

REGISTRO DE RAYOS GAMMA Y CARACTERIZACIÓN DE MINERALES ARCILLOSOS EN LA FORMACIÓN SAN FELIPE (CRETÁCICO SUPERIOR) EN LA LOCALIDAD PUERTO PASTORES (GALEANA, N.L.)

Fernando Velasco-Tapia^{1,*}, Alejandro Alanís-Platas¹, Jaime Antonio Tienda-Garza¹, Pedro Rodríguez-Saavedra¹, Yolanda Pichardo-Barrón¹ & Emma Gema García-González¹

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Carretera Linares-Cerro Prieto km 8, 67700 Linares, N.L.

* fernando.velascotp@uanl.edu.mx

Resumen

Se ha realizado el registro de rayos gamma y la caracterización de minerales arcillosos en un perfil de la Formación San Felipe (Cretácico Superior, Sierra Madre Oriental) expuesto en la localidad Puerto Pastores (Galeana, N.L.). Se registraron lecturas utilizando un radiómetro GRS-500 Scintrex para radiación gamma total (Tc1, 181 cps en promedio), Potasio (K, 0.96%), Torio (Th, 5.05 ppm) y Uranio (U, 8.16 ppm). En general, lutita y toba alterada son los materiales que presentan las concentraciones más altas en K, U y Th, mientras que horizontes carbonatados muestran valores más bajos. La información del material sedimentario es comparable a la reportada en la literatura. El arreglo de minerales arcillosos se detectó utilizando un difractómetro de polvos Rigaku MiniFlex, en la que destaca la illita y la montmorillonita.

Abstract

Gamma ray logging and characterization of clay minerals was carried out in a profile of the San Felipe Formation (Upper Cretaceous, Sierra Madre Oriental) exposed at the Puerto Pastores locality (Galeana, N.L.). Readings were recorded using a GRS-500 Scintrex radiometer for total gamma radiation (Tc1, 181 cps on average), Potassium (K, 0.96%), Thorium (Th, 5.05 ppm) and Uranium (U, 8.16 ppm). In general, shale and altered tuff are the materials with the highest concentrations of K, U and Th, while carbonate horizons show lower values. The sedimentary material information is comparable to that reported in the literature. The arrangement of clay minerals was detected using a Rigaku MiniFlex powder diffractometer, in which illite and montmorillonite stand out.

Introducción

La respuesta radiométrica de los materiales geológicos depende de la presencia de especies minerales en cuya estructura se concentren uno o más radioelementos, siendo los principales K, Th y U. Estas especies químicas pueden ser constituyentes primarios de la roca, o bien, encontrarse en cantidades traza

como impurezas en la estructura de un cristal. El potasio (¹⁹K) es el radioelemento más abundante en las rocas y pertenece al grupo IA (metales alcalinos) en la Tabla Periódica (Faure, 1986). Se encuentra presente principalmente en feldespatos alcalinos, micas e illita. El isótopo radioactivo principal del potasio es el ⁴⁰K (abundancia = 0.01167%; T_{1/2} = 1.25 × 10⁹ años) que presenta un decaimiento ramificado hacia ⁴⁰Ca (proceso β⁻, 89.44%) y ⁴⁰Ar

Velasco-Tapia, F., Alanís-Platas, A., Tienda-Garza, J.A., Rodríguez-Saavedra, P., Pichardo-Barrón, Y. & García-González, E.G. (2023): Registro de rayos gamma y caracterización de minerales arcillosos en la Formación San Felipe (Cretácico Superior) en la localidad Puerto Pastores (Galeana, N.L.). – en: Montalvo Arrieta, J.C., Ramírez Fernández, J.A., Aguilar-Madera, C.G., Jenchen, U., Salinas Jasso, J.A., Velasco-Tapia, F. & Navarro-de León, I. (eds.): Número especial en conmemoración del 90° Aniversario de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del 40° Aniversario de la Facultad de Ciencias de la Tierra. – Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, 9 (2023): 201-209.

(proceso β^+ o captura de electrones, 10.56%). Minerales formadores de rocas, tal como cuarzo y el feldespato alcalino, pueden contener cantidades traza (en ppm) de los radioelementos ^{90}Th y ^{92}U . Sin embargo, también pueden concentrarse en minerales accesorios, tal como zircón, la monzonita, esfena, rutilo, entre otros (Dentith & Mudge, 2014). El ^{90}Th es un elemento del grupo de los metales de transición interna (actínidos) mono-isotópico conformado por la especie radioactiva ^{232}Th ($T_{1/2} = 14.010 \times 10^9$ años) que decae por una serie de decaimientos α y β^- hacia ^{208}Pb (Steiger & Jäger, 1977). El ^{92}U es un elemento del grupo de los elementos de transición interna (actínidos) conformado por tres isótopos radioactivos (Steiger & Jäger, 1977): (a) ^{238}U ($T_{1/2} = 4.468 \times 10^9$ años; abundancia = 99.2743%; por decaimientos α y β^- se transforma en ^{206}Pb), (b) ^{235}U ($T_{1/2} = 0.7038 \times 10^9$ años; abundancia = 0.7200%; por decaimientos α y β^- se transforma en ^{207}Pb) y (c) ^{234}U ($T_{1/2} = 2.47 \times 10^5$ años; abundancia = 0.0057%; por decaimiento α se transforma en ^{230}Th).

En los procesos de decaimiento de K, U y Th ocurre también la emisión de radiación gamma (γ), la cual es de tipo alta energía y cuya emisión no implica un cambio en masa en el isótopo emisor. Su intensidad es un indicador de la radiactividad natural de las rocas y una forma indirecta de establecer la concentración de K, U y Th. La detección de la radiación γ se efectúa a través de efectos físicos o químicos que ocurren por su interacción con la materia. De esta forma, existen varios tipos de detectores, que incluyen: (a) cámaras de ionización, (b) tubos Geiger-Muller, (c) semiconductores, (d) de termoluminiscencia y (e) de centelleo (IAEA, 2003). En el caso particular de los detectores de centelleo (por ejemplo, el modelo Scintrex GRS 500 [Eda Instruments; Toronto, Canadá]) los rayos γ interactúan con cristales de yoduro de sodio activados con talio (NaI(Tl)), yoduro de cesio activados por talio (CsI(Tl)) o germanato de bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) dando lugar a la producción (centelleo) de fotones de luz visible. Estos inducen la liberación de un flujo de electrones, que se multiplica, desde un fotomultiplicador. La nube de electrones impacta en un ánodo metálico que genera un pulso negativo de voltaje que se traduce en unidades de cuentas por segundo (cps) de radiación.

Por otra parte, en el caso particular de las unidades sedimentarias, el registro de radiación γ refleja normalmente el contenido de los radioelementos en minerales arcillosos, que es donde se tienden a concentrarse. La aplicación de esta técnica en núcleos de perforación petroleros y de geotermia permite (IAEA, 2003): (a) distinguir variaciones en ambiente de depósito y/o alteración, (b) la identificación de roca generadora y sello de sistemas petroleros (generalmente, lutita) y (c) la correlación entre grupos de pozos.

En el presente estudio se planteó el análisis sistemático de las variaciones de radiación γ y la caracterización de minerales de arcilla a través de un afloramiento de la Formación San Felipe (Cretácico Superior, Sierra Madre Oriental) expuesto en la

localidad Puerto Pastores (Galeana, N.L.). Este trabajo se efectuó en el marco de las tesis de licenciatura de Alanís-Platas (2019) y de maestría de Tienda-Garza (2018).

La Formación San Felipe se ha considerado como representativa, en el NE de México durante el Cretácico Superior, de una transición desde un dominio carbonatado a uno clástico. Este proceso fue afectado además por una actividad volcánica que presumiblemente ocurrió en el margen occidental de Norteamérica (Velasco-Tapia et al., 2016). Considerando las reconstrucciones paleogeográficas (por ejemplo: Blakey, 2014), el área de depósito de la unidad representaría además la transición del Mar Interior Occidental (ambiente de cuenca epicontinental) al proto-Golfo de México (ambiente de mar abierto).

Geología local

El afloramiento bajo estudio se localiza a ~ 6 km al SE de la cabecera municipal de Galeana, N.L., en la parte central del Estado de Nuevo León y dentro de la región fisiográfica Sierra Madre Oriental (Figura 1). En esta zona se observan altitudes que alcanzan los 1840 msnm hasta amplios valles con alturas de 1500 msnm, que en conjunto conforman un sistema de anticlinal-sinclinal. De hecho, el afloramiento de trabajo se ubica sobre el flanco de un sinclinal de orientación NW-SE. Además de estos rasgos geomorfológicos notables, en esta zona se observan pequeños cerros y un arroyo secundario que pasa por la cañada de Loma Alta, que conecta con el arroyo principal del ejido Brownsville.

El perfil se caracteriza en general por mostrar una estratificación normal sin discontinuidades, alcanzando un espesor total de ~120 m, de los cuales ~95 m constituyen a la Formación San Felipe. En su base se encuentra expuesta la Formación Agua Nueva como una secuencia de caliza mediana a gruesa, de color gris a gris oscuro y negro, que a su vez esta intercalada con lutita y marga laminada de color café y gris oscuro. Es posible reconocer el contacto litológico entre esta unidad y la Formación San Felipe, con la aparición del primer estrato de toba alterada. La Formación San Felipe (~95 m) ocurre en forma de una secuencia de (Figura 2): (a) caliza compacta de color gris claro a oscuro, (b) marga de color gris claro, (c) lutita de color gris y verde claro a oscura, (d) toba alterada de color verde que al intemperismo cambia a ocre y (e) caliza mezclada con ceniza volcánica de color blanco (denominada como porcelanita por Seibertz, 1988). El número y espesor de los estratos de caliza y volcánico-clásticos va disminuyendo conforme se asciende estratigráficamente, variación que es acompañada de un incremento en marga y lutita. Por tal motivo, el perfil se puede dividir en dos sectores (inferior y superior).

La parte inferior de la Formación San Felipe (0 – 30 m) está conformada por (a) capas de caliza mediana, de color gris oscuro, con espesor de 3 – 20 cm, (b) lutita de color gris a crema

con espesor de 10 – 35 cm y (c) toba alterada verde olivo a crema con espesor de 8 – 25 cm. [Tienda Garza \(2018\)](#) reportó para estos estratos calcáreos una textura *wackstone/packstone*, con un contenido micropaleontológico de radiolarios y foraminíferos plantónicos (*Heterohelix* y *Globotruncana*). La parte media de la sección (30 – 60 m) está constituida por una caliza de color gris a gris oscuro más arcillosa en comparación con la observada en la sección basal y de un mayor espesor (15 – 50 cm). Estos horizontes (en los que predominan el tipo *wackstone*) se encuentran intercalados con estratos relativamente gruesos de lutita (20 – 80 cm) de color gris oscuro y de toba alterada (15 – 20 cm) de color verde pálido. [Velasco-Tapia et al. \(2016\)](#) reportaron en estos estratos volcano-clásticos la presencia de

inofauna del tipo *Cruziana* y *Zoophycos*. En la parte superior de la unidad (60 – 95 m), en dirección hacia el contacto con la Formación Méndez, los estratos de caliza (preferentemente *mudstone*) se vuelven menos potentes (espesor < 20 cm) y frecuentes. De igual forma, disminuye el espesor (< 15 cm) y el número de estratos de toba alterada. Esta parte del perfil está dominada por estratos lutíticos que pueden alcanzar hasta 30 cm de espesor. [Tienda-Garza \(2018\)](#) reportó un contenido micropaleontológico que incluye foraminíferos plantónicos, calciesferas y radiolarios. La parte superior del perfil concluye con un contacto gradual hacia la Formación Méndez, constituida por intercalaciones de marga y lutita.

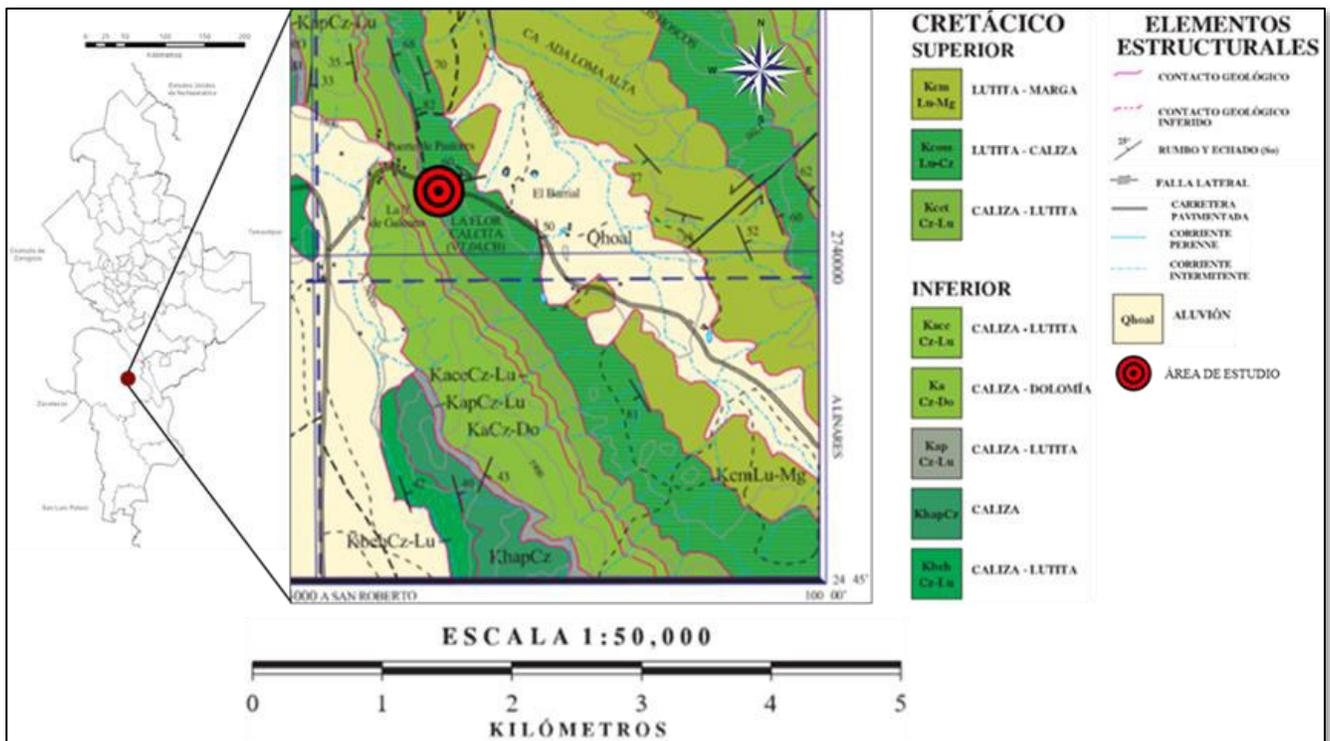


Figura 1: Localización y mapa geológico del área de estudio (ejido Puerto Pastores, Galeana, N.L.; [Alanís-Platas, 2019](#)).

Metodología

A partir de la sección bioestratigráfica de la Formación San Felipe en la localidad Puerto Pastores (Galeana, N.L.) se establecieron puntos de medición equidistantes cada 50 cm a través de 85 m del perfil. En cada uno de estos puntos se registraron lecturas de radiación gamma utilizando un radiómetro GRS-500 (*Differential Gamma Ray Spectrometer / Scintillometer*) Scintrex. El equipo utilizado es un instrumento portátil simple el cual tiene cinco canales que miden la radiación gamma natural asociada a Potasio (^{40}K), Torio (^{232}Th) y Uranio (^{238}U) con una precisión de lectura 0.1 – 1.0 cps. En cada punto se efectuaron cinco mediciones, durante un periodo de 10 s, de radiación total (Tc1), Potasio (K), Torio (Th) y Uranio (U). Se

procuró tomar las lecturas sobre superficies planas y en contacto directo con la roca. Las mediciones de campo se ajustaron a fin de eliminar la parte de la señal que se considera como ruido instrumental, que incluyen el efecto de dispersión de Compton y la interferencia espectral. De acuerdo con el manual de operación del sistema GRS-500, las sensibilidades reportadas para los elementos bajo estudio son: Potasio = 1.47 cps/%, Uranio = 0.09 cps/ppm y Torio = 0.054 cps/ppm. Los coeficientes de extracción presentan los siguientes valores: $\alpha = 1.28$, $\beta = 1.41$ y $\gamma = 0.81$. Finalmente, para cada bloque de cinco mediciones por estrato se estableció el promedio y la desviación estándar aplicando las ecuaciones clásicas de estos parámetros. La información y los parámetros estadísticos se concentraron en una base de datos de Excel para su manejo e interpretación.

Durante el trabajo de campo, y como complemento al estudio de radiación γ , se llevó a cabo además el muestreo de estratos de lutita (4 muestras) y toba alterada (3 muestras) de la Formación San Felipe a través del perfil de Puerto Pastores. Para cada una de estas muestras se aplicó un esquema de separación de fracción arcillosa, la cual fue estudiada por medio de Difracción de Rayos X, utilizando un difractómetro de polvos Rigaku MiniFlex instalado en la empresa DiffractLab, S.A.

(Monterrey, N.L.). Este sistema incluye un tubo de Cu (Radiación $\text{CuK}\alpha$ 1.5418Å), que fue operado con un voltaje de 40 kV y una corriente de 15 mA. Los patrones se obtuvieron efectuando barridos de 2θ de 3 a 30° , con una velocidad de $1^\circ/\text{min}$. La identificación de los minerales presentes en las muestras se efectuó por comparación directa con los patrones reportados por el JCPDS (*Joint Committee of Powder Diffraction Standards*).

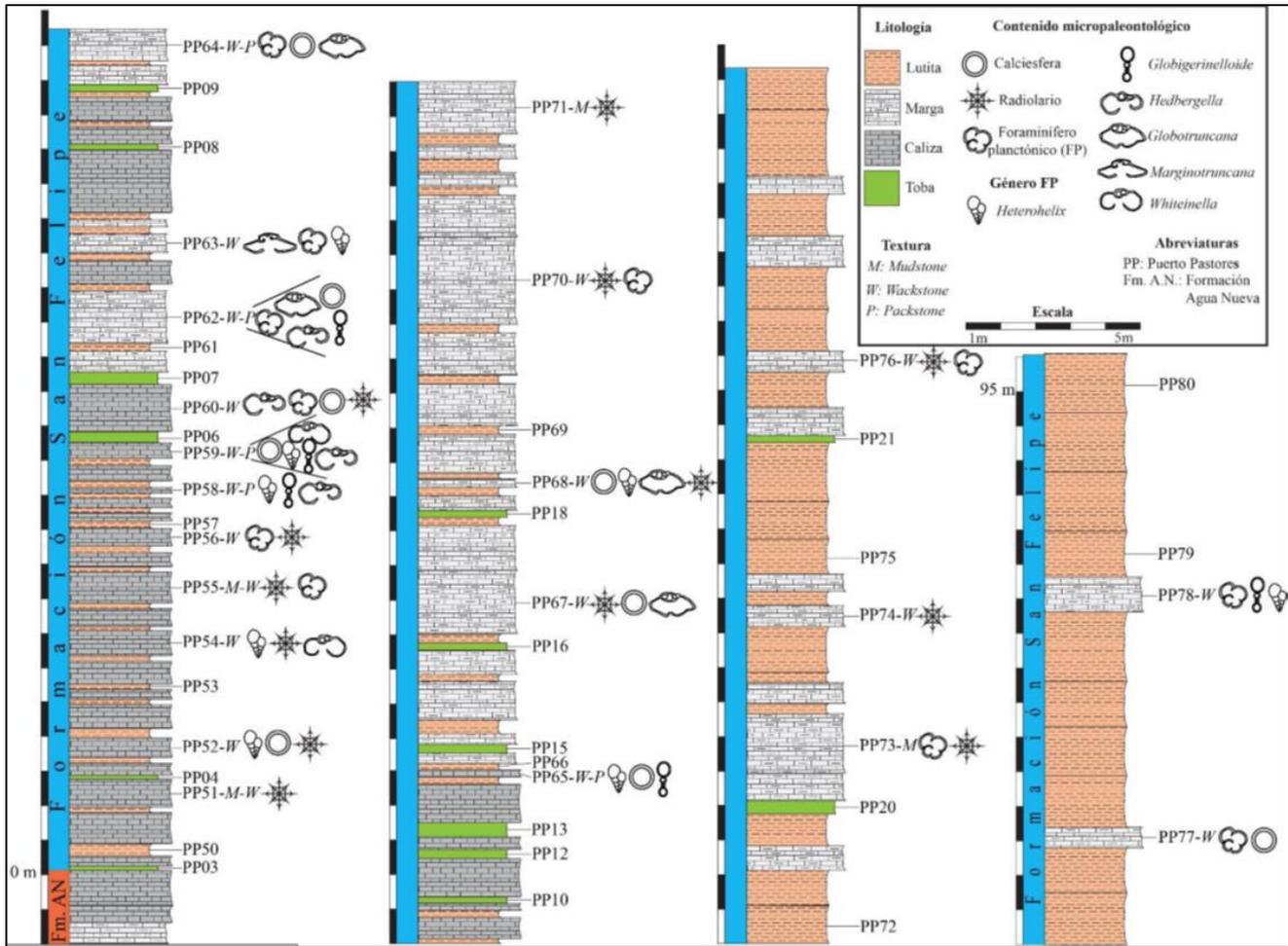


Figura 2: Sección bioestratigráfica (litología, micropaleontología y muestreo) de la Formación San Felipe en la localidad Puerto Pastores, Galeana, N.L. (Tienda-Garza, 2018).

Resultados y discusión

En la Figura 3 se reporta la variación de la Radioactividad Total (cps) y de las concentraciones de radioelementos (%K, ppm U, y ppm Th) a través del perfil y considerando el tipo de litología. Se aprecia una disminución de la radioactividad total hacia la cima. Una posible explicación sería que la intemperización descompone los principales minerales portadores de K, tales como los feldspatos, la biotita y la moscovita (Denitith & Mudge, 2014), acumulándose el elemento

sólo en minerales de arcilla. Por otro lado, minerales accesorios como el circón, que contribuyen con U y Th, permanecen relativamente estables durante procesos de meteorización. La respuesta del U es parecida a la del K. En los primeros 40 m del perfil se observan concentraciones relativamente altas, pero conforme se va ascendiendo estratigráficamente estas disminuyen. En el registro de Th, se presentan pequeñas variaciones, aunque no son significativas. Los picos están relacionados con la presencia de tobas, y el resto posiblemente se encuentra controlado por la presencia de arcillas. De esta

forma, los valores promedio del registro incluyen: 180.9 cuentas por segundo (cps) de rayos γ , 0.96 %K, 8.16 ppm U y 5.05 ppm Th. La concentración de uranio y torio es relativamente baja en comparación a lo reportado para rocas sedimentarias detríticas (IAEA, 2003). Sin embargo, todos los valores se encuentran dentro de los intervalos propuestos en la literatura para estas litologías.

Por otra parte, se efectuó el análisis del registro por litología. En la Figura 4 se reportan los histogramas correspondientes a

radiación gamma total. En ellos se observa que la lutita ($\bar{x} \sim 190$ cps) y la toba alterada ($\bar{x} \sim 270$ cps) son los materiales que muestran la mayor emisión de radiación (Figura 4c-d), ya que estas litologías tienden a concentrar una mayor cantidad de minerales arcillosos. Por otro lado, como era de esperarse, la caliza y la marga ($\bar{x} \sim 150$ -160 cps) se caracterizan por una emisión limitada de radiación (Figura 4a-b).

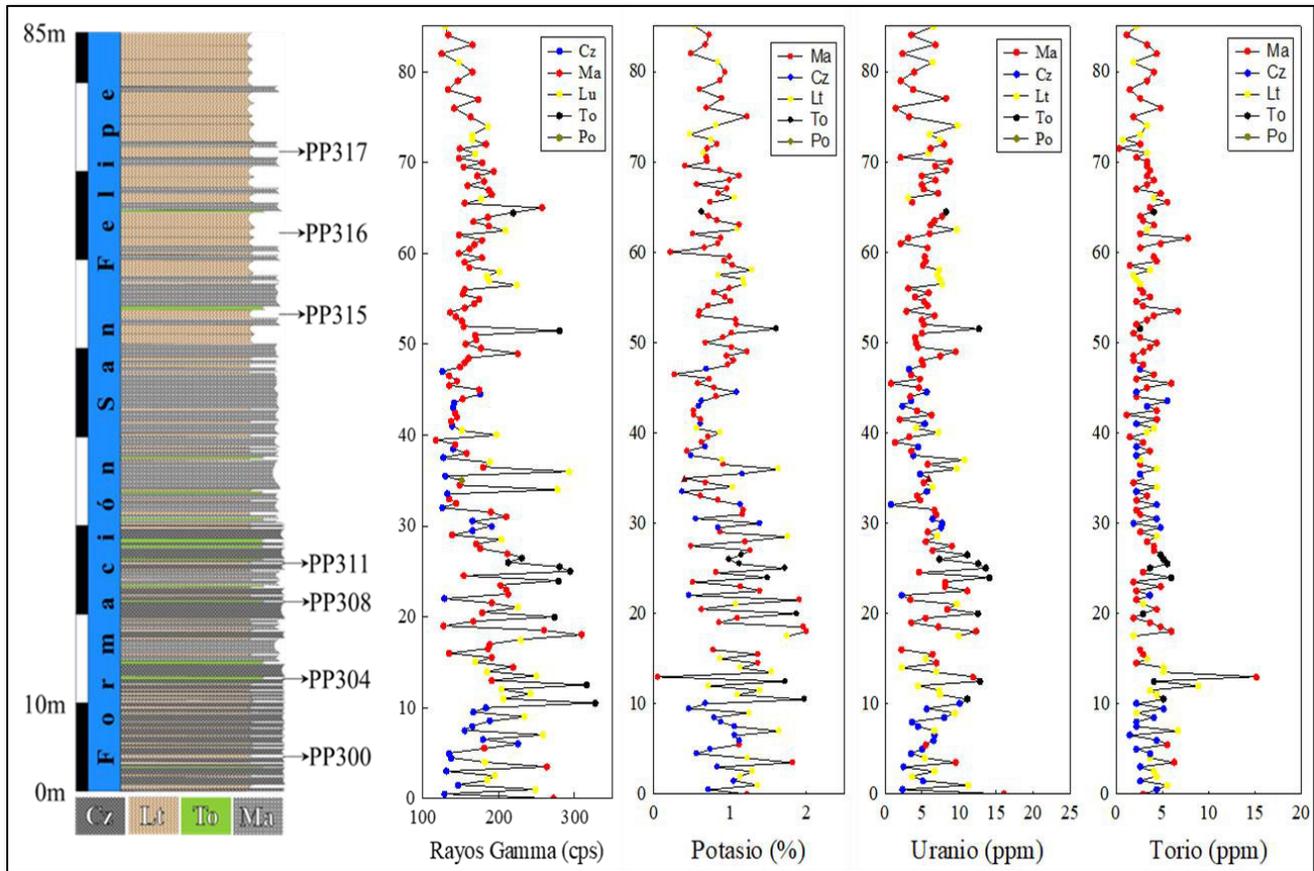


Figura 3: Variación de concentración de radioelementos y radiación gamma a través de las litologías que integran el perfil Puerto Pastores, Galeana N.L.

Como ya se ha mencionado, los minerales que incluyen isótopos radioactivos (^{40}K , ^{238}U y ^{232}Th) tienden a concentrarse en sedimentos finos (tamaño de partícula $\leq 2\mu\text{m}$). Las superficies químicamente activas de las partículas de arcillas absorben átomos radioactivos debido a su alta capacidad de intercambio catiónico (Meunier et al., 2004). Esto explica el alto nivel de radioactividad que se observa tanto en las mediciones que se encuentran en los estratos arcillosos (e.g., lutita). En el caso de la toba alterada San Felipe, la petrografía realizada por Tienda-Garza (2018) indica la presencia de feldespato-K y plagioclasa, que pueden incluir K, y de circón, que puede incluir U y Th. De

esta forma, estos minerales son contribuyentes a la radioactividad de estas rocas.

El potasio (K^+) se encuentra presente en la mayoría de los sedimentos y es un claro indicador de aluminosilicatos como feldespatos, arcillas y micas. Estos son componentes usuales en lutitas. En la Figura 5 se puede observar que las calizas y margas se caracterizan por concentraciones relativamente bajas ($\bar{x} \sim 0.8 - 0.9\%$), mientras que las lutitas ($\bar{x} \sim 1.1\%$) y tobas alteradas ($\bar{x} \sim 1.5\%$) muestran una mayor concentración. En el caso de la lutita San Felipe, el K está principalmente asociado a illita, mientras que en el caso de la toba el contenido lo proporcionan

feldespato, illita y moscovita. Sin embargo, a partir de los 40 m en el perfil (Figura 3) se aprecia una disminución general en este elemento, que se asume se deba a una ligera disminución de la acumulación de feldespato. Los valores promedio de concentración de U en las diferentes litologías son comparables entre sí y relativamente bajos ($\bar{x} \sim 8$ ppm). Esto es explicable, ya que sólo la toba alterada puede concentrar, aunque de forma restringida, circón. La concentración de torio ($\bar{x} \sim 5$ ppm) se encuentra distribuida de forma uniforme a lo largo de todo el perfil Puerto Pastores. Esto se debe a que este elemento se concentra en circón, que es un mineral ausente o muy escaso en las litologías bajo estudio.

La aplicación de la difracción de rayos-X en concentrados de $< 2 \mu\text{m}$ para muestras de lutita y toba alterada de la Formación San Felipe, colectadas en la localidad Puerto Pastores (Galeana, N.L.) permitió establecer que: (a) en general, la composición

mineralógica de las muestras de lutita es comparable y constituida principalmente por illita $2M_1$ (reflexiones 10.04, 4.98 y 3.33 Å) cuarzo (reflexiones 4.26 y 3.34 Å) y calcita (reflexión 3.03 Å) (Figura 6a). Por otra parte, las muestras de toba alterada están constituidas por illita $2M_1$ (reflexiones 10.04, 4.98 y 3.33 Å), moscovita 3T (reflexiones 9.97 y 3.33 Å) y ortoclasa (reflexiones 3.79 y 3.33 Å) (Figura 6b). En ambos casos (lutita y toba alterada), la presencia de illita se confirma al no mostrar cambios en la configuración de los patrones con los tratamientos con etilenglicol y calentamiento a 300°C (Meunier et al., 2004; Bergaya & Lagali, 2006); (b) los patrones se encuentran mejor definidos hacia la base, lo que se puede interpretar como una disminución en la cristalinidad como se asciende estratigráficamente; (c) la muestras de toba alterada de la sección basal, en su condición original, incluye la reflexión a 15.00 Å, la cual desaparece con los tratamientos. Este comportamiento es evidencia de la presencia de trazas de montmorillonita.

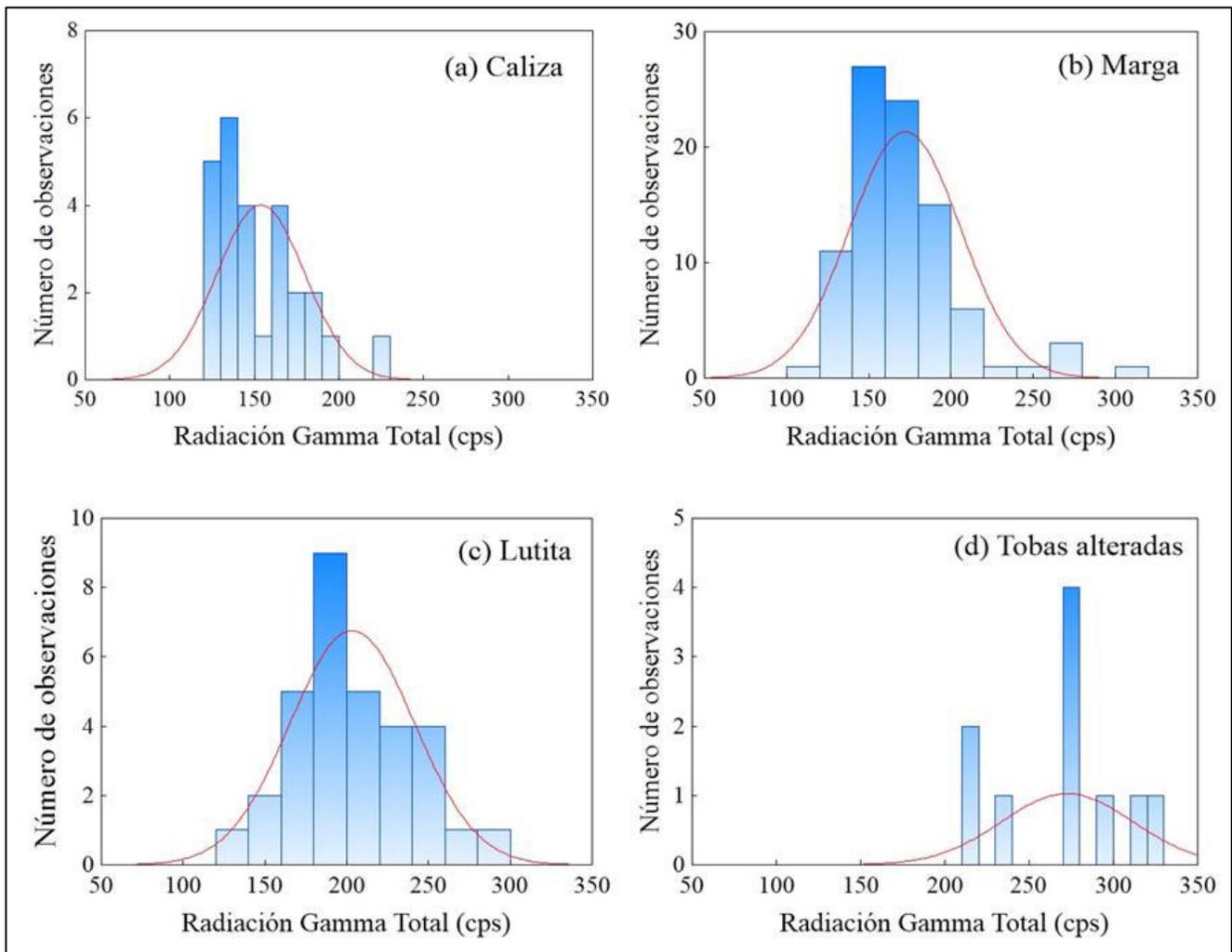


Figura 4: Histogramas de radiación gamma total para las litologías que conforman la Formación San Felipe en la localidad Puerto Pastores (Galeana, N.L.): (a) Caliza, (b) Marga, (c) Lutita, (d) Toba alterada.

Conclusiones

El trabajo de campo, el estudio de espectrometría de radiación gamma y la caracterización mineralógica para la fracción <math> < 2 \mu\text{m}</math>, por difracción de rayos X, de la Formación San Felipe en la localidad Puerto Pastores (Galeana, N.L.) indican que:

- (1) El perfil presenta en general una estratificación normal sin discontinuidades, alcanzando un espesor total de ~ 95 m, constituido por: (a) caliza compacta de color gris claro a oscuro, (b) margas de color gris claro, (c) lutita de color gris y verde claro a oscura, (d) toba alterada de color verde que al intemperismo cambia a ocre y (e) caliza mezclada con ceniza volcánica de color blanco (porcelanita). Conforme se asciende estratigráficamente, el número de estratos y el espesor de los estratos de caliza y volcanoclásticos disminuye. Esta variación es acompañada por un incremento en el número y el espesor de los horizontes de margas y lutita.
- (2) El estudio de espectrometría de rayos gamma ha revelado los siguientes valores promedio de emisión y concentración en la Formación San Felipe: 181 cps de rayos gamma total, 0.96 %K, 8.16 ppm U y 5.05 ppm Th. Aunque estas concentraciones son relativamente bajas, se encuentran

dentro de los intervalos propuestos para rocas sedimentarias carbonatadas y detriticas (IAEA, 2003). En general, la lutita y la toba son los materiales que presentan las concentraciones más altas en K, U y Th, como resultado de un mayor contenido de minerales que acumulan principalmente potasio, tal como feldespato-K, illita y muscovita.

- (3) Los patrones de difracción de rayos X para fracción arcillosa ($\leq 2 \mu\text{m}$) revelaron en la lutita la presencia de illita 2M1, cuarzo y calcita. En el caso de las tobas alteradas, se identificaron illita 2M1, montmorillonita, muscovita 3T y ortoclasa.
- (4) En general, la fase dominante en los concentrados de fracción arcillosa es la illita. La formación de este mineral se vio favorecida por la alteración de feldespato-K y mica durante el depósito de la Formación San Felipe en el Cretácico Superior. Este depósito tuvo lugar en un ambiente marino ligeramente básico (sector sur del Mar Interior Occidental de Norteamérica en la frontera con el proto-Golfo de México) durante una etapa de regresión marina. Además, el proceso diagenético de los sedimentos se vio influido por el inicio de la deformación mexicana, lo que provocó que la consolidación de los sedimentos ocurriera a temperaturas entre 100-200°C, favorables para la formación de minerales arcillosos no expansivos.

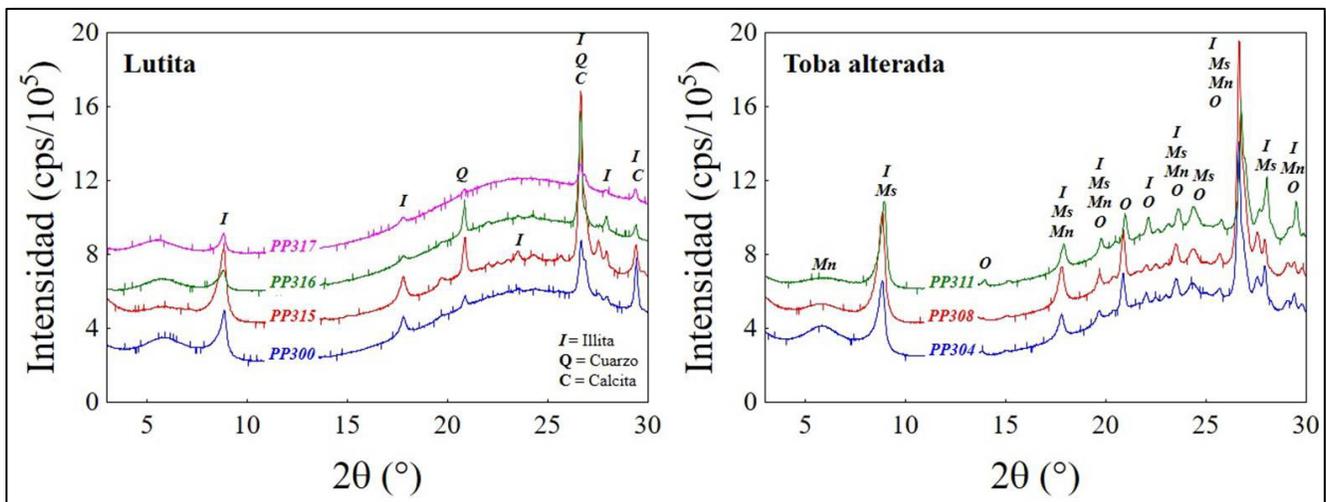


Figura 6: Difractogramas para lutita y toba alterada de la Formación San Felipe, localidad Puerto Pastores (Galeana, N.L.). I = illita, C = calcita, Mn = montmorillonita, Ms = muscovita, O = feldespato-K.

Referencias

Alanís-Platas, A. (2019): Caracterización de radiación gamma natural y de minerales arcillosos para la Formación San Felipe (Cretácico Superior) en la localidad Puerto Pastores

(Galeana, N.L.). – Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.

Bergaya, F. & Lagaly, G. (2006): General introduction: clays, clay minerals, and clay science. – *Developments in Clay Science*, 1: 1-18.

- Blakey, R.C. (2014): Paleogeography and paleotectonics of the Western Interior Seaway, Jurassic – Cretaceous of North America. – AAPG Search and Discovery Article, **30392**: 1-72.
- Dentith, M. & Mudge, S. (2014): Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. – Cambridge, UK (Cambridge University Press).
- Faure, G. (1986): Principles of Isotope Geology. – New York (Wiley).
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (2003): Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data. –IAEA-TECDOC-1363, Nuclear Fuel Cycle and Materials Section; Viena, Austria.
- Meunier, A., Velde, B. & Velde, B. (2004): Illite: Origins, evolution and metamorphism. – New York (Springer Science & Business Media).
- Seibertz, E. (1988): El desarrollo cretácico del Archipiélago de Tamaulipas. I. Litogénesis, paleogeografía y datación bioestratigráfica de la Formación San Felipe por medio de inoceramidos en el estado de Nuevo León [The Cretaceous development of the Archipelago of Tamaulipas. I. Lithogenesis, paleogeography and biostratigraphic dating of the San Felipe Formation by means of inoceramides in the state of Nuevo León] (Turoniano, NE México). – Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL Linares, **3**: 9-29.
- Steiger, R.H. & Jäger, E. (1977): Subcomission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. – Earth and Planetary Science Letters, **36**: 359-362.
- Tienda-Garza, J.A. (2018): Estudio estratigráfico, mineralógico, geoquímico e isotópico de la Formación San Felipe, Sierra Madre Oriental. – Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.
- Velasco-Tapia, F., Martínez-Paco, M., Iriondo, A., Ocampo-Díaz, Y.E., Cruz-Gámez, E.M., Ramos-Ledezma, A., Andaverde, J.A., Ostrooumov, M. & Masuch, D. (2016): Altered volcanic ash layers of the Late Cretaceous San Felipe Formation, Sierra Madre Oriental (Northeastern Mexico): U-Pb geochronology, provenance and tectonic setting. – Journal of South American Earth Sciences, **70**: 18-35.