



TIERRAS RARAS DURANTE EL CAMPANIANO-MAASTRICHTIANO EN EL VALLE
MEDIO DEL MAGDALENA

Rare Earth Elements During the Campanian–Maastrichtian in the Middle Magdalena Valley

Emilio José Arbeláez Gallo y Simón Betancur Guerra

Trabajo de grado

Director:

Andrés Cárdenas

Codirector:

Felipe de la Parra

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERÍA

GEOLOGÍA

MEDELLÍN

2025

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente al profesor *Andrés Cárdenas Rozo* su manera de enseñar e inspirarnos (*aunque niega hacerlo*). Su pasión, su conocimiento, su calidez y las oportunidades que nos brindó son la razón por la que decidimos continuar en la geología. Nos sentimos satisfechos y orgullosos de la ruta que elegimos. Gracias, profesor, por iluminarnos el camino, por tener siempre las puertas abiertas para discutir nuestras ideas “*extravagantes*”, por tenernos siempre tanta paciencia, por nunca rendirse con nosotros y, sin importar la dificultad, por brindarnos la mano incluso en los momentos más oscuros. Nos sentimos afortunados de haber tenido la oportunidad de contar con un mentor como usted, de conocer la naturaleza del registro estratigráfico de su mano, de sus enseñanzas sobre la vida y la muerte, de sus reflexiones y consejos que nos han convertido en más que profesionales, mejores personas, de su capacidad innata para bromear con nosotros y hacernos reír. Le imploramos que siga con su tarea, guiando más mentes jóvenes hacia los profesionales que quieren convertirse.

Agradecemos también al profesor *Felipe de la Parra*, gracias por creer en nosotros cuando le presentamos nuestra idea: tomar *jugo de zanahoria con changua*. Usted siempre apuesta por nosotros y nos apoya con lo que necesitamos. Su trabajo fue la semilla que germinó en nosotros: nuestra fascinación por las fosforitas y la estratigrafía. Siempre estuvo dispuesto a mantener largas conversaciones con nosotros, enseñarnos tantas cosas en campo y por correo, a reírse de nosotros cuando decíamos barbaridades, nos llevó al mejor campo que hemos tenido con *Zarco Iván y Víctor*, ese campo, entre las risas, nos permitió aprender de la calidad de persona que usted es: como hacer las cosas con la mayor rigurosidad, paciencia y precisión; a siempre ser humildes y tratar a todo el mundo con cariño y respeto.

Agradecemos al profesor *Camilo Bustamante* por enseñarnos a pensar críticamente, siempre sustentado en la razón y en evidencias rigurosas. Por siempre apoyarnos y por estar siempre con las puertas abiertas para discutir sobre tectónica y geoquímica. Aprendimos de usted el inmenso poder del método científico, la calma ascética ante las provocaciones, el profesionalismo inamovible, el respeto a cualquier persona o idea y la humildad que lo caracteriza.

Agradecemos a *Will y Leidy* por colaborar siempre con todos los proyectos que desarrollamos, con cariño y paciencia. Agradecemos al Zar y Señor de la Renta, *Ronaldiño*, por escoltarnos con su guardia de perros en todo momento, por ayudarnos durante todo el trabajo de campo, ¡y

por aprender y enseñarnos también! Por brindarnos agua en la eterna subida y por siempre estarnos esperando, en el portón, con las botas puestas, ¡para comenzar la aventura!

Agradecemos a nuestros compañeros de batalla, lanzas y hermanos: *Sebastián y Daniel*, por acompañarnos en toda nuestra carrera, siempre sorteando y conquistando cualquier desafío que se nos plantara en frente, en las buenas y en las malas. Siempre con las risas y el espíritu energético, más que colegas, los consideramos hermanos y ya saben, ¡Arrieros somos y en el camino nos vemos!

Agradecemos al Pregrado de Geología de la Universidad EAFIT, al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) por su apoyo en la financiación de la metodología desarrollada, y al Fondo Corrigan ACGGP por el financiamiento del campo y de los análisis geoquímicos(ICP-MS). A los profesores de la Universidad EAFIT *Astrid, Marcela J., Marcela, Edgar, Harold, Avellaneda y Luis M.*

Agradecemos a los profesores *Juan Sebastián, Juan Camilo y José Daniel* por enseñarnos tanto en tan poco tiempo, por empujarnos a cumplir retos que parecían imposibles y por otorgarnos la mística del Geólogo de campo.

Ambos autores agradecen infinitamente a sus familias;

Emilio agradece especialmente y como principal motivación de todo lo que hace y es a la familia que lo hizo, su madre Olga Lucia, siempre la mejor animadora, paciente, amorosa y resiliente y su padre Rubén Darío, siempre el mejor consejero, cariñoso, sabio y gracioso, A su tía Nancy, que le enseñó a nunca rendirse, con su amor eterno y generosidad, a su tía Norela por ayudarlo siempre en los más difíciles, a su Abuela Afralina, que le brindo el mayor amor. A su tío Oscar, por siempre ayudarlo sin esperar nada a cambio, a sus tíos/as Sergio, Javier, Fanny y Julio. A su prima Sofía, por su apoyo y cariño. A Erik, por darle otra oportunidad y una nueva vida. A Selene, por amarlo completo, y Simón, por más que sea un amigo, ser su hermano y compañero de mil batallas. Finalmente, a la Secretaria de Educación de Medellín por permitirle estudiar con la Beca Mejores Bachilleres

Simón agradece especialmente a su madre, Marleny, y a su padre, Henry, por el apoyo y la paciencia que han tenido durante todo su recorrido académico, además de su amor abnegado. A su hermana Paulina por el amor incondicional y desinteresado. A toda su familia por las enseñanzas de calidez, apoyo y constancia que han sido el cimiento de este camino y han

acompañado cada paso. A Emilio, por otorgar su amistad: el regalo máspreciado que alguien puede recibir.

CONTENIDO

RESUMEN.....	8
PALABRAS CLAVE	8
1. INTRODUCCIÓN	9
1.2 FOSFOGÉNESIS	10
1.3 FRACCIONAMIENTO DE REE.....	11
1.4 CONTEXTO GEOLÓGICO	12
1.5 GENERALIDADES.....	13
2. METODOLOGÍA.....	14
2.1 ESTRATIGRAFÍA	14
2.2 PETROGRAFÍA.....	15
2.3 DRX-XRF.....	15
2.4 ICP-MS.....	15
3. RESULTADOS	16
3.1 ESTRATIGRAFÍA	16
3.2 PETROGRAFÍA.....	21
3.3 DRX-XRF.....	22
3.4 ICP-MS.....	22
4. DISCUSIÓN	25
4.1 AMBIENTE DE ACUMULACIÓN DE LA FM. LA RENTA	25
4.2 PETROGÉNESIS DE LAS FOSFORITAS DE LA FM. LA RENTA	26
4.3 IMPLICACIONES REGIONALES	27
4.4 GEOQUÍMICA	28
4.4 REE.....	28
4.5 CONDICIONES PALEOAMBIENTALES	29
4.6 CAPTURA DE REE EN LA FM. UMIR.....	31
4.7 FUENTE PRIMARIA DE LAS REE.....	33
5. CONCLUSIONES.....	34
6. REFERENCIAS.....	36
7. ANEXOS.....	40

FIGURAS

Figura 1. Localización geográfica del neoestratotipo de la Fm. La Renta.	14
Figura 2. Columna Estratigráfica de la Fm. La Renta y la base de la Fm. Umir.	17
Figura 3. Calizas fosfáticas y Lente de caliza fosfática embebido en lodo negro.	18
Figura 4. Afloramiento Sección Aguablanca.	21
Figura 5. Comparación de spiderplot SE02 - SE13.....	25
Figura 6. Gráficos bivariados de relaciones REE, Base de datos recuperada de Baioumy & Farouk (2022).	30
Figura 7. Proceso de formación del conglomerado basal de la Fm. Umir.	32

TABLAS

Tabla 1. Composición de los elementos mayores de las muestras.....	23
Tabla 2. Composición de elementos trazas en muestras seleccionadas.	24
Tabla 3. Composición de elementos de tierras raras (REE) en muestras seleccionadas.	24

ANEXOS

Anexo 1. Segmento estratigráfico entre los metros 19-20.....	40
Anexo 2. Muestras de mano y secciones delgadas en nicoles paralelos.	41
Anexo 3. Composición mineralógica de las muestras según DRX.	42
Anexo 4. Composición química normalizada de las muestras con base en XRF.....	42
Anexo 5. Diagrama bivariado correlación de fósforo (P) en ppm vs. elementos mayores.	42
Anexo 6. Diagrama bivariado de correlación del fósforo (P) en ppm vs. los elementos trazas.	43
Anexo 7. Modelo de Pufahl & Groat (2017) para mares epicontinentales influenciados por corrientes de surgencia con facies fosfáticas.	43
Anexo 8. Relación entre el contenido de Fósforo (P) y REE (ppm) a lo largo de la Columna Estratigráfica de la Fm. La Renta.	44

RESUMEN

Este trabajo determina los procesos geológicos que permitieron el enriquecimiento en REE de la Fm. La Renta y la base de la Fm. Umir en el VMM. Para ello se realizó un levantamiento estratigráfico de alta resolución en el neoestratotipo de la Fm. La Renta (Qda. Aguablanca; Lebrija; Santander), complementado con petrografía, DRX, XRF, e ICP-MS.

Los resultados indican que el enriquecimiento en REE de la Fm. La Renta se presenta en fosforitas genéticamente relacionadas con tormentas (*Tempestitas*) en un ambiente de rampa media bajo la influencia de corrientes de surgencia, donde la captura oceánica-diagenética de REE por fluorapatita carbonatada (CFA) resultó en un enriquecimiento de HREE ($La/Yb \approx 0.64$). Las relaciones Ce/Ce^* (1.08) y Y/Ho (46.9) sugieren que la fuente primaria fue un océano metalogénicamente enriquecido por el magmatismo submarino del Cretácico Superior. En cambio, en la Fm. Umir, el enriquecimiento se presenta en un conglomerado basal con concentraciones $\Sigma REE+Y \approx 700$ ppm, enriquecido en HREE ($La/Yb \approx 0,64$) y con la secuencia mineral diagnóstica: glauconita-CFA-pirita-dolomita, producto de bacterias oxidantes de azufre; lo que indica un segundo evento fosfogénico en un ambiente diferente a la Fm. La Renta, con condiciones reductoras y mayor influencia terrígena ($Y/Ho=46.9$, $Eu/Eu^*=1.08$), que fue erosionado y acumulado en lentes sobre la discordancia del Campaniano–Maastrichtiano. En consecuencia, los contenidos de REE en la Fm. La Renta y en la base de la Fm. Umir se dan por un enriquecimiento previo del océano que es controlado por procesos paleoambientales distintos, propios del ambiente de acumulación de cada formación.

PALABRAS CLAVE

Formación La Renta, Formación Umir, Fósforo, REE, Cordillera Oriental

ABSTRACT

This work determines the geological processes that enabled REE enrichment in the La Renta Formation and the base of the Umir Formation in the MMV. A high-resolution stratigraphic section was measured at the La Renta Formation neostratotype (Aguablanca Creek, Lebrija, Santander), complemented with petrography, XRD, XRF, and ICP-MS analyses.

Results indicate that REE enrichment in the La Renta Formation occurs in phosphorites genetically related to storms (tempestites) in a mid-ramp environment under the influence of upwelling currents, where oceanic-diagenetic capture of REE by carbonate fluorapatite (CFA) resulted in HREE enrichment ($La/Yb_N \approx 0.64$). Ce/Ce^* (0.46) and Y/Ho (58.3) ratios suggest

that the primary source was a metallogenically enriched ocean due to Late Cretaceous submarine magmatism. On the other hand, in the Umir Formation, enrichment occurs in a basal conglomerate with total concentrations of $\Sigma\text{REE}+\text{Y}\approx 700$ ppm, enriched in HREE ($\text{La}/\text{Yb}_N\approx 0.64$) and displaying the diagnostic mineral sequence: glauconite-fluorapatite-pyrite-dolomite, produced by sulfur-oxidizing bacteria. This finding reflects a second phosphogenic event in an environment distinct from the La Renta Formation, with more reducing conditions and greater terrigenous influence ($\text{Y}/\text{Ho}=46.9$, $\text{Eu}/\text{Eu}^*=1.08$), which was subsequently eroded and accumulated in lenses over the Campanian–Maastrichtian unconformity. Consequently, REE contents in the La Renta Formation and the base of the Umir Formation result from prior oceanic enrichment controlled by distinct paleoenvironmental processes specific to each formation's depositional environment.

KEY WORDS

La Renta Formation, Umir Formation, Phosphorus, REE, Cordillera Oriental

1. INTRODUCCIÓN

Las fosforitas son rocas sedimentarias con porcentajes por peso de P_2O_5 entre el 18 al 35% (Pufahl & Groat, 2017). Macroscópicamente, ocurren como capas de centímetros a decenas de metros, o como concreciones y nódulos (Birch, 2005). Están principalmente constituidas por peloides, intraclastos y bioclastos fosfatizados embebidos en una matriz de micrita, esparita o lodo fosfático. Su textura se asemeja a la de las calizas y se asocia con lodolitas negras, *cherts* negros, calizas y, raramente, con areniscas y depósitos de uranio (Dar et al., 2017).

El fósforo se encuentra en la fluorapatita carbonatada (CFA; por sus siglas en inglés *Carbonate fluorapatite*) como nódulos, reemplazando bioclastos o como masas amorfas (Birch, 2005; Dar et al., 2017). Aparecen en el registro geológico desde el Paleoproterozoico y su ambiente de formación es generalmente marino somero, como mares epicontinentales, plataformas continentales, islas y mesetas oceánicas (Birch, 2005); también se registran en ambientes profundos como montes marinos (Pufahl & Groat, 2017).

Durante el Cretácico Tardío, son abundantes las fosforitas debido a la influencia de corrientes de surgencia en los márgenes continentales, lo que permitió el desarrollo de provincias fosfogénicas en el Norte de África (Tetis) y en el Norte de Suramérica (Tetis Sur) (Föllmi et al., 1992; Pufahl & Groat, 2017; Baioumy & Farouk, 2022).

En las últimas décadas, las fosforitas han cobrado relevancia por su contribución a la seguridad alimentaria como fuente de fertilizantes y por su enriquecimiento en elementos de tierras raras (REE, por sus siglas en inglés). Los REE son críticos para el desarrollo de los sectores tecnológico, energético y de defensa (Christmann, 2014; Emsbo et al., 2015). El mecanismo de enriquecimiento en estos elementos se debe a la sustitución del Ca^{2+} por REE^{3+} durante la diagénesis temprana en el CFA (Jarvis et al., 1994; Bau et al., 1995).

La procedencia de los REE en las fosforitas se debe a la composición química del agua durante la diagénesis temprana, siendo mayor su concentración durante cambios en las condiciones redox de los océanos, estos cambios, disuelven las fases transportadoras de REE (oxihidróxidos) liberándolas en el fondo, donde posteriormente, se fijan en el CFA autigénico (Zhang et al., 2021; Buccione et al., 2021). También se ha reportado la influencia de factores como el aporte siliciclástico de material fino (Abbott et al., 2019) o el retrabajo posterior en condiciones más reductoras (Baioumy & Farouk, 2022), entre las principales causas de la concentración alta y anómala de REE en fosforitas (Baioumy & Farouk, 2022; Valetich et al., 2022).

En la zona de surgencia ubicada en Perú, se forman fosforitas actualmente; sin embargo, la concentración de REE disueltas no es suficiente para generar enriquecimientos relevantes ($\Sigma\text{REE}+\text{Y} < 10$ ppm) (Emsbo et al., 2015); Lo anterior, indica que la abundancia de REE en el agua oceánica actual puede ser menor que durante el Cretácico Tardío donde las fosforitas presentan generalmente concentraciones de $\Sigma\text{REE}+\text{Y} > 100$ ppm (e.g, Baioumy & Farouk, 2022).

El análisis de datos geoquímicos de fosforitas del Cretácico Superior del Tetis sugiere que las firmas geoquímicas Y_N , La/Sm, Sm/Yb y Y/Ho podrían funcionar como posibles indicadores del origen de los REE. Específicamente, determinar si el factor dominante de enriquecimiento es el REE disponible en aguas oceánicas o el aporte siliciclástico (Baioumy & Farouk, 2022).

1.2 FOSFOGÉNESIS

El fósforo llega al océano como producto de la meteorización de las rocas continentales, pero la mayoría de él, como clastos de minerales ígneos o metamórficos, no es biodisponible y no participa en el ciclo biogeoquímico (Ahmed et al., 2022). Del continente también llegan partículas de materia orgánica y minerales arcillosos que contienen fósforo biodisponible; la disolución de estas fases y la liberación del fósforo se deben a factores como la acción

bacteriana en los fondos marinos, las condiciones redox y el elevado potencial iónico del agua oceánica (Pufahl & Groat, 2017).

El fósforo disuelto favorece una alta productividad biológica en los océanos (Birch, 2005). En las aguas superficiales lejanas a la costa, su concentración se reduce a cero debido a la rápida asimilación por parte del fitoplancton. En las aguas profundas, el reciclaje constante de la materia orgánica aumenta su concentración debido a la actividad microbiana (Jarvis et al., 1994; Pufahl & Groat, 2017). Las corrientes de surgencia movilizan aguas ricas en fósforo, oxihidróxidos y otros nutrientes desde las profundidades hasta las regiones más someras (Birch, 2005). Esta circulación genera un aumento de la productividad biológica y una acumulación sostenida de materia orgánica en los márgenes continentales. En consecuencia, estos procesos saturan los poros del sedimento con fluidos ricos en fósforo que, durante la diagénesis temprana, precipitan CFA (Pufahl & Groat, 2017).

Bajo estas condiciones se produce la fosfatación en diferentes bioclastos (e.g., bivalvos, braquiópodos, coprolitos, foraminíferos, etc.) (Pufahl & Groat, 2017). Sin embargo, estas presentaciones de CFA se encuentran dispersas en los fondos y se conocen como facies “prístinas”, formadas en las zonas de oxígeno mínimo de los sistemas influenciados por corrientes de surgencia (Pufahl, 2003). Procesos hidráulicos, como las tormentas y el oleaje, retrabajan y acumulan estos fragmentos fosfáticos diseminados en capas o lentes con altas concentraciones de P_2O_5 (18-35%) denominadas facies retrabajadas, *tempestitas* o fosforitas *alóctonas* (Föllmi et al., 1992). Tanto la fosfogénesis como el retrabajamiento requieren bajas tasas de sedimentación que permitan la precipitación de CFA y su posterior amalgamamiento y concentración mediante procesos hidráulicos (Pufahl & Groat, 2017).

1.3 FRACCIONAMIENTO DE REE

Las tierras raras (REE) son trazadores geoquímicos importantes porque su fraccionamiento permite identificar fuentes y procesos geológicos, como la fusión parcial, la cristalización y la alteración (Rezaei et al., 2025). En arcos continentales, la fusión de la cuña mantélica produce un enriquecimiento en LREE en las rocas más evolucionadas, ya que son elementos incompatibles que prefieren permanecer en el fundido (Schilling & Winchester, 1967).

En ambientes oceánicos (p. ej., dorsales oceánicos y grandes provincias ígneas, LIPs; por sus siglas en inglés), los patrones N-MORB muestran LREE bajos y HREE altos, una señal típica del manto empobrecido (Davidson et al., 2013; Workman & Hart, 2005). Este predominio de HREE se debe a que los minerales que los retienen, como granate y clinopiroxeno, son escasos

o se consumen durante la fusión parcial del manto, lo que permite que las HREE pasen al estado fundido (Davidson et al., 2013). En las dorsales y LIPs, procesos metasomáticos asociados a la alteración del suelo oceánico liberan HREE (Fowler et al., 2016).

En el océano, la concentración de REE aumenta con la profundidad, con un patrón dominante enriquecido en HREE (Elderfield et al., 1988). Los oxihidróxidos marinos son los principales vectores de REE entre la columna de agua y el fondo (Elderfield et al., 1988), y la surgencia puede movilizar estos vectores hacia los márgenes continentales (Abbott et al., 2019)

En márgenes donde domina el aporte continental, las arcillas y óxidos de Fe-Mn, provenientes de lateritas o de la meteorización de rocas continentales, introducen una señal enriquecida en LREE, lo que tiende a reducir el valor de Y/Ho respecto al agua oceánica (Abbott et al., 2019). Por contraste, el agua oceánica mantiene una firma oceánica con un Y/Ho alto (>44) porque Y se remueve menos eficientemente que las REE en el océano y queda enriquecido frente al Ho; esta diferencia permite distinguir entre el aporte siliciclástico y el dominio oceánico (Baïoumy & Farouk, 2022).

1.4 CONTEXTO GEOLÓGICO

La Cordillera Oriental de Colombia forma parte de la provincia fosfogénica del Tetis Sur; datos estratigráficos y geoquímicos indican la presencia de horizontes fosfáticos con concentraciones de P₂O₅ entre 18 y 35 wt.%, asociados a *cherts* biogénicos y lutitas negras (Föllmi et al., 1992; Terraza, 2019; Martin-Rincón et al., 2022; de la Parra et al., 2024).

Entre las formaciones con fosforitas, destaca la Fm. La Renta del Campaniano (83,6-72,2 Ma; Terraza, 2019; de la Parra et al., 2024). Su base se caracteriza por la aparición de una serie de fosforitas interpretadas como alóctonas o *tempestitas* (Terraza, 2019). La definición de fosforitas alóctonas establece que provienen del reabajamiento de material biogénico y de facies fosfáticas prístinas profundas mediante el oleaje y las tormentas, durante periodos transgresivos con bajas tasas de sedimentación y alta condensación (Föllmi et al., 1992; Pufahl & Groat, 2017).

Otro intervalo de interés es la base de la Fm. Umir, definida en su límite inferior por la discordancia del Campaniano–Maastrichtiano respecto de la Fm. La Renta, sobre esta, se registra una capa conglomerática con clastos fosfáticos, suprayacida, de forma concordante, por paquetes masivos de lodolitas negras fisiles (Maughan et al., 1979; Terraza, 2019).

1.5 GENERALIDADES

1.5.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el mecanismo geológico y la fuente de enriquecimiento en REE en las capas de fosforitas de la Formación La Renta?

1.5.2 HIPÓTESIS

Las fosforitas de la Formación La Renta contienen REE debido a una fuente continental posiblemente relacionada a la disolución de material siliciclástico fino (arcillas) en condiciones reductoras

1.5.3 OBJETIVO

Determinar la fuente y los procesos geológicos que permitieron el enriquecimiento en REE de las fosforitas de la Fm. La Renta y la base de la Fm. Umir en la Quebrada Aguablanca (neoestratotipo de la Fm. La Renta, Lebrija, Santander; Fig. 1).

Los siguientes son los objetivos específicos:

1. Comprender el ambiente de acumulación y la petrogénesis de la Fm. La Renta mediante un levantamiento estratigráfico y un análisis petrográfico de las muestras colectadas. Esto permitirá determinar estructuras de acumulación a escala macro y micro, como también saber los componentes biológicos y aloquímicos de la roca.
2. Cuantificar el contenido de REE y fósforo, y su patrón de distribución mediante análisis químicos (DRX, XRF y ICPMS). Con esto se podrán encontrar correlaciones entre contenido de fósforo y REE, e identificar en qué segmentos de la columna y qué condiciones de acumulación favoreció la precipitación de fósforo.
3. Determinar las condiciones paleoambientales y una posible fuente de las REE mediante proxies geoquímicos reportados en la literatura como Eu/Eu^* , Ce/Ce^* , La/Sm e Y/Ho .
4. Comparar los resultados obtenidos con las fosforitas del Tetis, normalizando los datos geoquímicos al PAAS (*Post-Archean Australian Shale*; 2012) junto con la base de datos de [Baïoumy & Farouk, 2022](#). Para conocer el grado de similitud geoquímica y determinar si es un buen análogo para las condiciones de acumulación de las fosforitas de la Fm. La Renta.

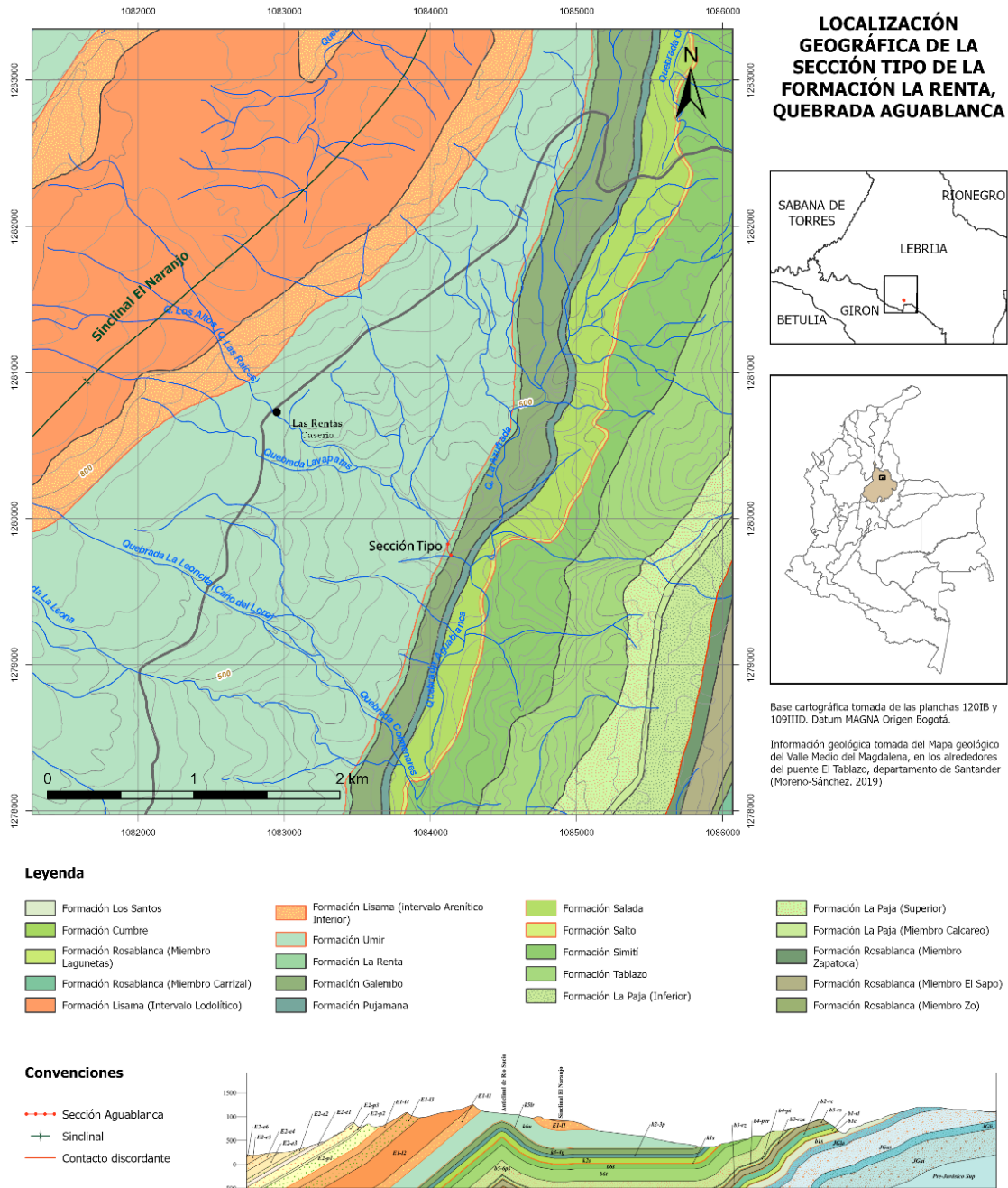


Figura 1. Localización geográfica del neoestratotipo de la Fm. La Renta; Qda. Aguablanca, Lebrija, Santander. Valle Medio del Magdalena (VMM), modificado de Moreno-Sánchez (2019).

2. METODOLOGÍA

2.1 ESTRATIGRAFÍA

Se midieron y describieron 48 metros de la columna estratigráfica en la Qda. Aguablanca, neoestratotipo de la Fm. La Renta (Terraza, 2019). Las mediciones se hicieron con una precisión de 1 cm usando el bastón de Jacob (1,5 m), cinta métrica y brújula (Fig. 1). Se registró cada capa mediante lupa, martillo y tablas de granulometría, y se clasificaron las calizas según

Duhman (1962). Se describió el color, la composición, la textura, las estructuras sedimentarias, el contenido fósil y la geometría de cada capa, siguiendo la metodología propuesta por Prothero & Schwab (2004, p. 5). Posteriormente, se elaboró una columna estratigráfica mediante SDAR (Ortiz et al., 2020), que se correlacionó con la columna estratigráfica de Terraza (2019) y con la calibración cronoestratigráfica de La Parra et al. (2024).

2.2 PETROGRAFÍA

Se recopilaron 8 muestras representativas a lo largo de la columna (Fig. 2). El criterio de selección consistió en coleccionar muestras con fragmentos e intraclastos fosfáticos a lo largo de la Fm. La Renta y la base de la Fm. Umir con el objetivo de identificar la distribución de fósforo y determinar su enriquecimiento en REE. A estas muestras se les realizaron secciones delgadas para un análisis petrográfico siguiendo la metodología de Chayes (1956) y los atlas de clasificación de Scholle et al., (2003).

2.3 DRX-XRF

La composición mineralógica y química fue determinada en el laboratorio de espectrometría del Instituto Colombiano del Petróleo - Ecopetrol S.A. El análisis de DRX se realizó en un equipo Rigaku Smartlab SE, de operación multipropósito, en geometría Bragg-Brentano, con radiación de Cu a 50 kV y 40 mA. Para el análisis XRF se utilizó un equipo convencional NEX-DE, que opera con un tubo de rayos X de Ag a 60 kV y 1 mA, y un detector de deriva de silicio. Las concentraciones minerales se determinaron con un nivel de incertidumbre del 5-2%. Para el DRX-XRF, 10 gramos de muestra fueron triturados sin tratamiento químico; en estos se midieron las concentraciones de minerales mayores, menores y de trazas. Para el análisis de la fracción menor a 2 micras en DRX, 5 gramos de muestra fueron separados y la materia orgánica se eliminó mediante peróxido de hidrógeno.

2.4 ICP-MS

Se realizaron dos análisis (SE02 y SE13) mediante ICP-MS en el laboratorio de ALSminerals. Para la química total se utilizó el instrumento ME-ICP06. Antes del análisis de tierras raras, se registró una pérdida por ignición con el QA-GRA05 a 1000 °C. El análisis de REE se realizó con un ME-MS81, un ICP-MS con fusión de borato de litio especializado en REE. Las concentraciones de los REE fueron normalizadas respecto a PAAS (*Post-Archean Australian Shale*; 2012). Este estándar funciona como una composición “ideal” de una lutita negra durante el Fanerozoico y se utiliza para identificar variaciones en el contenido de REE del océano, permitiendo identificar periodos en los que la composición oceánica experimentó cambios

anómalos en sus concentraciones de REE. Los resultados obtenidos se compararon con datos geoquímicos de fosforitas del Tetis, que están normalizados bajo el mismo estándar (Baïoumy & Farouk, 2022).

3. RESULTADOS

3.1 ESTRATIGRAFÍA

De los 48 metros se describieron 317 capas (Figura 2). El 67,7% (151 capas) corresponde a calizas con textura de *wackestone* a *mudstone*. La sumatoria de los espesores de estas capas es de 32,22 m. Las lodolitas negras se presentan en 99 capas y tienen un espesor acumulado de 7,76 m (16,2%). Las calizas con textura *packstone* (identificadas como *tempestitas*) se presentan en 28 capas, con un espesor acumulado de 5,53 m (11,5%). Además, se identificaron 35 capas de bentonita con un espesor acumulado de 1,13 m (2,35%); una capa conglomerática glauconítica de 1,15 m, correspondiente al 2,4%, y 3 estratos lenticulares de *chert* con un espesor acumulado de 0,22 m (0,5%).

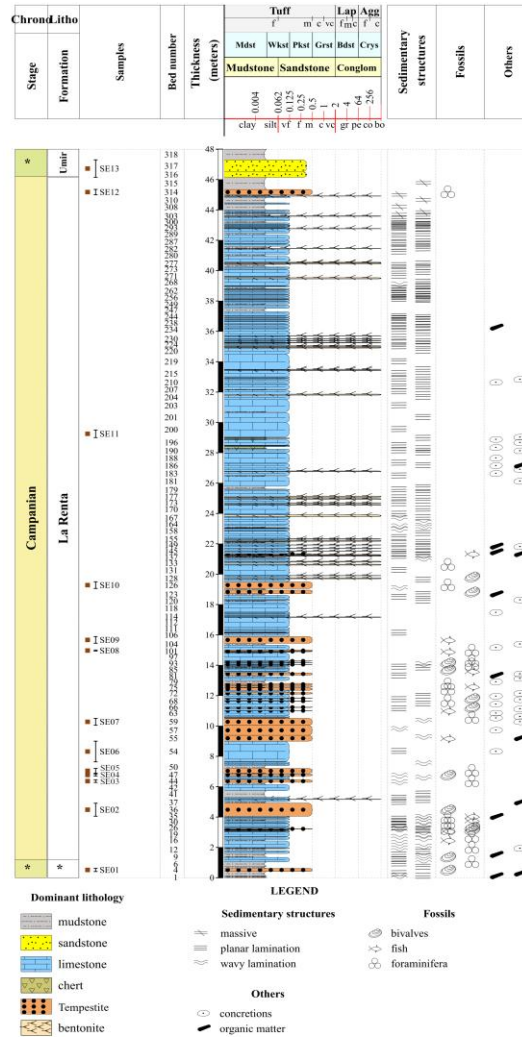


Figura 2. Columna Estratigráfica de la Fm. La Renta y la base de la Fm. Umir; Qda. Aguablanca, municipio de Lebrija, Santander.

El límite inferior de la Fm. La Renta se define según el segmento 9 propuesto por Terraza (2019), que se compone de una intercalación de calizas tipo *wackestone*, de color negro a grisáceo, con calizas fosfáticas de textura *packstone*. Su límite superior, debido a la discordancia Campaniano–Maastrichtiano, se ubica en el tope de la sección levantada (Fig. 2).

La Fm. Umir se ubica a partir del metro 46,2 de la columna estratigráfica. Su límite inferior se define por la discordancia entre el Campaniano-Maastrichtiano y la Fm. La Renta (Terraza; 2019). En su base se observa una capa conglomerática glauconítica con clastos fosfáticos heredados de la Fm. La Renta (muestra SE13), suprayacida concordantemente por paquetes masivos de lodolitas negras fisiles (Fig. 2).

De acuerdo con nuestra columna (Fig. 2), la Fm. La Renta, se caracteriza por cuatro litologías dominantes:

- (1) **Calizas tipo *wackestone* a *mudstone* (F1):** de color negro grisáceo a gris con laminación plano-paralela y variaciones de color marcadas por láminas de foraminíferos. Presentan bitumen diseminado y forman estratos plano-tabulares.
- (2) **Lodolitas calcáreas negras fisiles (F2):** con laminación plano-paralela y presencia de bitumen diseminado, forman estratos plano-tabulares. Presentan un mayor grado de meteorización y una menor competencia que la litología (F1). Estas dos litologías presentan contactos netos entre sí. Presentan foraminíferos silicificados localmente.
- (3) **Calizas fosfáticas masivas, con textura de *packstone* a *grainstone* (F3):** de tamaño arena fina a media, de color gris y en contacto neto con las litologías anteriores, que fosilizan en su base una superficie de erosión. Presentan bioclastos fosfatizados de bivalvos, briozoos, huesos y foraminíferos con una pátina azul rey, embebidos en una matriz de micrita o esparita. Generalmente forman estratos plano-tabulares, pero también aparecen de forma lenticular en nódulos de entre 10 a 20 cm (Fig.3A).
- (4) ***Chert* (F4):** de color negro, con fractura concoidea, formando capas lenticulares en la litología (F1). Compuesto por foraminíferos planctónicos silicificados, de tamaño entre arena fina y limo.

El contacto inferior de las calizas fosfáticas (F3) siempre es neto, conservando una superficie de erosión fosilizada y registrando la aparición de concreciones calcáreas de hasta 40 cm de diámetro. En estos contactos es común encontrar un patrón de estratificación cruzada hamaca, donde los lentes de las calizas fosfáticas (F3) y las concreciones calcáreas están embebidas en lodo calcáreo negro (F2) (Fig. 3B).

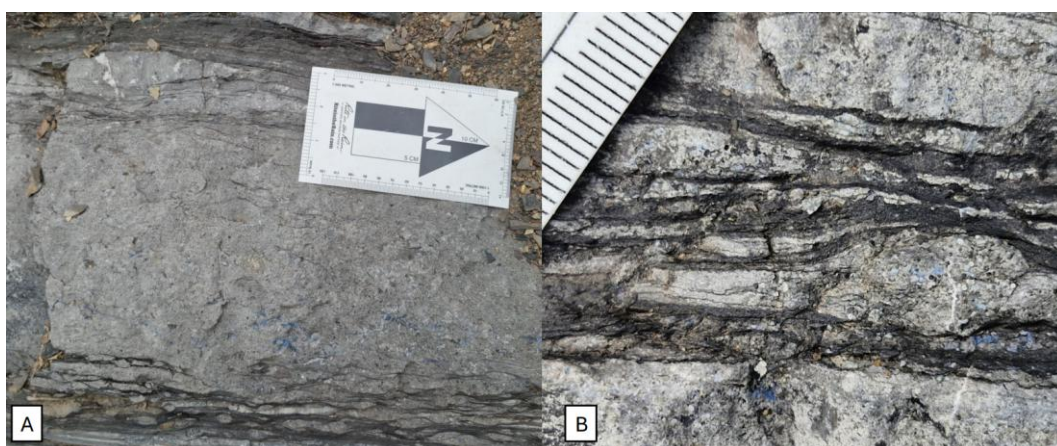


Figura 3. *A.* Calizas fosfáticas (F3). Se observan fragmentos fosfáticos con patina azul. *B.* Lente de caliza fosfática (F3) con fragmentos fosfáticos, embebido en lodo negro calcáreo con laminación cruzada tipo hamaca.

El patrón estratigráfico de los primeros 10 metros de la columna se caracteriza por un orden cíclico, generalmente incompleto, que comienza con calizas de textura *wackestone* (F1), lodolitas negras (F2) y calizas fosfáticas (F3), que, en su base, presentan superficies de erosión. Posteriormente, reaparecen las calizas (F1), repitiendo la secuencia (Fig.4A). Las calizas fosfáticas (F3) suelen presentar concreciones en su base (Fig.4B) y, en este tramo, alcanzan sus mayores espesores, que varían entre 50 cm y 1,2 m.

Hacia los 10 metros de la columna el espesor de las calizas fosfáticas (F3) se reduce a ordenes de 10 a 20 centímetros (Fig. 4C) y las calizas (F1) generalmente de textura *wackestone*, empiezan a presentar silicificación marcada por lentes negros discontinuos de *chert* (Fig. 4D), y en algunos casos, presentan textura *mudstone* que se diferencian de las lodolitas negras por su falta de fisibilidad.

Hacia los 20 metros aparecen calizas fosfáticas (F3) de espesores entre 40 a 70 cm (Anexo 1). En este tramo, empiezan a dominar calizas de textura *mudstone* grisáceas (F1). También aparecen bentonitas de espesores variables entre 1 y 5 cm, caracterizadas por una alta meteorización y una pátina rojiza a naranja (Fig. 4E). Además, se observan capas lenticulares silíceas y concreciones calcáreas/silíceas de hasta 1,2 m de diámetro (Fig. 4EF).

A partir de los 44 metros, la frecuencia de las calizas (F1) empieza a disminuir y predominan las lodolitas negras calcáreas (F2). También aparece la última caliza fosfática (F3), que presenta características distintas del resto, como la presencia de pirita y concentraciones más altas de bitumen diseminado (SE12). Finalmente, se identifica la discordancia Campaniano-Maastrichtiano entre las formaciones La Renta y Umir (Fig. 4G) sobre la cual yace una capa conglomerática glauconítica con intraclastos fosfáticos (Fig. 4H), de contacto concordante en su tope, subyaciendo a estratos de lodolitas negras fisiles.

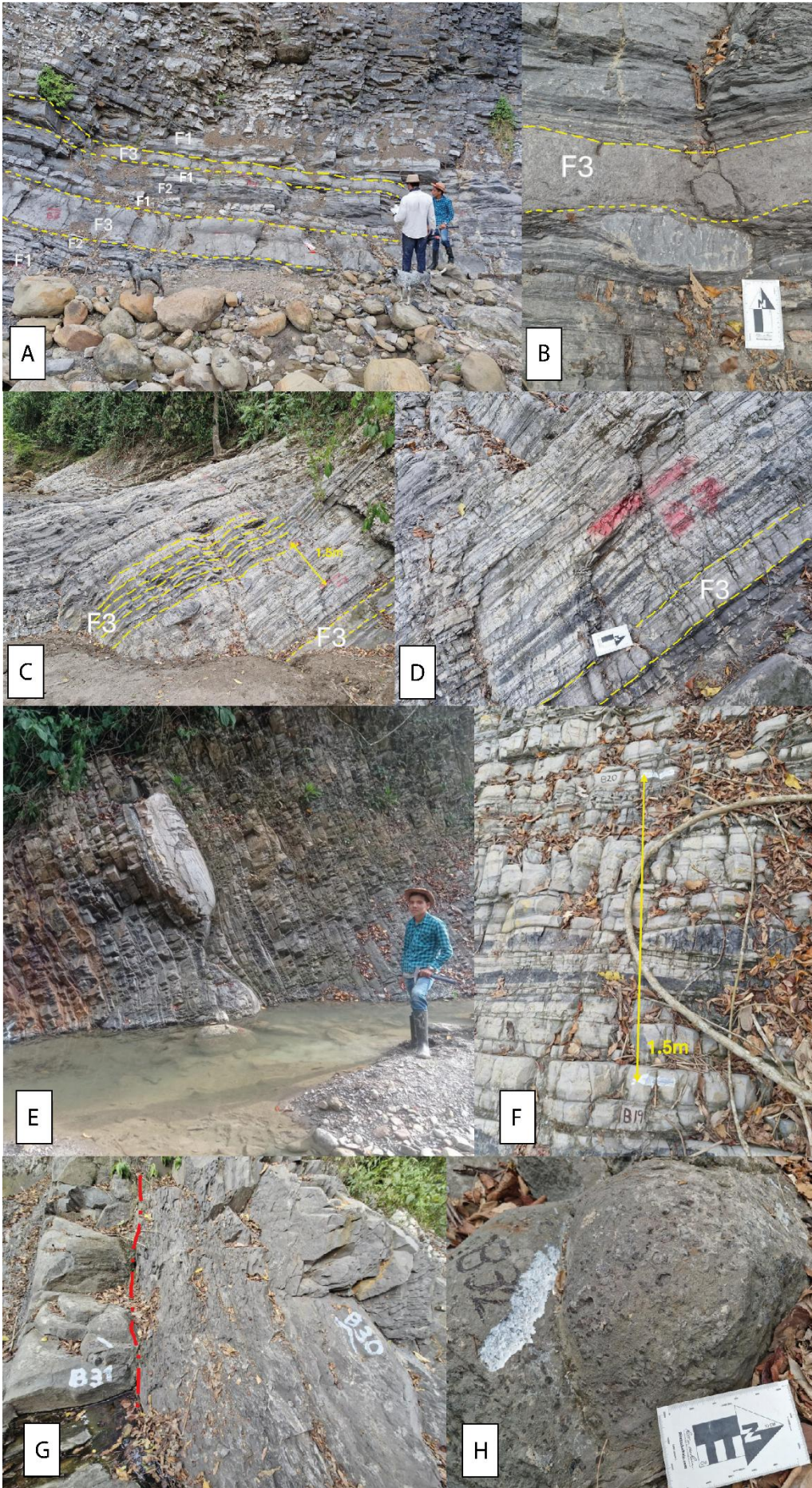


Figura 4. AB. Afloramiento Sección Aguablanca entre los metros estratigráficos 4,5-7m. Escala: hombre de blanco (1,80m). **A.** sucesión ideal de la secuencia descrita (F1=Calizas wackestone, F2=Lodolitas negras, F3=Calizas fosfáticas) **B.** Concreción calcárea entre lente de calizas wackestone y calizas fosfáticas. **C.** Entre los metros 10-13,5, las calizas fosfáticas (F3) empiezan a aparecer en estratos delgados del orden de 10 a 20 cm **D.** Silificación de las calizas wackestone(F1) por lentes discontinuos de chert negro. **EF** Segmento estratigráfico entre el metro 28,5 y 30. **E.** Concreción silícea, obsérvese a su izquierda la presencia de bentonitas y su característica meteorización, escala 1,6m. **F.** Aparición de horizontes lenticulares de chert negro intercalando con las calizas wackestone (F1). **G.** Discordancia Campaniano-Maastrichtiano entre la Fm. La Renta y la Fm. Umir **H.** Capa conglomerática glauconítica con clastos fosfáticos.

3.2 PETROGRAFÍA

Las muestras SE01, SE02, SE03, SE04, SE07, SE09 y SE12 ([Anexo 2](#)) se clasifican como calizas tipo *packstone* ([Dunham, 1962](#)) y se caracterizan por bioclastos soportados en una matriz de cemento y lodo calcáreo; en ocasiones presentan cemento silíceo localmente. Los aloquímicos más comunes son foraminíferos bentónicos, planctónicos, fragmentos óseos, restos de algas y briozoos. Hacia el tope de la columna, entre las muestras SE01 y SE09, el porcentaje de foraminíferos planctónicos disminuye del 16% al 5% y el de bentónicos aumenta del 19,5% al 27,5%. Además, se identifican variaciones en los contenidos de materia orgánica. Las calizas *packstone* presentan una selección pobre-moderada. Los bioclastos varían desde arena fina hasta gránulos. La fábrica es generalmente masiva; sin embargo, en SE02 se observa una gradación normal. En SE07, SE09 y SE12 se observa una laminación ondulosa y cruzada, marcada por bandas de foraminíferos. La silificación es notable en las muestras SE03 y SE09 ($\approx 19\%$).

SE13 corresponde a un conglomerado glauconítico; su armazón está compuesto principalmente por granos de glauconita y clastos fosfáticos retrabajados (79%), cementados por cemento calcáreo y silíceo (19%). Los componentes accesorios incluyen foraminíferos bentónicos y planctónicos (2%). La selección textural es pobre, los clastos varían desde arena fina hasta gránulos. Los granos fosfáticos muestran evidencias de retrabajo; entre ellos se pueden identificar restos de bioclastos, mientras que otros están compuestos enteramente por lodo fosfático. También se evidencian clastos de tamaño de arena media a gránulo de pirita. Se observan dos tipos de glauconita: (1) angular, sin alteración, autigénica y (2) alterada, subredondeada, porosa, con variaciones de color en nicoles cruzados (XPL), de verde a azul, e inclusiones de pirita.

3.3 DRX-XRF

3.3.1 MINERALOGÍA

Se presenta la mineralogía de las 8 muestras colectadas a lo largo de la sección mediante DRX (Anexo 3). Los resultados indican una alta proporción de calcita y cuarzo, sin diferencias mineralógicas entre las muestras SE01 y SE09. En la muestra SE12 se registran valores más altos de filosilicatos, y en la SE13 se destaca la aparición de concentraciones relevantes de pirita (10%), cuarzo (20%) y dolomita (19%). En cuanto a la fracción fina, se observa la presencia de illitas y caolinita en todas las muestras, con valores inferiores al 5%, excepto en la SE12, donde no están presentes. Solo se detectaron cloritas en las SE03, SE07 y SE09, con concentraciones inferiores al 2%.

3.3.2 CONCENTRACIONES DE REE Y FÓSFORO

Del XRF, que permitió identificar algunos REE, se obtuvieron las concentraciones de Y, La, Ce, Dy, Yb y de fósforo. Las muestras correspondientes a fosforitas SE02, SE03 y SE04 (% $P_2O_5 > 18\%$) (Anexo 4) presentan un contenido medio de fósforo de 102700,0 ppm y de Y+La+Ce+Dy+Yb de 251,63 ppm. En general, los datos muestran una relación entre el contenido de fósforo y de las REE identificadas, aunque la muestra SE13 se desvía de esta relación, presentando una baja concentración de fósforo (54000 ppm) y un alto contenido de las tierras raras detectadas (706,7 ppm).

3.3.3 ELEMENTOS MAYORES

La mayoría de las muestras presentan como óxido dominante el CaO, seguido del SiO_2 y de contenidos variables de P_2O_5 . Se observa una correlación positiva entre el contenido de CaO ($R^2 = 0,61$) y el de P_2O_5 . Por otro lado, se observan correlaciones negativas entre el contenido de fósforo y SiO_2 ($R = -0,71$), Al_2O_3 ($R = -0,20$), TiO_2 ($R = -0,18$) (Anexo 5).

3.3.4 ELEMENTOS TRAZA

Domina Sr ($\bar{x} \approx 1792,1$ ppm) en la mayoría de las muestras. Se observan correlaciones positivas fuertes ($R > 0,6$) entre el contenido de fósforo y las concentraciones de elementos como Sr, Ba, Y, Zr (. 14(Anexo 6).

3.4 ICP-MS

3.4.1 ELEMENTOS MAYORES

La muestra SE02 (Fm. La Renta) presenta una composición en la que dominan el CaO (45,90%), P_2O_5 (22,70%) y SiO_2 (13,80%). Por otro lado, las concentraciones de Al_2O_3 , Fe_2O_3 ,

MgO, Na₂O y K₂O son de trazas; el TiO₂ presenta valores insignificantes (0,02%) y el MnO está por debajo del límite de detección (<0,01%) (Tabla 1).

La muestra SE13 (Fm. Umir) está dominada por CaO (36,40 %), P₂O₅ (16,10 %) y SiO₂ (14,95 %). Presenta contenidos intermedios de Fe₂O₃ (5,49 %), MgO (4,17 %) y Al₂O₃ (2,79 %); los alcalinos son menores (K₂O 1,24 %, Na₂O 0,12 %), y los óxidos de trazas son TiO₂ 0,09 % y MnO 0,02 %. En comparación con SE02, mantiene una composición fosfática rica en Ca y P, pero exhibe una mayor fracción detrítica/ferromagnesiana (Fe₂O₃, MgO, Al₂O₃ y TiO₂ más altas) y un mayor contenido de potasio (K₂O) (Tabla 1).

Tabla 1. Composición de los elementos mayores de las muestras. Elementos principales en porcentaje de peso (% wt). PPI = Pérdida por ignición.

Muestra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PPI	Total
SE02	13,80	0,66	0,02	0,29	0,12	0,01	45,90	0,09	0,07	22,70	14,80	98,71
SE13	14,95	2,79	0,09	5,49	4,17	0,02	36,4	0,12	1,24	16,1	16,6	98,14

3.4.2 ELEMENTOS TRAZA

En la muestra SE02 (Fm. La Renta), el Sr tiene la concentración más alta de los elementos trazas (1540 ppm); le siguen el Ba (771 ppm), el V (77 ppm) y el Cr (72 ppm). El U presenta concentraciones moderadas (66,6 ppm) y el Th, 9,64 ppm. El resto de los elementos trazas, como Zr (14 ppm), Rb (3,8 ppm), Ga (1,4 ppm), Nb (0,48 ppm), Hf (0,27 ppm) y Cs (0,16 ppm), presentan concentraciones menores (Tabla 2).

En la SE13 (Fm. Umir), los elementos más abundantes son Sr = 833 ppm, Cr = 297 ppm, V = 122 ppm, U = 52,9 ppm y Ba = 255 ppm. El Rb = 45 ppm y el Zr = 37 ppm son moderados; el Th = 11,1 ppm, el Ga = 6,4 ppm, el Nb = 1,5 ppm, el Hf = 0,94 ppm y el Cs = 1,31 ppm son trazas. Respecto a SE02, presenta concentraciones menores de Sr y Ba, pero mayores de Cr, V, Zr, Ga y Rb (Tabla 2).

Tabla 2. Composición de elementos trazas en muestras seleccionadas. Elementos trazas en ppm.

Muestra	Ba	Cr	Cs	Ga	Hf	Nb	Rb	Sr	V	Zr	Th	U
SE02	771	72	0,16	1,4	0,27	0,48	3,8	1540	77	14	9,64	66,6
SE13	255	297	1,31	6,4	0,94	1,5	45	833	122	37	11,1	52,9

3.4.3 ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (REE)

La concentración total de REE (Σ REE+Y) en SE02 (Fm. La Renta) es de 488,44 ppm. En los REE ligeros (LREE) el La presenta la mayor concentración (86,1 ppm), seguido por Ce (65,8 ppm), Nd (57,4 ppm), Pr (13,35 ppm), Gd (13,65 ppm) y Sm (11,40 ppm). El Eu presenta concentraciones menores (2,49 ppm). Los REE pesados (HREE) presentan concentraciones variables, con Y (197,0 ppm), Dy (13,35 ppm) y Er (10,60 ppm) como los más abundantes, seguidos por Yb (9,10 ppm), Ho (3,38 ppm), Tb (1,97 ppm), Tm (1,52 ppm) y Lu (1,33 ppm) (Tabla 3). SE02 exhibe un patrón REE normalizado a PAAS con una inclinación hacia las HREE $(La/Yb)_N = 0,64$. $(La/Yb)_N = 0,64$ (Fig. 5), una anomalía negativa de cerio $(Ce/Ce^* = 0,46)$, la ausencia de una anomalía positiva de europio $(Eu/Eu^* = 0,59)$ y una relación $Y/Ho = 58,3$.

La concentración total de REE (Σ REE+Y) en la muestra SE13 (Fm. Umir) es de 697,6 ppm. En los LREE el La presenta la mayor concentración (118 ppm), seguido por Ce (120 ppm), Nd (87,5 ppm), Pr (21,4 ppm), Gd (23,5 ppm) y Sm (19,5 ppm). El Eu presenta concentraciones menores (4,34 ppm; Tabla 3). Los REE pesados (HREE) presentan concentraciones variables, con Y (241 ppm), Dy (22,2 ppm) y Er (15,15 ppm) como los más abundantes, seguidos por Yb (12,45 ppm), Ho (5,14 ppm), Tb (3,36 ppm), Tm (2,00 ppm) y Lu (2,06 ppm). SE13 exhibe un patrón REE normalizado a PAAS (2012) con inclinación hacia las HREE $(La/Yb)_N=0,64$ una anomalía negativa de cerio $(Ce/Ce^*=0,57)$, sin anomalía significativa de europio $Eu/Eu^*=1,08$ y una relación $Y/Ho = 46,9$

Tabla 3. Composición de elementos de tierras raras (REE) en muestras seleccionadas. Elementos de tierras raras (REE) en partes por millón (ppm). Σ REE = Suma de los elementos de las tierras raras.

Muestra	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE
SE02	86,1	65,8	13,35	57,4	11,40	2,49	13,65	1,97	13,35	3,38	10,60	1,52	9,10	1,33	197,0	488,44
SE013	118	120	21,4	87,5	19,5	4,34	23,5	3,36	22,2	5,14	15,15	2	12,45	2,06	241	697,6

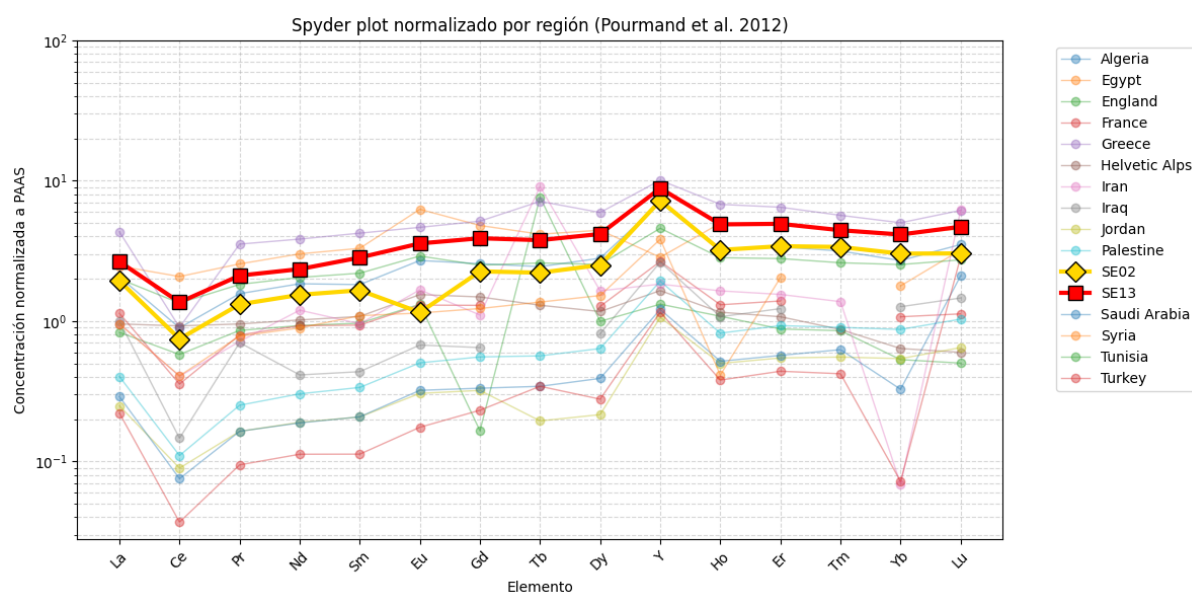


Figura 5. Comparación de spiderplot SE02 - SE13 respecto al resto de fosforitas del Tetis, con base en Baioumy & Farouk (2022). Todos los valores están normalizados con respecto a PAAS (Pourmand et al., 2012).

4. DISCUSIÓN

4.1 AMBIENTE DE ACUMULACIÓN DE LA FM. LA RENTA

El análisis estratigráfico y petrográfico demuestra que la Fm. La Renta está compuesta por intercalaciones de calizas *mudstone-wackestone* con laminación fina, marcada por bandas de foraminíferos, y de lodolitas negras con estratificación plano-paralela. Ambas litologías presentan un alto contenido de materia orgánica, lo que, junto con la fábrica laminada y la escasa bioturbación, sugiere: un ambiente de acumulación de baja energía, de baja pendiente y condiciones subóxicas-anóxicas en la interfaz sedimento-agua que permitieron la preservación orgánica (Terraza, 2019).

La textura fina y la ausencia de estructuras de alta energía en las litologías predominantes (F1 y F2) favorecen una ubicación distal respecto de la línea de costa. En este sentido, Terraza (2019) propone para la Fm. La Renta un ambiente de rampa media a distal, con una inclinación aproximada de 1 grado. Además, las características batimétricas interpretadas para esta rampa sugieren que la acumulación de sedimentos se produjo en cinturones continuos, siguiendo las curvas de profundidad.

Respecto a las concreciones calcáreas, diversos estudios han comprobado que estas se forman durante periodos estratigráficos condensados, lo que las relaciona genéticamente con periodos

de bajo aporte sedimentario y con un aumento del nivel del mar (Grimm, 2000; Wetzel and Allia, 2000; Pufahl et al., 2003).

4.2 PETROGÉNESIS DE LAS FOSFORITAS DE LA FM. LA RENTA

Las calizas con textura *packstone* ricas en fosfatos (F3) presentan: contactos erosivos con laminación cruzada tipo hamaca, gradación normal, fragmentos de bioclastos re TRABAJADOS, decantación de granos finos en los contactos y asociación con concreciones en su base. Estas características, en el contexto de una rampa homoclinal de bajo ángulo, con suficiente espacio para permitir una acumulación plano-paralela y condiciones de baja energía, permiten interpretar su origen como resultado de eventos de tormenta (*tempestitas*) (Föllmi et al., 1992; Pufahl et al., 2003).

El efecto de los eventos de tormenta sobre el lecho de acumulación puede explicarse por las fluctuaciones del nivel relativo del mar, que, al modificar la posición del fondo respecto al campo de acción de las olas de tormenta (*storm-wave base level*), incrementaron la energía local y promovieron la granulación y la selección de los bioclastos. Fenómenos similares se han observado en ambientes análogos del Campaniano en el Norte de África, donde la aparición de estas facies fosfáticas *alóctonas* se asocia con bajas tasas de sedimentación y con periodos transgresivos (Baioumy & Tada, 2005; Pufahl et al., 2003). El espesor de las tempestitas está controlado por la frecuencia e intensidad de los eventos de tormenta; espesores elevados podrían correlacionarse con eventos catastróficos, como huracanes, o con temporadas en las que las tormentas son frecuentes y se amalgaman espesores considerables (Pufahl & Groat, 2017).

En un ambiente de este tipo, con una geometría tan plana, resulta inviable proponer flujos de gravedad, como turbiditas, ya que ni la literatura ni los datos estratigráficos y paleogeográficos evidencian la presencia de un quiebre de plataforma cercano al espacio donde se acumuló la Fm. La Renta, lo que indica un origen asociado a las tormentas.

Como observó Terraza (2019), no se evidencian facies fosfáticas prístinas en la Qda. Aguablanca, las cuales se caracterizan por su contenido de lodolitas ricas en fósforo. Este tipo de facies es necesario para la petrogénesis de las fosforitas alóctonas y usualmente se ubica en la parte más distal de la rampa, en la zona de oxígeno mínimo (Pufahl et al., 2003). Lo anterior permite plantear dos hipótesis: (1) las facies prístinas fueron re TRABAJADAS hasta no conservarse o (2) debido a la geometría plana de la rampa, las facies prístinas se ubicarían en la parte más

distal del mar de la Luna, por lo que podrían encontrarse recubiertas por sedimentos cenozoicos en el VMM. Por otro lado, los resultados obtenidos en el XRF indican que no todas las tempestitas, alcanzan las concentraciones de fósforo suficientes ($\% \text{P}_2\text{O}_5 > 18\%$) para ser denominadas fosforitas.

Lo anterior indica que, aunque el fenómeno de tormentas fue recurrente, pudieron ocurrir dos escenarios: (1) las tormentas no tuvieron la suficiente intensidad o frecuencia para retrabajar y movilizar sedimento fosfático en cantidades suficientes o (2) las cantidades de sedimento fosfático no fueron suficientes. El último escenario podría sugerir que hubo variaciones a lo largo del tiempo en el frente o en la intensidad de las corrientes de surgencia, lo que explica la naturaleza discontinua de las fosforitas a lo largo de la Cordillera Oriental.

Con base a las evidencias presentadas, la generación de tempestitas ricas en fosfatos requiere de la convergencia de varios factores: (1) bajas tasas de sedimentación que favorezcan el retrabajamiento, la concentración de bioclastos y precipitación autigénica de CFA; (2) La presencia de facies prístinas y en consecuencia, la existencia de corrientes de surgencia; (3) Tormentas junto a condiciones de poros subóxicos que permitan la concentración y conservación de la materia orgánica y del fósforo previo a la precipitación de CFA; y (4) una alta productividad biológica como fábrica de bioclastos ricos en fósforo.

4.3 IMPLICACIONES REGIONALES

La sucesión estratigráfica ideal propuesta por Föllmi et al. (1992) para el Cretácico Tardío no se reconoce en la Fm. La Renta, lo cual se explica por su posición más distal y profunda respecto al Grupo Guadalupe en el mar de La Luna (Carvajal-Torres et al., 2022). En este sentido, mientras que Föllmi et al. (1992) describen facies fosfáticas asociadas a siliciclásticos, la Fm. La Renta registra fosfatos vinculados a carbonatos. Esta diferencia es coherente con los modelos de sedimentación en mares epicontinentales influenciados por corrientes de surgencia oceánica (Anexo 7.; Pufahl & Groat, 2017).

Por lo tanto, al integrar las distintas expresiones de facies fosfáticas documentadas con los modelos previamente expuestos, es posible construir un esquema regional de la sedimentación durante el Cretácico Tardío. En este contexto, las corrientes de surgencia oceánica, enriquecidas en fósforo, promovieron explosiones de vida en los mares epicontinentales, lo que condujo a la formación de fondos subóxicos bajo condiciones de circulación restringida y de elevada evaporación (Anexo 7).

En los sectores más distales, el fósforo incorporado por la biota fue precipitado como CFA durante la diagénesis temprana y, posteriormente, retrabajado por tormentas y acumulado hacia el continente, originando tempestitas fosfáticas. Por el contrario, en las áreas más próximas, el mecanismo fue análogo, aunque con un aporte siliciclástico mayor, lo que dio lugar a las facies descritas por Föllmi et al. (1992). Estas, al estar más expuestas a la acción de las tormentas y del oleaje, configuran la sucesión métrica ideal propuesta por dichos autores.

4.4 GEOQUÍMICA

Según los datos presentados, se observan varias relaciones entre los elementos mayores, en las que el contenido de fósforo se asocia con altas concentraciones de CaO. Hay relaciones inversamente proporcionales con el SiO₂, TiO₂ y Al₂O₃, lo que sugiere que el componente autigénico (P₂O₅ + CaO) disminuye respecto al terrígeno, lo que indica que la composición de las muestras es dinámica oceánica/marina y no de aporte terrígeno (Ahmed et al., 2022).

Entre los elementos menores, los altos contenidos de P se correlacionan con concentraciones más elevadas de Y, Zr, Sr y Ba. Según Ahmed et al. (2022), la relación positiva entre el Sr y el Ba con el fósforo se explica por su incorporación directa en el CFA desde el agua durante la precipitación temprana. Estas concentraciones también reflejan la actividad biológica que favorece su absorción por parte de microorganismos, lo que, según Ahmed et al. (2022), corresponde a una génesis asociada a la sedimentación marina normal. La única muestra que no sigue esta tendencia es SE13 (Fm. Umir). Su comportamiento anómalo sugiere que no corresponde a una sedimentación marina ni refleja una influencia biogénica significativa.

4.4 REE

Mediante el análisis de XRF se observa que el contenido de REE en las muestras presenta una correlación positiva con el contenido de fósforo ($R = 0,910$; Anexo 8), lo cual se debe a que el CFA actúa como una trampa geoquímica que retiene los REE disueltos (Bau et al., 1995). Sin embargo, uno de los principales controles sobre el contenido de REE es la disponibilidad de estos elementos para su captura por el CFA (Emsbo et al., 2015). En el caso específico de la Fm. La Renta, los eventos de tormenta que retrabajaron la mayor cantidad de sedimento fosfático coincidieron en tiempo con cantidades considerables de REE disueltos.

Dos de los resultados del ICP-MS en SE02 (Fm. La Renta) muestran un contenido total de REE+Y ≈ 500 ppm y un patrón enriquecido en HREE, con una concentración particular y anómala de Y en comparación con el resto de las fosforitas del Tetis (Baïoumy & Farouk,

2022). Tiene una concentración de REE+Y mayor al 85% de la de fosforitas del Tetis y se ubica en el percentil 92% en contenido de Y.

Por otro lado, SE13 (Fm. Umir) presenta un contenido total de REE+Y \approx 700 ppm y un patrón enriquecido en HREE, con una concentración particular y anómala de Y, en comparación con el resto de las fosforitas del Tetis (Baioumy & Farouk, 2022). La muestra SE13 tiene una concentración de REE +Y superior al 90% de las fosforitas del Tetis y se ubica en el percentil 95% en contenido de Y.

4.5 CONDICIONES PALEOAMBIENTALES

4.5.1 FM. LA RENTA

Las relaciones geoquímicas de SE02 (Fm. La Renta) sugieren un control oceánico–diagenético con un bajo aporte siliciclástico. El sesgo hacia HREE $La/YbN \approx 0,64$ y $Y/Ho = 58,3$ son consistentes con una señal semejante al agua de mar. La anomalía negativa de $Ce/Ce^* = 0,46$ indica una columna de agua oxigenada en el momento de la captura por CFA; el $Eu/Eu^* = 0,59$ (negativo) es coherente con una señal oceánica primaria (Baioumy & Farouk, 2022).

El alto contenido de materia orgánica no exige anoxia de fondo: se explica por la alta productividad y el sepultamiento rápido, con poros subóxicos que favorecen el reciclaje de P y la fijación temprana en CFA. En conjunto, los patrones de los elementos mayores/traza y de los REE en la Fm. La Renta responde a: (i) la captura en la columna de agua de fases portadoras de REE; (ii) la liberación en poros reductores; y (iii) la fijación en CFA durante la diagénesis temprana. SE02 se ubica en el campo marino de los diagramas comparativos de Baioumy & Farouk (2022) (Fig. 6) con un REE+Y relativamente alto (487 ppm).

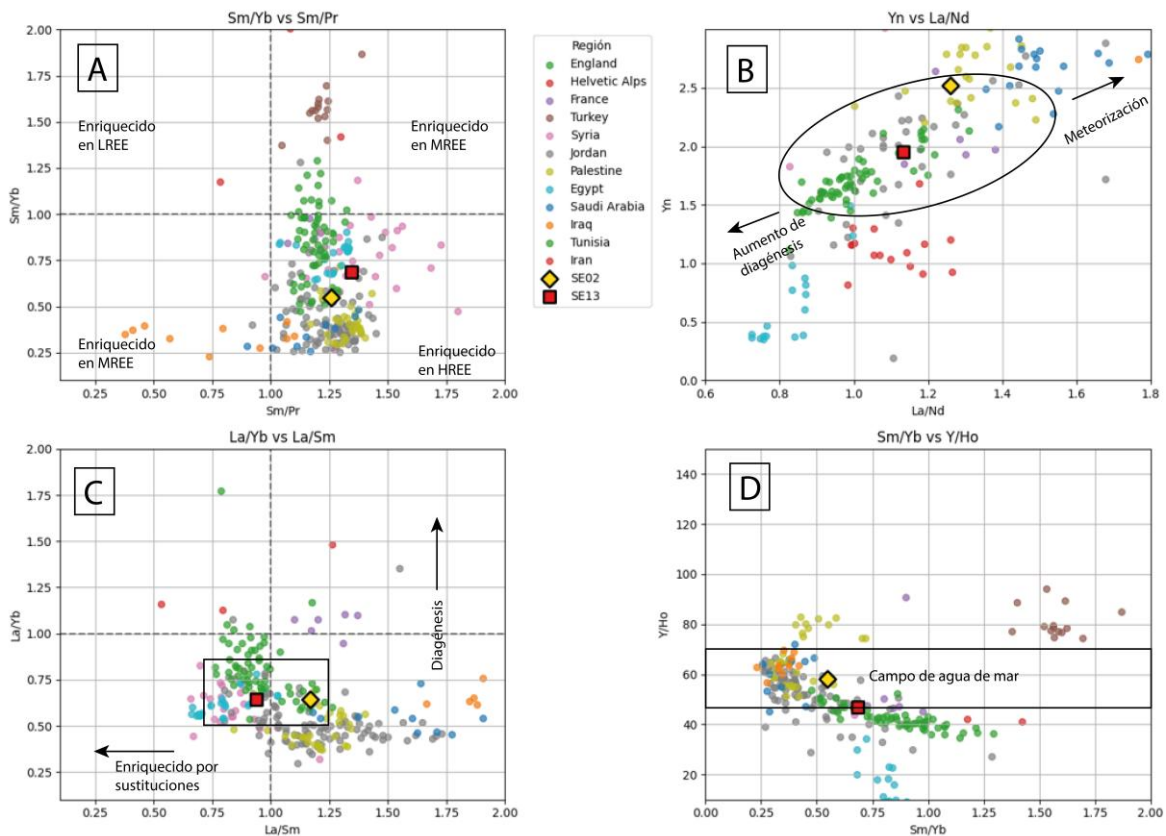


Figura 6. Gráficos bivariados de relaciones REE, Base de datos recuperada de [Baioumy & Farouk \(2022\)](#) **A.** Relación Sm/Yb vs Sm/Pr, **B.** Y_N vs La/Nd **C.** La/Yb vs La/Sm **D.** Sm/Yb vs Y/Ho.

4.5.2 FM. UMIR

La muestra SE13 preserva un patrón enriquecido en HREE (La/Yb) con $N \approx 0,64$, compatible con un control oceánico–diagenético heredado de clastos fosfáticos retrabajados de la Fm. La Renta, pero con un mayor aporte siliciclástico. La anomalía negativa de $Ce/Ce^* \approx 0,57$ sugiere una columna de agua oxigenada al momento de la acumulación, mientras que la pirita indica poros reductores.

Según [Baioumy & Farouk \(2022\)](#) y [Zhang et al. \(2021\)](#), el $Eu/Eu^* > 1$ en fosforitas retrabajadas indica sobreimpresión de retrabajo en ambientes de acumulación más reductores. En este escenario, el $Eu/Eu^* \approx 1,08$ de SE13 es consistente con un posterior retrabajo y una acumulación en un fondo más reductor (sin implicar la química de la columna de agua). El $Y/Ho \approx 46,9$ menor que en la Fm. La Renta, pero aún dentro del rango marino, junto con Fe_2O_3 , MgO , Al_2O_3 y TiO_2 más altos, y $Cr = 297$ ppm y $V = 122$ ppm, respaldan una señal sobreimpuesta por una mayor mezcla terrígena y retrabajo, superpuesta a la señal primaria oceánico–diagenética heredada de la Fm. La Renta.

4.6 CAPTURA DE REE EN LA FM. UMIR

La muestra SE13 contiene glauconita (autigénica y retrabajada), dolomita, pirita y clastos fosfáticos. Geoquímicamente está enriquecida en $\Sigma\text{REE}+\text{Y} \approx 700$ ppm, con $\text{Y}/\text{Ho} \approx 46,9$ (menor que en la Fm. La Renta, $\text{Y}/\text{Ho} \approx 58,3$) y una anomalía atenuada de Ce/Ce^* ($\approx 0,57$), similar a la de la Fm. La Renta ($\approx 0,46$) carece de la anomalía negativa de Eu/Eu^* ($\approx 1,08$) de la Fm. La Renta ($\approx 0,59$) (Fig. 6). Además, los clastos fosfáticos son texturalmente heterogéneos: mezclan tamaños entre gránulo y arena fina y presentan angulosidad de subredondeado a subangular.

La sucesión de glauconita \rightarrow CFA \rightarrow pirita \rightarrow dolomita (abreviado por sus siglas, GCPD) es común y única en fosforitas (Glenn, 1990; Glenn & Arthur, 1988). Esta sucesión indica fondos subóxicos con baja productividad biológica, un mayor aporte siliciclástico por lateritas ricas en Fe y una surgencia más débil/estacional que en las facies alóctonas (Glenn & Arthur, 1988; Jarvis et al., 1994).

En este ambiente, las bacterias oxidantes de azufre (e.g. *Beggiatoa*, *Thioploca*, *Thiomargarita*) (Reimers et al., 1990; Bailey et al., 2013), y oxihidróxidos, capturan y reprecipitan CFA durante la diagénesis temprana (Jarvis et al., 1994). En un ciclo continuo de oxidación en la interfaz sedimento-agua y reducción en los poros subóxicos/anóxicos del fondo; catalizando la formación de otros minerales autigénicos como la glauconita, la pirita y la dolomita; dotando la secuencia mineral (glauconita \rightarrow CFA \rightarrow pirita \rightarrow dolomita) de una estratificación de menor a mayor profundidad (Jarvis et al., 1994).

En el conglomerado basal de la Fm. Umir, esa secuencia no aparece: no hay estructuras sedimentarias tabulares y los minerales están embebidos de forma caótica en una matriz de glauconita autigénica no porosa, sin evidencias de retrabajo. Sin embargo, se evidencia la presencia de glauconitas retrabajadas, porosas y con inclusiones de pirita.

La falta de estratificación y la presencia de dos poblaciones de glauconita sugieren que el depósito corresponde a clastos erosionados de la secuencia estratificada GCPD original, que fue retrabajada y acumulada en lentes sobre la discordancia que pone en contacto la Fm. La Renta con la Fm. Umir. Además, los clastos fosfáticos, algunos con núcleos compuestos por bioclastos y otros por lodo fosfático, podrían pertenecer tanto a la Fm. La Renta como fosfatos precipitados durante la sucesión mineral GCPD, explicando la sobreimpresión de la señal geoquímica oceánico-diagénica (Fig. 7).

En síntesis, la sucesión posterior registró los cambios paleoambientales en el fondo de acumulación de la Fm. La Renta, hacia un fondo subóxico con baja productividad biológica; mayor aporte continental de Fe/arcillas; una surgencia más débil/estacional y un segundo evento fosfogénico, fue erosionada. Lo que le sobrevive son lentes retrabajados, acumulados sobre la superficie de erosión, donde se formaron glauconita autigénica y cuarzo microcristalino cementante. Lo cual es consistente con las relaciones geoquímicas que indican: un retrabajo en un ambiente con menor contenido de oxígeno ($Eu/Eu^* \approx 1,08$); una columna de agua oxidante ($Ce/Ce^* \approx 0,57$) y un aporte terrígeno superior ($Y/Ho \approx 46,9$).

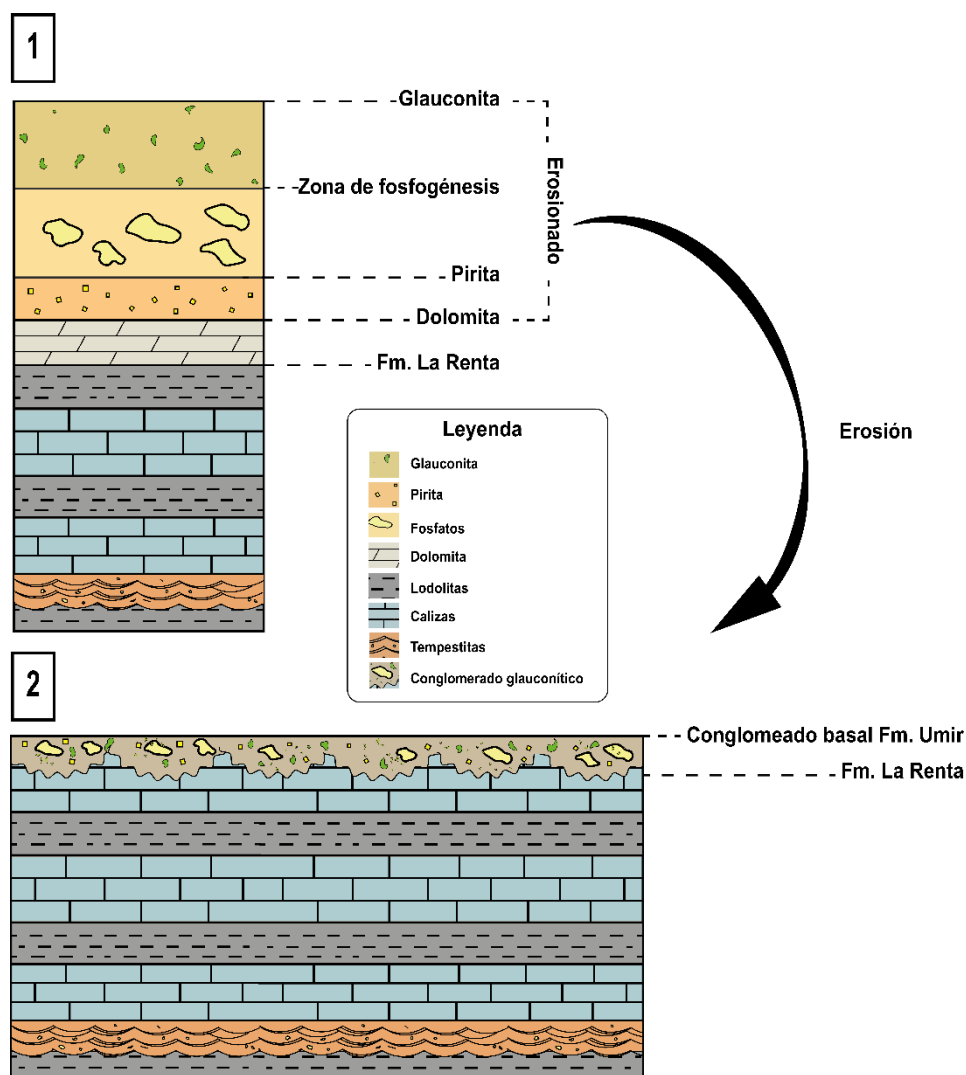


Figura 7. Proceso de formación del conglomerado basal de la Fm. Umir. 1) Los cambios en los patrones de surgencia generan variaciones verticales en la zona de fosfogénesis, lo que permite la precipitación de minerales en un patrón GCPD. 2) Procesos erosivos retrabajan esta secuencia que posteriormente forma el conglomerado basal de la Fm. Umir.

4.7 FUENTE PRIMARIA DE LAS REE

Se sugiere que el enriquecimiento en $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ de las muestras SE02 y SE13 se debe a un reservorio oceánico metalogénicamente enriquecido durante el Cretácico Tardío, alimentado por pulsos de magmatismo submarino enriquecido en HREE, probablemente de origen en las LIPs.

Orth et al. (1993) realizaron un muestreo sistemático de rocas sedimentarias acumuladas durante el intervalo de extinción del Cenomaniano – Turoniano (90-93 Ma) en Europa, Norteamérica, y Suramérica, encontró que se presentaban anomalías metalogénicas en las composiciones químicas de las rocas entre más cerca se ubicaban a la LIP del Caribe, como, por ejemplo, el límite Cenomaniano – Turoniano estudiado en Chaparral, Tolima, en el Valle Superior del Magdalena (VSM). Lo anterior les permitió concluir que la LIP del Caribe enriqueció la composición oceánica y los sedimentos en metales y en HREE.

El enriquecimiento en HREE de las fosforitas de La Fm. La Renta y el conglomerado basal de la Fm. Umir podría deberse a fenómenos similares (no exclusivamente asociados a LIP del Caribe, sino también al activo magmatismo submarino que caracterizó el Cretácico Tardío y la placa del Caribe).

Complementado esta idea, los oxihidróxidos de Fe y Mn habrían actuado como vectores, secuestrando los REE liberados por el magmatismo submarino de composición N-MORB (enriquecido en HREE) y siendo transportados hasta ambientes subóxicos–anóxicos en los márgenes continentales por las mismas corrientes de surgencia, donde los oxihidróxidos se disuelven por condiciones reductoras y las REE se incorporan en el CFA durante la fosfogénesis y diagénesis temprana. Fenómenos similares han sido propuestos para el enriquecimiento en REE de las fosforitas cámbricas en el mar de China, asociados a la fragmentación de Rodinia (Zhang et al., 2021).

Los resultados obtenidos son coherentes con este mecanismo: la muestra SE02 presenta patrones PAAS con realce de HREE, Ce/Ce* negativo (0,46), Eu/Eu* < 1 (0,59), Y/Ho marino (58,3) y $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ de 488 ppm, lo que indica una fuente oceánica dominante, probablemente enriquecida en HREE. SE13 (Fm. Umir), por su parte, preserva la señal oceánica, aunque con mezcla y retrabajo con un Ce/Ce* de 0,57, Eu/Eu* positivo leve (1,08), Y/Ho de 46,9 y $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ de 698 ppm.

En Argelia, Kechiched et al. (2020) propone que las fosforitas presentan relaciones con agua de mar abierto, con Ce negativo y Y/Ho oceánico, y que las diferencias en el contenido de REE

reflejan variaciones en la circulación oceánica. Los autores proponen que el enriquecimiento en REE no se debe únicamente al aporte siliciclástico o condiciones redox locales, sino también a la exposición del sedimento a corrientes oceánicas profundas enriquecidas en metales. Tal interpretación resulta coherente con lo propuesto por Orth et al. (1993) y, en este sentido, SE02 comparte con Argelia un $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ similar (400-500 ppm), acompañado de Ce negativo y Y/Ho oceánico, lo que refuerza la idea de una exposición a un océano metalogénicamente enriquecido.

Si bien los contenidos elevados de $\Sigma\text{REE}+\text{Y}$ por sí solos no constituyen evidencia de una fuente oceánica enriquecida, en el caso de este trabajo, la combinación de contenidos de REE altos (comparados con el grueso de datos del Tetis) con realce de HREE, relaciones Ce/Ce* de columna de agua oxigenada y Y/Ho de dominio oceánico sugieren un escenario de un reservorio previamente enriquecido metalogénicamente. Esto se debe a la diferencia entre lo reportado en el Tetis y lo reportado en la Fm. La Renta, donde los valores altos en REE no se acompañan de relaciones que apunten a un control siliciclástico ni a una redox dominante, sino que preservan una señal coherente con un océano como fuente dominante.

Estas inferencias deben considerarse someras y sujetas a prueba, ya que la identificación de un reservorio oceánico enriquecido por magmatismo submarino N-MORB requiere un mayor respaldo analítico, incluyendo datos isotópicos Nd–Sr y una base estadística más amplia. En síntesis, los resultados sugieren un escenario interesante, pero aún preliminar, que requiere estudios adicionales para ser confirmado con mayor certeza.

5. CONCLUSIONES

- Las calizas fosfáticas (F3) corresponden a tempestitas: bases con superficies de erosión fosilizadas, gradación normal, laminación cruzada tipo hamaca, bioclastos retrabajados y asociación con concreciones calcáreas/silíceas; lo que sustenta un origen por retrabajamiento y amalgamiento durante eventos de tormenta con bajas tasas de sedimentación.
- Los nuevos datos geoquímicos sugieren que el origen de las REE+Y en la Fm. La Renta obedece principalmente a un control oceánico–diagenético antes que a un aporte terrígeno, lo que refleja una alta eficiencia de captura de REE+Y por CFA durante la diagénesis temprana, controlada por eventos de tormentas catastróficas durante

intervalos en los que el océano estaba enriquecido en HREE. Se sugiere que el océano estaba enriquecido por pulsos de magmatismo submarino ricos en HREE.

- El conglomerado basal de la Fm. Umir presenta una mayor fracción terrígena (Fe-Mg-Al-Ti, Cr, V) y condiciones de menor oxígeno que la Fm. La Renta, una relación Y/Ho menor y un contenido total de REE mayor. Lo anterior no representa el ambiente de la Fm. La Renta ni de la Fm. Umir, sino que muestra que el origen de esta capa corresponde a clastos retrabajados de una sucesión mineral previa de GCPD, conservados en lentes de la superficie de erosión, que al presentar un segundo evento fosfógeno y un mayor aporte siliciclástico bajo condiciones con menor oxígeno, aumentaron el reservorio disuelto de REE y, por ende, presentan una mayor concentración.
- La continuidad y el espesor de las tempestitas fosfáticas durante el Cretácico Tardío (Fm. La Renta) varían según la frecuencia e intensidad de las tormentas, la disponibilidad de facies prístinas de fósforo asociadas a corrientes de surgencia y la variación de sus frentes. Esto explica la naturaleza discontinua de las fosforitas relacionadas con tempestitas en la Cordillera Oriental.
- Según el modelo propuesto de un océano metalogénicamente enriquecido durante el Cretácico Tardío, sería esperable encontrar intervalos temporalmente correlacionables con la Fm. La Renta y el conglomerado basal de la Fm. Umir en los Andes del Norte que presenten concentraciones de REE similares. Esto, si las condiciones paleoambientales son favorables y similares, sean las evidenciadas en la Fm. La Renta o en el conglomerado basal de la Fm. Umir. Sin embargo, se necesitan levantamientos estratigráficos detallados, cronoestratigráficamente controlados y más análisis geoquímicos para probar esta idea.

6. REFERENCIAS

- Abbott, A. N., Löhr, S., & Trethewy, M. (2019). Are clay minerals the primary control on the oceanic rare earth element budget? *Frontiers in Marine Science*, 6, 504. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00504>
- Ahmed, A. H., Aseri, A. A., & Ali, K. A. (2022). Geological and geochemical evaluation of phosphorite deposits in northwestern Saudi Arabia as a possible source of trace and rare-earth elements. *Ore Geology Reviews*, 144, 104854. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104854>
- Bailey, J. V., Corsetti, F. A., Greene, S. E., Crosby, C. H., Liu, P., & Orphan, V. J. (2013). *Filamentous sulfur bacteria preserved in modern and ancient phosphatic sediments: Implications for the role of oxygen and bacteria in phosphogenesis*. *Geobiology*, 11(5), 515–527. <https://doi.org/10.1111/gbi.12046>
- Baioumy, H. M., & Farouk, S. (2022). The geochemical and economic significance of REE in the Upper Cretaceous-Eocene Tethyan phosphorites. *Journal of African Earth Sciences*, 194, 104635. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104635>
- Baioumy, H. (2011). Rare earth elements and sulfur and strontium isotopes of upper Cretaceous phosphorites in Egypt. *Cretaceous Research*, 32(3), 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2011.01.008>
- Baioumy, H. M., & Tada, R. (2005). Origin of Late Cretaceous phosphorites in Egypt. *Cretaceous Research*, 26(2), 261–275. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2004.12.004>
- Baioumy, H. M., Tada, R., & Gharaie, M. H. M. (2007). Geochemistry of Late Cretaceous phosphorites in Egypt: Implication for their genesis and diagenesis. *Journal of African Earth Sciences*, 49(1–2), 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2007.05.003>
- Banerjee, S., Choudhury, T. R., Saraswati, P. K., & Khanolkar, S. (2020). The formation of authigenic deposits during Paleogene warm climatic intervals: A review. *Journal of Palaeogeography*, 9(1), 27. <https://doi.org/10.1186/s42501-020-00076-8>
- Bau, M., Dulski, P., & Möller, P. (1995). *Yttrium and holmium in South Pacific seawater: Vertical distribution and possible fractionation mechanisms*. *Geochemistry*, 55(1), 1–15. https://www.researchgate.net/publication/279903300_Yttrium_and_holmium_in_South_Pacific_seawater_vertical_distribution_and_possible_fractionation_mechanisms
- Birch, W. D. (2005). Phosphates. In D. S. Cronan (Ed.), *Encyclopedia of Geology* (pp. 120–128). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369396-9/00282-3>
- Buccione, R., Kechiched, R., Mongelli, G., & Sinisi, R. (2021). REEs in the North Africa P-bearing deposits, paleoenvironments, and economic perspectives: A review. *Minerals*, 11(2), 214. <https://doi.org/10.3390/min11020214>
- Carvajal-Torres, J., Catuneanu, O., Mora, A., Caballero, V., & Reyes, M. (2022). First-order stratigraphic boundaries of the Late Cretaceous–Paleogene retroarc foreland basin in Colombia. *Frontiers in Earth Science*, 10, 876140. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.876140>

Chayes, F. (1956). *Petrographic modal analysis: An elementary statistical appraisal*. New York: John Wiley & Sons.

Christmann, P. (2014). A forward look into rare earth supply and demand: A role for sedimentary phosphate deposits? *Procedia Engineering*, 83, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.005>

Cook, P. J., & McElhinny, M. W. (1979). A reevaluation of the spatial and temporal distribution of sedimentary phosphate deposits in the light of plate tectonics. *Economic Geology*, 74(2), 315–330. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.74.2.315>

Davidson, J., et al. (2013). Dy/Dy*: Variations arising from mantle sources and petrogenetic processes. *Journal of Petrology*, 54(3), 525–537. <https://doi.org/10.1093/petrology/egs076>

Dar, S. A., & Khan, K. F. (2017). Sedimentary: Phosphates. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (pp. 1–18). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10509-3>

de la Parra, F., Higuera, C., Ramírez, R., Maya, L., Céspedes, S., Marfissi, N., Carreño, A., Juliao, T., & Forero, S. (2024). Chronostratigraphy of the Upper Cretaceous succession in the Middle Magdalena Valley of Colombia (Northern South America). *Cretaceous Research*, 157, 105824. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2023.105824>

Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In W. E. Ham (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks—A Symposium* (AAPG Memoir 1, pp. 108–121). Tulsa, OK: AAPG.

Elderfield, H. (1988). *The oceanic chemistry of the rare-earth elements*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 325(1583), 105–126. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0046>

Emsbo, P., McLaughlin, P. I., Breit, G. N., du Bray, E. A., & Koenig, A. E. (2015). Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis? *Gondwana Research*, 27(2), 776–785. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.10.008>

Föllmi, K. B., Garrison, R. E., Ramírez, P. C., Zambrano-Ortiz, F., Kennedy, W. J., & Lehner, B. L. (1992). Cyclic phosphate-rich successions in the Upper Cretaceous of Colombia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 93(3–4), 151–182. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90095-M](https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90095-M)

Fowler, A. P. G., et al. (2016). Elemental changes and alteration recorded by basaltic drill cores. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(9), 3654–3671. <https://doi.org/10.1002/2016GC006595>

Glenn, C. R. (1990). *Depositional sequences of the Duwi, Sibâiya and Phosphate formations, Egypt: Phosphogenesis and glauconitization in a Late Cretaceous epeiric sea*. *Geological Society, London, Special Publications*, 52(1), 451–464. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.052.01.15>

Glenn, C. R., & Arthur, M. A. (1988). *Petrology and major element geochemistry of Peru margin phosphorites and associated diagenetic minerals: Authigenesis in modern organic-rich*

sediments. *Marine Geology*, 80(3–4), 231–267. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(88\)90092-8](https://doi.org/10.1016/0025-3227(88)90092-8)

Grimm, K. A. (2000). *Stratigraphic condensation and the redeposition of economic phosphorite: Allostratigraphy of Oligo-Miocene shelfal sediments, Baja California Sur, Mexico*. En *Marine Authigenesis: From Global to Microbial* (pp. 325-347). SEPM (Society for Sedimentary Geology). <https://doi.org/10.2110/pec.00.66.0325>

Hesse, R. (1989). Silica diagenesis: Origin of inorganic and replacement cherts. *Earth-Science Reviews*, 26(1–3), 253–284. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(89\)90024-X](https://doi.org/10.1016/0012-8252(89)90024-X)

Jarvis, I., Burnett, W. C., Nathan, Y., Almbaydin, F. S. M., Attia, A. K. M., Castro, L. N., Flicoteaux, R., Hilmy, M. E., Husain, V., Quatawnah, A. A., Serjani, A., & Zanin, Y. N. (1994). *Phosphorite geochemistry: State-of-the-art and environmental concerns*. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 87, 643–700.

Kechiched, R., Laouar, R., Bruguier, O., Kocsis, L., Salmi-Laouar, S., Bosch, D., Ameur-Zaimeche, O., Foufou, A., & Larit, H. (2020). *Comprehensive REE + Y and sensitive redox trace elements of Algerian phosphorites (Tébessa, eastern Algeria): A geochemical study and depositional environments tracking*. *Journal of Geochemical Exploration*, 208, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106396>

Kechiched, R., Laouar, R., Bruguier, O., Kocsis, L., Salmi-Laouar, S., Bosch, D., Ameur-Zaimeche, O., Foufou, A. & Larit, H. (2018). Glauconite-bearing sedimentary phosphorites from the Tébessa region (eastern Algeria): Evidence of REE enrichment and geochemical constraints on their origin. *Journal of African Earth Sciences*, 145, 190-200. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.05.018>

Maliva, R. G., & Siever, R. (1988). Mechanism and controls of silicification of fossils in limestones. *Journal of Geology*, 96(3), 387–398. <https://doi.org/10.1086/629235>

Martín-Rincón, C. L., Terraza-Melo, R., Rojas-Parra, N. R., Martínez-Aparicio, G. A., Rojas-Jiménez, S., & Hernández-González, J. S. (2022). The Upper Cretaceous (Santonian–Maastrichtian) phosphate deposits in the west of the Neiva subbasin, Upper Magdalena Valley, Colombia. *Boletín Geológico*, 49(2), 75–96. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.49.2.2022.621>

Mei, W., Cai, C., Ming, X., Wang, Z., & Jiang, L. (2025). Geochemistry and enrichment of rare earth elements in phosphorite successions in the Lower Cambrian, Eastern Yun'nan, South China. *Minerals*, 15(6), 581. <https://doi.org/10.3390/min15060581>

Moreno-Sánchez, G., Montoya-Arenas, D. M., Terraza-Melo, R., Pérez-Ávila, A., Arenas-Mosquera, J. E., & Etayo-Serna, F. (2019). Mapa geológico del Valle Medio del Magdalena, en los alrededores del Puente El Tablazo (escala 1:50 000). Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.

Maughan, E. K., Zambrano, F., Mojica, F. O., Abozaglo, M., Pachón, F. P., & Durfin, R. R. (1979). *Paleontologic and stratigraphic relations of phosphate beds in Upper Cretaceous rocks of the Cordillera Oriental, Colombia* (Open-File Report No. 79-1525, 97 pp.). U.S. Geological Survey.

- Ortiz, J. R., Jaramillo, C., & Moreno, C. (2020). *SDAR: Stratigraphic Data Analysis* (R package version 0.9-55). Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.SDAR>
- Orth, C. J. (1993). Global geochemical cycles and mass extinctions at the Cenomanian–Turonian and the Cretaceous–Tertiary boundaries. In Princeton University Press (pp. 315–339).
- Pourmand, A., Dauphas, N., & Ireland, T. J. (2012). A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: Revising CI-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances. *Chemical Geology*, *291*, 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.08.011>
- Prothero, D. R., & Schwab, F. L. (2004). *Sedimentary geology: An introduction to sedimentary rocks and stratigraphy* (2nd ed.). New York: W.H. Freeman.
- Pufahl, P. K., Grimm, K. A., Abed, A. M., & Sadaqah, R. M. Y. (2003). Upper Cretaceous (Campanian) phosphorites in Jordan: Implications for the formation of a south Tethyan phosphorite giant. *Sedimentary Geology*, *161*(3–4), 175–205. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(03\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(03)00070-8)
- Pufahl, P. K., & Groat, L. A. (2017). *Sedimentary and igneous phosphate deposits: Formation and exploration*. *Economic Geology*, *112*(3), 483–516. <https://doi.org/10.2113/econgeo.112.3.483>
- Rezaei, M., Sanchez-Lecuona, G., & Abdolazimi, O. (2025). A cross-disciplinary review of rare earth elements: Deposit types, mineralogy, machine learning, environmental impact, and recycling. *Minerals*, *15*, 720. <https://doi.org/10.3390/min15070720>
- Reimers, C. E., Kastner, M., & Garrison, R. E. (1990). The role of bacterial mats in phosphate mineralization with particular reference to the Monterey Formation. En W. C. Burnett & S. R. Riggs (Eds.), *Phosphate deposits of the World: Vol. 3. Neogene to modern phosphorites* (pp. 300–311). Cambridge University Press.
- Schilling, J.-G., & Winchester, J. W. (1967). *Rare-earth fractionation and magmatic processes* (pp. 267-283). In *Mantles of the Earth and Terrestrial Planets* [Conference paper]. Interscience Publishers. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19680035420>
- Scholle, P. A., & Ulmer-Scholle, D. S. (2003). *A color guide to the petrography of carbonate rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis (AAPG Memoir 77)*. Tulsa, OK: American Association of Petroleum Geologists.
- Seredin, V. V. (2010). A new method for primary evaluation of the outlook for rare earth element ores. *Geology of Ore Deposits*, *52*(5), 428–433. <https://doi.org/10.1134/S1075701510050077>
- Terraza Melo, R. (2019). “Formación La Luna”: expresión espuria en la geología colombiana. En F. Etayo-Serna (Ed.), *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena* (Vol. XXIII). Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Valetich, M., Zivak, D., Spandler, C., Degeling, H., & Grigorescu, M. (2022). REE enrichment of phosphorites: An example of the Cambrian Georgina Basin of Australia. *Chemical Geology*, 588, 120654. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120654>

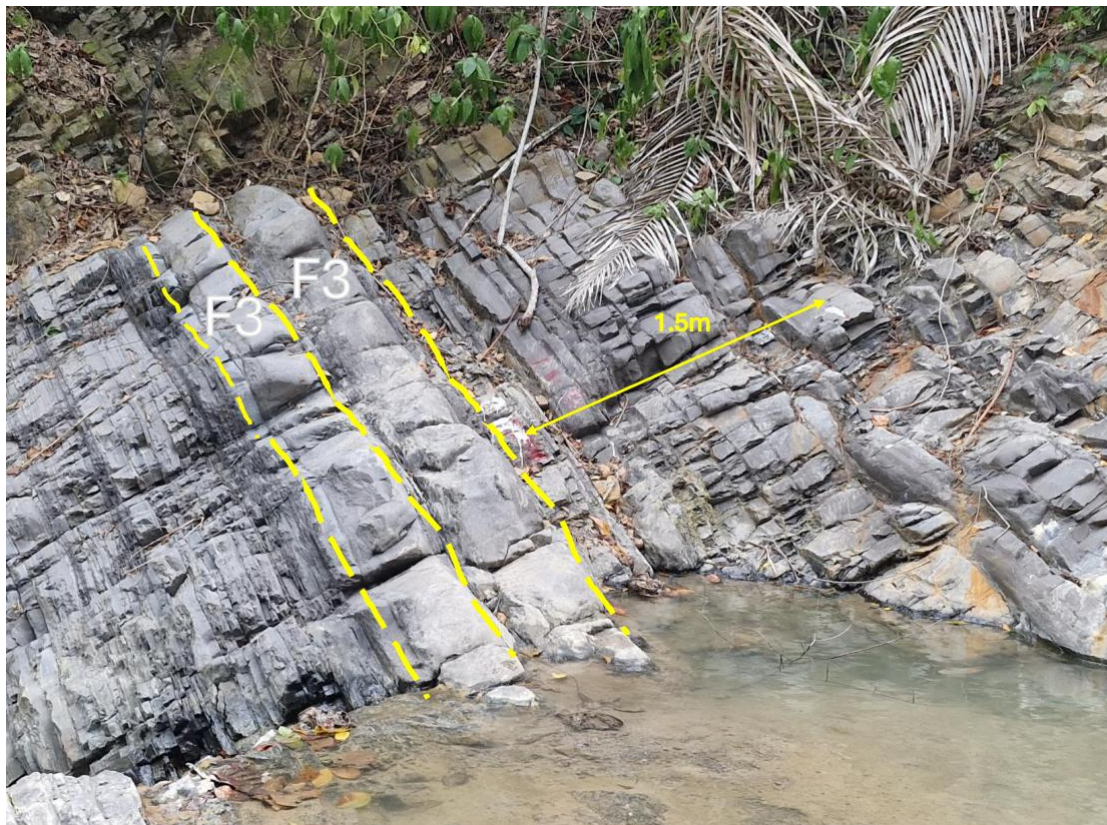
Wetzel, A., & Allia, V. (2000). *The significance of hiatus beds in shallow-water mudstones: An example from the Middle Jurassic of Switzerland*. *Journal of Sedimentary Research*, 70(1), 108–120. <https://doi.org/10.1306/2dc40908-0e47-11d7-8643000102c1865d>

Workman, R. K., & Hart, S. R. (2005). Major and trace element composition of the depleted MORB mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.005>

Zhang, Z., Jiang, Y., Niu, H., Xing, J., Yan, S., Li, A., Weng, Q., & Zhao, X. (2021). Enrichment of rare earth elements in the early Cambrian Zhijin phosphorite deposit, SW China: Evidence from francolite micro-petrography and geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 138, 104342. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104342>

7. ANEXOS

Anexo 1. Segmento estratigráfico entre los metros 19-20.



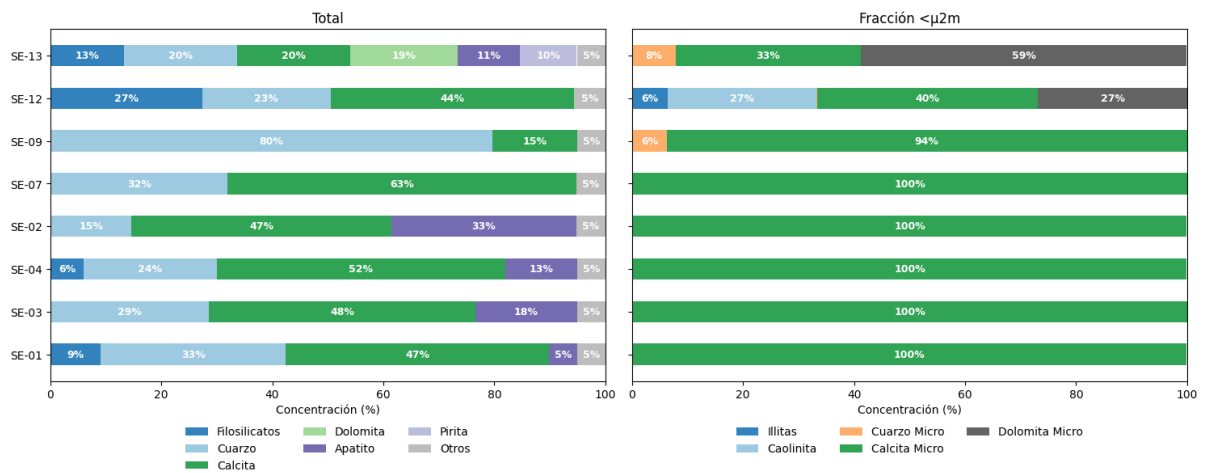
Se observan dos estratos de calizas fosfáticas (F3) que contrastan con las calizas tipo wackestone (F1) y lodolitas (F2).

Anexo 2. Muestras de mano y secciones delgadas en nicols paralelos.

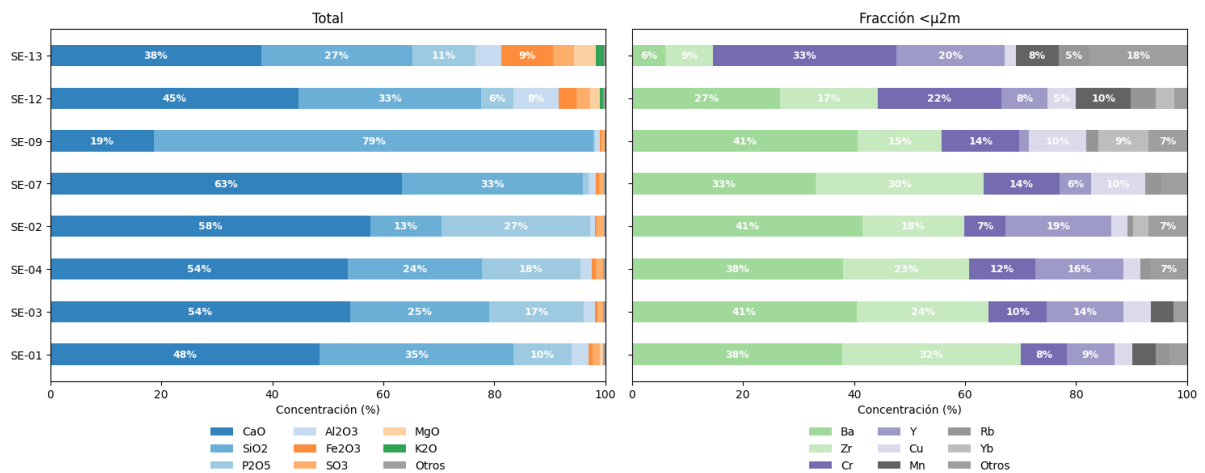


A: SE07, SE09, SE12 y SE13. **B:** SE01, SE02, SE03 y SE04.

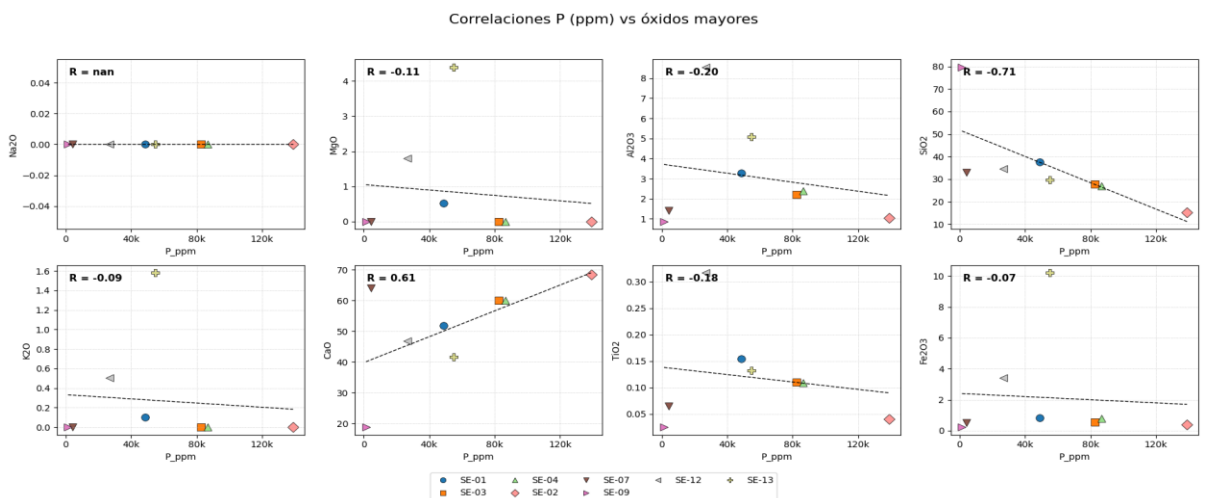
Anexo 3. Composición mineralógica de las muestras según DRX.



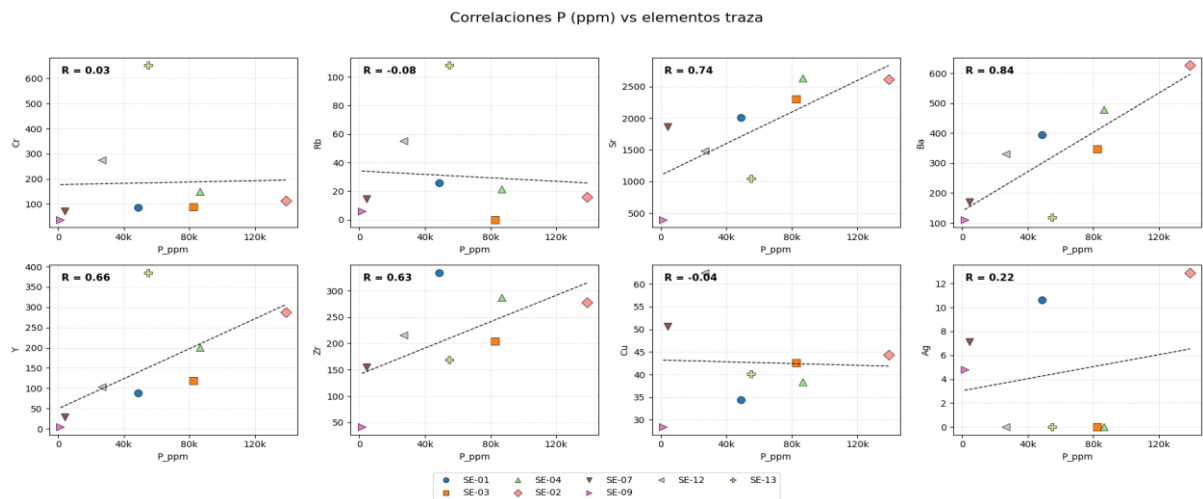
Anexo 4. Composición química normalizada de las muestras con base en XRF.



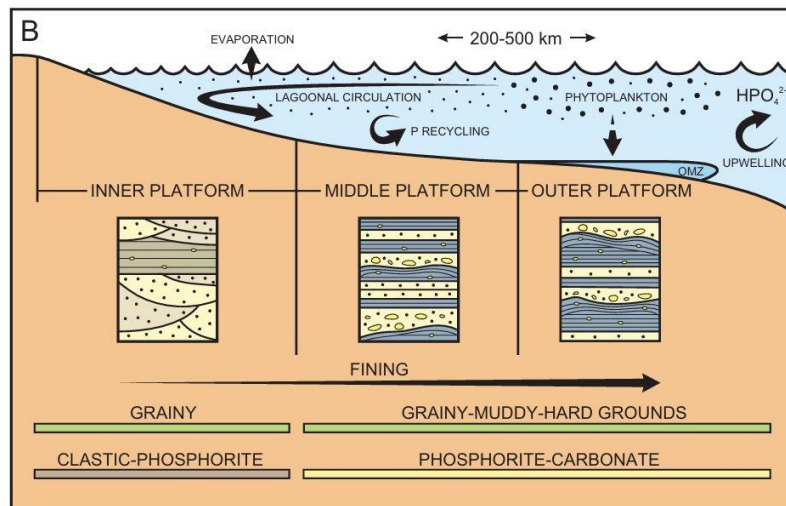
Anexo 5. Diagrama bivariado correlación de fósforo (P) en ppm vs. elementos mayores.



Anexo 6. Diagrama bivariado de correlación del fósforo (P) en ppm vs. los elementos traza.



Anexo 7. Modelo de Pufahl & Groat (2017) para mares epicontinentales influenciados por corrientes de surgencia con facies fosfáticas.



Anexo 8. Relación entre el contenido de Fósforo (P) y REE (ppm) a lo largo de la Columna Estratigráfica de la Fm. La Renta.

