

IDENTIFICACIÓN DE ANOMALÍAS RADIATIVAS EN YACIMIENTOS DEL SUBSUELO DE LA FAJA PETROLÍFERA DEL ORINOCO, VENEZUELA

Iván BARITTO^{1,3}, Zureisy MARÍN^{2,3}

RESUMEN

El estudio consistió en la identificación, análisis e interpretación de información petrofísica y geoquímica sedimentaria inorgánica derivada de registros espectrales y geoquímicos de un conjunto de pozos ubicados en los bloques Boyacá, Junín y Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco, al igual que análisis por DRX y MEB-EDX a muestras de núcleos, para determinar el origen de ciertas anomalías radiactivas detectadas en yacimientos de crudos pesados, con el objeto de caracterizar la extensión areal y temporal de este fenómeno. Se demostró que desde el Bloque Boyacá hasta el Bloque Ayacucho existe una anomalía radioactiva relevante generada por el torio (Th), el cual impacta los registros de rayos gamma totales y espectrales que está asociada a la vez con un incremento en el contenido del gadolinio (Gd), elemento químico de la serie de las tierras raras, ambos generados por el mineral pesado monacita, contenido tanto en las arenas como en las arcillas del intervalo estratigráfico analizado. Este mineral es un fosfato de tierras raras que proviene de rocas félsicas, graníticas y volcánicas de la Provincia de Cuchivero y de granitos intrusivos dentro del Complejo de Imataca en el Escudo de Guayana, ubicados al sur de la zona de estudio. La anomalía de torio/gadolinio (Th/Gd) es diacrónica en tiempo a todo lo largo de la Faja Petrolífera del Orinoco, ya que aparece desde el Cretácico hasta el Mioceno Temprano, por lo cual no debe ser establecida como un marcador entre el Cretácico y el Paleógeno (K/Pg) en el área. Se infiere a partir de los datos de subsuelo presentados que la configuración actual del río Orinoco se produjo posterior al Mioceno Temprano.

ABSTRACT

Identification of Radioactive Anomalies in Subsurface Reservoirs of The Orinoco Oil Belt, Venezuela.

The study consisted of the identification, analysis, and interpretation of petrophysics and inorganic sedimentary geochemical information derived from spectral and geochemical loggings of a set of wells located in the Boyaca, Junin and Ayacucho blocks of the Orinoco Oil Belt, and XRD and SEM-EDS analysis of core samples to determine the origin of certain radioactive anomalies detected in heavy crude reservoirs in order to characterize the areal and temporal extension of this phenomenon. It was demonstrated that from Boyaca to Ayacucho Block there is a relevant radioactive anomaly generated by thorium (Th), which impacts the total gamma ray and spectral logs and it is associated at the same time with an increase in the content of gadolinium (Gd), a chemical element of the rare earth series, both generated by the heavy mineral monazite, contained in the sands and clays of the stratigraphic interval analyzed. This mineral is a rare earth phosphate that comes from felsic, granitic and volcanic rocks of the Cuchivero Province and from intrusive granites within the Imataca Complex in the Guayana Shield, which are located to the south of the study area. The thorium/gadolinium (Th/Gd) anomaly is diachronic in time throughout the Orinoco Oil Belt, since it appears from the Cretaceous to the Early Miocene, for which it should not be established as a marker between the Cretaceous and Paleogene (K/Pg) in the area. It's inferred from the subsurface data presented that the current configuration of the Orinoco river occurred after the Early Miocene.

Palabras claves: torio, gadolinio, monacita, radioactividad, Faja Petrolífera del Orinoco.

Keywords: thorium, gadolinium, monazite, radioactivity, Orinoco Oil Belt.

¹ Ingeniero Geólogo. M.Sc. Ciencias Geológicas. Esp. Geociencias Petroleras. Correo-e: ivanbaritto@gmail.com

² Ingeniero de Petróleo. M.Sc. Ciencias de la Tierra.

³ INTEVEP, S.A., Gerencia de Exploración, Los Teques, Venezuela.

INTRODUCCIÓN

La Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) representa la acumulación de crudos pesados y extrapesados más grande del mundo con un área aproximada de 55.314 Km². El área piloto que activó esta investigación surgió originalmente en el Campo Dobokubi (372 Km²) localizado en la parte nororiental del Bloque Ayacucho, haciéndose luego la investigación extensible al resto de la FPO (Figura 1). En este campo se reportan valores irregularmente altos en los registros de rayos gamma totales (GR>150 API) y registros espectrales (Th>25 ppm) en secuencias de edad Cretácico correspondientes con el Grupo Temblador de edad Aptiense-Maastrichtiense (Rendón *et al.* 2015), en yacimientos que contienen hidrocarburos pesados (11°– 15,8° API) y que no habían sido originalmente considerados dada la alta radioactividad natural presente en estos intervalos sedimentarios, la cual enmascara a las arenas contentivas de este petróleo. La señal detectada por los registros espectroscópicos espectrales (U, Th, K) puede ser confundida con la respuesta radioactiva emanada por los intervalos arcillosos, dificultando así la precisa identificación y evaluación de este tipo de yacimientos (Baritto, 2021). La afectación de estos registros espectroscópicos es causada probablemente por la acumulación de ciertos tipos de minerales pesados que son necesarios caracterizar en detalle, con el objeto de no descartar zonas de interés prospectivo en la FPO. Por tanto, es necesario considerar estos nuevos paradigmas en los cálculos de reservas y en las futuras estrategias de explotación en áreas con estas mismas características geológicas.

La primera medición de la radiación gamma natural en un pozo petrolero fue en el año 1938. A través de la medición de los elementos radiactivos presentes en las rocas (U, Th, K), la espectrometría de rayos gamma natural se ha constituido en una herramienta muy poderosa para aplicaciones sedimentológicas y para distinguir entre formaciones arcillosas con alta radioactividad de las arenosas, con baja radioactividad, entre otras aplicaciones. El reconocimiento de minerales radiactivos y la comprensión de las condiciones de depositación dan una mejor determinación de la distribución mineralógica, permitiendo una reconstrucción más precisa de los ambientes depositacionales, los cuales están frecuentemente caracterizados por la presencia de ciertos minerales (Serra & Serra, 2004). Los métodos de caracterización geoquímica enfocados hacia la sedimentología han demostrado tener un valor práctico en la comprensión de eventos sedimentarios, interpretaciones paleoambientales y en la identificación de unidades estratigráficas de interés en muchas áreas geológicas (Baritto, 2013).

Por otra parte, las herramientas espectroscópicas de perfilaje geoquímico fueron introducidas hace más de 30

años, comenzando con herramientas de cable basadas en generadores pulsados por neutrones y definidas por sus siglas en inglés como PNG (pulsed-neutron generator), las cuales empleaban detectores de centelleo de yoduro de sodio activadas con tántalo (NaI-Tl) (Hertzog, 1978). El surgimiento de nuevos detectores de centelleo produjo herramientas basadas en oxiortosilicato de gadolinio (GSO) y germanato de bismuto (BGO), ambas todavía en uso activo en el mercado. Desde entonces, el perfilaje geoquímico ha evolucionado y avanzado en gran parte debido a la mejora de las técnicas de medición y los métodos de interpretación. Los desarrollos recientes incluyen la combinación de espectroscopía inelástica y de captura, introduciendo nuevos detectores de centelleo y nuevas innovaciones bajo un diseño tradicional (Galford *et al.*, 2009), lo cual se traduce en una más alta precisión y en una mejora de la exactitud de las mediciones para los análisis de elementos claves en la formación de las rocas. Precisamente el fin último de este tipo de herramientas espectroscópicas es proveer información mineralógica y litológica cuantitativa para mejorar la evaluación de las formaciones geológicas (Hertzog & Herron, 1990; Herron & Herron, 1990; Pemper *et al.*, 2006). Con estas tecnologías aplicadas en años recientes en la Faja Petrolífera del Orinoco se busca reducir la incertidumbre en la predicción de las litologías existentes y determinar con mayor precisión los intervalos arenosos y los volúmenes de arcilla en los yacimientos, objetivos que en ciertas circunstancias no son tan fáciles de lograr en el área empleando únicamente las herramientas de perfilaje convencionales para tales fines, como por ejemplo el registro de rayos gamma total (GR), debido a ciertas particularidades mineralógicas, como el caso en cuestión objeto de este estudio. La información proveniente de estos tipos de registros espectroscópicos junto a otras técnicas analíticas tradicionales de laboratorio como la difracción de rayos X (DRX), la fluorescencia de rayos X (FRX) y la microscopía electrónica de barrido (MEB-EDX) permiten extraer información geológica más precisa y robusta que resulta de gran utilidad para caracterizar detalladamente a este tipo de yacimientos petrolíferos.

La idea de realizar este estudio partiendo inicialmente desde el Campo Dobokubi en el Bloque Ayacucho, hacia el resto de los bloques de la Faja Petrolífera del Orinoco, se debe en primera instancia a la existencia de secuencias de la misma edad Cretácica que pueden reflejar este mismo fenómeno geológico observado en el campo piloto, además de que se cuenta con la información petrofísica y geoquímica requerida para caracterizar en detalle la respuesta de estos registros espectroscópicos en el intervalo estratigráfico de interés y de esta forma establecer la extensión geográfica y temporal hacia otras áreas de importancia económica en la FPO.

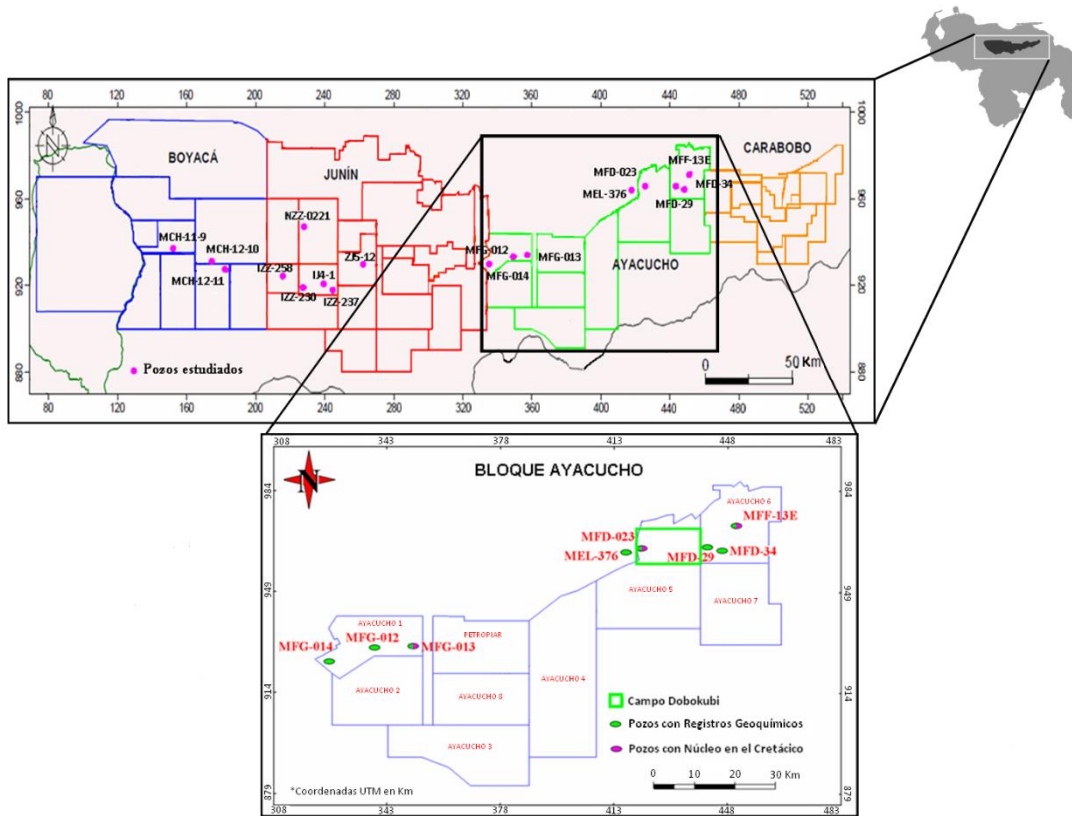


Figura 1. Ubicación de los pozos estudiados con registros espectroscópicos (espectrales y geoquímicos) en la Faja Petrolífera del Orinoco y detalle del Campo Dobokubi en el Bloque Ayacucho. Uno de los pozos claves donde se identificó la anomalía radioactiva fue el pozo MFD-023, el cual cuenta con núcleo en el intervalo Cretácico

CONTEXTO GEOLÓGICO

La Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) se ubica en la porción sur de la Cuenca Oriental de Venezuela y ha sido interpretada como parte de una flexura de la corteza del tipo *fore-bulge* que no fue afectada durante la colisión oblicua de la Placa Caribe con la Placa Suramericana durante el Oligoceno (Di Croce, 1996). Desde el punto de vista estructural y tectónico, se destacan tres grandes dominios estructurales en la Faja Petrolífera del Orinoco, separadas por el sistema de fallas de Hato Viejo al occidente y por el Alto de Hamaca al oriente. El dominio occidental corresponde con el área de Boyacá y noroeste de Junín y una columna estratigráfica que comprende rocas del Paleozoico, Jurásico, Cretácico, Oligoceno y Mioceno, donde se tienen fallas de orientación preferencial N60°E. Un dominio central que cubre el sureste de Junín hasta el noroeste de Ayacucho y una columna estratigráfica con remanentes del Cretácico y el Mioceno con fallas de orientación preferencial N70° E y conjugadas N55°O, y por último un dominio oriental que cubre el sureste de Ayacucho y el área de Carabobo con una columna estratigráfica que comprende fundamentalmente rocas del Mioceno Medio a Tardío y fallas de orientación preferencial E-O (POMR, 2012) (Figura 2). En el área de Ayacucho los sedimentos terciarios que se encuentran descansando sobre el basamento ígneo-metamórfico tienen un papel determinante en la configuración de las trampas petrolíferas, excepto para

una estrecha franja al norte donde la secuencia Cretácica se intercala discordantemente entre el Terciario y el Precámbrico. En el dominio occidental que involucra las áreas de Boyacá y Junín, los sedimentos terciarios suprayacen predominantemente a depósitos Cretácicos, infra-mesozoicos y Paleozoicos, estando estas dos últimas secuencias preservadas en estructuras grábenes (Crespo, 2008).

Las formaciones geológicas se caracterizan estructuralmente por representar un monoclin con buzamiento 3°–4° hacia el norte generado por la deflexión de las formaciones hacia el sur de la Cuenca Oriental de Venezuela. El Bloque Ayacucho también presenta sistemas de fallas normales, las cuales representan estructuras de relajación por la deflexión de las formaciones hacia el sur. El área mayor de Ayacucho, que forma parte del flanco sur de la Cuenca Oriental, es una cuenca asimétrica con su eje mayor en dirección este-oeste, cuyo origen puede remontarse a la era Paleozoica y que en los períodos subsiguientes fue adquiriendo su configuración actual, completándose desde el Terciario hasta el presente (Figura 3).

El marco estratigráfico regional de la Faja Petrolífera del Orinoco corresponde al acuífamiento sur de los sedimentos terciarios de esta cuenca, por encima del basamento ígneo-metamórfico del Cratón de Guayana localizado al sur del río Orinoco. El basamento en el área de Ayacucho está

compuesto por granitos, gneises, anfibolitas y esquistos. Las rocas del Complejo Imataca, ubicado al sur del Bloque Ayacucho, tienen edades mayores a 2.800 Ma, con algunos sectores cercanos a Guri con edades probablemente mayores a 3.200 Ma, las cuales han sido sometidas a intensos procesos de metamorfismo y deformación, que alcanzaron la facies de la granulita (Urbani, 2011). El paleorelieve de la Faja se caracteriza por ser accidentado y fallado, lo que ocasiona desajustes en la compactación de los sedimentos reflejándose como altos y bajos estructurales. A través del mapa gravimétrico del área, se pueden apreciar estas irregularidades del basamento correspondientes con el dominio oriental y central de la Faja, y el control que este basamento específicamente ejerció en el área de Ayacucho para la depositación de las secuencias sedimentarias cretácicas y terciarias suprayacentes (Araujo, 2016) (Figura 3).

grupo se subdivide en dos formaciones denominadas de más antigua a más joven como Formación Canoa de ambiente continental y Formación Tigre de ambiente marino (González de Juana *et al.*, 1980). La Formación Canoa de edad Aptiense-Albiense está definida como una intercalación de conglomerados de grano fino y areniscas conglomeráticas, areniscas, limolitas y arcilitas generalmente moteadas. Se sugiere una depositación en ambientes continentales por la presencia de conglomerados, posiblemente fluvial del tipo barra de meandro. Por su parte la Formación Tigre de edad Turoniense-Maastrichtiense es una secuencia variable, irregularmente estratificada, de areniscas y limolitas de grano fino, glauconíticas, gris a gris verdoso, areniscas gruesas friables y espesas, limolitas grises a gris verdoso y lutitas carbonosas y fosfáticas. También se observan capas delgadas de calizas dolomíticas y dolomías en capas blanquecinas, delgadas, duras y con frecuencia fosilíferas y glauconíticas. La fauna encontrada en esta unidad indica un ambiente de plataforma que va desde plataforma exterior a talud.

Toda la secuencia Cretácica que descansa inconformemente sobre el basamento ígneo-metamórfico corresponde con el Grupo Temblador de edad Aptiense-Maastrichtiense. Este

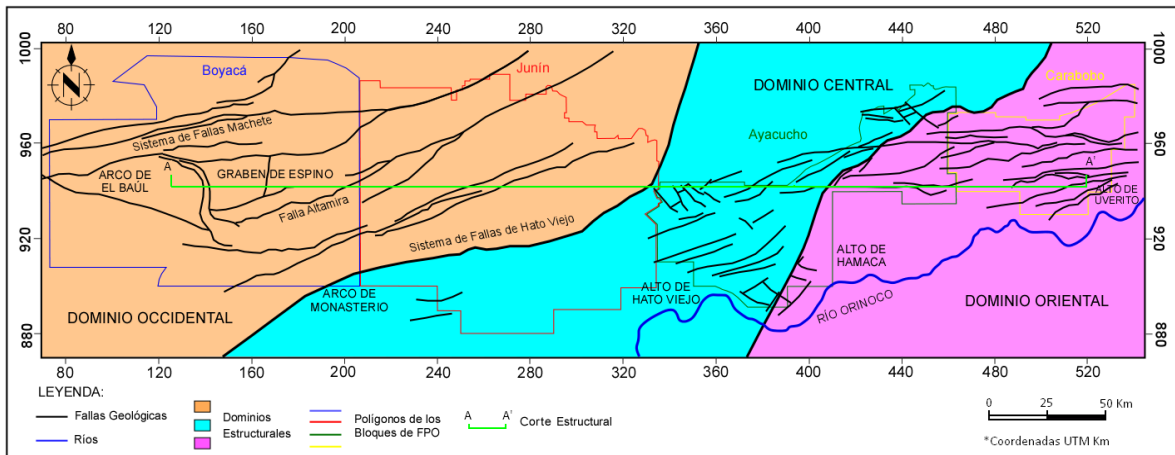


Figura 2. Mapa de la Faja Petrolífera del Orinoco mostrando las áreas con los tres dominios estructurales y las principales fallas geológicas de carácter regional. Modificado de POMR (2012)

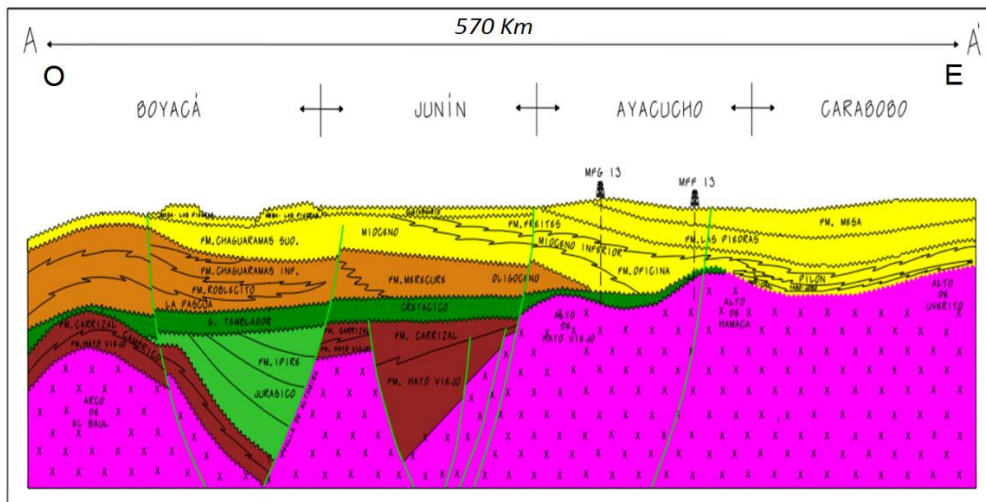


Figura 3. Corte estructural regional A-A' en sentido oeste-este de la Faja Petrolífera del Orinoco ubicada en la Fig. 2, con la localización de los pozos MFG-013 y MFF-13. Modificado de POMR (2012)

En la parte más septentrional de la Faja, particularmente hacia los sectores de Carabobo y Ayacucho, los sedimentos terciarios suprayacen discordantemente a una franja relativamente poco espesa de sedimentos Cretácicos que a su vez se adelgazan antes de desaparecer hacia el sur. Se tienen a las secuencias terciarias constituidas por las formaciones Merecure y Oficina (Figura 4). La Formación Merecure de edad Oligoceno – Mioceno Temprano está compuesta en más de un 50 % por areniscas de color gris claro a oscuro, masivas, mal estratificadas y lenticulares, duras, de grano fino a grueso, incluso conglomeráticas, con estratificación cruzada. Las areniscas están intercaladas por láminas delgadas de lutitas de color gris oscuro a negro, carbonáceas, laminadas irregularmente, algunas arcilitas ferruginosas con ocasionales capas de lignitos. Las características litológicas indican que la sedimentación de esta unidad se desarrolla en un sistema fluvio-deltaico. La Formación Oficina de edad Mioceno Temprano – Medio se describe como una alternancia de lutitas que se encuentran intercaladas e interestratificadas con areniscas y limolitas de grano fino a grueso, al igual que ocasionales lignitos. La presencia de arenas lenticulares y de relleno de canales de ríos podría indicar la existencia de un gran complejo fluvio-deltaico. La Formación Oficina se encuentra concordante sobre la Formación Merecure, sin embargo, la misma está discordante sobre unidades cretácicas. En algunos casos hacia el sur y el este esta Formación descansa discordantemente sobre el basamento (CIEN, 2011).

Los pozos con núcleo claves considerados en esta investigación se encuentran localizados en el Bloque Ayacucho, los mismos están identificados con los siguientes nombres: MFG-013 (Ayacucho 1), MFD-023 (Campo Dobokubi) y el pozo MFF-013 (Campo Farante). El pozo MFG – 013 se constituye en uno de los pozos más importantes para el estudio debido a la variabilidad de

depósitos y de ambientes sedimentarios que involucra la sección de núcleo analizado (362'). En este pozo se lograron identificar dieciocho (18) facies sedimentarias, por lo que representa un pozo modelo o base. Ocho facies (8) constituyen areniscas limpias y/o calcáreas, cuatro facies (4) de areniscas arcillosas, cuatro facies de (4) lutitas, una (1) facies de carbón y una (1) facies heterolítica (Rangel *et al.*, 2013). Otra característica resaltante en cuanto al núcleo analizado de este pozo es que abarca tres ambientes sedimentarios, siendo estos identificados de base a tope en el núcleo como: ambiente fluvial (2.430'1"-2.500'), ambiente transicional (2.430'1"- 2.316'9") y ambiente marino somero (2.316'9"- 2.138'6") (Figura 5).

Por su parte el Pozo MFD-023 localizado en el Campo Dobokubi (433,81' de núcleo), se caracteriza por estar dividido en cuatro intervalos estratigráficos: Basamento (4.603.50'-4.633.42'), Sedimentos Cretácicos (4.448.17'-4.603.50'), Formación Oficina/Merecure (4.295'-4.448.17') y Formación Freites (2.555'- 2.771.58'), donde se lograron identificar once (11) facies sedimentarias. Seis (6) constituyen areniscas de diversos tamaños granulométricos, una facies (1) de conglomerado, una (1) facies heterolítica, una (1) facies lutítica, una (1) facies limolítica y una (1) facie de carbón (IRES, 2007). La sucesión Cretácica se compone de sedimentos continentales, con un intervalo fino de sedimentos marinos en la parte basal. La Formación Oficina/Merecure se compone predominantemente de sedimentos de varios ambientes fluviales, con menor influencia del mar. En total esta unidad estratigráfica representa una sucesión transgresiva, depositada en ambientes continentales en la parte inferior (fluvial, paleosuelo), con deposición deltaica en la parte superior de la secuencia y, posiblemente transición hasta condiciones marinas en la parte superior de la unidad.

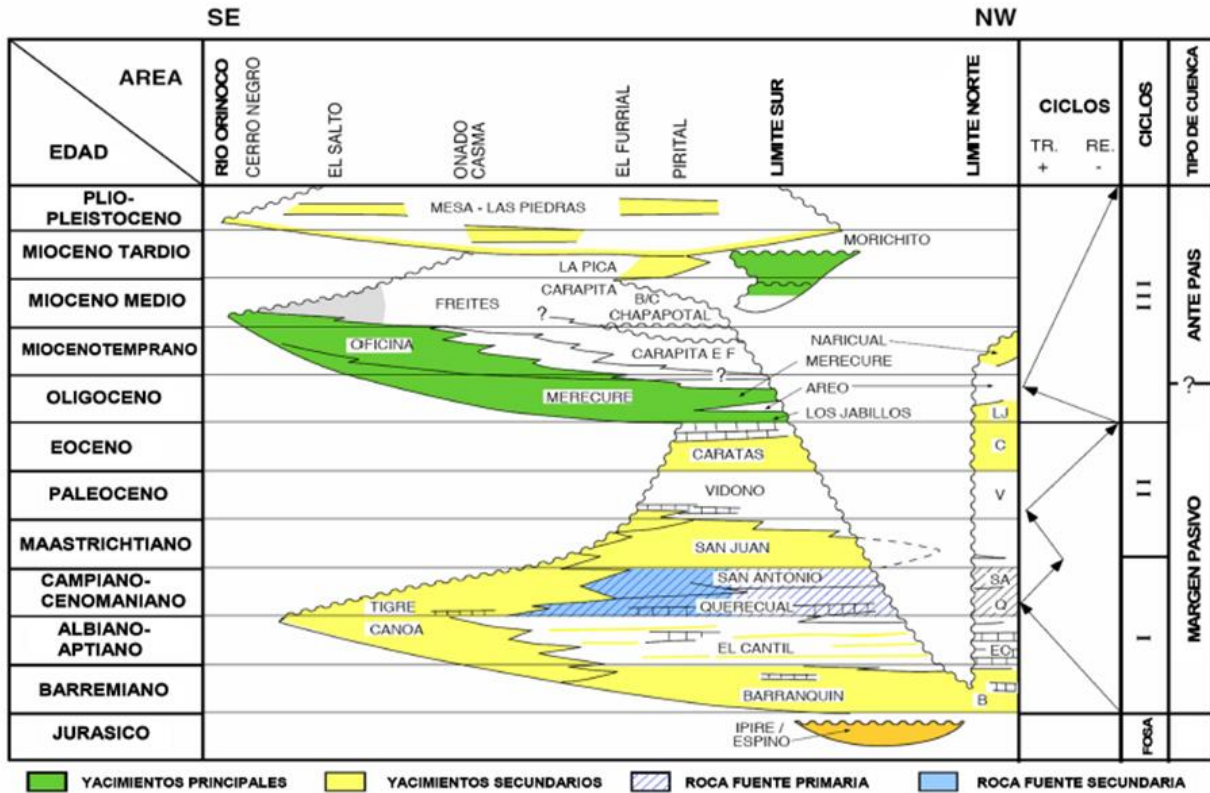


Figura 4. Cuadro cronoestratigráfico de la Cuenca Oriental de Venezuela donde se aprecia hacia el SE las unidades estratigráficas presentes en el subsuelo de la FPO. Tomado de Summa (2003)

El pozo MFF-013 del Campo Farante tiene una sección con núcleo de 695' de espesor entre las profundidades 4.325'-4.680,9' que abarcan el Terciario principalmente, ya que a partir de 4.681' se encuentra el Cretácico hasta una profundidad de 4.910' aproximadamente (tope del basamento), pero en esta sección Cretácica no hubo recuperación de núcleo. Sin embargo, en este pozo la "anomalía radioactiva" en el registro de rayos gamma total comienza en 4.645', es decir, se inicia en la base del Mioceno Temprano de la Formación Oficina, donde sí hay núcleo.

Los ambientes de sedimentación de las secuencias Cretácicas y de inicios del Terciario en los tres pozos pilotos estudiados corresponden con asociaciones sedimentarias de canales fluviales, los cuales son muy proclives a acumular minerales pesados de diversos tipos, los cuales son mayormente indicativos de roca fuente y de las condiciones que prevalecieron durante los ciclos de sedimentación, ya que estos tienen una alta resistencia a la meteorización física y por consiguiente un alto potencial de preservación en las secuencias sedimentarias.

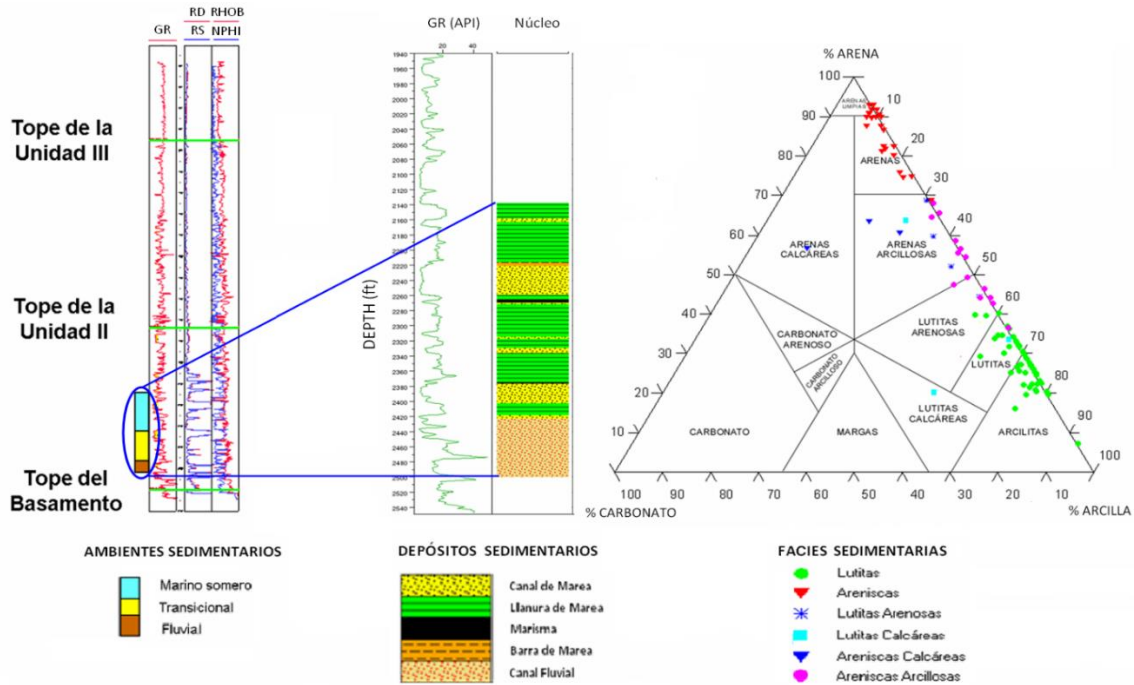


Figura 5. Ambientes, depósitos y facies sedimentarias identificadas en el núcleo del pozo piloto MFG-013 del Bloque Ayacucho de la FPO. Modificado de Rangel et al. (2013)

METODOLOGÍA

La investigación abarcó dos etapas. La primera etapa comprendió un análisis geoquímico sedimentario inorgánico derivado de la información combinada de las mediciones de las herramientas especiales de perfilaje geoquímico tales como el ECS (*Elemental Capture Spectroscopy*) y FLeX (*Formation Lithology Explorer*), donde se analizaron en conjunto los elementos químicos mayoritarios: Si, Ca, Fe, S, Ti, Mn, los cuales son indicativos en conjunto del tipo de roca presentes en el subsuelo (Baritto, 2013). También se interpretaron registros de rayos gamma espectrales donde se estudió el U, Th y K, elementos radiactivos que caracterizan algunos tipos de mineralogías presentes en las rocas (Liendo 2003), al igual que se analizaron datos sedimentológicos detallados de estudios previos (IRES, 2007, Rangel et al. 2013; Palma, 2012) tales como: litologías, fósiles, estructuras sedimentarias, facies, en tres núcleos claves Cretácicos correspondientes a los pozos: MFG-013, MFD-023 y MFF-13E.

Se hizo especial hincapié dentro de los registros espectroscópicos en el elemento torio (Th), y en el gadolinio (Gd), que es un elemento tierras raras contenido en ciertos minerales pesados y el cual es determinado por las herramientas especiales ECS y FLeX, para su posterior interpretación geológica. Es importante señalar que las anomalías geoquímicas definidas de este par de elementos (Th, Gd) obedecen a las diferencias significativas apreciadas en las tendencias de las curvas que exceden los valores normales de fondo de estos registros, en el caso del Th lecturas que superan los 25 ppm y en el caso del Gd lecturas

que exceden los 2 ppm. El otro conjunto de pozos analizados de interés y que cuentan con toda la información de registros convencionales y especiales para el estudio fueron: MCH-11-9, MCH-12-10, MCH-12-11, IZZ-213, IZZ-230, IZZ-237, IZZ-258, IJ4-1, IJ4-14, ZJ5-12, MFG-012, MFG-014, MFD-29 y MFD-34, ubicados en los bloques Boyacá, Junín y Ayacucho respectivamente.

La segunda etapa consistió en los análisis de laboratorio efectuados en las instalaciones de INTEVEP, S.A a muestras de núcleos y ripios pertenecientes al pozo MEL-376 y MFG-013 del Bloque Ayacucho por Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB-EDX). Finalmente, con toda la información analizada de los pozos se realizó una correlación geoquímica y cronoestratigráfica de la anomalía radioactiva para establecer así su extensión areal y temporal en la FPO.

Difracción de Rayos X (DRX)

Se realizó el estudio en muestras mediante análisis de roca total por DRX, utilizando un difractómetro PHILIPS PW 3710, provisto de un ánodo de cobre y manejado mediante el paquete informático de PANalytical que comprende el software Data Collector para la adquisición de datos y software HighScore Plus para el procesamiento de los difractogramas.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB-EDX)

Las muestras fueron analizadas por esta técnica analítica utilizando un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6490LV, provisto de un filamento de tungsteno. Este equipo está acoplado a un detector EDX OXFORD Instrument modelo INCA PENTA FETx3, con 30 mm² área de detección y 137 eV de resolución.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

En base a la evaluación de los registros espectrales y geoquímicos de los pozos claves con núcleo como el MFD-023 del Campo Dobokubi y de otros pozos localizados dentro del Bloque Ayacucho tales como el MFG-013 y MFF-013 (pozos con núcleo y registros geoquímicos), y los pozos MFG-012, MFG-014, MFD-29 y MFD-34 (pozos con registros geoquímicos), se constató la existencia de una anomalía geoquímica preponderante referida al elemento químico torio (Th) que se asocia a su vez al elemento gadolinio (Gd) en un intervalo estratigráfico que en algunos casos es relativamente mucho más joven que Cretácico, considerando la información bioestratigráfica y de correlación entre todos los pozos. En el MFD-023 se aprecia claramente que la anomalía radioactiva en los rayos gamma totales coincide con el registro espectral del torio a una profundidad de 4.374'. Al realizar una ampliación más detallada de la zona de la anomalía donde se muestra el tope del Cretácico, se destaca que el mismo se encuentra a una profundidad de 4.448', es decir, que entre la anomalía geoquímica y el límite Cretácico existe una diferencia de 74' de espesor, lo que sin duda refleja que esta anomalía involucra un período de tiempo mucho más amplio, siendo diacrónica en tiempo y llegando por consiguiente a abarcar arenas del Mioceno Temprano correspondientes con la Formación Oficina (Figura 6). En este pozo se aprecia claramente en el núcleo impregnación de hidrocarburo pesado en las arenas de la secuencia Cretácica. El pozo MFD-23, posee una evaluación petrofísica que coteja con los datos de núcleo, tal es el caso del volumen de arcilla (VSH) desplegado en la pista 6, calculado mediante las curvas de densidad/neutrón, las cuales indican facies de arenas limpias que están enmascaradas por el registro GR (Figura 7).

En el pozo MFG-013, un pozo con núcleo que abarca parte del Terciario y del Cretácico (2138' – 2500'), ubicado en la parte más occidental del Bloque Ayacucho, se aprecia que la anomalía geoquímica dada por el incremento del torio (Th)

y del gadolinio (Gd) es coincidente justamente con tope del Cretácico a 2.450' (Figura 8). Esta anomalía que impacta la curva de rayos gamma totales (GR) efectivamente se incrementa en relación al intervalo Terciario a partir de dicha profundidad. La afectación de la curva de rayos gamma totales obviamente es influenciada por el contenido de torio que presenta una elevada concentración (>25 ppm) a partir de este intervalo estratigráfico. El estudio sedimentológico efectuado por Rangel *et al.* (2013), interpreta en este intervalo de la anomalía geoquímica canales fluviales de ambiente continental. Otro de los pozos con núcleo cercano al Campo Dobokubi, corresponde con el MFF-013, en el cual se visualiza que la anomalía radioactiva en el registro de rayos gamma totales coincide en el registro del torio y gadolinio a una profundidad de 4.645' (Figura 9). No obstante, el tope del Cretácico se ubica a 4.681', a 36 pies por debajo de la anomalía radioactiva, lo cual es indicativo de que en este pozo dicha anomalía llega hasta los primeros pies de la parte basal de las arenas terciarias de la Formación Oficina y los principales depósitos sedimentarios identificados en este pozo también son correspondientes con canales fluviales.

Otro de los pozos también interpretado del área de Dobokubi es el MFD-029, el cual no tiene núcleo pero si presenta registros espectrales y geoquímicos en la zona estratigráfica de interés (Figura 10). En el mismo también se aprecia una diferencia existente entre la anomalía geoquímica del torio/gadolinio (Th/Gd) y el tope del Cretácico. La anomalía se ubica a 4.092' mientras que el tope del Cretácico a 4.180', es decir, existen 88 pies de diferencia entre ambos topes. Al analizar otros pozos fuera del contexto geográfico del Bloque Ayacucho, específicamente hacia los Bloques Boyacá y Junín, se estudiaron dos pozos claves: el primero de ellos denominado MCH-12-11, ubicado en el área de Boyacá y el segundo definido como NZZ-0221, localizado en el área de Junín. El pozo MCH-12-11 presenta la anomalía geoquímica del torio (Th) y el gadolinio (Gd) coincidente exactamente con el tope del Oligoceno, tal y como se visualiza en la Figura 11. A partir del Oligoceno se observa como la curva del torio aumenta de forma considerable diferenciándose de la sección estratigráfica suprayacente. También en el gadolinio se aprecia este mismo incremento que posteriormente se acentúa aún más en el Cretácico en ambos elementos químicos. En el pozo NZZ-0221, se aprecia según los topes cronoestratigráficos (Figura 12) que la anomalía geoquímica se encuentra a partir del Mioceno Temprano, según las tendencias similares reflejadas por las curvas de concentración del torio y del gadolinio.

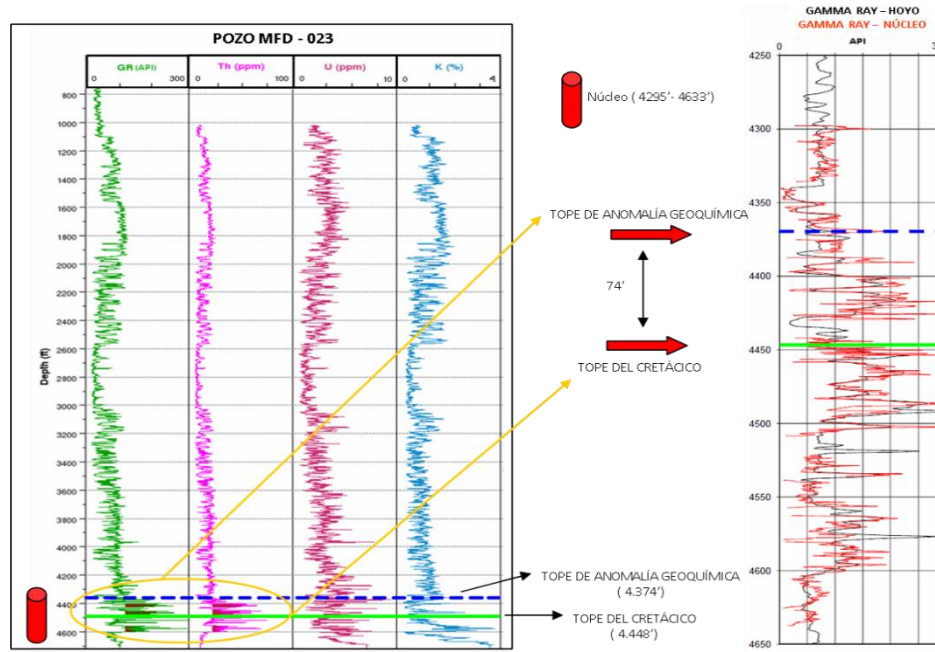


Figura 6. Pozo MFD-023 del Campo Dobokubi que refleja la anomalía geoquímica del Th versus el tope del Cretácico (aproximadamente 74' de diferencia). El registro a la derecha de la imagen compara en detalle el gamma ray del hoyo y el gamma ray del núcleo donde se indica el inicio de esta "anomalía radioactiva"

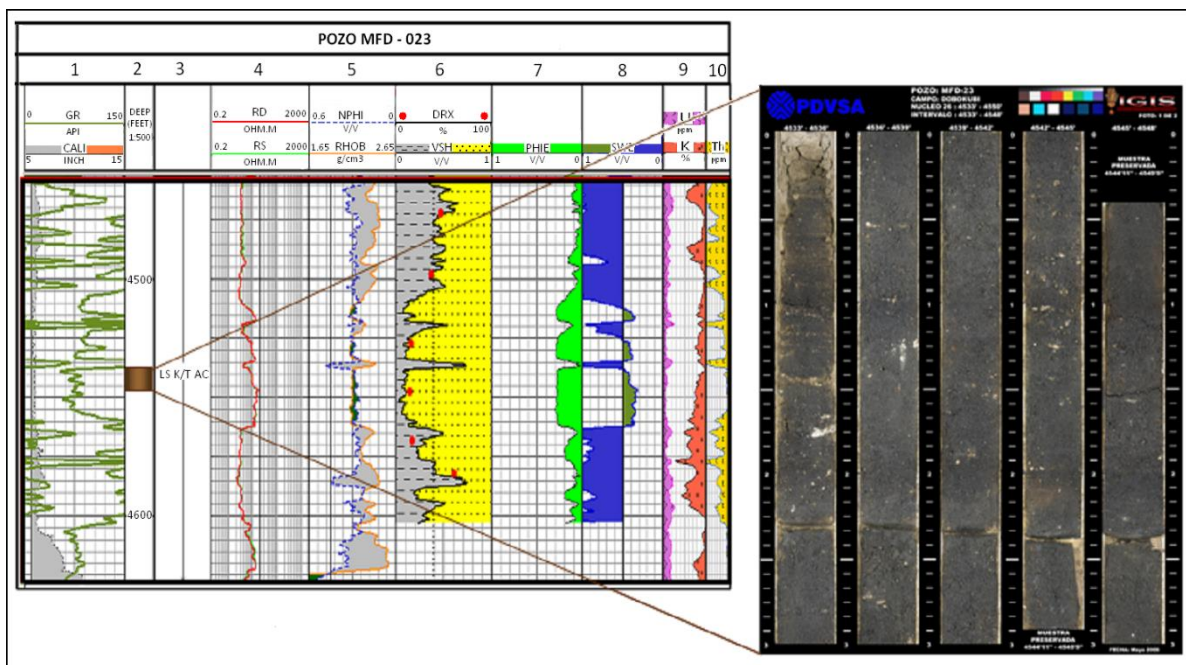


Figura 7. Evaluación petrofísica del pozo piloto MFD-023 en la sección Cretácica, donde se destaca la impregnación de crudo en el núcleo en las arenas de esta unidad estratigráfica a la derecha. Identificación de las pistas =(1) GR: Rayos gamma, CALI: Caliper; (4) RD: Resistividad profunda, RS: Resistividad somera; (5) NPHI: Registro de neutrones, RHOB: Registro de densidad, (6) DRX: Difracción de rayos X, VSH: Volumen de arcilla; (7) PHIE: Porosidad efectiva; (8) SWE: Saturación de agua efectiva; (9) U: Uranio, K: Potasio; (10) Th: Torio

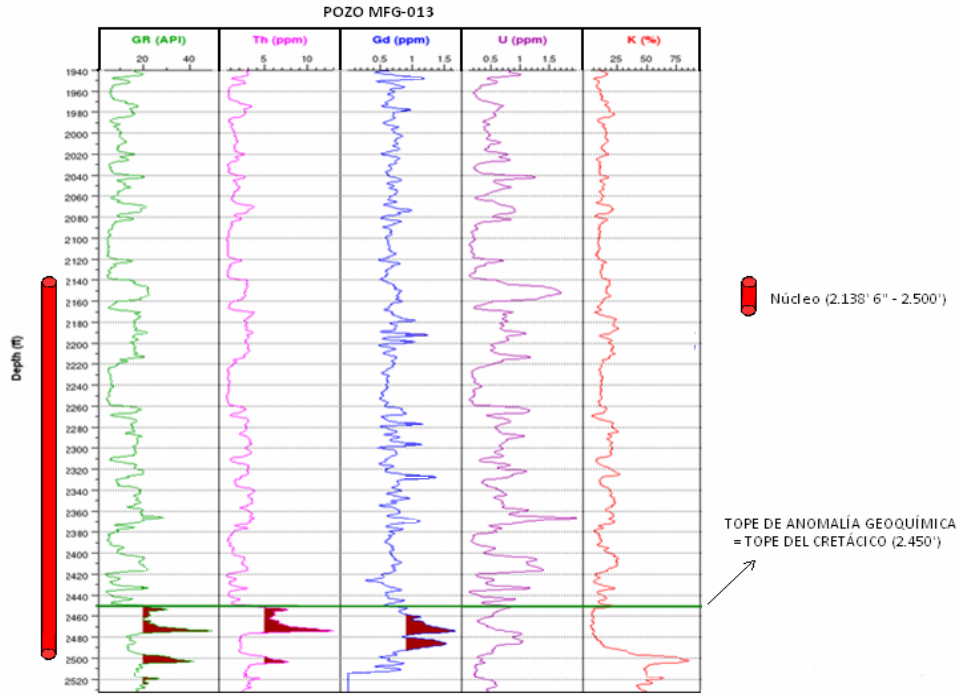


Figura 8. Pozo MFG-013 del Bloque Ayacucho que refleja la anomalía geoquímica del Th y Gd coincidente con el tope del Cretácico a 2.450'

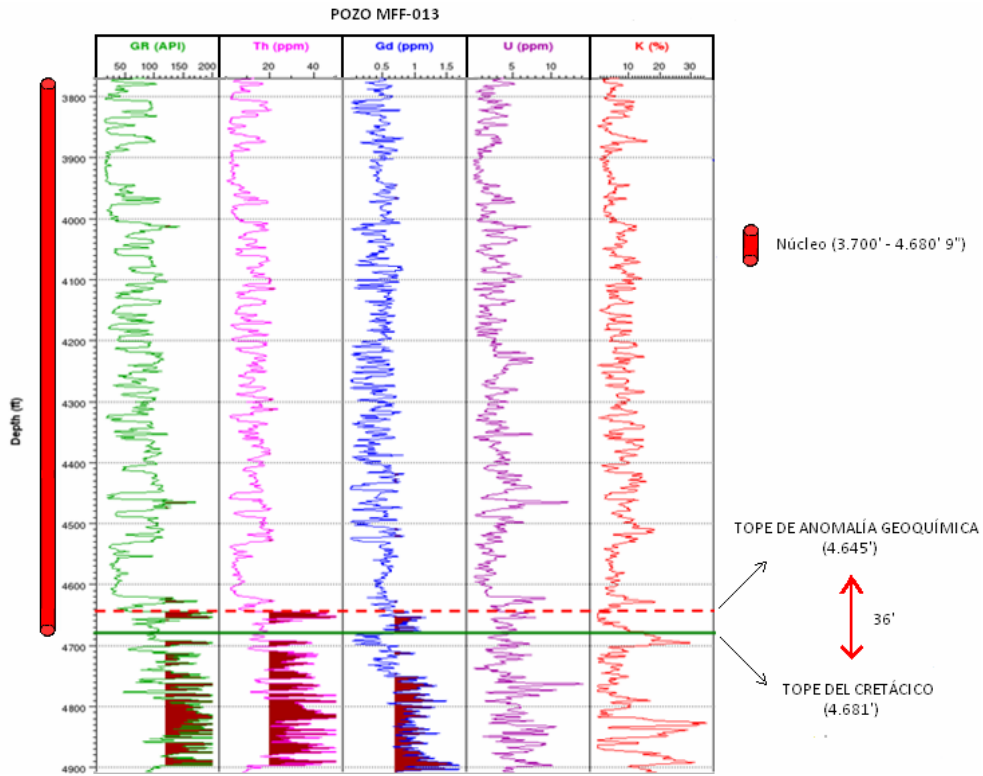


Figura 9. Pozo MFF-013 del Bloque Ayacucho mostrando la anomalía geoquímica Th/Gd (4.645') a 36' por arriba del tope del Cretácico a 4.681'

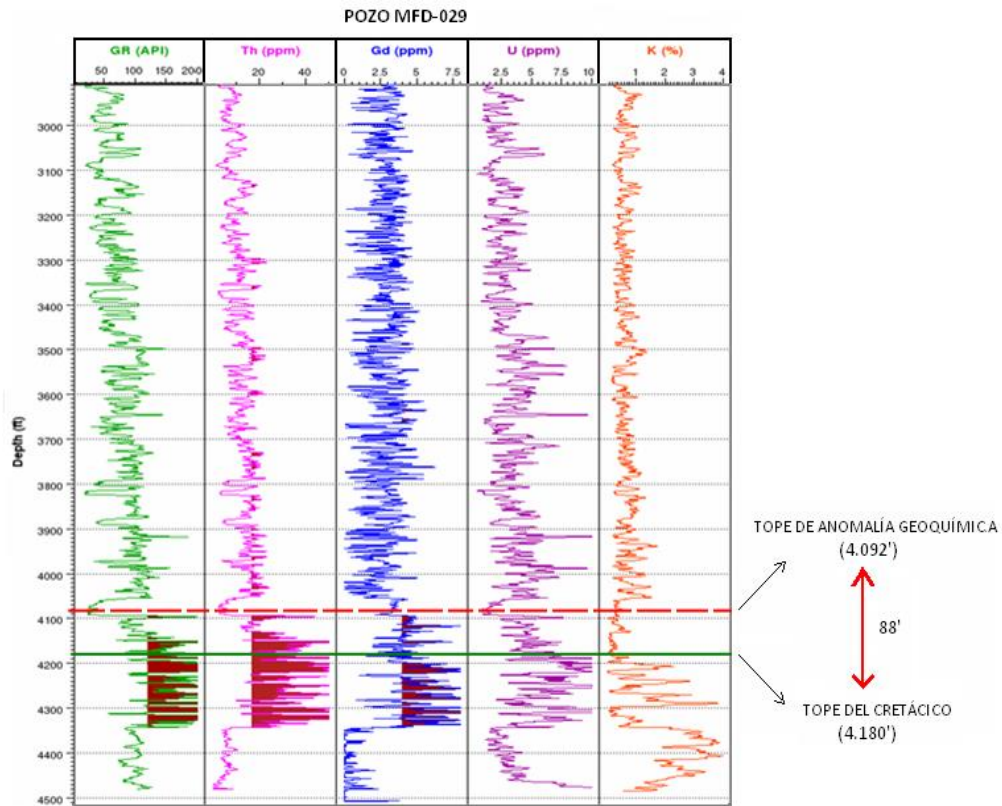


Figura 10. Pozo MFD-029 del Bloque Ayacucho mostrando la anomalía geoquímica Th/Gd (4.092') a 88' por arriba del tope del Cretácico a 4.180'

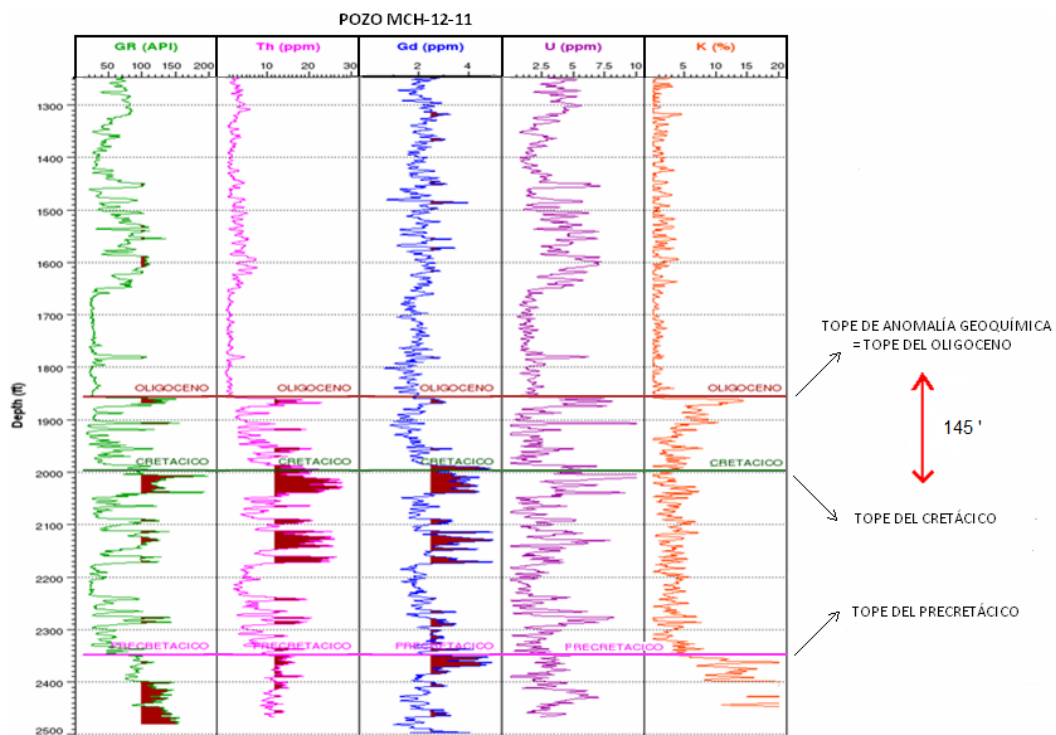


Figura 11. Pozo MCH-12-11 del Bloque Boyacá en la zona occidental de la FPO mostrando la anomalía geoquímica Th/Gd coincidente con el tope del Oligoceno a 145' por arriba del Cretácico

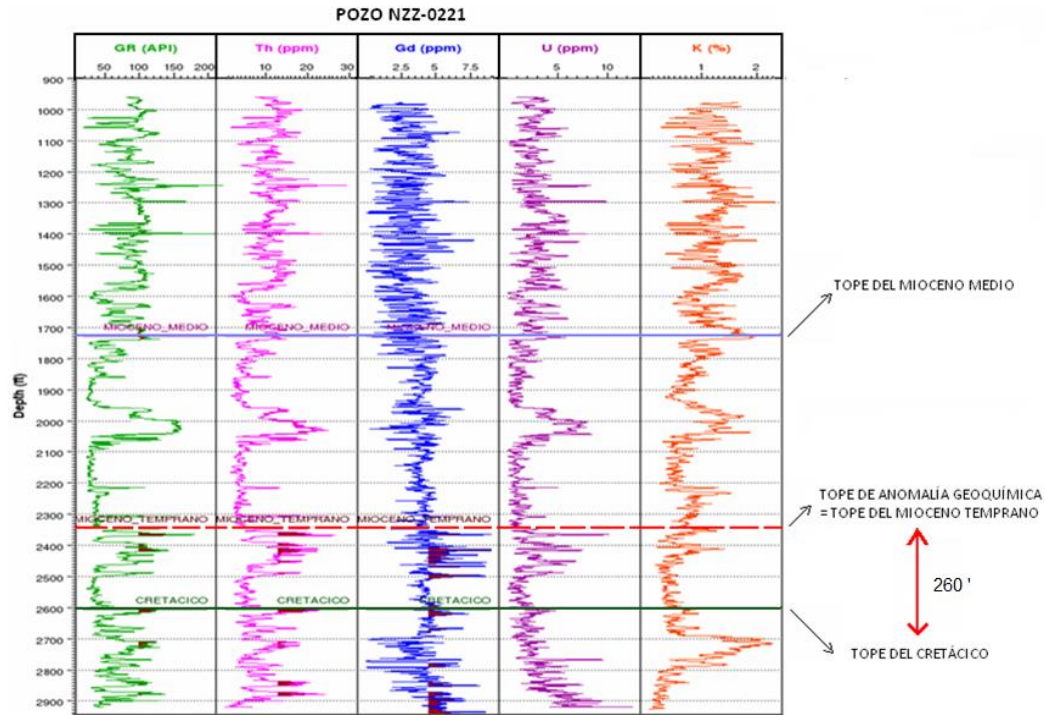


Figura 12. Pozo NZZ-0221 del Bloque Junín reflejando la anomalía geoquímica Th/Gd coincidente con el tope del Mioceno Temprano a 260' por arriba del Cretácico

De acuerdo a estos hallazgos, al colocar en contexto estratigráfico la anomalía radioactiva del Th/Gd, esta es diacrónica en tiempo geológico y la misma no sólo se circunscribe al período Cretácico, como ocurre en algunos de los pozos estudiados, sino que incluso en ciertos casos abarca un período de tiempo de más de 100 Ma, por lo que es importante enfatizar que donde se detecta el aumento de este par de elementos químicos (Th/Gd), el mismo no es correspondiente con un marcador cronoestratigráfico donde se puede fijar exclusivamente el tope del Cretácico, una vez que se identifica esta anomalía mediante las herramientas de perfilaje, sino que es necesario tener en cuenta la bioestratigrafía de las secuencias sedimentarias analizadas en cada uno de los pozos objeto de estudio.

La anomalía radioactiva del Th que afecta los registros de rayos gamma totales y espectrales es generada por el mineral pesado monacita, fosfato de tierras raras altamente radiactivo (rico en Th) y adicionalmente también contiene elementos tierras raras (REE) tales como: Ce, La, Pr, Nd, Sm y Gd. El elemento gadolinio (Gd), el cual es reportado por primera vez por este estudio, es detectado por las herramientas espectroscópicas de perfilaje geoquímico y se ajusta con el torio (Th), debido a que estos dos componentes químicos coexisten dentro de la estructura química de este mineral pesado. Con ínfimas cantidades en el contenido de monacita (0,09% - 0,1% en p/p) se pueden tener anomalías radiométricas de magnitud considerable en un registro de rayos gamma natural, ya que el torio es un elemento químico altamente radiactivo y además es proporcionalmente elevado

en este mineral pesado. En varias partes del mundo existen arenas ricas en monacita, de las cuales se extrae Th y tierras raras (TR) (Philander & Rozendaal, 2011). En el Campo Dobokubi, en el pozo MFD-023 se ha determinado monacita en muestras del núcleo analizadas (Duhamel, 2016). En los estudios efectuados en los laboratorios de INTEVEP, S.A a muestras del pozo MEL-376 por las técnicas de DRX y MEB-EDX, también se corroboró la existencia de este mineral pesado (Figura 13).

La monacita está contenida tanto en las arenas como en las arcillas estudiadas en los intervalos estratigráficos de interés, coexistiendo con la caolinita que es un mineral del grupo de las arcillas preponderante en los sedimentos de la Faja Petrolífera del Orinoco (Figura 14). La coexistencia de estas dos fases minerales (monacita – caolinita) es posible y ha sido también documentada en yacimientos petrolíferos radiactivos del Mar del Norte (Hurst & Milodowski, 1996). El enriquecimiento en torio de las caolinitas es muy característico en virtud de que es un elemento inmóvil muy estable que no sufre alteración desde su roca parental tales como los granitos alcalinos y las carbonatitas, hasta su permanencia por ejemplo en un caolín puro (Figura 15), que es el estado final de una roca arcillosa constituida casi exclusivamente por mineral de arcilla tipo caolinita y que ha sido identificada en la gran mayoría de las facies arcillosas descritas en pozos de la FPO (Figura 16) y también en análisis de arcillas en sedimentos del río Orinoco (Eisma *et al.*, 1978). En el pozo MFD-029 se destaca esta coexistencia

mineralógica y una alta radioactividad a nivel del Cretácico (Figura 17).

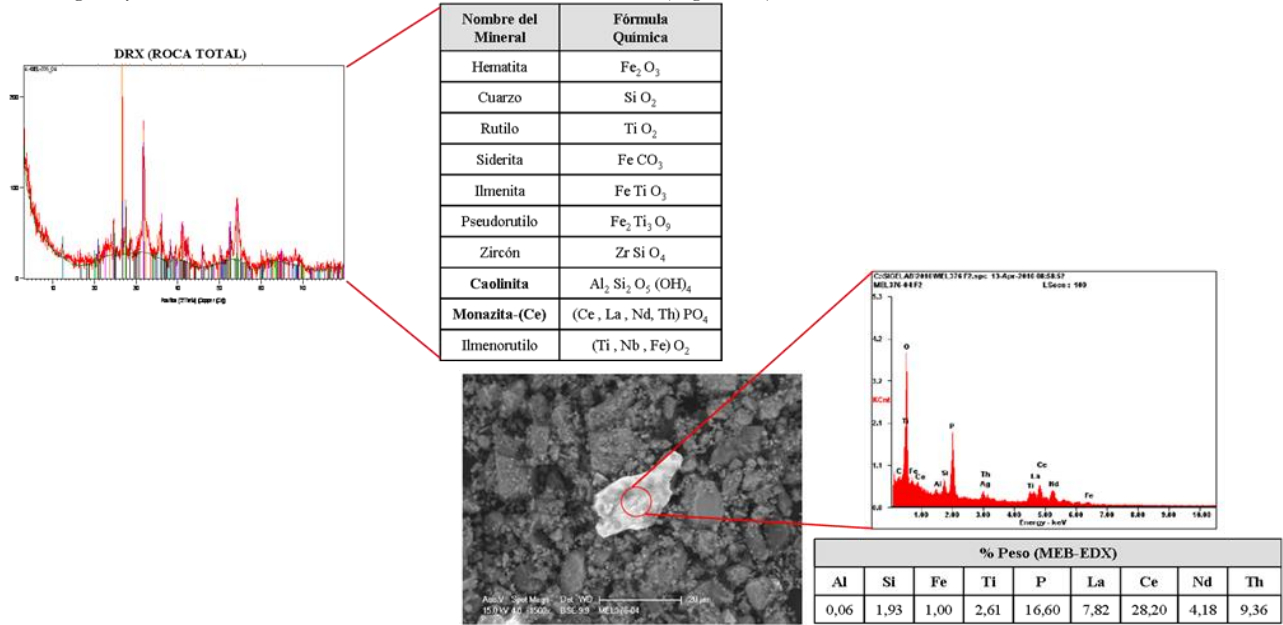


Figura 13. Análisis por DRX en roca total a muestra del pozo MEL-376 determinándose la presencia de monacita en coexistencia con otras fases mineralógicas como la caolinita (mineral de arcilla). Análisis químico detallado por MEB-EDX en la misma muestra a una monacita donde se observa el porcentaje en peso de los principales elementos químicos constituyentes entre los que destaca el torio (Th)

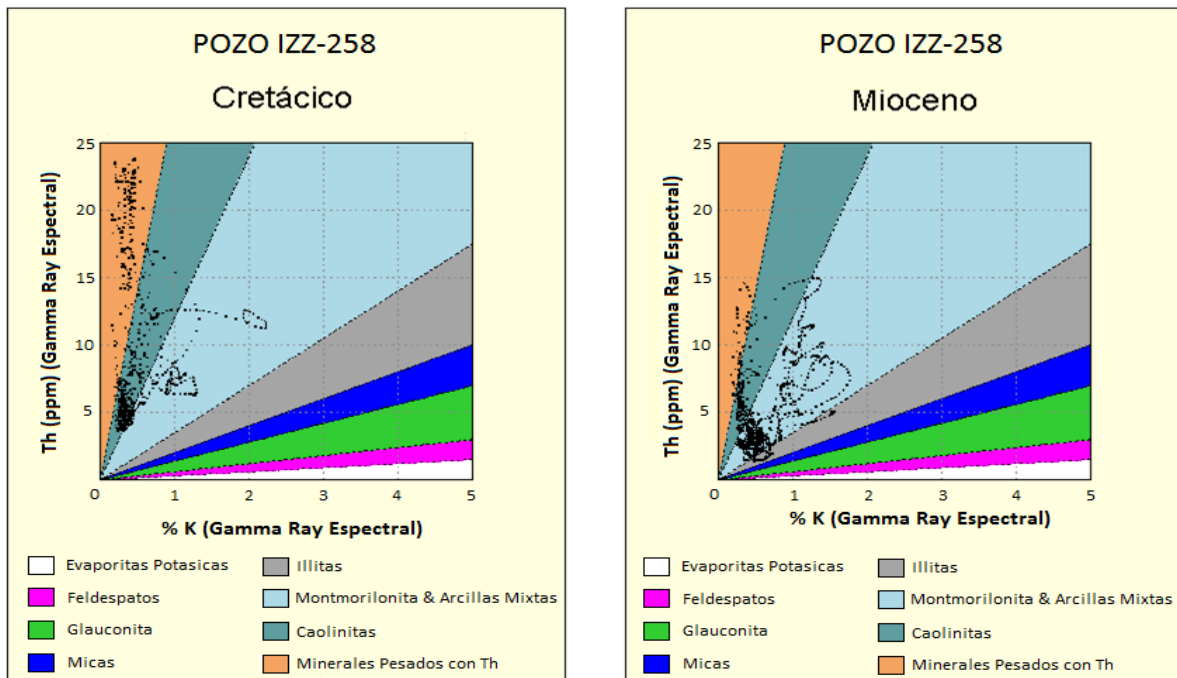


Figura 14. Identificación de minerales de arcilla y minerales pesados a través del gráfico de relación Th (ppm) y K (%) de la Schlumberger (1984), donde se comparan los sedimentos del Cretácico versus los sedimentos del Mioceno en el Pozo IZZ – 258 (Bloque Junín). En el gráfico se destaca la preponderancia de minerales pesados con torio (Th) para el Cretácico (monacita), coexistiendo con el mineral de arcilla caolinita fundamentalmente. En el Mioceno disminuye el contenido de minerales pesados y aumenta la proporción de minerales de arcillas

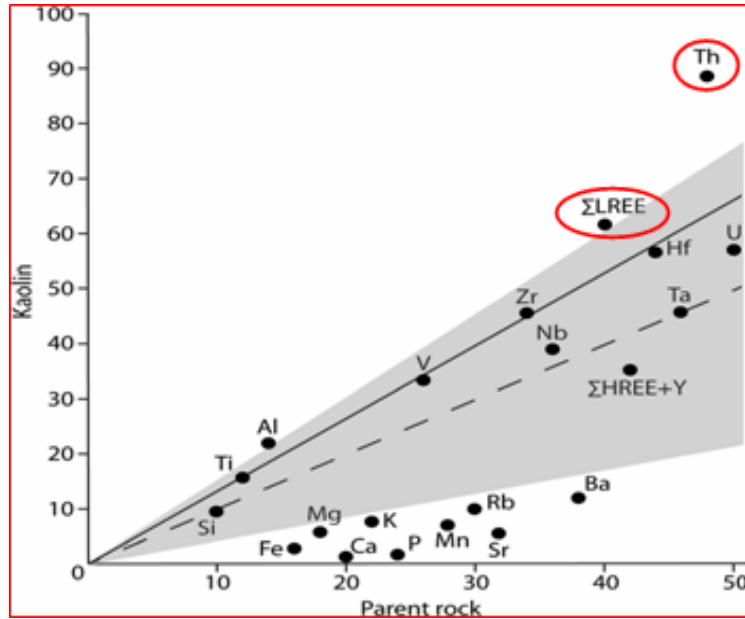


Figura 15. Estabilidad química de los elementos tierras raras ligeras (LREE), el Gd forma parte de este grupo, y del torio (Th) en un caolín generado de un granito (roca parental). A partir de la parte superior de la línea continua negra los elementos químicos son considerados más estables o menos móviles en el caolín (en círculos rojos). Tomado de Höhn et al. (2014)

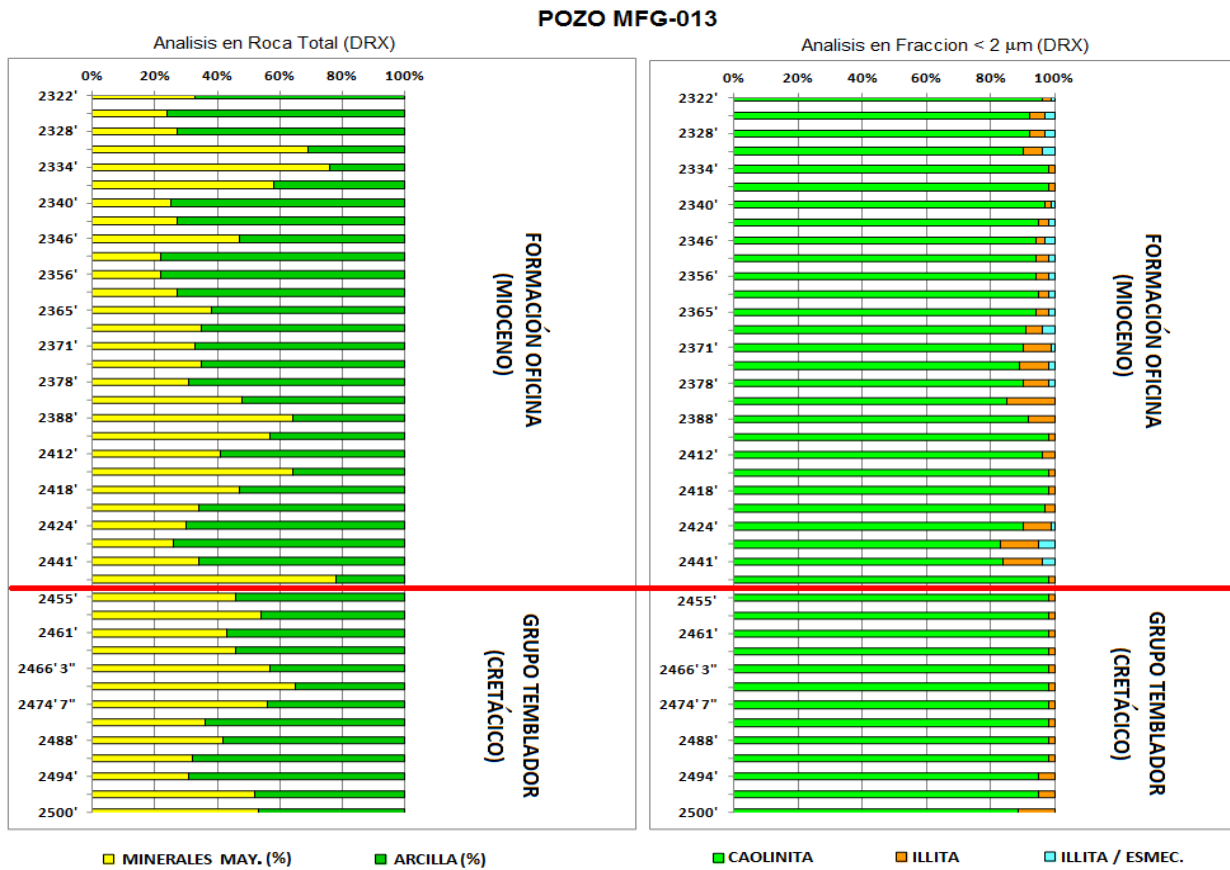


Figura 16. Análisis comparativo de las fases minerales tanto en roca total como en la fracción <2μm (DRX) para el Grupo Temblador y la Formación Oficina en la parte basal del pozo MFG-013 (Bloque Ayacucho), destacándose el alto contenido de arcilla en ambas unidades estratigráficas y la alta proporción de caolinita en más de un 90%

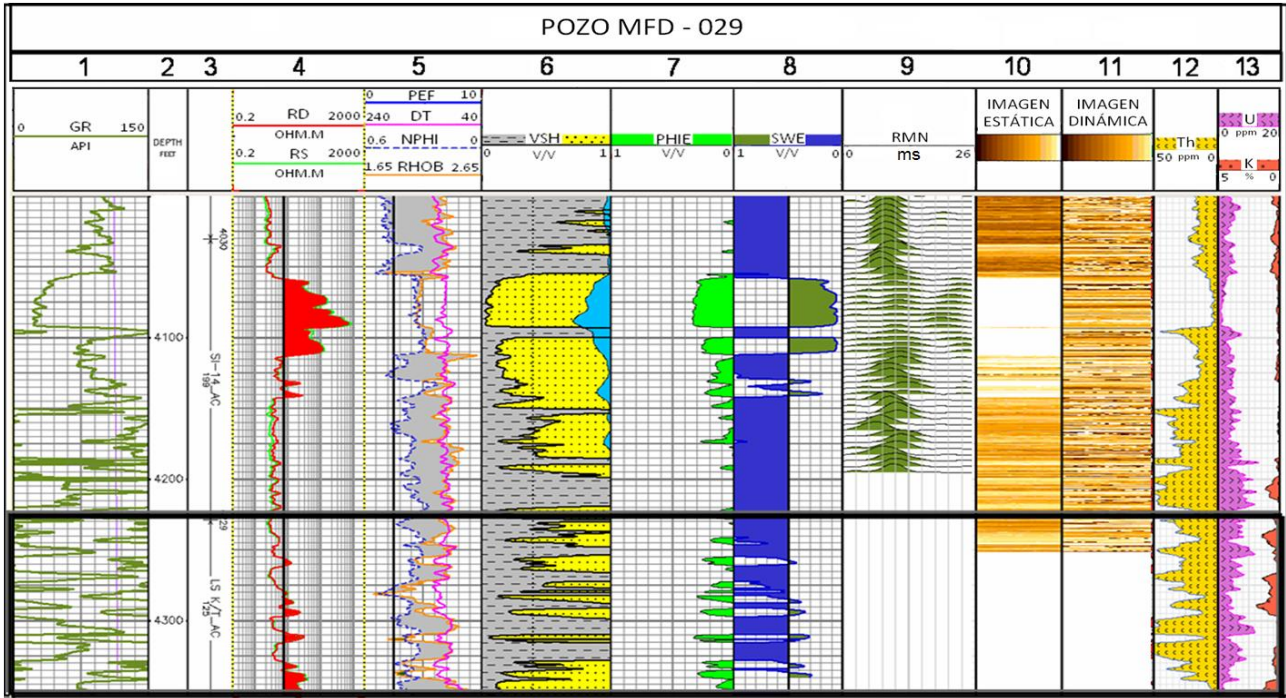


Figura 17. Evaluación petrofísica del pozo MFD-029 del Bloque Ayacucho señalando en el rectángulo en color negro la secuencia Cretácica caracterizada por facies arenosas (con presencia de hidrocarburo) y facies arcillosas definidas ambas por una alta radioactividad, donde coexisten la monacita y la caolinita en ambos tipos de facies. Identificación de las pistas del gráfico = (1) GR: Rayos gamma; (4) RD: Resistividad profunda, RS: Resistividad somera; (5) PEF: Factor fotoeléctrico, DT: Registro sónico, NPHI: Registro de neutrones, RHOB: Registro de densidad, (6) VSH (GR): Volumen de arcilla; (7) PHIE: Porosidad efectiva; (8) SWE: Saturación de agua efectiva; (9) RMN: Resonancia magnética nuclear; (10, 11): Registros de imágenes; (12) Th: Torio; (13) U: Uranio, K: Potasio

Es importante acotar que el torio no es un elemento sustitutivo de algún catión dentro de la estructura química de la caolinita, sino que este forma parte de la composición química de las monacitas. En ocasiones este mineral pesado llega a presentar un tamaño de grano tan pequeño como el tipo arcilla (< 2 µm), lo que permite su coexistencia con la caolinita (Hurst & Milodowski, 1996).

Diversos afluentes fluviales en sentido casi norte-sur han aportado sedimentos a la Cuenca Oriental desde el Cratón de Guayana, el cual está constituido por diversas provincias geológicas precámbricas, destacándose entre estas las Provincias de Cuchivero e Imataca, las cuales abarcan una gran extensión de terreno aflorante hacia el sur del río Orinoco (Figura 18). Por el lado suroccidental de la FPO, se tiene a la Provincia de Cuchivero, contentiva de rocas félsicas, graníticas y volcánicas que pueden contener monacita, en particular rocas de tipo Parguazensis y también carbonatitas ricas en Th (como cerro Impacto) y quizás las de la Asociación Cuchivero, ambas generadas por la acción de sendas plumas mantelares, hace 1,54 Ga y 1,98 Ga respectivamente (Grande, 2023). En el lado suroriental de la FPO, se tiene el Complejo de Imataca, el cual es intrusionado a su vez por varios cuerpos ígneos como el Granito de la Encrucijada, el de los Castillos de Guayana y el Granito de El Palmar, el más grande de todos, generados por una plumar

mantelar de edad Cuchivero, entre 2,0 - 1,8 Ga (Grande, 2023), sirviendo estas unidades intrusivas tentativamente como otras fuentes del mineral monacita en la zona oriental de la FPO.

Durante el Cretácico y el Mioceno, los relieves expuestos de estos plutones graníticos intrusivos era mucho más extensa que en la actualidad, de modo que pudieron aportar más de este mineral a la cuenca desde las fuentes graníticas erosionadas hacia las zonas de bajos relieves del Cratón, junto a arenas químicamente maduras. El límite K/Pg en el Escudo de Guayana dejó una vasta superficie de erosión, que ahora se sitúa a 600-700 m s.n.d.m., denominada Superficie de Erosión Nuria-Cerro Bolívar-Pijiguaos. Ese es justo el tiempo cuando la monacita comenzó a ser transportada a la cuenca. El mineral se concentró preferentemente en los depósitos tipo placeres desarrollados por los sistemas de canales fluviales en los meandros (*point bar*) a nivel superficial y luego soterrados en el subsuelo. Estos ambientes y depósitos de sedimentación continental han sido reportados en núcleos de edad Cretácica en la FPO por Rangel *et al.* (2013) (Figura 19). En el Complejo de Imataca se han ubicado la mayoría de los sitios anómalos reportados por levantamientos radiométricos aéreos y por estudios previos, presentando un valor de fondo regional que supera en tres veces o más al del resto de las provincias geológicas contiguas (Audemard, 1977), esto en

parte debido a los cuerpos graníticos que intrusionan esta unidad.

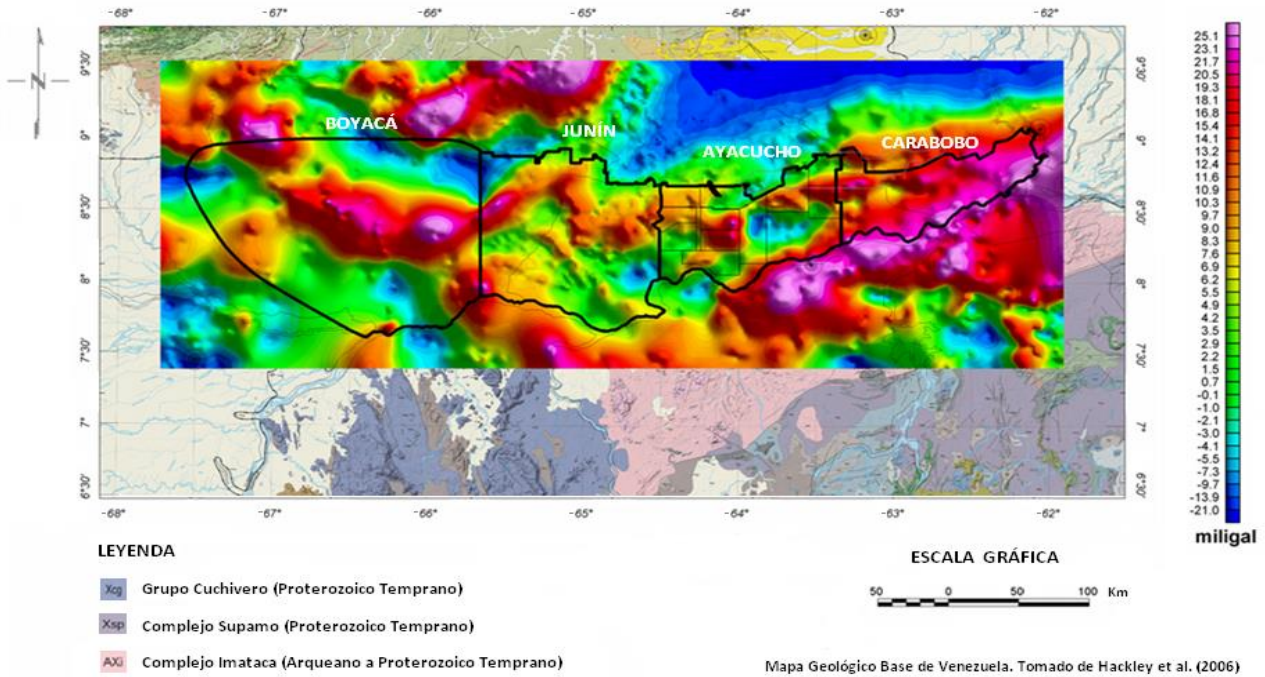


Figura 18. Mapa gravimétrico de anomalía de Bouguer donde se destacan las Provincias geológicas de Cuchivero e Imataca al sur del río Orinoco junto a los altos y bajos estructurales del basamento de la FPO. Tomado de Araujo (2016)

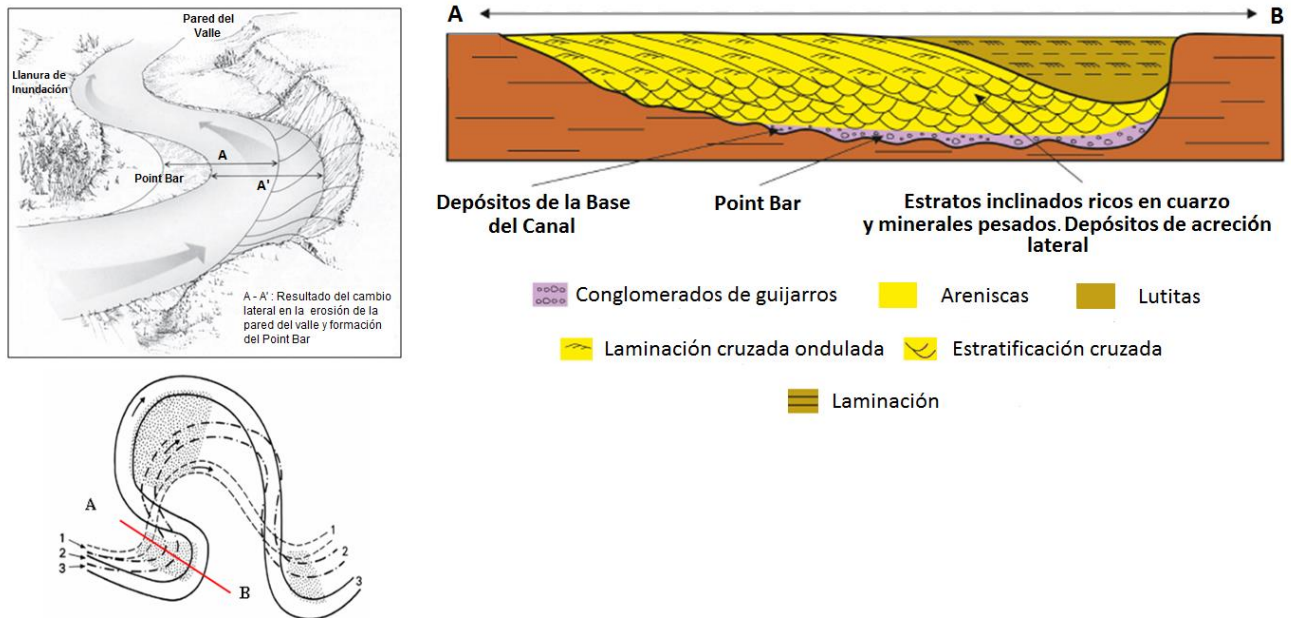


Figura 19. Modelo sedimentológico conceptual de yacimientos tipo placer, favorables a la acumulación de minerales pesados tales como la monacita en las zonas de los point bar. En la imagen izquierda se aprecia la evolución de este tipo de depósitos sedimentarios y en la imagen derecha se expone un corte geológico donde se muestran las distintas facies y estructuras sedimentarias asociadas. Modificado de Simon & Gibling (2017) y Rhoads (2020)

Si se analiza el mapa del porcentaje de arena neta de la Formación Oficina realizado por Funes (1985), en el área del Bloque Ayacucho con el paleodrenaje trazado en este estudio derivado del mapa isópaco de entonces, se tiene una clara distribución de la sedimentación desde el Cratón de Guayana

hacia el norte (Figura 20), aportando una idea clara de cómo ha sido esta dinámica sedimentaria al menos hasta el Mioceno Temprano en cuanto a las tendencias de sedimentación desde esa región sur hacia la FPO. En el Cretácico la sedimentación identificada en los núcleos analizados es preponderantemente

continental con depósitos de canales fluviales y estos drenajes sólo se han desplazado de forma lateral y frontal en virtud de la evolución de estos cauces a través del tiempo geológico, hasta que la configuración que fue tomando el actual río Orinoco cortó la sedimentación proveniente de todos estos afluentes de sentido norte-sur que drenaban hacia esta zona de la Cuenca Oriental de Venezuela (Figura 21).

Estudios ya efectuados en los años '70, indicaban que una franja de rocas sedimentarias que descansaban sobre rocas precámbricas del Escudo de Guayana, debido a su carácter depositacional, litológico y estructural resultaban de interés para la exploración de minerales radiactivos. Esa área preferencial de acumulación al norte del río Orinoco en base a estos estudios preliminares aeroradiométricos, señalaban que la Formación Oficina ofrecía las mejores perspectivas para las localizaciones de estas mineralizaciones radiactivas, de tal forma que hacia el sur donde se acuña esta unidad estratigráfica contra el Escudo de Guayana se hace más continental, debido al mayor aporte de material cratónico, indicando condiciones ideales para la formación de depósitos de tipo sedimentarios y de oxidación-reducción (Audemard, 1977; Pasquali, 1977). Los análisis e interpretaciones derivadas de este estudio, han determinado que sólo la parte basal (Mioceno Temprano) de la Formación Oficina es la única capaz de alojar a estos minerales radiactivos indicados por investigaciones previas. El Grupo Templador, constituido por las formaciones Tigre y Canoa, es la otra unidad estratigráfica (Cretácico) con capacidad de contener a estos minerales radiactivos (monacita), dada las características sedimentarias y el tipo de depósitos desarrollados (ambientes fluviales).

Otras investigaciones en prospección geoquímica de minerales pesados en yacimientos tipo placeres, realizados en la parte sur del río Orinoco, específicamente en la cuenca hidrográfica del río Arizo afluente del río Aro, referidos a la caracterización de las concentraciones de uranio (U), torio (Th) y tierras raras (REE), determinan que las concentraciones encontradas en los minerales pesados para dichos elementos químicos son los suficientemente altas y son derivados de litologías de fuente félsicas que podría contener mineralizaciones importantes de estos elementos (Hernández, 2013). La asociación mineralógica contenida en los minerales pesados de los sedimentos estudiados por Hernández (2013) está dominada por ilmenita, monacita, circón, magnetita, cuarzo y hematita. La presencia de monacita es indicativa de que este mineral es el que aporta las altas concentraciones de los REE presentes en los minerales pesados para el área señalada.

Gamero *et al.* (2014) efectuaron caracterizaciones geoquímicas de minerales pesados en muestras de diversas cuencas hidrográficas de la zona noroccidental del estado Bolívar definiendo varias zonas anómalas, entre las que se destaca el Th, relacionadas al mineral pesado monacita en las cabeceras del río Caura, en rangos de concentración que van

desde 1.803 ppm hasta 17.086 ppm. Otras investigaciones de importancia en zonas cercanas a este estudio, que involucran muestras de materia orgánica sedimentaria correspondiente a diferentes cuerpos de agua que drenan hacia el río Orinoco entre los que se destacan los ríos Aro, Caura y Cuchivero, muestran que los mismos tienen elevadas concentraciones en tierras raras (REE) dentro de esta materia orgánica si se compara a otros análogos mundiales (Freslon *et al.*, 2014) (Figura 22). Esto es indicativo sin lugar a dudas que existen rocas de fuentes félsicas en el área del Escudo de Guayana que están aportando altos valores en REE, que a su vez son absorbidas por la materia orgánica que es transportada por estos afluentes.

De igual forma, Osborne *et al.* (2015) realizaron un estudio de distribución de elementos tierras raras (REE) en aguas marinas de diversas zonas del Caribe, destacándose que en tres estaciones (3) establecidas en la desembocadura del río Orinoco (246-1, 247-1 y 249-1) a diversas profundidades sobre el nivel del mar, los valores medidos en el contenido de tierras raras son mucho mayores a la profundidad de cero (0) metros que cualquiera de las otras estaciones medidas en toda la zona del Caribe, lo cual refleja que estas aguas superficiales someras transportadas por el río Orinoco hasta su desembocadura, están afectadas y enriquecidas en los actuales momentos por los elementos químicos de estos minerales pesados que al interactuar le imprimen una huella geoquímica diagnóstica anómala y distintiva del resto de las aguas marinas. Todas estas evidencias llevan a plantear, que existe un contexto geológico favorable que condiciona el enriquecimiento de torio (Th) y de tierras raras (REE), entre los que destaca el gadolinio (Gd), en la región norte del Escudo de Guayana inducido primordialmente por la monacita, que está generando dichas anomalías tanto en los sedimentos de los yacimientos presentes en el subsuelo de la FPO, así como también afecta a las aguas superficiales y a la materia orgánica en estas áreas.

Otro estudio de relevancia en el área, que confirma las evidencias que se han planteando con antelación, en cuanto a la presencia de la monacita en las arenas radiactivas del subsuelo de la Faja Petrolífera del Orinoco, corresponde con el trabajo efectuado por Duhamel (2016), quien en un análisis de minerales pesados realizado a tres (3) muestras de arenas del núcleo MFD-023 del Campo Dobokubi, dentro de la zona del Bloque Ayacucho, logró identificar este mineral en diversos intervalos de profundidad (4.519', 4.522' y 4.540'), en base a análisis realizados por técnicas de separación de minerales pesados, Difracción de rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) en la Universidad Central de Venezuela, Universidad Simón Bolívar e INTEVEP. Los resultados arrojados en ese estudio permiten establecer una correlación directa entre el contenido de la monacita y el nivel de radioactividad reportado por las herramientas de rayos gamma totales en las diversas profundidades analizadas.

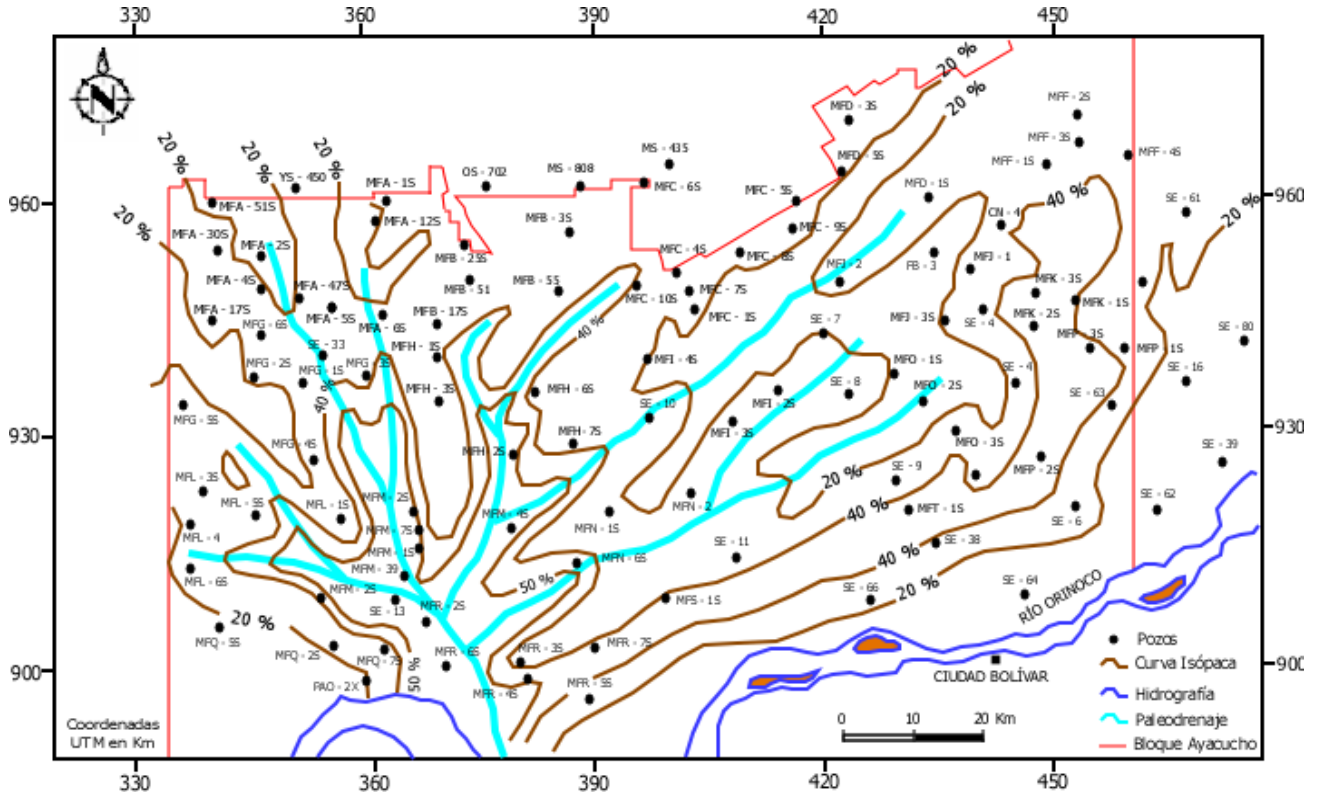


Figura 20. Mapa del porcentaje (%) de arena neta de la Formación Oficina en el Bloque Ayacucho de la FPO, mostrando el paleodrenaje existente (en color azul claro) en claro sentido de sedimentación sur-norte desde el Cratón hacia la Cuenca Oriental de Venezuela. Modificado de Funes (1985)

Un trabajo clave y pionero que corrobora el planteamiento referido al contenido de monacita en las arenas del Cretácico en el subsuelo de la Faja Petrolífera del Orinoco es el estudio de minerales pesados llevado a cabo por Feo (1949) para la Mene Grande Oil Company, S.A en todos los pozos perforados del Campo Temblador, ubicado al Noroeste de la FPO, al norte específicamente del Bloque Carabobo, donde

se demuestra muy claramente el contenido preponderante de este mineral para la Formación Temblador (como era denominado en ese entonces el Grupo Temblador), a través de una carta resumen de minerales pesados generada para una serie de unidades estratigráficas presentes en el subsuelo de este campo del oriente del país (Figura 23).

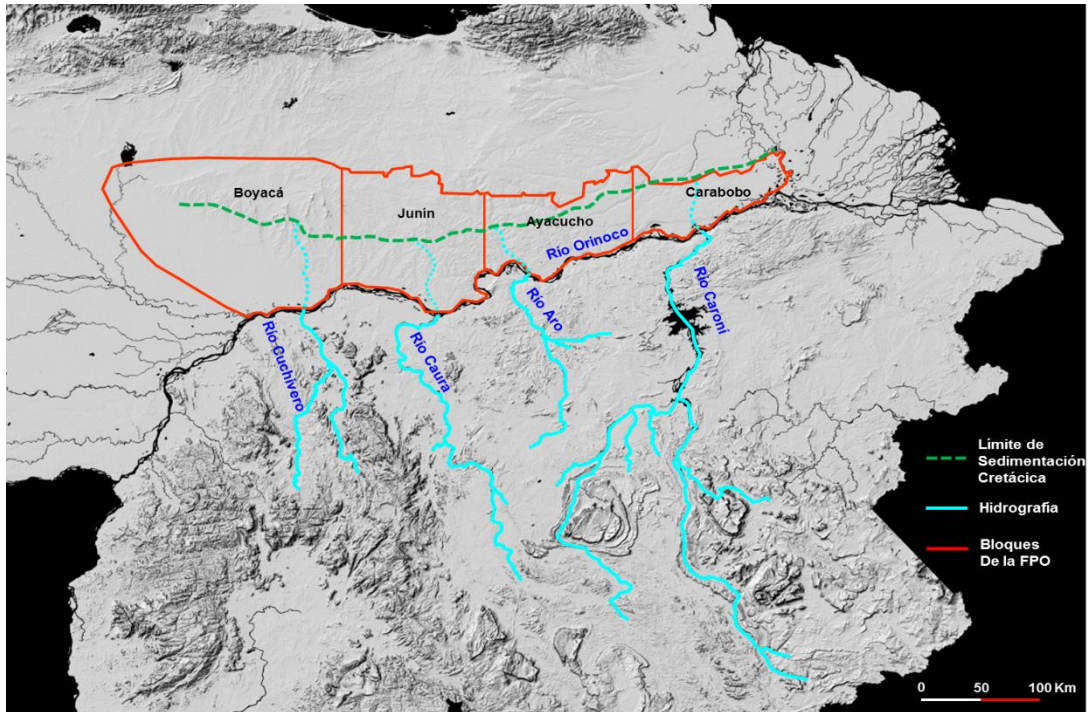


Figura 21. Mapa donde se aprecian los diversos afluentes fluviales actuales drenando sobre el Escudo de Guayana. La línea segmentada en color verde indica el límite de sedimentación Cretácica en donde se acuña esta secuencia contra el basamento de la FPO. Se muestra adicionalmente una proyección tentativa en color azul claro punteado de los paleodrenajes hacia el norte del río Orinoco en tiempo previo al Mioceno Temprano. Modificado de POMR (2012)

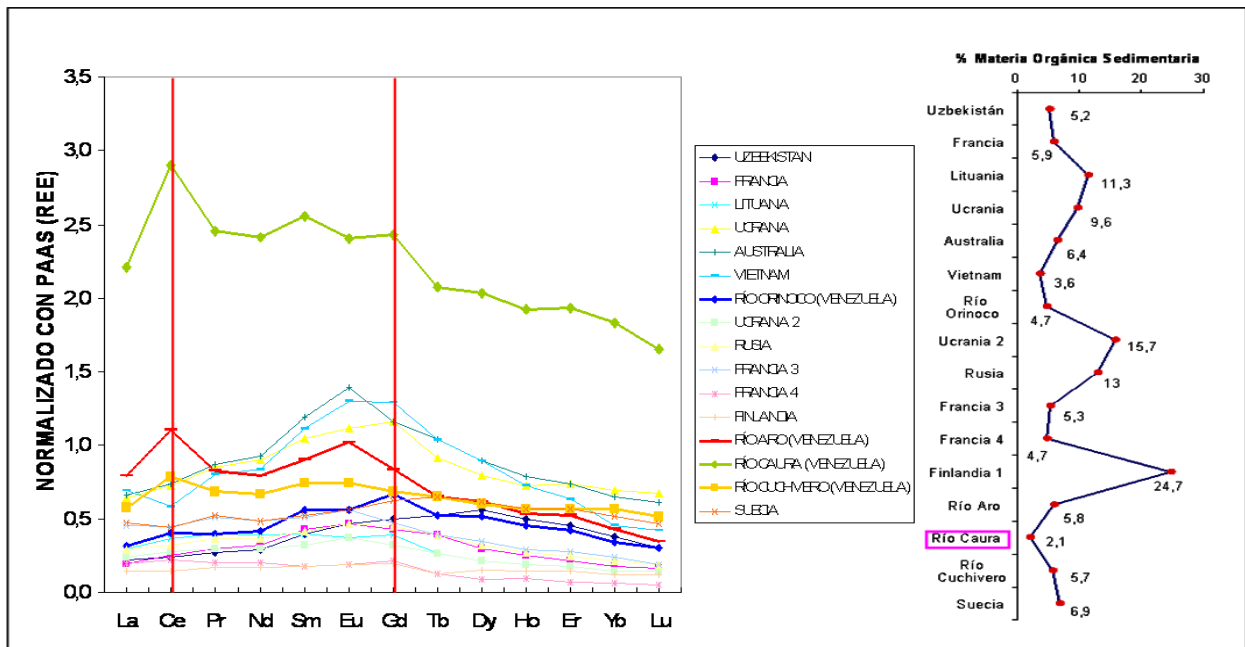


Figura 22. Concentración de tierra raras (REE) en materia orgánica sedimentaria (gráfico izquierdo), donde se destacan los valores anómalos por ejemplo del cerio (Ce) y Gadolinio (Gd) (líneas en rojo) para el río Caura en comparación a otros análogos mundiales. En el gráfico de la derecha se tiene el contenido de materia orgánica total contenido en cada uno de los ríos analizados, destacándose el río Caura en Venezuela por su bajo valor en materia orgánica y elevadas concentraciones en REE. Modificado de Freslon et al. (2014)

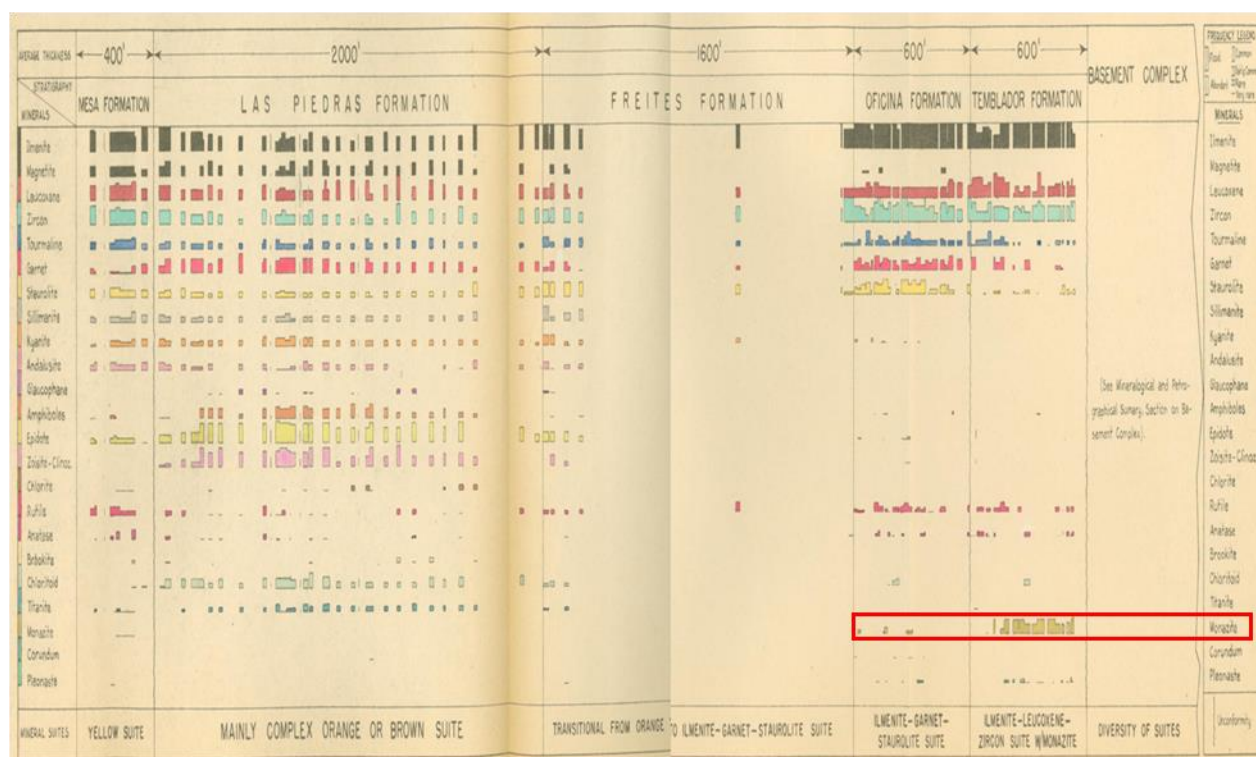


Figura 23. Carta que refleja el contenido de minerales pesados para todos los pozos del Campo Temblador, donde se indica en el rectángulo en color rojo el contenido abundante de monacita para la Formación Temblador (ahora Grupo Temblador del Cretácico) y que se denomina suite de ilmenita-leucoceno-zircón con monacita. La Formación Oficina presenta menor concentración de este mineral. Tomado de Feo (1949)

“Una versión de alta resolución de esta figura puede ser solicitada al autor”

En el estudio de Feo (1949), se aprecia claramente que la Formación Oficina, la cual es suprayacente al Grupo Temblador, muestra poco contenido del mineral de monacita en comparación a la unidad infrayacente Cretácica. En las unidades más jóvenes como las formaciones Freites, Las Piedras y Mesa no se presenta contenido alguno de este mineral radiactivo. Esta baja concentración de monacita en la Formación Oficina, justifica la radioactividad que aún prevalece en los sedimentos de edad Mioceno Temprano que se han observado en algunos de los pozos interpretados en esta investigación a lo largo de la Faja Petrolífera del Orinoco, lo que genera efectivamente el diacronismo que se ha indicado con la anomalía Th/Gd. El trabajo de Feo (1949) demuestra hasta donde al menos tuvo afectación el aporte de sedimentos contentivos de monacita, transportada por los diversos afluentes fluviales que drenaban desde el Cratón de Guayana en dirección norte-sur, durante y después del Cretácico, en virtud de que hoy en día este mineral está presente en el registro sedimentario del subsuelo no sólo del área tradicional de la FPO, sino también en el subsuelo de campos petroleros vecinos de vieja explotación, ubicados más hacia el norte de este gran reservorio de hidrocarburos, como son los casos de los campos Temblador y Jobo (Mendoza, 2018).

Es importante indicar que tener una anomalía radioactiva como la presente en las unidades de estudio Cretácicas no necesariamente requiere de altas concentraciones volumétricas de monacita. Con ínfimas cantidades de este

mineral pesado en el contenido en roca total, que puede estar en el orden de 0,09% y 0,1% (p/p), se pueden tener anomalías radiométricas de la magnitud observadas en los registros de rayos gamma totales o espectrales estudiados en los pozos de la FPO. Así como se ha indicado con antelación, el contenido de torio es proporcionalmente elevado dentro de la composición química de dicho mineral (>20% p/p). Esto se puede apreciar en estudios tales como los de Philander & Rozendaal (2011), sobre depósitos de arenas monacíticas y también lo corroboran en el área las concentraciones de monacita con un 0,06% en peso total para las muestras analizadas por Duhamel (2016) en el pozo MFD-023.

La meteorización de las rocas félsicas del Cratón por un período de tiempo superior a los 100 Ma ha generado los sedimentos contentivos del mineral radiactivo monacita, que ahora se observa en la parte basal de la FPO y que se encuentran en franca diacronía desde el Cretácico hasta el Mioceno Temprano en los bloques Boyacá, Junín y Ayacucho, y la cual puede ser apreciada claramente a través de una correlación cronoestratigráfica en sentido este-oeste, donde se destaca esta anomalía del Th/Gd (Figura 24).

A través de esta investigación y del análisis de los registros espectroscópicos y de las edades de las unidades estratigráficas estudiadas, se puede inferir que la configuración actual del río Orinoco se produjo a partir del Mioceno Temprano, en virtud de que después de este tiempo geológico en el subsuelo de la Faja Petrolífera del Orinoco no

existió más la acumulación de la monacita entre el grupo de minerales pesados existentes en las secuencias sedimentarias analizadas con edades más recientes. Sin embargo, este mineral aún se encuentra acumulado en los placeres de los cauces de los diferentes afluentes que drenan al norte del Cratón de Guayana, muy cercanos a sus desembocaduras con el río Orinoco, lo que permite inferir que el curso de este gran río cortó el mecanismo de transporte y sedimentación de todos los cauces que estaban transportando material sedimentario hacia la Cuenca Oriental de Venezuela desde el sur a partir de ese tiempo geológico y en los actuales momentos conforma una barrera natural del material terrígeno llevado por estos afluentes, drenándose parte de la sedimentación captada como carga de fondo y sedimentos en suspensión hacia la desembocadura en el Delta del Orinoco.

Al respecto de la actual configuración del río Orinoco, Méndez (2000) señala que es complejo relacionar el actual curso del Orinoco y el delta con sistemas precedentes los cuales desde el Terciario han sido considerados como proto-Orinoco. Sin embargo, se cree que con estas nuevas evidencias en el subsuelo de la FPO se puede establecer una relación clara de los procesos sedimentarios terciarios y el paleodrenaje de este río. Numerosos autores estiman que ya para el Mioceno el proto-Orinoco desarrolló un ambiente deltaico en la actual Cuenca Oriental y en las áreas adyacentes

a Trinidad (Young *et al.*, 1958; Renz, 1957; Renz *et al.*, 1958; Renz *et al.* 1963; Michelson, 1976, Stainforth, 1978). Díaz de Gamero (1996) postula un proto-Orinoco en la Cuenca de Falcón durante el Mioceno Temprano-Mioceno Medio y para el Mioceno Tardío lo ubica en la Cuenca de Maturín. No obstante, de acuerdo a las evidencias aportadas por este estudio, es precisamente en el Mioceno Temprano en un área de aproximadamente más de 500 km de extensión en sentido este-oeste cuando cesó la sedimentación que transportaba el mineral pesado monacita que provenía desde el Escudo de Guayana, descartándose por consiguiente un posicionamiento distante de este paleodrenaje en la Cuenca de Falcón para este tiempo geológico.

Potter (1998), por su parte postula tomando en cuenta el patrón de relaciones tectónicas y estructurales en América del Sur que el proto-Orinoco desde su curso medio siempre mantuvo una dirección hacia el este, hipótesis que también es considerada incorrecta, en virtud de que existió sedimentación hacia la zona sur de la Cuenca Oriental desde el Cratón por un período de tiempo de más de 100 Ma, lo cual es indicativo de que el proto-Orinoco no siempre estuvo drenando en dirección hacia el este como lo señala este autor, ya que esto hubiera impedido la acumulación del mineral pesado monacita desde el Cretácico junto al resto de los sedimentos derivados de las fuentes cratónicas.

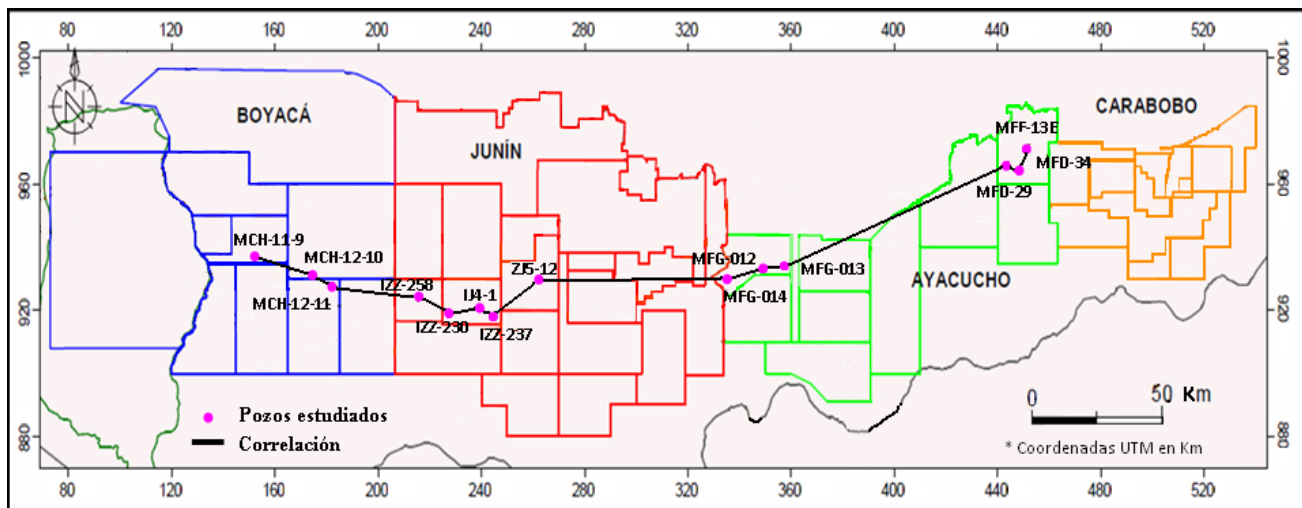


Figura 24. Mapa base de la FPO donde se presentan los pozos considerados en la correlación cronoestratigráfica del Cretácico y la anomalía Th/Gd en sentido E-O.

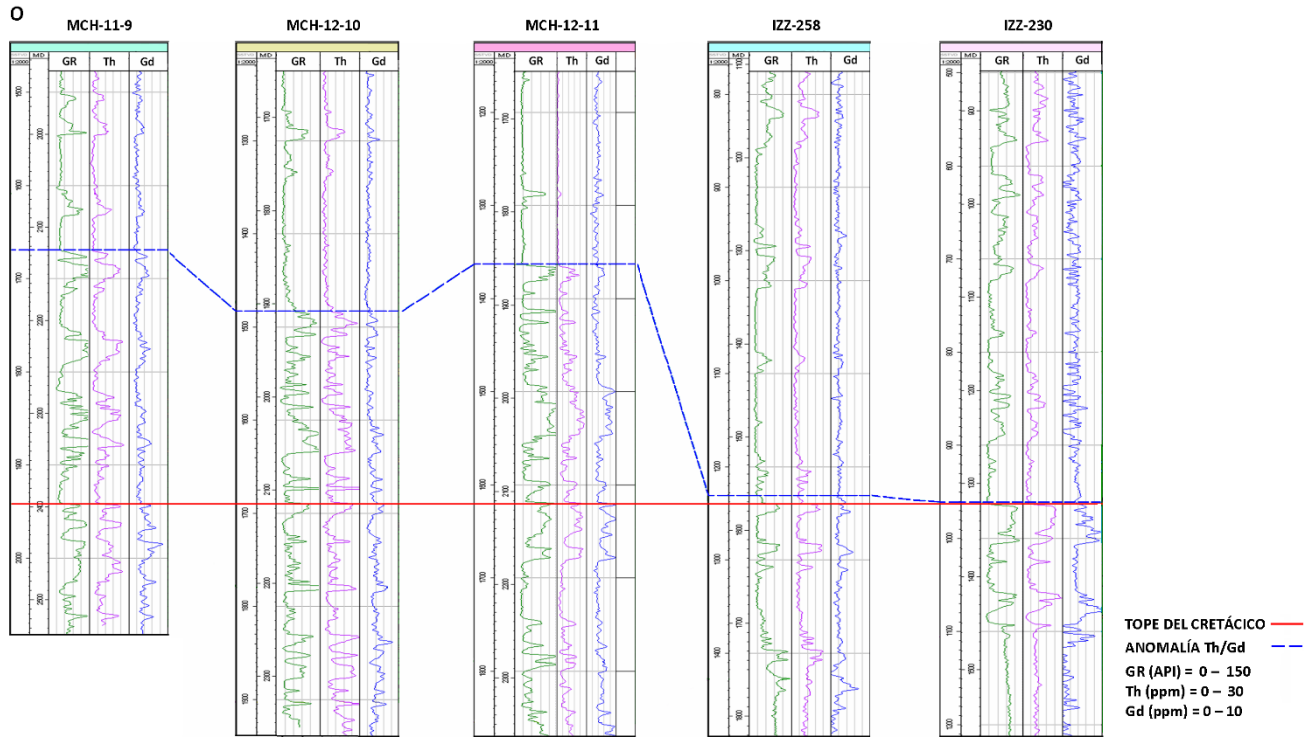


Figura 24a. Sección occidental de la correlación en la FPO (MCH-11-9, MCH-12-10, MCH-12-11, IZZ-258, IZZ-230), donde se presenta el tope del Cretácico en la línea de color rojo y la anomalía Th/Gd en la línea color azul segmentada. El datum de la correlación es el tope del Cretácico

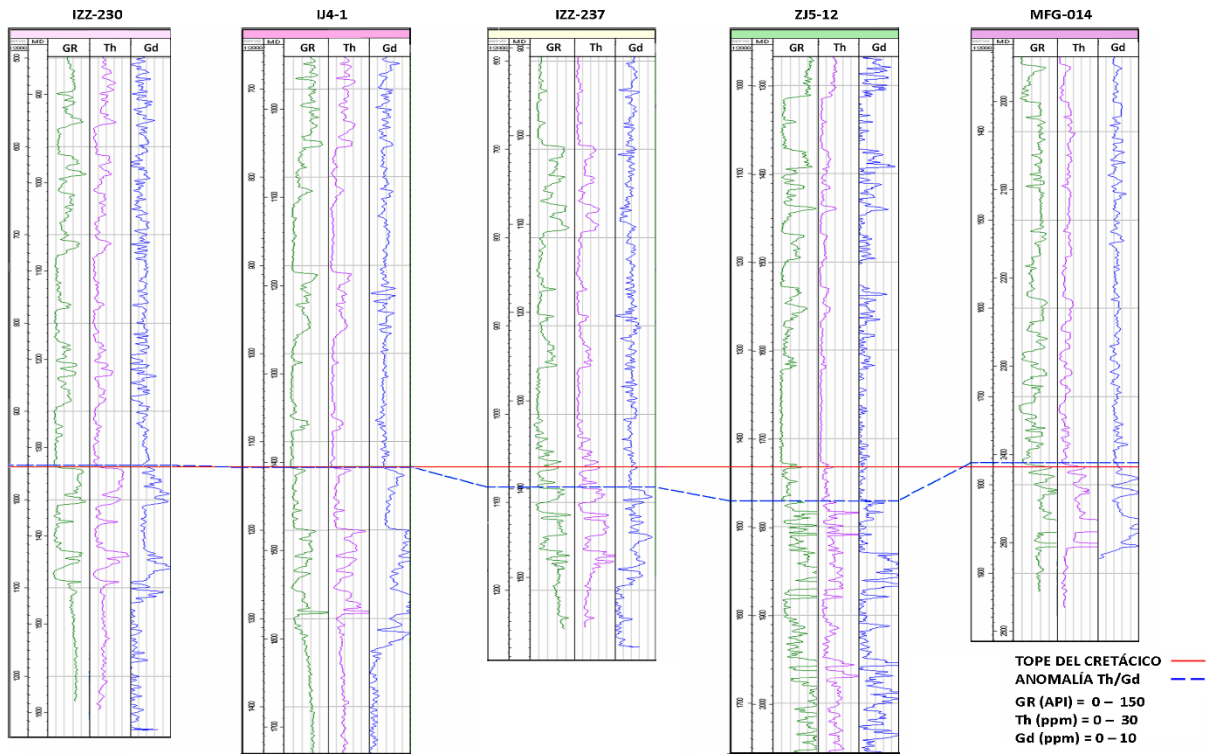


Figura 24b. Sección central de la correlación en la FPO (IZZ-230, IJ4-1, IZZ-237, ZJ5-12, MFG-014), donde se presenta el tope del Cretácico en la línea de color rojo y la anomalía Th/Gd en la línea color azul segmentada. El datum de la correlación es el tope del Cretácico

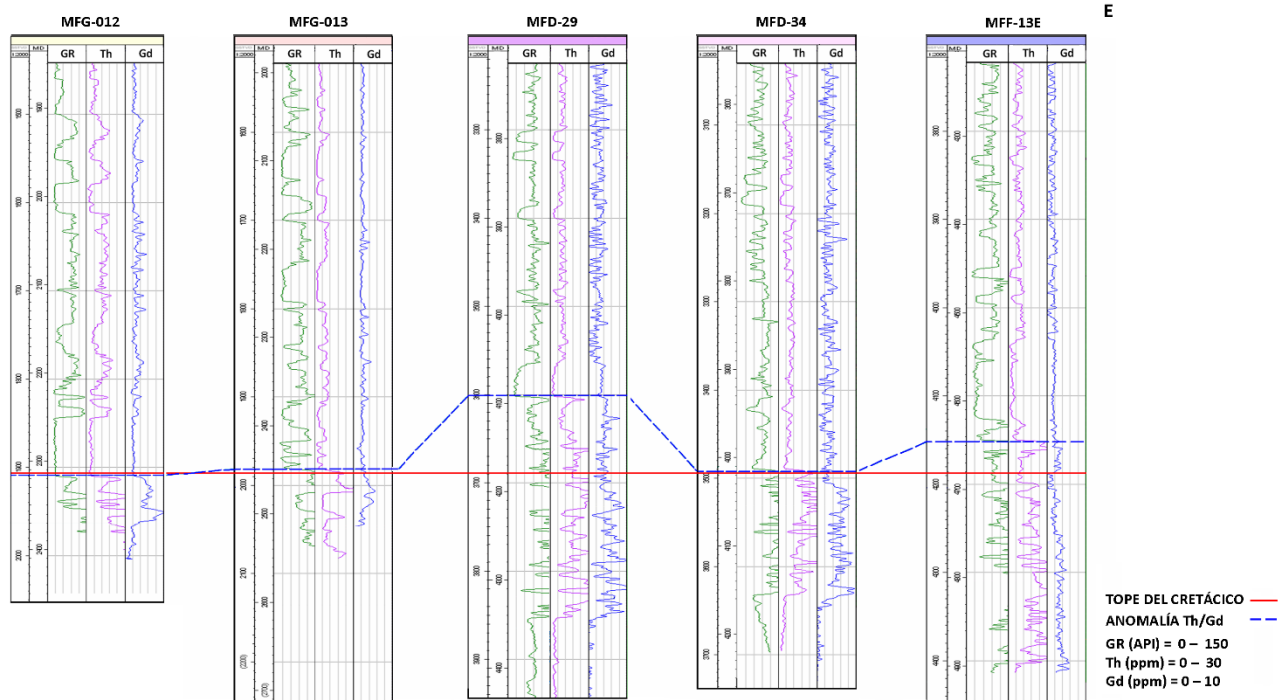


Figura 24c. Sección oriental de la correlación en la FPO (MFG-012, MFG-013, MFD-29, MFD-34, MFF-13E), donde se muestra el tope del Cretácico en la línea de color rojo y la anomalía Th/Gd en la línea color azul segmentada. El datum de la correlación es el tope del Cretácico

IMPLICACIONES PETROFÍSICAS

En las evaluaciones petrofísicas efectuadas en el área, se visualiza que el perfil de GR sobrestima el VSH, por lo cual no se considera como el mejor indicador de arcillosidad el uso de este registro en zonas impactadas por la radioactividad natural. En la Figura 25, se ilustra por ejemplo la evaluación del pozo de IZZ-213, en la pista 1 se presenta alta radioactividad (1.630' aproximadamente) en arenas limpias (interpretadas con los perfiles de Densidad - Neutrón (RHOB/NPHI) en la pista 5). En las pistas 6 y 7, están los volúmenes de arcillas (VSH) calculados por GR y RHOB/NPHI respectivamente, donde se destaca las diferencias entre los cálculos de las arcillosidades obtenidas por ambas metodologías. En el Pozo MFD-023 (Figura 7), se demuestra en conjunto con los datos de DRX (pista 6) como los picos radiactivos enmascaran las facies arenosas.

Se ha observado en algunos pozos que, en intervalos de alta radioactividad no asociados a las arcillas, las resistividades se caracterizan por ser muy bajas, inferiores a 20 ohm.m, por lo cual su prospectividad es baja con parámetros de corte tradicionales. Es importante indicar el valor agregado que tiene la interpretación de los perfiles especiales como la

Resonancia Magnética Nuclear (RMN), para discretizar facies arenosas de baja resistividad con presencia de petróleo pesado y agua irreducible (no móvil) de aquellas arenas que también tienen baja resistividad, pero están saturadas de agua móvil.

Para ilustrar estos casos con ejemplos, se presentan los pozos IZZ-213 e IJ4-14, Figura 25 (pista 10) y Figura 26 (pista 12) respectivamente, ambos con perfil de RMN. En estos casos se puede distinguir la señal del agua irreducible de la señal de petróleo pesado en facies arenosas con resistividades cercanas a los 20 ohm.m. Bodan *et al.* (2013) realizaron un procesamiento e interpretación de registros de RMN para el pozo IJ4-14 (Figura 26 b), señalando para ese intervalo arenoso dos tiempos de relajación; el primero muy corto entre 0.5-2 ms (milisegundos) (óvalo amarillo), el cual indica petróleo pesado y el segundo por el orden de los 4 y 8 ms, correspondiendo con agua no móvil o agua irreducible (óvalo rojo). En ambos pozos, con los parámetros de corte de evaluaciones petrofísicas previas tradicionales, ese petróleo no hubiera sido contabilizado. De allí la importancia y el aporte de los perfiles especiales, como el RMN para incorporar estos hidrocarburos.

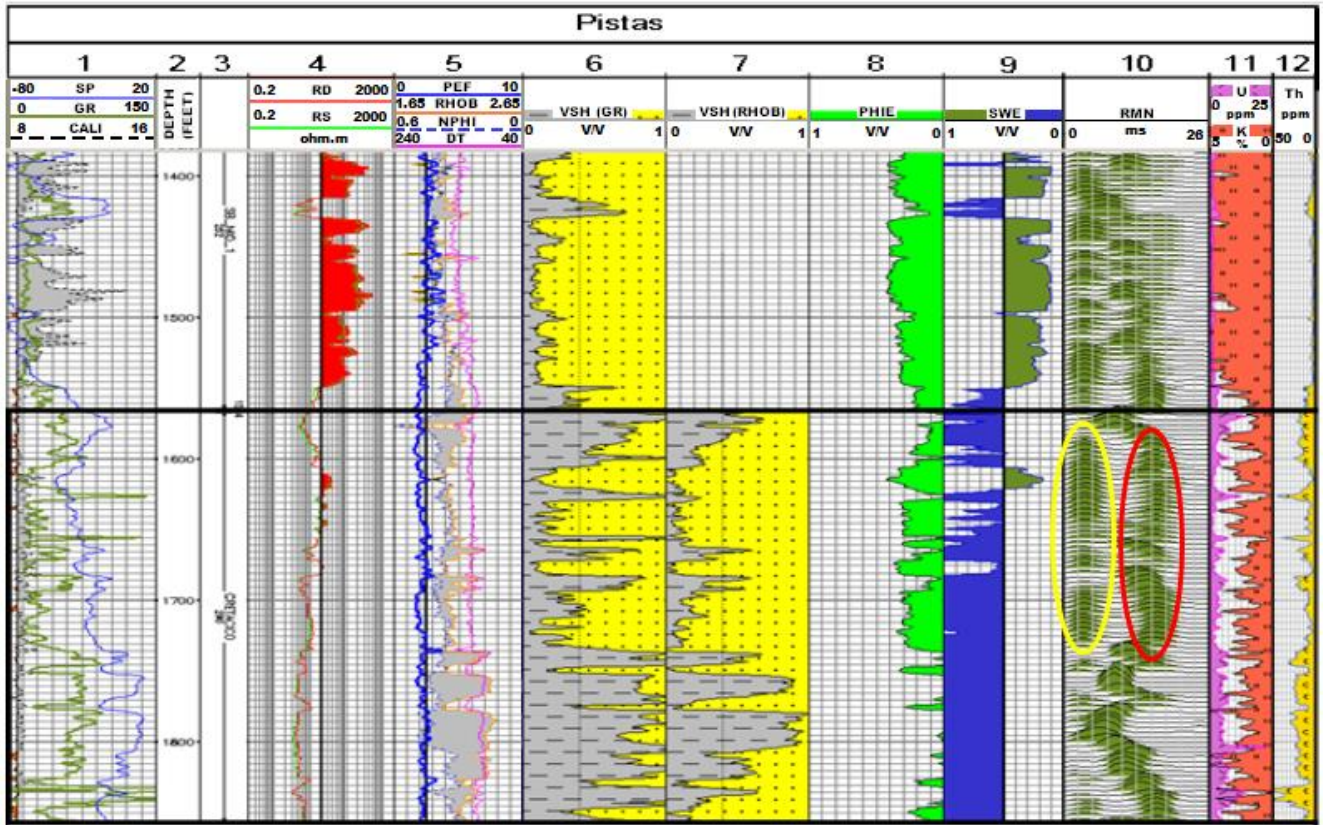


Figura 25. Evaluación petrofísica del Pozo IZZ-213, en el recuadro negro la sección Cretácica. A través del registro de RMN (pista 10) se puede distinguir la señal del agua irreducible (óvalo rojo) de la señal de petróleo pesado (óvalo amarillo) en secciones arenosas con resistividades cercanas a los 20 ohm.m (pista 4). Identificación de las pistas del gráfico = (1) SP: Potencial espontáneo, GR: Rayos gamma, CALI: Caliper; (4) RD: Resistividad profunda, RS: Resistividad somera; (5) PEF: Factor fotoeléctrico, RHOB: Registro de densidad, NPHI: Registro de neutrones, DT: Registro sínico; (6) VSH(GR): Volumen de arcilla por rayos gamma; (7) VSH(RHOB): Volumen de arcilla por densidad; (8) PHIE: Porosidad efectiva; (9) SWE: Saturación de agua efectiva; (10) RMN: Resonancia magnética nuclear; (11) U: Uranio, K: Potasio; (12) Th: Torio

Actualmente, se continúa investigando en cuanto a la naturaleza de este tipo de comportamiento de baja resistividad, desde aplicar algoritmos matemáticos que

mitiguen la respuesta de los perfiles eléctricos, así como el estudio de los fluidos y las propiedades eléctricas de los minerales identificados en estos depósitos sedimentarios.

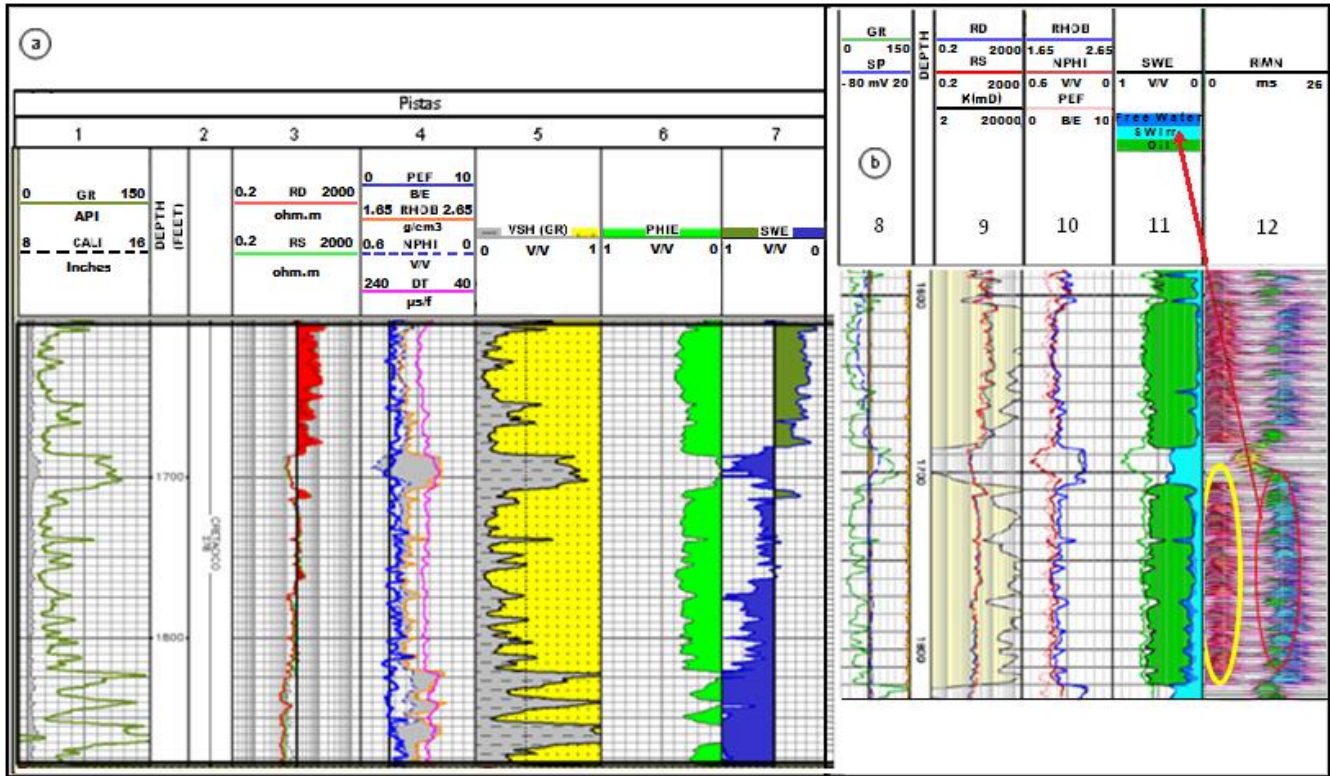


Figura 26.a) Evaluación petrofísica tradicional del Pozo IJ4-14, donde no se considera el contenido de petróleo existente en la sección arenosa por debajo de los 1.700' (pista 7), debido a las bajas resistividades existentes (pista 3). b) Evaluación petrofísica con registro especial de RMN del IJ4-14, donde se aprecia la señal del petróleo pesado (óvalo amarillo) y la señal del agua irreducible (óvalo rojo)(pista 12), que luego es incorporado a la cuantificación de hidrocarburos de este intervalo arenoso (pista 11). Identificación de las pistas de la Figura 26a y 26b : (1, 8) GR: Rayos gamma, CALI: Calíper, SP: Potencial espontáneo; (3, 9) RD: Resistividad profunda, RS: Resistividad somera, K(D): Permeabilidad en milidarcy (mD); (4, 10) PEF: Factor fotoeléctrico, RHOB: Registro de densidad, NPHI: Registro de neutrones, DT: Registro sísmico; (5) VSH(GR): Volumen de arcilla por rayos gamma; (6) PHIE: Porosidad efectiva; (7, 11) SWE: Saturación de agua efectiva, Free Water (agua libre o móvil), Swirr (saturación de agua irreducible), Oil (petróleo); (12) RMN: Resonancia magnética nuclear. Modificado de Bodan et al. (2013)

CONCLUSIONES

La alta radioactividad presente en yacimientos de crudos pesados en pozos del Bloque Ayacucho, al igual que en diversos pozos localizados en los Bloques Boyacá y Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco en secuencias sedimentarias con edades que van desde el Cretácico llegando incluso hasta el Mioceno Temprano, se debe fundamentalmente al mineral pesado monacita, contenido tanto en las arenas como en las arcillas tipo caolinita de los intervalos estratigráficos analizados. Es por tanto importante tener presente en las evaluaciones petrofísicas estas condiciones, de forma de reducir la incertidumbre en la predicción de las litologías existentes y determinar con mayor precisión los intervalos arenosos y los volúmenes de arcilla en los yacimientos, en orden de no repercutir en el cálculo de reservas y planificar estrategias de explotación acordes en áreas con estas mismas características geológicas.

Este mineral impacta considerablemente las lecturas de los registros espectroscópicos de rayos gamma totales, rayos gamma espectrales y registros de perfilaje geoquímicos debido al incremento del torio (Th) y del gadolinio (Gd), ambos elementos están contenidos dentro de la estructura de la monacita, el cual es un fosfato de tierras raras que proviene principalmente de rocas félsicas, graníticas y volcánicas de la Provincia de Cuchivero y de granitos intrusivos dentro del Complejo de Imataca en el Cratón de Guayana, ambas provincias ubicadas al sur de la zona de estudio y que fungieron como las principales áreas fuente y que a través de la meteorización y la acción de diversos afluentes fluviales que drenaron estas provincias geológicas, han transportado el material detrítico ahora presente en el registro sedimentario del subsuelo de la FPO. La identificación de monacita también ha sido reportada en estudios previos por Feo (1949), Duhamel (2016) y Mendoza (2018) en muestras del subsuelo, tanto del Campo Temblador al norte de la FPO, como en los campos Dobokubi y Jobo respectivamente. La presencia de este tipo de mineral pesado también está

afectando a las aguas superficiales e incluso a la materia orgánica presente en los afluentes que alimentan al río Orinoco.

La anomalía torio/gadolinio (Th/Gd) como se demostró en esta investigación, es diacrónica en tiempo a todo lo largo de los tres bloques analizados de la Faja Petrolífera del Orinoco, abarcando un período de tiempo de más de 100 Ma. Esta anomalía radioactiva no se debe establecer como un límite cronoestratigráfico entre el Cretácico y Paleógeno (K/Pg) en el área.

Se infiere a partir de los datos geoquímicos y mineralógicos presentados en esta investigación, que la configuración actual del río Orinoco se produjo posterior al Mioceno Temprano, en virtud de que después de este tiempo geológico en el subsuelo de la Faja Petrolífera del Orinoco no existió más acumulación de la monacita entre los minerales pesados identificados en las secuencias sedimentarias interpretadas, constituyéndose por consiguiente este río en una barrera natural a la sedimentación de los principales afluentes que fluyen en sentido norte-sur hacia la Cuenca Oriental provenientes del Cratón de Guayana, drenándose parte de la sedimentación captada como carga de fondo y sedimentos en suspensión hacia la zona este en la desembocadura del Delta del Orinoco.

La experiencia en esta investigación conduce a aplicar metodologías de interpretación de perfiles de pozos convencionales integrados con herramientas geoquímicas, así como a la necesidad de incorporar perfiles especiales magnéticos y dieléctricos que permitan realizar evaluaciones integrales para caracterizar con mayor certeza los yacimientos en la sección Cretácica de la Faja Petrolífera del Orinoco.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a INTEVEP, S.A. por otorgar el permiso para publicar los datos reflejados en este trabajo, al igual que las revisiones e inestimables comentarios de los profesores Dr. Wolfgang Scherer y M.Sc. Sebastián Grande de la Universidad Central de Venezuela para la mejora del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, F. 2016. Estudio gravimétrico de la Faja Petrolífera del Orinoco. INTEVEP, S.A. Los Teques. Informe Inédito.
AUDEMARD, F. 1977. Perspectivas geológicas favorables para mineralizaciones de uranio en la región norte de la Guayana Venezolana. *V Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, Tomo 3: 1013 – 1022.
BARITTO, I. 2013. Aplicación de discriminación estadística multivariable en la correlación química de secuencias Cretácicas, Campo El Furrial, Cuenca Oriental de Venezuela. *SPE-WS-204*, 1 – 10.

BARITTO, I. 2021. Anomalías radiactivas en yacimientos de la Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela. *Revista Visión Tecnológica*, 24 (1): 33 – 42.
BODAN, F., RENGEL, R., PADILLA, J., LEON, C. & M. LUGO. 2013. Pozo IZJ4-0014, Corrida 1, Campo Iguana Zuata. Procesamiento e interpretación de registros a hueco abierto. Geociencias. Reporte Baker Hugues, 99 p.
CIEN-COMITÉ INTERFILIAL DE NOMENCLATURA Y ESTRATIGRAFÍA. 2011. Código Estratigráfico de las Cuencas Petroleras de Venezuela. <www.intevep.pdv.com/~ibc03/c.htm>
CRESPO, J. 2008. *Modelo sedimentológico-estratigráfico, bloque Carabobo 2, Faja Petrolífera del Orinoco*. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, UCV, 125 p.
DÍAZ DE GAMERO, M. L. 1996. The changing course of the Orinoco river during the Neogene: a Review. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology*. 123: 385 - 402.
DI CROCE, J. 1996. *Eastern Venezuela Basin: Sequence Stratigraphy and Structural Evolution*. Rice University. Ph.D. Thesis, Houston, Texas. 225 p.
DUHAMEL, M. 2016. *Reconocimiento de minerales pesados y análisis de sus efectos sobre los registros petrofísicos del Grupo Temblador, Campo Dobokubi, Edo. Anzoátegui*. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, UCV. 153 p.
EISMA, D., VAN DER GAAST, S. J., MARTIN, J. M. & A. J. THOMAS. 1978. Suspended matter and bottom deposits of the Orinoco Delta: Turbidity, mineralogy and elementary composition. *Netherlands Journal of Sea Research*. 12 (2): 224 - 251.
FEO, G. 1949. Stratigraphy of The Temblador Field: Mineralogical and Petrographical Summary. Mene Grande Oil Company, C.A. Chrono 836: 5.15 / 0 - 42, 38 p.
FRESLON, N., BAYON, G., TOUCANNE, S., BERMELL, S., BOLLINGER, C., CHÉRON S., ETOUBLEAU, J., GERMAIN, Y., KHRIPOUNOFF, A., PONVEREZA, E. & M. L. ROUGET. 2014. Rare earth element and neodymium isotopes in sedimentary organic matter. *Geochim. Cosmochim. Acta* 140, 177 – 198.
FUNES, D. 1985. Tipos de acumulación de petróleo en el área de Hamaca. *VI Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, Tomo 5: 3015 – 3036.
GALFORD, J., QUIREIN, J., SHANNON, S., TRUAX, J. & J. WITKOWSKY. 2009. Field test results of a new neutron-induced gamma ray spectroscopy geochemical logging tool. Paper SPE 123992, Trans., SPE 84th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, 4 – 7 October,
GAMERO, A., REVETI, M. A., JIMÉNEZ, Y., RODRÍGUEZ, R., ANGULO, F., HURTADO, R. & A. DE ABRISQUETA. 2014. Caracterización geoquímica de minerales pesados recolectados en la zona Nor-Occidental del Estado Bolívar. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 29 (4): 25 – 40.
GONZÁLEZ DE JUANA, C., ITURRALDE DE AROCENA, J.M., & X. PICARD CADILLAT. 1980. *Geología*

- de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas. Ed. Foninves, 2 tomos, 1021 p.
- GRANDE, S. 2023. Evidencias petrológicas de supercontinentes y plumas mantelares en la geología de Venezuela. *Boletín de Historia de las Geociencias en Venezuela* 143, 228 - 279.
- HERNÁNDEZ, A. 2013. *Determinación de las concentraciones de los elementos U, Th y Tierras Raras (REE) en los minerales pesados de los sedimentos del río Arizo (afluente del río Aro), Municipio Heres, Estado Bolívar, Venezuela*. Trabajo especial de grado para optar al título de Licenciado en Geoquímica, Escuela de Química, Facultad de Ciencias, UCV. 106 p.
- HERRON, M. M. & S. L. HERRON. 1990. Geological application of geochemical well logging. *In: Geological Applications of Wireline Logs*. Geological Society Special Publication N° 48, 165176.
- HERTZOG, R. 1978. Laboratory and field evaluation of an inelastic neutron scattering and capture gamma ray spectrometry tool. Paper 7430, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA, 1 – 4 October.
- HERTZOG, R. C. and M.M. HERRON. 1990. Applications of elemental measurements in geochemical logging. Thirteenth European Formation Evaluation Symposium 15, Paper DD.
- HÖHN, S., FRIMMEL, E. & J. PAŠAVA. 2014. The rare earth element potential of kaolin deposits in the Bohemian Massif (Czech Republic, Austria). *Miner Deposita* 49, 967 – 986.
- HURST, A. & A. MIŁODOWSKI. 1996. Thorium distribution in some North Sea sandstones: implications for petrophysical evaluation. *Petroleum Geoscience*, (2): 59 – 68.
- IRES. 2007. Estudio sedimentológico del Pozo MFD-023, Campo Dobokubi, área Anzoátegui, Venezuela. Reporte N° 2005/12/4600011373.
- LIENDO, A. M. 2003. *Prospección geofísica de los radioelementos uranio, torio, potasio y minerales paragenéticos asociados*. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geofísico, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, UCV. 230 p.
- MÉNDEZ, J. 2000. Delta del Orinoco (Geología). Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN). Caracas, *Bol. Geol. Esp.* N° 13, 127 p.
- MICHELSON, J. E. 1976. Miocene deltaic habitat, Trinidad. *AAPG*. 60: 1502 - 1519.
- OSBORNE, A., HALEY, B., HATHORNE, E., PLANCHEREL, Y., & M. FRANK. 2015. Rare earth element distribution in Caribbean seawater: Continental inputs versus lateral transport of distinct REE compositions in subsurface water masses. *Marine Chemistry* 177, 172 – 183.
- PALMA, Z. 2012. Análisis sedimentológico y bioestratigráfico del núcleo MFF-13E, Faja Petrolífera del Orinoco, área de Ayacucho. Proyecto Orinoco Magna Reserva (POMR).
- PASQUALI, J. 1977. Plan nacional de exploración de Uranio en Venezuela. *V Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, Tomo 3: 989 – 1011.
- PEMPER, R., SOMMER, A., GUO, P., JACOBI, D., LONGO, J., BIVEN, S., RODRIGUEZ, E., MENDEZ, F. & X., HAN. 2006. A new pulsed neutron sonde for derivation of formation lithology and mineralogy. Paper SPE 102770, Trans., SPE 81st Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 24 – 27 September.
- MENDOZA, M. 2018. *Caracterización mineralógica de intervalos Cretácicos-Terciarios y su influencia en registros petrofísicos en el pozo MJOC-605, Campo Jobo, Faja Petrolífera del Orinoco*. Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Geólogo, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, UCV. 122 p.
- PHILANDER, C. & A. ROZENDAAL. 2011. Rare earth element and thorium potential of heavy mineral deposits along the west coast of South Africa with special reference to The Namakwa sands deposit. *Proceedings of the 10th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)*, 531 – 539.
- POMR. 2012. *Atlas de Integración Regional de la Faja Petrolífera del Orinoco, Proyecto Orinoco Magna Reserva*. Caracas, 133p.
- POTTER, P. E. 1998. The Mesozoic and Cenozoic paleodrainage of South America: A natural history. *Journal of South American Earth Sciences*. Elsevier Science Ltd. 10 (5): 331 - 344.
- RANGEL, M. D., SOLÓRZANO, E., y L. SUÁREZ. 2013. Definición e interpretación de facies sedimentarias en los núcleos de los pozos: MFG-011, MFG-013, MFL-010, MFR-009 de la Faja Petrolífera del Orinoco, Bloque Ayacucho y el pozo MFB-818 del Campo Bare. Informe Técnico PDVSA Intevep INT-14327. 95 p.
- RENDÓN, L., MATUTE, L., FUENMAYOR, G., MARCANO, R., and G. JAIMES. 2015. Discovery of unconventional heavy oil deposit of high electrical conductivity and radioactivity in the Temblador Group, age Maastrichtian to Aptian, Dobokubi Field, Ayacucho Block of the Orinoco Oil Belt, Venezuela. *SPE-WVS-608*, 1 – 11.
- RENZ, H. H. 1957. Stratigraphy and geological history of Eastern Venezuela. *En: Geologische Rundschau*, 45 (3): 728 - 759.
- RENZ, H. H., ALBERDING, H., DALLMUS, K. F., PATTERSON, J. M., ROBIE, R. M., WEISBORD, N. E. & J. MASVALL. 1958. The Eastern Venezuela Basin. *En: Habitat of Oil. Symposium AAPG*: 551 - 600.
- RENZ, H. H., ALBERDING, H., DALLMUS, K. F., PATTERSON, J. M., ROBIE, R. M., WEISBORD, N. E. & J. MASVALL. 1963. La Cuenca de Venezuela Oriental. *I Congreso Venezolano de Petróleo. Memoria*. 100 - 189.
- RHOADS, B. 2020. River Dynamics. Geomorphology to support Management. Cambridge University Press, 532 p. doi: 10.1017/9781108164108
- SERRA, O. & L. SERRA. 2004. *Well Logging - Data Acquisition and Applications*. Editions Serralog, France. 674 p.
- SCHLUMBERGER. 1984. Log Interpretation Charts. Mineral identification from natural gamma ray spectrometry log. Chart CP-19. 45 p.
- SIMON, S. S. T and M. R. GIBLING. 2017. Fine-grained meandering systems of the Lower Permian Clear Fork Formation of north-central Texas, USA: Lateral and oblique accretion on an arid plain. *Sedimentology*, (64): 714–746. doi: 10.1111/sed.12322
- STAINFORTH, R. M. 1978. Was it the Orinoco. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull.* 62 (2): 303 - 306.
- SUMMA, L. L., GOODMAN, E. D., RICHARSON, M., NORTON, I. O., & A. R. GREEN. 2003. Hydrocarbon

- system of northeastern Venezuela: Plate through molecular scale-analysis of the genesis and evolution of the Eastern Venezuela basin. *Marine and Petroleum Geology*. v. 20: 323-349.
- URBANI, F. 2011. Un esbozo de la Geología de Venezuela. *BioLania*, Edición Especial 10: 27-32.
- YOUNG, G. A., BELLIZZIA, A., GRENZ, H. H., JOHNSON, F. W., ROBIE, R. H. & J. MASVALL. 1958. Geología de las cuencas sedimentarias de Venezuela y de sus campos petrolíferos. *Bol. Geol. Publ. Esp.* 140 p..