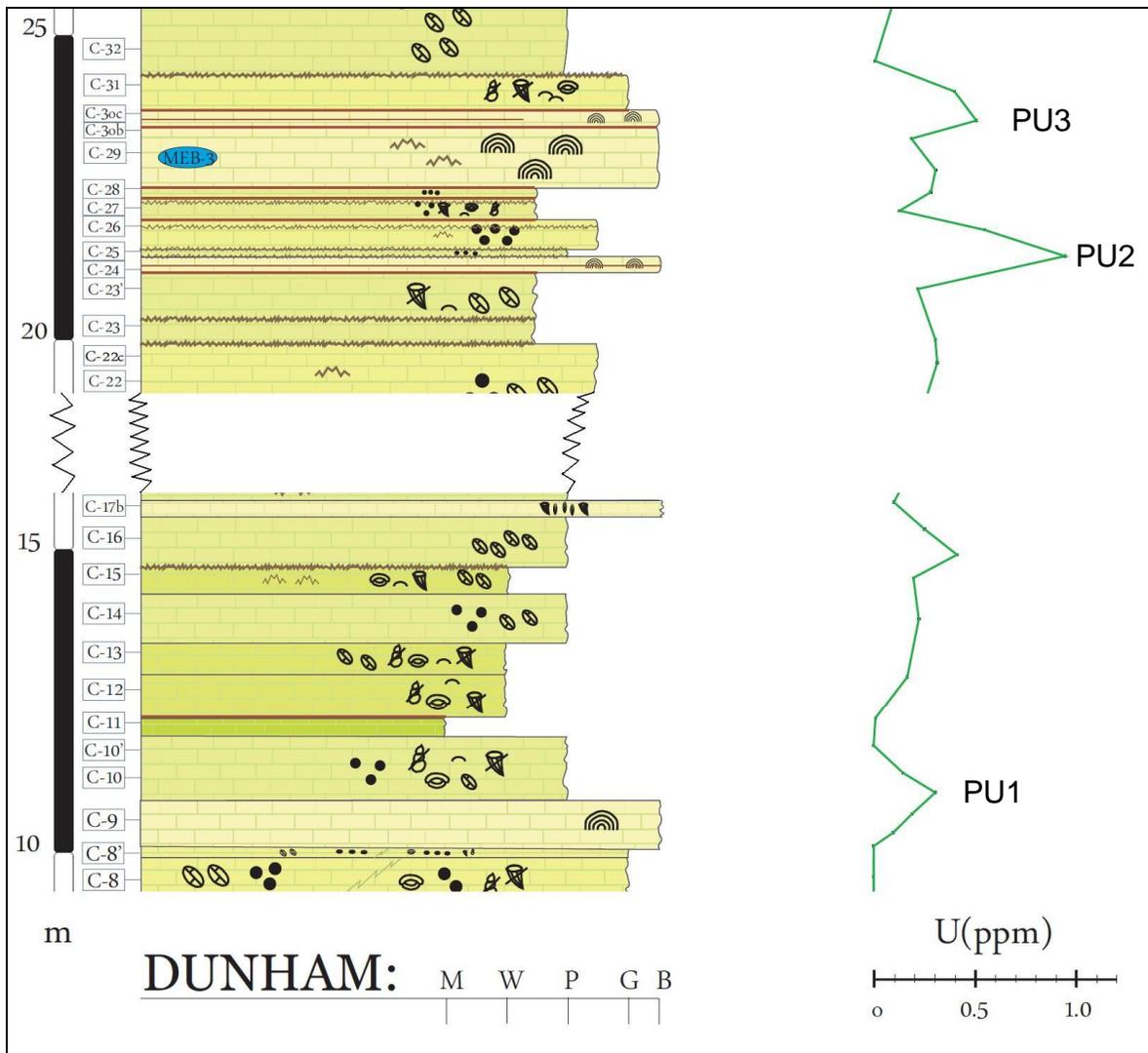


Fig. 6.14. Se observan los picos PU1, PU2 y PU3, en los cuales se tienen valores altos de uranio asociado con microbialitas (estromatolitos) debido a su naturaleza organosedimentaria.

En el pico PU4, PU5 y PU6 (Fig. 6.15), se observa que el perfil del Uranio presenta picos altos (de hasta 1 ppm de U). En la descripción petrográfica que corresponde a esta parte de la sección 2 se observaron abundantes suturas estilolíticas con presencia de hidrocarburos (Fig. 6.16).

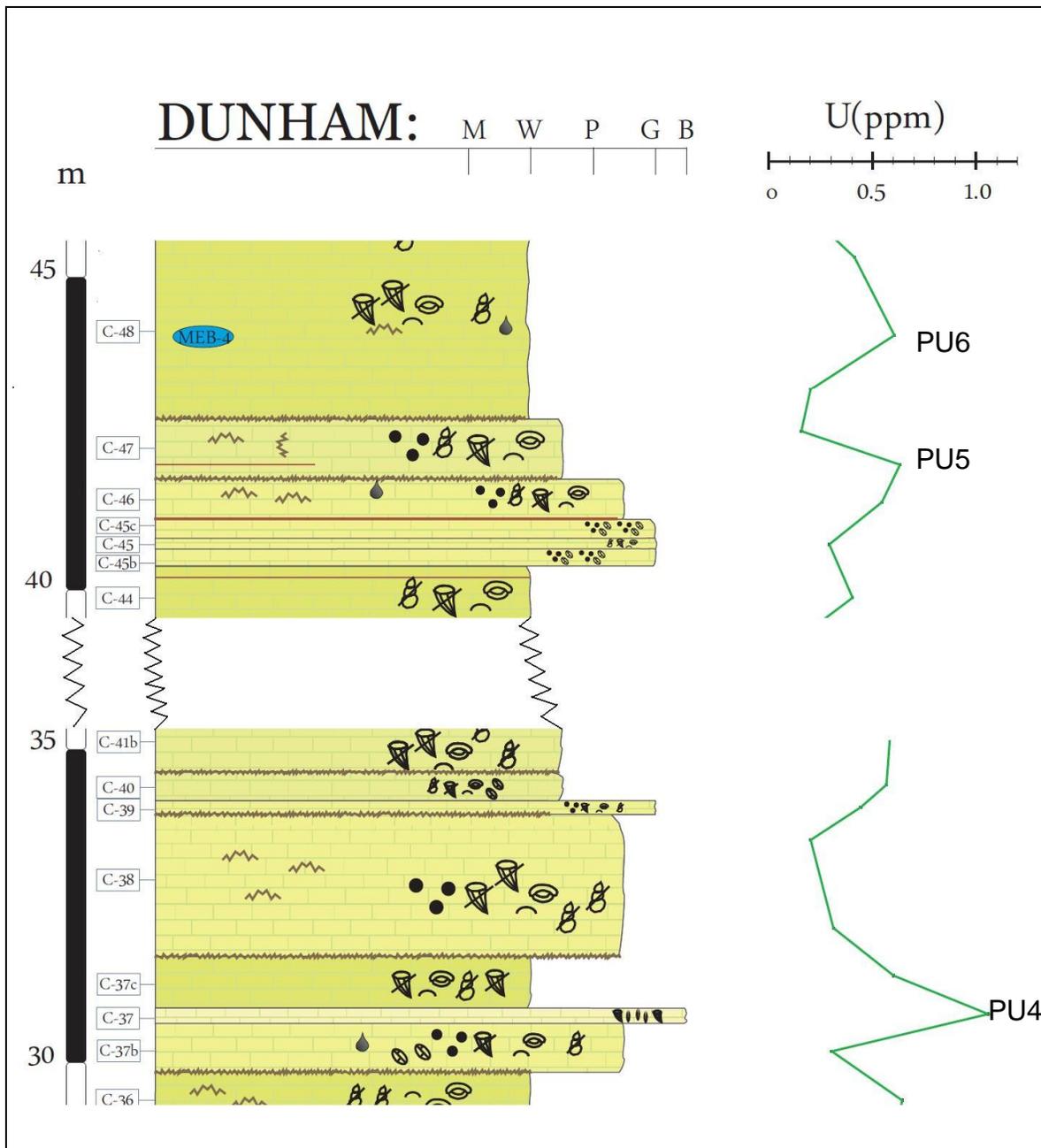


Fig. 6.15. Picos altos de uranio asociados al contenido de hidrocarburos en estilolitas y a la presencia de tobas.

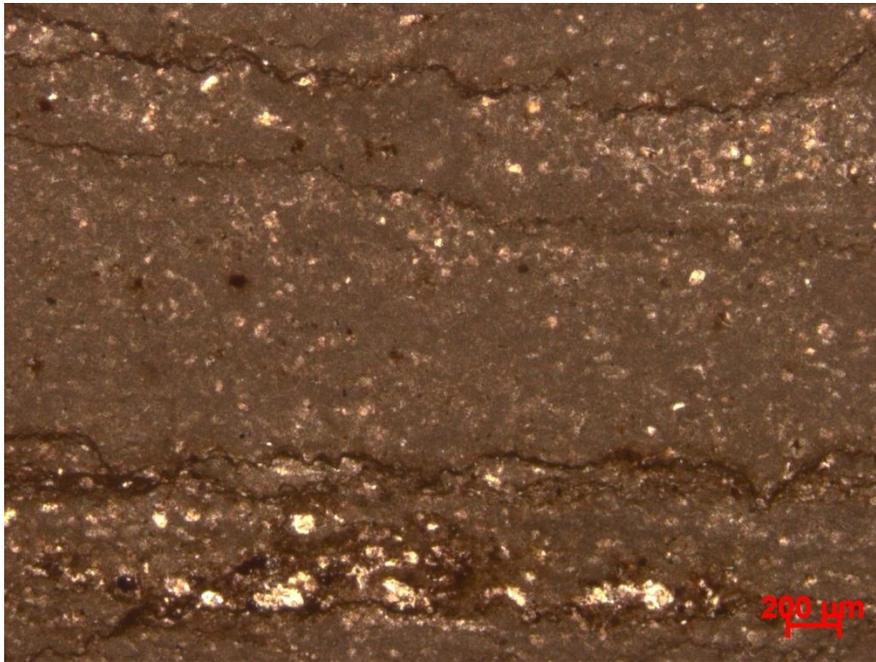


Fig. 6.16. Alta concentración de hidrocarburos en suturas estilolíticas.

La presencia de hidrocarburos en la sección 2, es confirmada mediante el estudio de muestras en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y el análisis químico, que muestra la presencia alta de azufre (Fig. 6.17). Esto mediante el análisis de los rayos X generados por el equipo WDX-400 que determina con gran exactitud la composición química de la muestra, ya que cada átomo tiene sus propias emisiones características.

De esta forma, los picos altos de Uranio son atribuidos a la alta concentración de hidrocarburos en estilolitas, así como a la presencia de tobas observadas en campo.

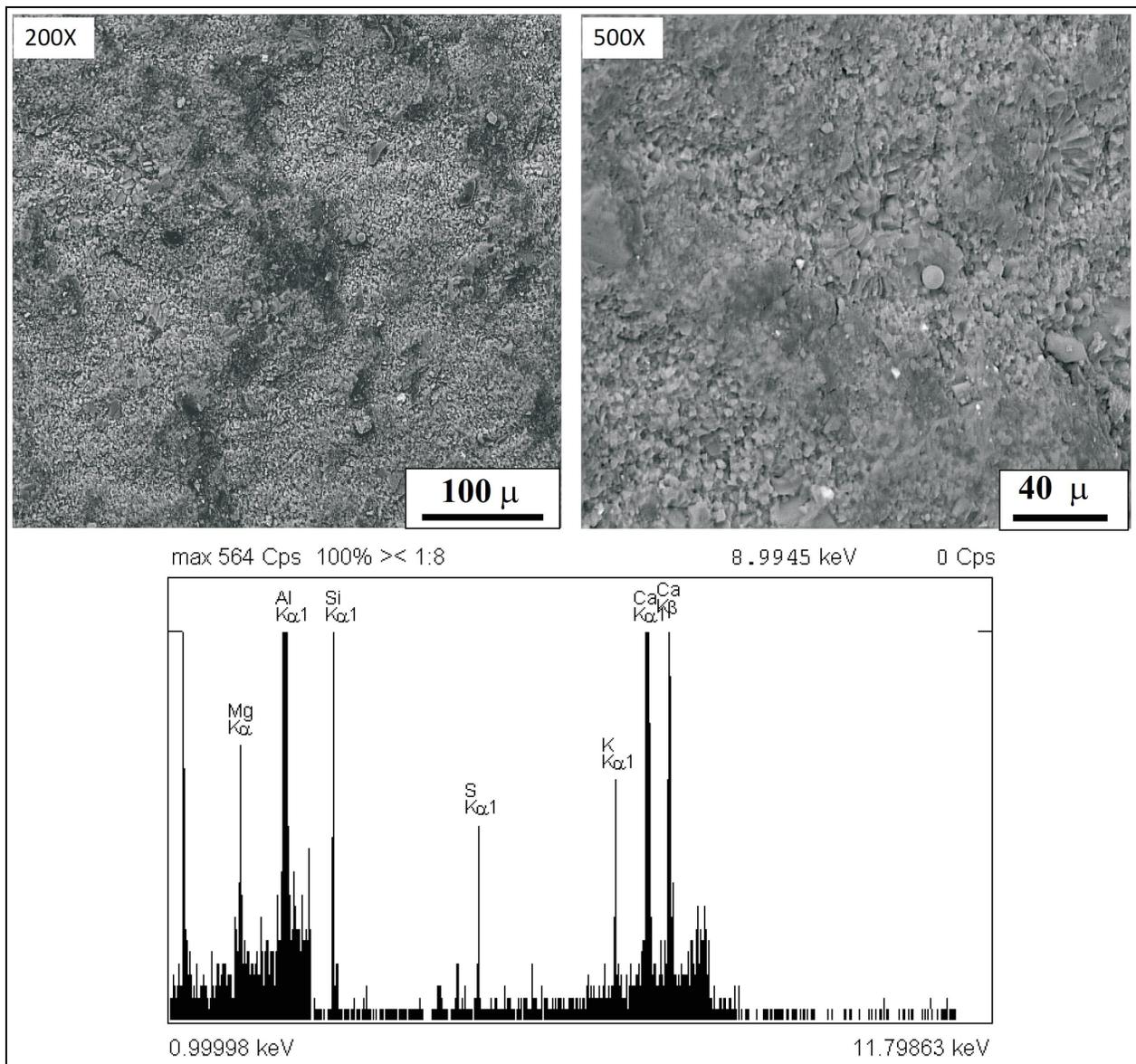


Fig. 6.17. Fotografías en alta resolución que muestran el contenido de hidrocarburo en las calizas. En el análisis químico (abajo) realizado a la muestra MEB-3 se observa la presencia de azufre (S), indicador de hidrocarburos.

6.7.1.3 Análisis de la curva de Torio (Th)

El torio está asociado principalmente a minerales pesados y arcillas, sin embargo a diferencia del K y U que se presentan en arcillas tipo illita, el Th también responde a otras arcillas como la caolinita (Ruffell y Worden, 2000).

En perfil del Th en la sección 2, se presentan ligeras variaciones, sin embargo, estas no son significativas, donde se relacionan picos altos con la presencia de tobas y el resto de la curva posiblemente se encuentra controlado por la presencia de arcillas. En la figura 6.10 se observa que el torio representa el menor aporte a la respuesta de los rayos gamma totales, esto es posiblemente debido a que el aporte de partículas sedimentarias fue mínimo en la plataforma.

En el análisis químico de la muestra MEB-1 (Fig. 6.18), se marca la presencia del elemento titanio, sin embargo la imagen en alta resolución no es concluyente, y no fue posible determinar el origen de esta respuesta, sin embargo, esto indica que la respuesta del torio estaría también marcada por la presencia de estos elementos.

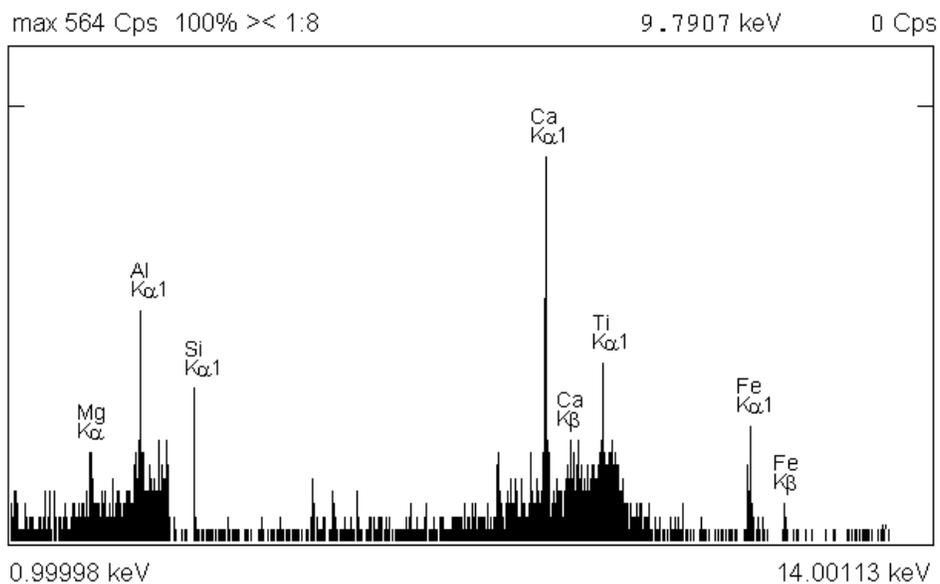


Fig. 6.18. Análisis químico a la muestra MEB-1, se observan picos altos de Al, Si, Fe y Ti, (los tres primeros asociados posiblemente a la presencia de clorita, mientras que la presencia de Ti no fue concluyente).

6.7.2 Respuesta a los ciclos estratigráficos

La distribución de las facies genéticamente relacionadas puede identificarse a través de los ciclos estratigráficos; un ciclo se expresa como la repetición de características litológicas como su textura, mineralogía o geoquímica entre otras; así como por las sucesiones producidas por oscilaciones climáticas (ciclos de Milankovitch; Einsele et al., 1991; Schwarzacher, 1993). Estos ciclos se observaron claramente tanto en campo, donde eran manifestados por sus relaciones geométricas (la cima de los ciclos se indicaba recurrentemente por estratos delgados de la Facies 1: Bounstone de estromatolitos), así como por el análisis de facies en el microscopio petrográfico.

Se identificaron diversos patrones cíclicos tanto de somerización como de profundización. La mayoría de las sucesiones resultan de intercalaciones de asociaciones de facies de submarea y de intermarea/supramarea (ciclos de perimarea). Los ciclos se presentan en escalas pequeñas, entre 2 y 7 metros de espesor y en general son de forma asimétrica.

Resulta evidente que la sección 2 (Fig. 6.19) está dominada en los primeros 30 metros por ciclos perimareales debido a la presencia de la Facies 1: Boundstone de estromatolitos, mientras que en el resto de la sección 2 se observa una alternancia, de ciclos de perimarea y submarea. Estos patrones cíclicos pudieron ser observados a través del registro de RG mediante ligeras tendencias de las curvas a presentar formas de campana o embudo.

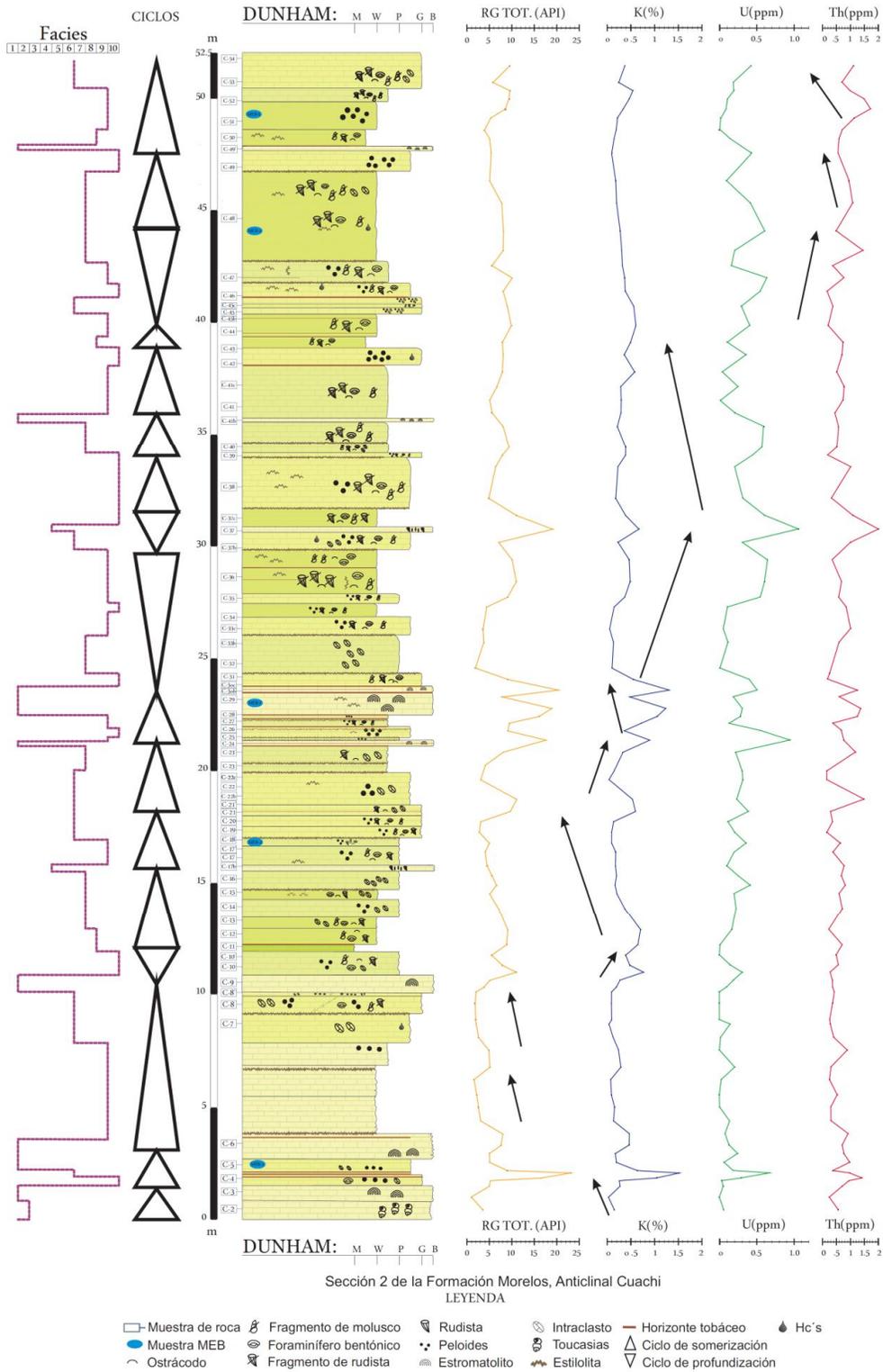


Fig. 6.19. Respuesta de las curvas de los rayos gamma a las facies depositacionales y su respuesta a los ciclos estratigráficos.

La respuesta de rayos gamma está indicada mayoritariamente por componentes terrígenos que son transportados hacia las plataformas carbonatadas por viento o por escorrentías. Este último es el principal factor de aporte en la mayoría de las plataformas carbonatadas antiguas (Hernández-Romano, 1999).

La cantidad y composición de la fracción de sedimentos terrígenos suministrados a una plataforma, incluyendo los tipos y cantidades de minerales de la arcilla, depende de varios factores, tales como: la composición de las rocas expuestas en el área de origen que determina los tipos y proporciones de los minerales que se pueden alterar y / o erosionar y transportar; y la topografía del área de origen determina la tasa de erosión y el tiempo de residencia de las rocas y los minerales en el perfil del suelo, donde pueden ser sometidos al intemperismo (Singer, 1984).

El clima en el área de origen de los terrígenos también juega un papel importante al controlar la intensidad de desgaste químico y de esta forma volver a ciertos minerales más propensos a la erosión (Singer, 1984; Chamley, 1989). De acuerdo a Singer (1984), en condiciones de temperatura sin humedad o secas, se favorece la preservación de la mineralogía original de las rocas expuestas y erosionadas. Bajo estas condiciones los sedimentos sufren poco desgaste químico y los minerales inestables como la illita y la clorita se conservan más tiempo y pueden ser transportados a mayores distancias respecto al área de aporte. En condiciones húmedas, los procesos de hidrólisis remueven los iones móviles de los minerales de la roca y puede producirse otra serie de minerales tales como caolinita o la esmectita. De esta forma, los sedimentos producidos en un clima cálido y húmedo contienen más caolinita en relación con illita a los sedimentos producidos durante los períodos fríos y secos (Chamley, 1989; Hillier, 1995).

La Plataforma Guerrero-Morelos fue una plataforma carbonatada desarrollada sobre el lado de cratón de una cuenca de trasarco. La fuente más probable de los minerales arcillosos y otros componentes terrígenos fueron las rocas metamórficas del Paleozoico del Complejo Acatlán, así como algunas de las unidades terrígenas como la Formación Zicapa o el Grupo Tecocoyunca. El levantamiento y la erosión de estas unidades iniciaron a finales del Cenomaniano, produciendo un aumento progresivo de la influencia de terrígenas (Hernández-Romano, 1999).

De acuerdo a diversos autores (Frakes y Francis, 1990; Francis y Frakes, 1993; Valdés et al, 1996), durante el Cenomaniano el clima era mucho más cálido que el actual. Estos estudios paleoclimáticos han dado origen a modelos de predicción del clima durante el Albiano-Cenomaniano. Según los resultados de Valdés et al. (1996) y Price et al. (1998), las temperaturas medias anuales para el sur de México en superficie oscilaban entre los 20 y 26°C, así como una precipitación anual menor a 1 mm/día y una baja humedad del suelo. Estos resultados representaban un clima de condiciones tropicales áridas a semiáridas.

La respuesta de los rayos gamma se puede correlacionar con estos datos paleoclimáticos. La sección 2 estudiada representa una porción de la Formación Morelos a finales del Cenomaniano, en donde posiblemente los primeros pulsos de la Orogenia Laramide dieron como resultado una mayor irregularidad en la topografía en las regiones de aporte del material arcilloso, estos resultados son resaltados en el perfil de la curva de potasio.

En la figura 6.20 se representa un cambio hipotético en el escenario topográfico de la región de estudio. A pesar de que no se cuenta con evidencias sobre cambios drásticos en las facies carbonatadas, debido posiblemente a que el aporte arcilloso no era en grandes proporciones y se pudiera afectar la fábrica de carbonatos ni las condiciones de luz o salinidad para que la biota tuviera cambios significativos, sí es posible evidenciarlos en los ciclos estratigráficos y en los perfiles del registro de RG, donde después de los 30 primeros metros aproximadamente de la sección 2, la curva del potasio muestra menores

variaciones en su registro, esto puede atribuirse a que las irregularidades topográficas propiciaron mayores escorrentías y ocasionó ligeros cambios en la humedad del área de aporte y de esta forma se alteró la arcilla illita y su consecuente disminución.

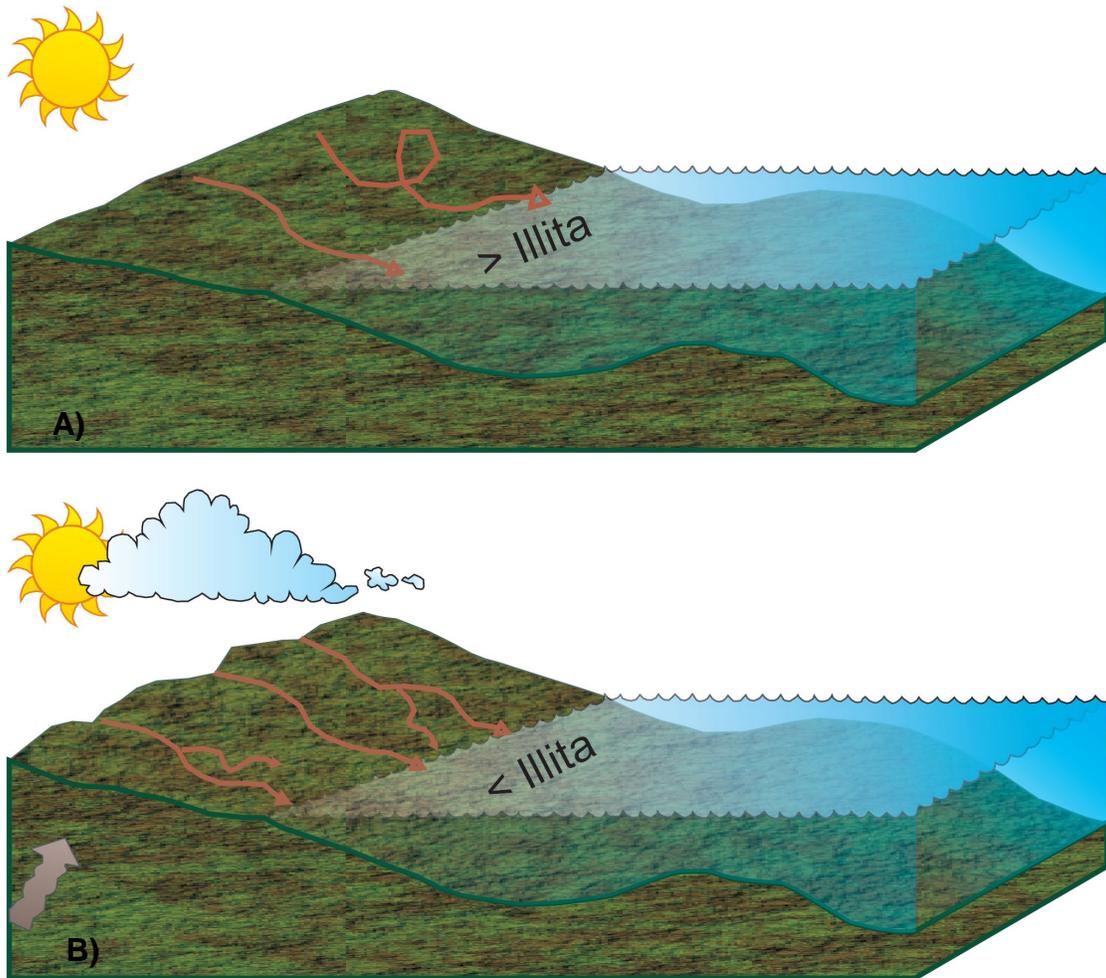


Fig. 6.20. Esquemas paleotopográficos a partir del contenido arcilloso en la columna de la Formación Morelos. A) Modelo para un clima semiárido donde la arcilla illita representa un mayor aporte y por lo cual una mayor respuesta a la curva de K, B) Modelo para un clima con mayor humedad por aumento de escorrentías debido a los primeros pulsos de la Orogenia Laramide y por lo cual el contenido de illita tiende a disminuir.

El análisis de 5 muestras de roca (distribuidas a lo largo de la sección 2) en el MEB corresponde con los datos esperados a partir de la respuesta de rayos gamma (Fig. 6.21). La muestra MEB-1 fue tomada a 2.5 m de la base de la sección 2 y corresponde a la Facies 6, packstone – grainstone de intraclastos y peloides. La muestra MEB-2 tomada a 17 m de la base y corresponde a la Facies 9 (Wackestone-packstone de bioclastos y peloides). La muestra MEB-3 corresponde a la Facies 1, Boundstone de estromatolitos, ubicada a 23 m de la base. La muestra MEB-4 y MEB-5 pertenecen a la parte superior de la sección 2, la primera tomada a 44 m de la base, corresponde a la Facies 7 (wackestone de bioclastos e intraclastos) y la segunda tomada a los 49 m de la base, pertenece a la Facies 9, wackestone de peloides.

En los resultados de estas muestras se observan picos altos en las primeras tres de ellas (MEB-1, MEB-2 y MEB-3) de Si, Al, y K, mientras que en las muestras MEB-4 y MEB-5 la presencia de estos elementos se presenta en menor proporción. Los picos altos de estos elementos corresponden a la presencia de arcilla de tipo illita, como se muestra en la figura 6. 21. Lo anterior corresponde con la respuesta de los rayos gamma, el perfil de la curva de K en los rayos gamma en la primera mitad de la sección 2 indica la abundancia de estas arcillas, principalmente de illita, y en menor proporción la presencia de clorita, así como la presencia de tobas.

De acuerdo a Singer (1984) tanto la illita como la clorita, bajo condiciones de un clima árido (como las que prevalecían en el área estudiada durante el Cretácico) su desgaste químico por intemperismo es mínimo y a pesar de ser minerales inestables, son transportados a mayores distancia de la fuente de aporte. Sin embargo con los datos de los perfiles de rayos gamma y el análisis químico de las muestras se plantea una disminución de la arcilla al ser sometida a procesos de intemperismo por el aumento de las escorrentías debido a un cambio en la superficie del terreno de aporte.

FOTOGRAFÍA EN ALTA RESOLUCIÓN (MEB)

ANÁLISIS QUÍMICO

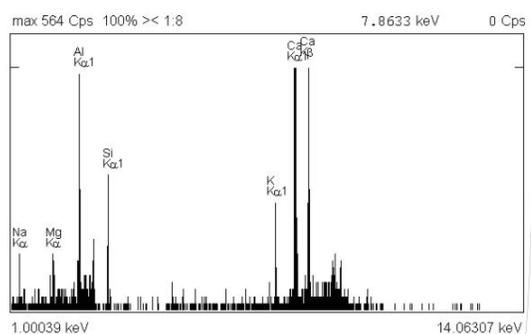
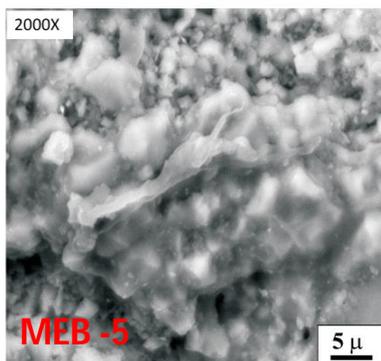
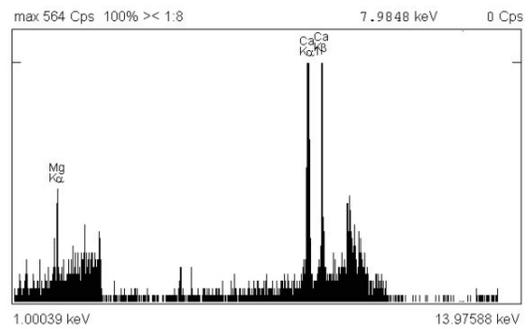
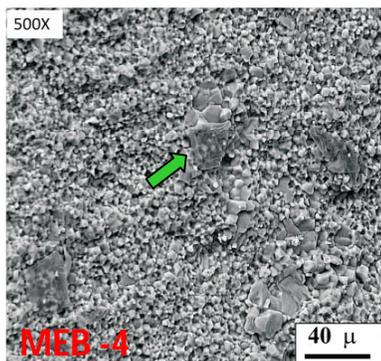
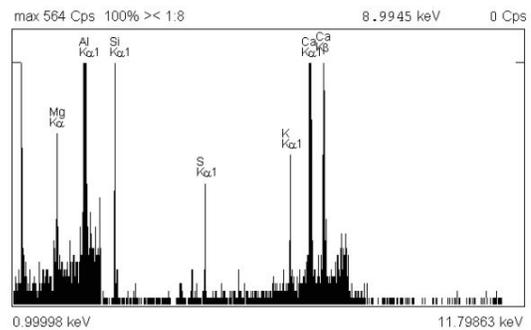
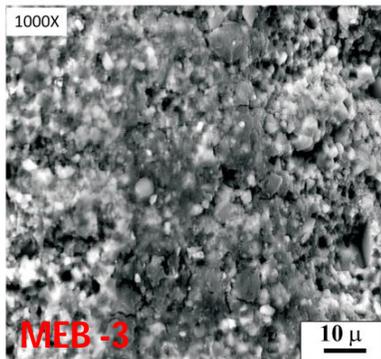
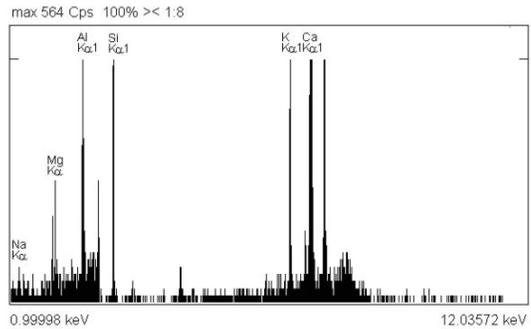
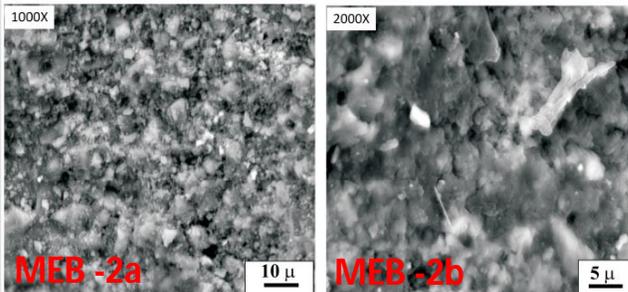
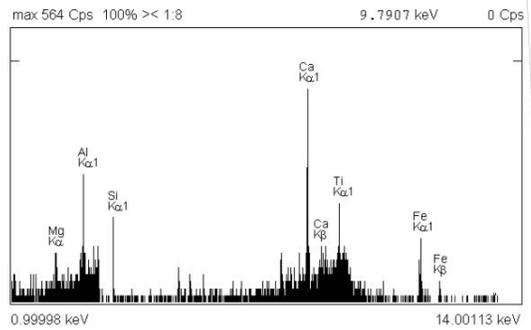
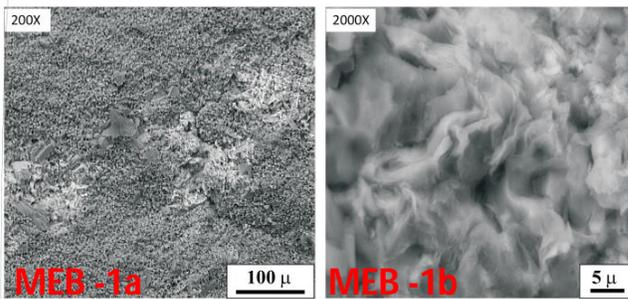


Fig. 6.21. Fotografías en alta resolución y análisis químico de 5 muestras de roca de la sección 2 pertenecientes a la Formación Morelos. En la muestra MEB-1a y MEB-1b se presenta posiblemente clorita de acuerdo al análisis químico, el elemento titanio que no fue concluyente posiblemente es lo que provoca el brillo no característico de esta muestra. En la muestra MEB-2a y MEB-2b se observa la presencia de arcilla illita en la matriz calcárea, así lo demuestran los picos altos de Si, Al, y K de su respectivo análisis químico. En la muestra MEB-3 se distingue la presencia de arcilla en la matriz por el aspecto “sucio” que le otorga, así como los picos altos de sus principales componentes en el análisis químico. En la muestra MEB-4 a diferencia de las anteriores, la matriz se observa “limpia”, y por el análisis químico se confirma la escasa presencia de material arcilloso, en esta muestra también se observa escasamente la presencia de hidrocarburo (flecha blanca) en algunos poros ya cementados. En la muestra MEB-5, se observa escasa arcilla tipo illita (por su característica forma alargada), confirmado por el análisis químico, sin embargo este no se observa tan abundante como en las primeras tres muestras.

7. CONCLUSIONES

- Del análisis de microfacies de la Formación Morelos aflorante en el Anticlinal Cuachi se obtuvieron 10 Facies que corresponden a ambientes perimareales. En este trabajo se dividieron en dos ambientes deposicionales principales: Ambiente lagunar (submarea somera) y ambiente de supramarea e intermarea.
- Los componentes calcáreos observados en lámina delgada varían para cada ambiente. En los ambientes de supramarea e intermarea son característicos los estromatolitos, oncoides y raros foraminíferos bentónicos. En los ambientes lagunares predominan los foraminíferos bentónicos, principalmente miliólidos, fragmentos de moluscos, ostrácodos, peloides e intraclastos.
- De acuerdo al análisis depositacional se reconocieron etapas con condiciones ambientales restringidas donde únicamente se depositaron partículas alóctonas (fragmentos de moluscos) probablemente derivados de un parche arrecifal. Estos periodos de ambientes restringidos alternaron con periodos donde el ambiente fue menos restringido, estos escenarios se infieren debido a la mayor cantidad y diversidad de componentes calcáreos observados en determinadas láminas delgadas.
- En las secciones medidas se reconocieron secuencias de somerización ascendente como resultado de una progradación de sedimentos. En estas secuencias se observaron ciclos de perimarea y submarea. Los ciclos de perimarea se caracterizan por la presencia de facies de ambientes muy someros hacia la cima y en estratos muy delgados (Facies 1: Boundstone de estromatolitos). Mientras que los ciclos de submarea están representados por facies con fauna bentónica en estratos gruesos o masivos. Estos ciclos pueden reconocerse tanto en escala de lámina delgada como en afloramiento.

- La Formación Morelos depositada en el área de estudio estuvo sometida a diferentes y variados rasgos diagenéticos. El rasgo diagenético que caracteriza a estas facies es el neomorfismo, específicamente la recristalización principalmente asociada a los cuerpos intrusivos. Este rasgo de diagénesis dificulta el reconocimiento de la facies deposicional.
- Las fracturas medidas presentaron un arreglo Tipo I y Tipo II asociadas al plegamiento, sin embargo regionalmente se pueden relacionar con la falla lateral de Papalutla.
- El control de los espesores en la densidad de fracturas no es claro en los afloramientos estudiados, debido a que en las rocas carbonatadas existen otros factores que afectan el fracturamiento.
- En algunos sistemas de fracturas, la densidad de fracturamiento tenía un ligero aumento con el incremento de granos micríticos y una disminución de la densidad con el incremento de bioclastos. Sin embargo, en otros sistemas de fracturas y/o estratos no existía tal relación o no era muy clara. Los bioclastos presentes en las muestras, parecían inhibir la formación de fracturas en rocas carbonatadas.
- En la sección 2 (Fig. 6.19), el contenido de potasio en las rocas brinda la mejor respuesta de RG, atribuido principalmente al contenido de arcillas tipo illita.
- Los valores más altos de potasio corresponden con la presencia de tobas intercaladas en las calizas, debido a su alto contenido de feldespatos.

- Los valores más altos de uranio se asocian a la alta presencia de materia orgánica en estromatolitos, así como a la presencia de hidrocarburos.
- Los ciclos de perimarea y submarea identificados a través de las observaciones de campo y análisis de microfacies, pudieron ser correlacionados con ligeras tendencias en las curvas de RG, principalmente con la curva de K, asociado a la presencia de arcillas en la matriz carbonatada y a los valores altos de uranio en estromatolitos que marcan el fin de un ciclo.
- El análisis químico y del MEB de muestras de roca indican abundancia de arcilla tipo illita, sin embargo esta es más abundante en la primera mitad de la sección 2 (Fig. 6.19), de la misma forma se observa una ligera menor presencia de ciclos de perimarea; esto se interpreta como un posible cambio en la paleotopografía de la región de aporte de terrígenos, ocasionando una disminución en la arcilla illita.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer estudios específicos para determinar la historia diagenética de esta secuencia calcárea.
- Analizar el contenido paleontológico de las facies carbonatadas del Anticlinal Cuachi para determinar su edad relativa y determinar su relación con las Formaciones Morelos y Cuautla.
- Se recomienda hacer un estudio con mayor número de mediciones de densidad de fracturas por cada una de las facies estudiadas para obtener un resultado un resultado más preciso.
- Realizar un estudio de correlación tanto de microfacies como con el espectrómetro de rayos gamma para confirmar los resultados obtenidos.
- Realizar un análisis del contenido de arcillas más detallado, para verificar la abundancia y ausencia de ellos en las secciones medidas.