

1. Ambientes Sedimentarios

Los ambientes sedimentarios del Grupo Guadalupe en la Cordillera Oriental, el Piedemonte Llanero y el Valle superior del Magdalena son esencialmente marinos, según lo propuesto por GUERRERO & SARMIENTO (1996), GUERRERO et al (2000) y GUERRERO (2002b). De acuerdo con el último autor, unidades litoestratigráficas coetáneas que se incluyen en el Alogrupo Guadalupe, también contienen estratos de origen continental en los bordes de los flancos, E y W de la Cuenca Cretácica Colombiana. Estos autores documentaron la presencia de dinoflagelados, foraminíferos, bivalvos y amonitas además de minerales fosfáticos y glauconita en varias secciones del sector central de la cuenca donde la unidad ha sido estudiada y se ha podido datar gracias a su contenido fósil.

Según lo establecido por GUERRERO (2002a, 2002b), la Cuenca Cretácica Colombiana se desarrolló en una cuenca intracratónica de back-arc. Por lo tanto, la configuración es la de una cuenca elongada en dirección N, con dos rampas (plataformas), E y W, en donde se desarrollaron ambientes de frente playa (shoreface) y costa afuera (offshore) en profundidades marinas no mayores a 200 metros hacia el eje de la cuenca. La Cuenca Cretácica Colombiana no incluye depósitos típicos de talud continental como turbiditas, debido a su carácter intracratónico con corteza continental de baja densidad, que no permitió velocidades de subsidencia y profundidades marinas típicas de corteza intermedia u oceánica. Los depósitos erróneamente interpretados como turbidíticos en algunas localidades de la Cordillera Oriental, corresponden a depósitos de tormenta que pueden ser granodecrecientes, en capas delgadas y medias, pero que no contienen la sucesión típica de Bouma presente en las turbiditas. Estas capas producidas por tormentas pueden ser caóticas, masivas o granodecrecientes y luego granocrecientes (en la misma capa) o al contrario, pueden ser primero granocrecientes y luego granodecrecientes. Una buena explicación de concentración de partículas por procesos de tormenta se presenta en PUF AHL et al (2003). Otro aspecto que se descartó en la Cuenca Cretácica Colombiana fue el de ambientes dominados por mareas versus ambientes dominados por el viento y el oleaje. Sencillamente, no se ha encontrado ninguna evidencia sólida en la cuenca, como estratificación cruzada bipolar u otras estructuras sedimentarias asociadas al proceso de marea controlado por la atracción lunar. La cuenca solamente presenta estructuras asociadas con el oleaje diario normal producido por el viento y asociadas con tormentas que redistribuyen partículas en profundidades de frente de playa inferior y costa afuera durante episodios de aumento de la energía del viento y consecuentemente del oleaje y de las corrientes asociadas.

La presencia de fosfatos es exclusiva de rocas de ambiente marino, así que los estratos de las secciones estudiadas que contienen abundantes pellets fecales, restos

fosfatizados de huesos de peces y varios minerales que contienen fósforo y que cristalizan como cemento en los poros del sedimento o en las cámaras de los fósiles, no presentan mayor duda. Otro elemento diagnóstico importante en términos de restos fósiles de origen marino, aparte de la importante presencia de restos de peces, es la presencia de foraminíferos en cantidades abundantes. Restos de amonitas, bivalvos y gasterópodos completan la asociación fósil. La presencia de glauconita es también muy importante en términos de elementos diagnósticos de ambientes marinos. Dicho mineral es exclusivamente marino y se presenta en la sección estudiada en pellets de origen mecánico, como mineral de reemplazamiento de partículas y rellenando el espacio poroso.

Los fósiles marinos como foraminíferos, pellets fecales y huesos de peces están distribuidos en toda la sección estudiada del Grupo Guadalupe en Iza y Cuitiva, pero son más comunes en los estratos de grano fino, como shales, biomicritas y cherts, de manera que con estos estratos no hay mucha duda. Entre los estratos de grano relativamente grueso, predominan las arenitas de cuarzo, aunque también se presentan algunas bioesparitas de bivalvos. Las arenitas generalmente contienen algunos fósiles y en las que no los presentan, se aprecia glauconita, de manera que la posible presencia de ambientes no marinos se descarta. La mayor probabilidad de encontrar ambientes continentales, como fluviales o eólicos, se presenta en la parte superior de la Aloformación Guadalupe, que en algunas localidades incluye unidades litoestratigráficas compuestas por conglomerados de guijos gruesos y muy gruesos de origen fluvial, como los de la parte superior de la Formación la Tabla en el Valle Superior del Magdalena (GUERRERO et al, 2000). Las rocas con mayor tamaño de grano del Grupo Guadalupe en las secciones estudiadas, que corresponden a conglomerados de gránulos asociados con arenitas de grano grueso y muy grueso, en la parte superior de la Formación Labor-Tierna, incluyen también glauconita (facies AmgX), de manera que se puede comprobar su origen marino.

Los sub-ambientes marinos que se presentan en el Grupo Guadalupe en las Secciones de Iza y Cuitiva corresponden a frente de playa (shoreface) y costa afuera (offshore), cuya definición en términos de profundidad, estructuras sedimentarias, asociaciones de facies y mecanismos de transporte han variado a lo largo del tiempo. De acuerdo con HAMPSON & STORMS (2003: fig. 3) la asociación de facies y la subdivisión de ambientes de depósito en la plataforma han variado de uno a otro autor. Ellos indican que la base del frente de playa (shoreface) se sitúa, en una sucesión gradualmente somerizante (granocreciente), para unos autores (VAN WAGONER et al., 1990; KAMOLA & VAN WAGONER, 1995) en la base de las arenitas de grano muy fino con intercalaciones menores de lodolitas, coincidiendo con la base del oleaje de tormentas (storm wave base -SWB-), mientras que para otros (ELLIOTT, 1986; WALKER & PLINT, 1992; CLIFTON, 2000), dicha base se sitúa varios metros más arriba, en la base de las arenitas de grano fino a medio con estratificación cruzada y swaley, coincidiendo con el nivel de oleaje diario normal (fair weather wave base -FWWB-).

En este trabajo, se toman como base y se modifican las facies, ambientes de depósito y conceptos de energía del oleaje de acuerdo con VAN WAGONER et al (1990), KAMOLA & VAN WAGONER (1995) y HAMPSON & STORMS (2003).

Las modificaciones fueron necesarias en términos del tamaño de grano de las arenitas, debido a que la energía de los frentes de playa de la Cuenca Cretácica Colombiana fue superior a la documentada por estos autores en el Cretácico de América del Norte, específicamente en las arenitas de la Formación Blackhawk del Campaniano. En Colombia, el tamaño de grano en los estratos de frente de playa superior alcanza arenita de grano muy grueso, en contraste con las arenitas de grano fino a medio de la Formación Blackhawk. Dichas arenitas (glauconíticas / fosilíferas) de grano grueso y muy grueso se presentan en la Aloformación Guadalupe Inferior del Piedemonte Llanero (Formación San Antonio) y en la Aloformación Guadalupe Superior del Piedemonte Llanero (Formación San Luis) y del Valle Superior del Magdalena (Formación La Tabla), así como en la Aloformación Une del Piedemonte Llanero (GUERRERO 2002b).

Las rocas del área de estudio se subdividieron en los siguientes ambientes de depósito, que se relacionan a las facies consignadas en la Tabla 6-1 y Figura 6-1.

- a) Frente de playa superior: Upper shoreface (USF). Profundidad: 0 a 50 m.
- b) Frente de playa inferior proximal: Proximal lower shoreface (pLSF). Profundidad: 50 a 75 m.
- c) Frente de playa inferior distal: Distal lower shoreface (dLSF). Profundidad: 75 a 100 m.
- d) Costa afuera superior: Upper offshore (UO). Profundidad: 100 a 150 m.
- e) Costa afuera inferior: Lower offshore (LO). Profundidad: 150 a 200 m.

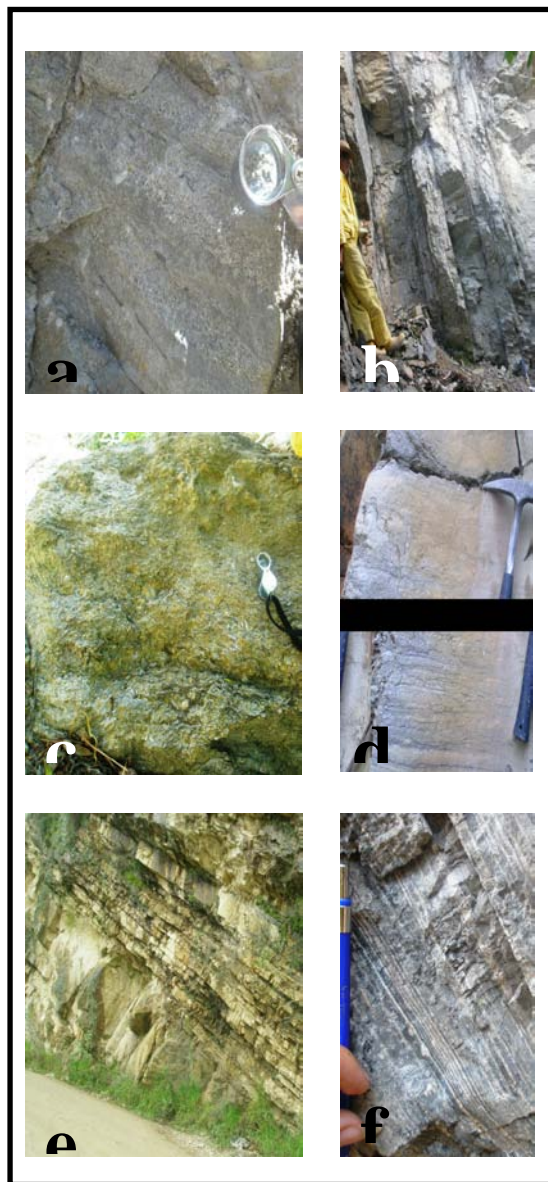
Las profundidades se obtienen por comparación con estudios de distribución actual de sedimentos en costas de varios regímenes energéticos controlados por el oleaje. DUNBAR & BARRETT (2005) documentaron la forma de transporte y la profundidad a la cual se encuentran partículas de diferentes tamaños de grano, desde lodolita y limolita hasta arenita de grano fino y medio, relacionándolas con la altura del oleaje. Dicha información permite concluir que las arenitas de grano grueso y muy grueso de las costas del Cretácico Colombiano se depositaron en regímenes de alta energía controlados por el viento y que las arenitas del frente de playa se depositaron a profundidades de hasta 100 metros.

Tabla 6-1. Asociación de facies y ambientes de depósito identificados.

FACIES	GEOMETRÍA DE LOS ESTRATOS, ESTRATIFICACIÓN INTERNA Y ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS	AMBIENTES DE DEPOSITO
AmgX: Arenita de cuarzo de grano muy grueso, con estratificación cruzada y láminas de conglomerado de gránulo, en capas gruesas y muy gruesas. Glauconítica.	Laminación ondulosa paralela continua, discontinua y lenticular. Estratificación cruzada.	Frente de playa superior (USF)
AgX: Arenita de cuarzo de grano grueso, con estratificación cruzada, en capas medias a muy gruesas. Glauconítica	Laminación ondulosa no paralela continua y discontinua. Estratificación cruzada.	Frente de playa de superior (USF)
BsgL: Bioesparita de bivalvos arenosa, con cuarzo tamaño arena fina, textura grainstone, en capas muy gruesas.	Estratificación lenticular y ondulosa. Estratificación swaley.	Frente de Playa superior (USF)
BsrL: Bioesparita de bivalvos arenosa, con cuarzo tamaño arena fina con textura rudstone, en capas muy gruesas.	Estratificación lenticular y ondulosa. Estratificación swaley.	Frente de playa superior (USF)
AmS: Arenita de cuarzo de grano medio, lodosa, en capas medias.	Laminación ondulosa paralela continua y discontinua. Estratificación hummocky y swaley.	Frente de playa inferior proximal (pLSF)
AfS: Arenita de cuarzo de grano fino, lodosa en capas delgadas a gruesas.	Laminación ondulosa paralela continua y discontinua. Estratificación hummocky y swaley.	Frente de playa inferior proximal (pLSF)
AffS: Arenita de cuarzo de grano fino, lodosa, con pellets fecales fosfáticos, fragmentos fosfatizados de huesos de peces y foraminíferos en capas delgadas y medias.	Laminación plano paralela continua, ondulosa paralela continua y lenticular. Estratificación hummocky y swaley.	Frente de playa inferior proximal (pLSF)
AmfH: Arenita de cuarzo de grano muy fino, lodosa, en capas medias y gruesas.	Laminación ondulosa paralela continua y lenticular. Estratificación hummocky y swaley.	Frente de playa inferior distal (dLSF)
AmffH: Arenita de cuarzo de grano muy fino, lodosa con pellets fecales fosfáticos, fragmentos fosfatizados de huesos de peces y foraminíferos, en capas delgadas y medias.	Laminación ondulosa paralela continua y discontinua. Estratificación hummocky y swaley.	Frente de playa inferior distal (dLSF)
LgH: Limolita de cuarzo de grano grueso en capas muy delgadas a medias.	Laminación plano paralela continua y ondulosa paralela continua. Estratificación hummocky y swaley.	Frente de playa inferior distal (dLSF)

FACIES	GEOMETRÍA DE LOS ESTRATOS, ESTRATIFICACIÓN INTERNA Y ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS	AMBIENTES DE DEPOSITO
LgaH: Limolita de cuarzo de grano grueso en capas muy delgadas a medias con intercalaciones de capas delgadas y medias de arenita de cuarzo de grano muy fino y fino.	Laminación plano paralela continua y ondulosa paralela continua. Estratificación hummocky y swaley.	Frente de playa inferior distal (dLSF)
LrH: Limolita de cuarzo de grano grueso recristalizada en capas delgadas y medias (Chert diagenético).	Laminación plano paralela continua y ondulosa paralela continua. Estratificación hummocky y swaley.	Frente de playa inferior distal (dLSF)
FH: Fosforita arenosa de pellets fecales fosfáticos, fragmentos fosfatizados de huesos de peces y ooides fosfáticos, en capas medias a muy gruesas	Laminación planar y ondulosa. Estratificación hummocky y swaley.	Costa afuera superior (UO)
LH: Lodolita en capas muy delgadas con intercalaciones de arenita de cuarzo de grano muy fino y fino en capas en capas delgadas y medias.	Laminación planar. Estratificación hummocky y swaley.	Costa afuera superior (UO)
LP: Lodolita en capas muy delgadas y delgadas.	Laminación plano paralela continua.	Costa afuera superior (UO)
LBmH: Lodolita en capas muy delgadas y delgadas con intercalaciones de biomicrita y bioesparita en capas delgadas y medias.	Laminación planar. Estratificación hummocky y swaley.	Costa afuera superior (UO)
BmP: Biomicrita de foraminíferos, lodosa, con textura wackestone y packstone, en capas medias y gruesas.	Laminación plano paralela continua.	Costa afuera inferior (LO)
BmrP: Biomicrita de foraminíferos, con textura packstone, parcial a totalmente silicificada. (Chert diagenético).	Laminación plano paralela continua.	Costa afuera inferior (LO)
BmfP: Biomicrita de foraminíferos, con textura packstone, parcial a totalmente silicificada con intercalaciones e fosforitas. (Chert diagenético).	Laminación plano paralela continua.	Costa afuera inferior (LO)
AP: Arcillolita en capas muy delgadas y delgadas, localmente recristalización de la fracción de limo de cuarzo presente.	Laminación plano paralela continua.	Costa afuera inferior (LO)

Figura 6-1. Ejemplos de afloramiento de algunas de las asociaciones de facies. a. Capa tabular muy gruesa de arenita de cuarzo de grano muy grueso con láminas de conglomerado de gránulo (Fm. Labor-Tierna, Sección Iza, facies: AgX), b. Capas tabulares de arenita de cuarzo de grano fino (Fm. Arenisca Dura, Sección Iza, facies: AfS), c. Capa tabular gruesa de bioesparita arenosa de bivalvos y ostreidos de textura rudstone (Fm. Los Pinos, Sección Iza, facies: BsrL), e. Capa tabular muy gruesa de fosforita arenosa de pellets fecales fosfáticos y fragmentos fosfatizados de huesos de peces (facies: FH) suprayacida por capa tabulares medias de biomicrita de foraminíferos de textura packstone parcial a totalmente silicificada (Fm. Arenisca Dura, Sección Cuitiva, facies: BmrP) y f. Detalle de capa tabular media de biomicrita de foraminíferos con textura packstone y laminación plano paralela continua (Fm. Arenisca Dura, Sección Iza, facies: BmrP).



2. Discusión de Resultados

La sección estudiada del Grupo Guadalupe se subdividió en facies que incluyen rocas con características diagnósticas de tamaño de grano, composición y estructuras sedimentarias, conducentes a la identificación de un ambiente particular de depósito (Tabla 6-1). Estas se asocian en parasecuencias, cintas de sistemas deposicionales (systems tracts), unidades aloestratigráficas (aloformaciones) y unidades litoestratigráficas (formaciones). La identificación de asociaciones de facies permite describir segmentos o intervalos que tienen estrecha relación genética interna y que corresponden a parasecuencias individuales. En este sentido, la unidad más pequeña de roca está constituida por facies, cuyas asociaciones constituyen una parasecuencia, que se asocia en conjuntos de parasecuencias, que a su vez se asocian vertical y horizontalmente para integrar sistemas deposicionales. El concepto de parasecuencia se constituye entonces en sinónimo de segmento (de 1 a 10 metros de espesor) y agrupa un intervalo transgresivo y uno regresivo de corta duración comparativamente con los conjuntos de parasecuencias, cintas de sistemas deposicionales y aloformaciones. Dividir la cantidad de tiempo durante la cual se depositó el Grupo Guadalupe (Campaniano y Maastrichtiano Temprano, de acuerdo con GUERRERO & SARMIENTO, 1996; GUERRERO et al, 2000; GUERRERO 2002a, 2002b) por el número de parasecuencias presentes, permite corroborar que la duración de las parasecuencias individuales se encuentra en el rango de los Ciclos de Milankovitch (20.000 a 100.000 años) y que la velocidad promedio de sedimentación se encuentra en el rango de 50 a 60 metros por millón de años en el flanco oriental de la Cuenca Cretácica Colombiana.

La sucesión de estratos de ambientes marinos adyacentes, separados de manera abrupta por estratos marinos relativamente profundos permite la identificación de superficies transgresivas, que separan una parasecuencia de otra. En esta interpretación es fundamental identificar de manera correcta los ambientes de depósito en que se formaron los estratos, para poder determinar superficies transgresivas e intervalos transgresivos, así como superficies regresivas e intervalos regresivos. Los ambientes marinos del Grupo Guadalupe incluyen esencialmente facies arenosas o esparíticas de frente de playa (shoreface) y lodosas o micríticas de costa afuera (offshore) en profundidades que oscilan de 0 a 200 metros bajo el nivel del mar en un ambiente de rampa intracratónica (GUERRERO, 2002 b). Dentro de una sola parasecuencia, la oscilación entre profundización y somerización puede estar en el rango de unos 30 a 50 metros, pero al comparar el tamaño de grano de la parte superior de una parasecuencia con el de la siguiente y las subsecuentes, se puede apreciar una somerización o una profundización relativa del conjunto de parasecuencias (parasequence set), que indica cambios relativos de entre 100 y 200 m de profundidad. Estos conjuntos de parasecuencias con una tendencia particular, se agrupan de acuerdo con VAN WAGONER et al. (1988) en patrones progradacionales (tendencia somerizante), retrogradacionales (tendencia a la profundización) o agradacionales (se mantienen

profundidades similares a pesar de las oscilaciones internas de cada parasecuencia). De acuerdo con GUERRERO (2002 a), quien modificó la propuesta original de POSAMENTIER et al. (1988), estos conjuntos de parasecuencias con (una sola) tendencia particular se incluyen en cintas de sistemas deposicionales (systems tracts) que respectivamente son Regressive Systems Tract (RST) para los conjuntos progradacionales de parasecuencias, Transgressive Systems Tract (TST) para los retrogradacionales y Highstand Systems Tract (HST) o Lowstand Systems Tract (LST) para los agradacionales.

En el desarrollo del trabajo de campo y de laboratorio se observó que los intervalos fosfáticos de interés del Grupo Guadalupe en el área de estudio se presentan en la parte inferior de intervalos transgresivos de pocos metros de espesor, que constituyen la parte inferior de parasecuencias. Estas parasecuencias, que presentan espesores de menos de 10 metros, están constituidas por estratos marinos y se separan unas de otras por superficies de inundación marina, que aquí se determinan como superficies transgresivas. La precisión es importante, porque la definición original de VAN WAGONER et al (1988) indica que una parasecuencia es (“a relatively conformable succession of beds or bedsets bound by marine-flooding surfaces”) una sucesión relativamente concordante de capas o conjuntos de capas limitados por superficies de inundación marina. La definición de éstas últimas, según los mismos autores, como (“a surface separating younger from older strata across which there is an abrupt increase in water depth”) una superficie que separa estratos jóvenes de antiguos, a través de la cual hay un incremento abrupto en la profundidad del agua, genera una importante ambigüedad, porque esta superficie podría corresponder a una superficie de máxima inundación o a una superficie transgresiva. En el primer caso, todos los estratos de una parasecuencia serían regresivos, mientras que en el segundo caso la parasecuencia estaría compuesta por estratos transgresivos seguidos de estratos regresivos.

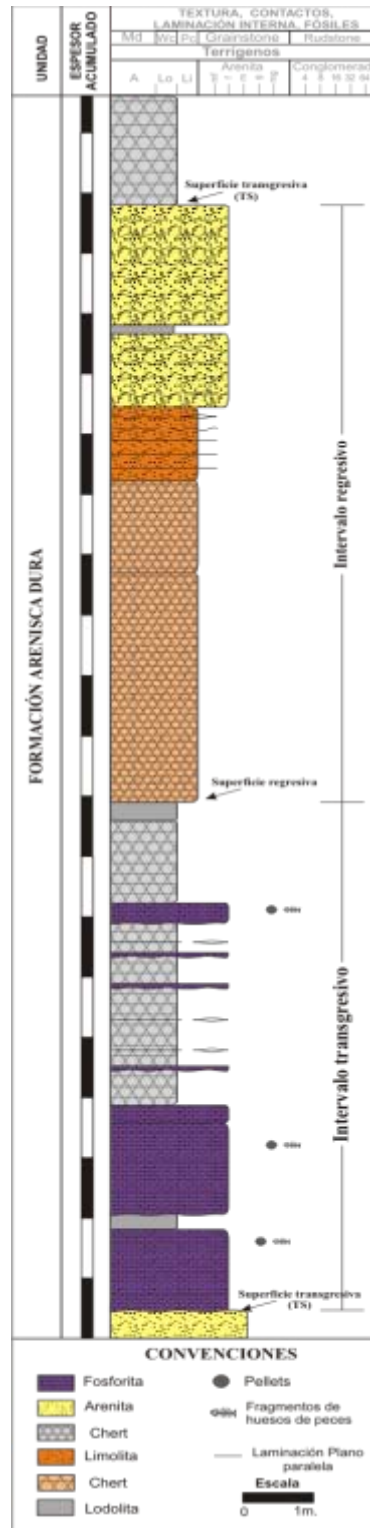
Las características de las facies individuales y sus asociaciones dentro del Grupo Guadalupe sugieren que la depositación ocurrió en un periodo de alta productividad durante el Campaniano, en coincidencia con otros depósitos de esta misma edad en otros lugares del mundo, como los documentados por FÖLLMI et al (1992) y PUFAHL et al (2003) en la Provincia Fosfogénica del lado sur del Mar de Tethys, de la que hace parte Colombia. Esto se ve evidenciado en la presencia de intervalos de biomicritas con abundantes foraminíferos bentónicos y planctónicos, de bioesparitas de bivalvos (entre los que se incluyen ostreidos) y de fosforitas con abundantes pellets fecales fosfáticos y fragmentos fosfatizados de huesos de peces. Esta alta productividad, que aparentemente se favorece durante transgresiones marinas de corta duración (parte inferior de parasecuencias), condujo a la abundancia y disponibilidad de partículas fosfáticas en algunos sectores profundos de la Cuenca Cretácica Colombiana, principalmente durante el Campaniano. Durante este intervalo de tiempo, se depositaron intervalos correspondientes a cintas de sistemas predominantemente regresivos y de bajo nivel (RST y LST de la Aloformación Guadalupe Inferior) o predominantemente transgresivos y de alto nivel (TST y HST de la Aloformación Guadalupe Medio). Las parasecuencias que contienen los fosfatos corresponden a oscilaciones del nivel del mar de corta duración (20.000 a 100.000 años), que hacen parte de los sistemas RST, LST, TST y HST de las aloformaciones justamente mencionadas y que a su vez hacen parte de una secuencia completa que se depositó en aproximadamente 13 Ma, en el intervalo entre 83.5 Ma y 70.5 Ma.

A partir de observaciones realizadas en campo y de los análisis petrográficos realizados se confirma que los fosfatos se depositan predominantemente en intervalos transgresivos de la parte inferior de parasecuencias, suprayaciendo “superficies de inundación marina”, que en el caso estudiado corresponden a superficies transgresivas, que infrayacen intervalos marinos relativamente profundos, con patrones transgresivos y de alto nivel. Las capas de fosforita se encuentran asociadas con capas de biomicrita (Figura 12), demostrando que las concentraciones económicas se producen en un ambiente de costa afuera (Upper Offshore) debido a que la baja energía de este ambiente permite la preservación de las partículas fosfáticas. La presencia de partículas de cuarzo dentro del armazón (10% a 25%) de algunas fosforitas, junto con la fragmentación de partículas fosfáticas, son evidencias de transporte desde el frente de playa hasta costa afuera durante episodios de tormenta.

Un ejemplo muy recurrente de parasecuencia (Figura 7-1), inicia con una superficie transgresiva que separa ambientes marinos relativamente profundos (facies FH de offshore superior) comparados con los que se encuentran debajo de ésta superficie transgresiva y que usualmente están compuestos por arenitas de cuarzo de grano fino a medio (facies AfS de shoreface inferior proximal) de la parasecuencia infrayacente. Los estratos del intervalo transgresivo en el que se depositan las capas de fosforitas económicas, se encuentran íntimamente interdigitados con láminas y capas delgadas de biomicrita o shales e incluyen fosforitas impuras con un contenido de cuarzo mucho menor y de menor tamaño de grano que el del tope de la parasecuencia inmediatamente infrayacente. Las fosforitas, que alcanzan hasta 2 m de espesor y contienen hasta 28 % de fosfato en volumen, se encuentran suprayacidas por biomicritas parcial a totalmente silicificadas (chert diagenético) con intercalaciones menores de capas delgadas de fosforita. Las facies de biomicrita (BmrP y BmfP) se consideran más profundas que las de fosforita impura (arenosa), demostrando el proceso de profundización relativa de los ambientes de depósito. El inicio del intervalo regresivo está marcado por una superficie regresiva indicada por la aparición de limolita de cuarzo, que continúa aumentando de tamaño de grano hasta llegar a arenita de cuarzo de grano fino a medio.

En el área de estudio la Formación Arenisca Dura (Aloformación Guadalupe Inferior) presenta un patrón progradacional (RST) debido a que las parasecuencias van indicando ambientes sucesivamente más someros. Hacia la parte inferior de la formación las parasecuencias finalizan en arenita de cuarzo de grano muy fino, mientras que hacia la parte superior de la formación alcanzan arenita de cuarzo de grano medio. Un patrón similar se observa en la Formación Labor-Tierna (Aloformación Guadalupe Superior) debido a que en la parte inferior de la formación las parasecuencias terminan en arenita de cuarzo de grano muy fino, mientras que hacia la parte superior de la misma, las arenitas de cuarzo alcanzan tamaños de grano muy grueso e incluso se presentan conglomerados de gránulos. La acumulación de fosfatos se ve favorecida aún en conjuntos progradacionales de parasecuencias (RST) cuando el ambiente de depósito llega a costa afuera superior (Upper offshore) en profundidades de 100 a 150 metros alcanzados durante los intervalos transgresivos de la parte inferior de las parasecuencias. Los intervalos transgresivos y de alto nivel (TST y HST) de la Formación Los Pinos (Aloformación Guadalupe Media) presentan importantes cantidades de fosfatos debido a que una alta proporción de los estratos de la unidad se depositaron en ambiente de offshore.

Figura 7-1. Ejemplo de parasecuencia de la Formación Arenisca Dura, Sección Iza (130 m -148 m).



La fosfogénesis primaria es un proceso de precipitación de carbonato de fluorapatito (Francolita) dentro de los centímetros superiores de los sedimentos (JARVIS et al., 1994). Es un proceso bio-geoquímico gobernado por la mediación entre el Eh y el Ph de las especies químicas dentro del agua de los poros, facilitado por la interacción microbial (FÖLLMI et al., 1992). Este es un proceso diferente al re-trabajamiento complementario que concentra los sedimentos fosfáticos en capas de fosforitas económicas (BATURIN, 1971; GLENN et al., 1994; PUFAHL et al., 2003).

El re-trabajamiento sedimentario de estas partículas fosfáticas (pellets fecales fosfáticos y fragmentos de huesos de peces) por acción de episodios de tormenta, produce la concentración económica de fosforitas en capas, que para este yacimiento, varían entre 1m y 2m de espesor. En el área de estudio, las capas de fosforita se encuentran asociadas con capas de biomicrita, mostrando que las concentraciones económicas se producen costa afuera (Upper Offshore) debido a que la baja energía de este ambiente (entre 100 y 150 m de profundidad) permite la preservación de estas partículas fosfáticas. El hecho de que las capas de fosforita no sean continuas en distancias de más de 1 km indica su geometría lenticular debido a que el paso de tormentas podría cambiar de localización, así como sucede actualmente en el Golfo de México.

Para la concentración económica de fosforitas se requieren períodos de alta productividad y un ambiente de baja energía que favorezca la preservación de las partículas fosfáticas. Debido a que el mecanismo de concentración principal es el re-trabajamiento sedimentario por tormentas, se requiere un ambiente afectado por estas, pero de baja energía, por lo que se propone el sub-ambiente costa afuera superior (Upper Offshore). Esto es apoyado por los intervalos de biomicrita y chert diagenético que se observan suprayaciendo los intervalos fosfáticos, lo que indicaría una continua profundización del ambiente hasta alcanzar ambientes de offshore inferior, entre 150 y 200 m de profundidad.

La petrografía permite inferir tres procesos diagenéticos en las rocas del Grupo Guadalupe estudiadas. La silicificación que afecta biomicritas y bioesparitas es evidenciada por el remplazo de partículas biogénicas calcáreas como foraminíferos y fragmentos de bivalvos por cuarzo. Así mismo, porciones de matriz y cemento calcáreo son reemplazadas por cuarzo microcristalino, de manera que estas rocas no reaccionan con ácido clorhídrico y tienen la fractura concoidea propia del chert. La fosfogénesis que afecta las fosforitas, arenitas fosfáticas y biomicritas es evidente por el reemplazo de partículas calcáreas y matriz por fosfato. Finalmente, la recristalización de cuarzo que afecta las limolitas de cuarzo de grano fino a muy fino también produce capas de chert diagenético.

A nivel mundial, se reconocen otros depósitos de rocas fosfáticas con características similares al descrito en esta investigación, un ejemplo sería el descrito por PUFAHL et al. (2003), en el cual se reconocen las tormentas como el principal mecanismo de concentración de capas fosfáticas económicas y que además tiene una edad similar (Campaniano) al depósito estudiado en esta investigación. En ese depósito de igual manera el autor resalta la presencia de chert diagenético y la silicificación como el proceso diagenético que ha afectado las biomicritas.

3. Conclusiones

- En la Sección de Iza, flanco Occidental del Sinclinal de San Miguel, se observa el Grupo Guadalupe en afloramientos continuos, lo cual facilitó el levantamiento de una columna estratigráfica detallada. En esta sección estratigráfica el Grupo Guadalupe tiene un espesor medido de 495.8m y está compuesto por la Formación Arenisca Dura (Aloformación Guadalupe Inferior), la Formación Los Pinos (Aloformación Guadalupe Medio) y la Formación Labor-Tierna (Aloformación Guadalupe Superior).
- En las secciones de Iza y Cuitiva se encuentran aflorando capas de fosforitas de espesores que varían entre 30cm a 2m. Estas están ubicadas en la parte media y superior de la Formación Arenisca Dura (Secciones Iza y Cuitiva), en la parte inferior de la Formación Los Pinos (Sección Cuitiva) y en la parte inferior de la Formación Labor-Tierna (Sección Iza). Estos intervalos fosfáticos han sido explotados de manera artesanal desde mediados del siglo XX por los pobladores de la región.
- A partir de los análisis petrográficos realizados a las muestras de roca de las capas de fosforita se observó que las partículas fosfáticas predominantes son los pellets fecales fosfáticos, los fragmentos fosfatizados de huesos de peces y los ooides fosfáticos. Debido a que la fosfogénesis afecta todos los componentes de la roca se reconocieron foraminíferos bentónicos y planctónicos parcial a totalmente fosfatizados, al igual que la matriz lodosa terrígena presente. Dentro de las muestras de fosforitas estudiadas resalta la presencia de partículas de cuarzo, de tamaños que varían entre limo grueso y arena media, con porcentajes entre 5% y 25%. Es por esto que el nombre de las fosforitas incluye la palabra impura, haciendo referencia a las partículas terrígenas presentes.
- Durante el levantamiento de las columnas estratigráficas se observaron intervalos de rocas con partición ortogonal, en conjuntos con espesores entre 1m y 6m, que a partir de las observaciones realizadas en campo se clasificaron como lidadas. Posteriormente, el análisis petrográfico de estas rocas mostró que corresponden a chert diagenéticos, es decir, que rocas afectadas por procesos diagenéticos tales

como la silicificación o recristalización que exhiben partición ortogonal y fractura concoidea en muestra de mano. Los tipos de rocas identificados son: 1. Biomicritas de foraminíferos de texturas wackestone y packstone parcial a totalmente silicificadas (HG-009, HG-072, HG-073, entre otras) y 2. Limolitas de cuarzo de grano grueso recristalizadas (HG-074).

- Los análisis petrográficos permitieron identificar el contenido de armazón fosfático presente en las fosforitas estudiadas. En algunos casos este porcentaje de armazón no variaba de base a tope; tal es el ejemplo de las muestras HG-071B y HG-071T, las cuales tienen un contenido de armazón fosfáticos de 48.5% y 56.3%, respectivamente. Mientras que en otras capas el contenido de partículas fosfáticas varía considerablemente de base a tope, como en el caso de las muestras HG-067B y HG-067T que tiene un contenido de 84.1% y 38.6%, respectivamente.
- Los análisis químicos de óxidos mayores realizados para conocer el porcentaje de P_2O_5 contenido en las fosforitas y otras rocas fosfáticas tales como biomicritas de foraminíferos, fosfáticas de textura wackestone y packstone parcial a totalmente silicificada, permite concluir que los valores económicos de P_2O_5 se encuentran en las rocas con porcentajes de armazón fosfático mayor al 50%, que se denominan fosforitas. Para estas rocas los valores de P_2O_5 fluctúan entre 10% y 28%. Mientras que para otros tipos de roca los valores no alcanzan el 2% (Muestra HG-009, Sección Iza).
- Las observaciones de campo y de petrografía sedimentaria de las secciones de Iza y Cuitiva permiten concluir que los estratos de la parte inferior de las parasecuencias del Grupo Guadalupe son transgresivos (TST), de manera que las parasecuencias incluyen primero estratos transgresivos y luego estratos regresivos, que se separan de la siguiente parasecuencia por una superficie transgresiva (TS), que coincide con la superficie de máxima regresión (LS de GUERRERO, (2002a) o con una superficie transgresiva (TS) después del LST de GUERRERO (2002a).
- Las rocas del Grupo Guadalupe aflorantes en las secciones estratigráficas estudiadas, Secciones Iza y Cuitiva, se depositaron en ambientes marinos correspondientes a frente de playa (shoreface) y costa afuera (offshore).
- Las capas de fosforitas que estudiaron en las secciones estratigráficas de Iza y Cuitiva se depositaron predominantemente en los intervalos transgresivos de la parte inferior de las parasecuencias, suprayaciendo superficies de inundación marina (superficies transgresivas). El retrabajamiento sedimentario de las partículas

fosfáticas presentes (pellets fecales fosfáticos y fragmentos de huesos de peces) por acción de episodios de tormenta, produjo la concentración económica de fosforitas en capas, que para estas localidades, varían entre 30cm y 2m de espesor. En el área de estudio, las capas de fosforitas se encuentran asociadas con capas de biomicrita de foraminíferos parcial a totalmente silicificadas (Chert diagenético), lo que permite concluir que las concentraciones económicas se producen en el sub-ambiente denominado costa afuera(100 y 150 m de profundidad) debido a que la baja energía de este ambiente permite la preservación de partículas fosfáticas.

4. Referencias

- BATURIN, G.N. 1971. Stages of phosphorite formation on the ocean floor. *Nature* 232: 61-61.
- BATURIN, G.N. 2003. Phosphorus Cycle in the Ocean. *Lithology and Mineral Resources*, Vol. 38, No. 2, 2003, pp. 101–119. Translated from *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*, No. 2, 2003, pp. 126–146.
- BÜRGL, H., BOTERO, G. 1962. Las capas fosfáticas de la Cordillera Oriental (Informe Preliminar). Colombia Servicio Geológico Nacional. Informe 1416, 54p. Bogotá.
- CAMPBELL, C. 1967. Lamina, lamina set, bed and bedset. *Sedimentology*, 8:7-26. Amsterdam.
- CATHCART, J., ZAMBRANO, F. 1969. Phosphate Rock In Colombia – A Preliminary Report. Geological Survey Bulletin 1272-A, 75p. Washington.
- CLIFTON, H. 2000. Shoreface myths and misconceptions. Programme for AAPG annual convention (abstract). Tulsa.
- COMPTON, R. 1985. *Geology in the Field*. John Wiley & Sons Inc. 338p. New York, USA.
- DUNBAR, G., BARRETT, P. 2005. Estimating paleobathymetry of wave-graded shelves from sediment. *Sedimentology* 52: 253-269p.
- DUNHAM, R. 1962. Classification of carbonate rocks according to their depositional texture. Ham. W.E., ed. *Classification of Carbonate Rocks*, p. 108-121. AAPG Memoir 1. Tulsa.
- ELLIOT, T. 1986. Clastic shorelines. In: *Sedimentary environments and facies*. Blackwell Scientific Publications. 143-177p. Oxford.
- EMBRY, A. 1995. Sequence boundaries and sequence hierarchies: problems and proposal. NPF: Special Publication 5: 1-11.
- EMBRY, A., 2006. Four systems tracts: useful methodology or model driven, wishful thinking. CSPG Annual Convention Abstracts, Calgary.
- ETAYO-SERNA, F. 1985. Metodología de trabajo del Proyecto Cretácico. Proyecto Cretácico, 1-13p. Bogotá
- FOLK, R. 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Co. 74 p. Austin, Texas.

- FÖLLMI, K. B.; GARRISON, R. E.; RAMÍREZ, P.; ZAMBRANO, F.; KENNEDY, W. J.; LEHNER, B. L. 1992. Cyclic phosphate-rich successions in the upper cretaceous of Colombia. *Paleogeography, Paleoclimatolog, Paleoecology*, 93:151-182.
- FÖLLMI, K. 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. *Earth Science Review* 40: 55-124.
- GLENN, C.R., FÖLLMI, K., RIGGS, S., BATURIN, G., GRIMM, K., TRAPPE, J. 1994. P and phosphorites: sedimentology and environments of formation. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 87: 747-788.
- GUERRERO, J. & SARMIENTO G. 1996. Estratigrafía física, palinológica, sedimentológica y secuencial del Cretácico Superior y Paleoceno del Piedemonte Llanero. Implicaciones en Exploración Petrolera. *Geología Colombiana*, 20:3-66. Bogotá.
- GUERRERO, J., SARMIENTO G., NAVARRETE, R. 2000. The stratigraphy of the W side of the Cretaceous Colombian Basin in the Upper Magdalena Valley. Reevaluation of selected areas and type localities including Aipe, Guaduas, Ortega and Piedras. *Geología Colombiana* 25, 45-110p. Bogotá.
- GUERRERO 2002 (a). A proposal on the Classification of Systems Tracts: Application to the Allostratigraphy and Sequence Stratigraphy of the Cretaceous Colombian Basin: Part 1: Berriasian to Hauterivian. *Geología Colombiana*, 27: 3-25. Bogotá.
- GUERRERO 2002 (b). A proposal on the Classification of Systems Tracts: Application to the Allostratigraphy and Sequence Stratigraphy of the Cretaceous Colombian Basin: Part 2: Barremian to Maastrichtian. *Geol. Col.*, 27: 27-49. Bogotá.
- HALLSWORTH, C. & KNOX, R. 1999. Classification of sedimentary rocks. British Geological Survey Report, RR 99-03, 44p. Nottingham.
- HAMPSON, G., STORMS, J. 2003. Geomorphological and sequence stratigraphic variability in wave-dominated, shoreface-shelf parasequences. *Sedimentology* 50: 667-701.
- HETTNER, A. 1892. Die Kordillere von Bogotá. *Patermans Mitteil Eng.*, 22 (104) 131p.
- HUBACH, E., 1931. Geología petrolífera del departamento de Norte de Santander. *INGEOMINAS. CECOG.*, 12:1-337. Bogotá.
- HUBACH, E. 1952. Estado actual de la exploración de fosfatos en Colombia. Colombia Servicio Geológico Nacional. Informe 860, 5p. Bogotá.
- INGRAM, R. 1954. Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 65:937-938.
- JARVIS, I., BURNETT, W., NATHAN, Y., ALMBAYDIN, F., ATTIA, A., CASTRO, L. 1994. Phosphorite geochemistry: state-of-the-art and environmental concerns. *Eclogae Geologicae Helveticae* 87: 643-700.
- KAMOLA, D., VAN WAGONER, J. 1995. Stratigraphy and facies architecture of parasequences with examples from the Spring Canyon Member, Blackhawk Formation, Utah. *AAPG memories* 64. 27-54p. Tulsa.
- KRUMBEIN, W., SLOSS, L. 1969. Estratigrafía y sedimentación. *UTHEA*. México D.F.
- MIAL, D. 1978b. Facies types and vertical profile models in braided river deposits. *Canadian Society of Petroleum Geologist, Memoir* 5, 567-604p. Canada.

- MOORE, G., & SCRUTTON, C., 1957. Minor internal structures of some recent unconsolidated sediments. *Assoc. Petrol. Geol., Bull.*:41, 2723-2751p.
- MUNSELL COLOR. 2009. Geological rock-color chart. Geological Society of America, 12p.
- OSPINA, C. 1968. Yacimiento de fosforita Tota-Cuitiva-Iza. INGEOMINAS. Informe 1537: 21p. Bogotá.
- PABA SILVA, F. 1949. Informe sobre la prospección de los fosfatos de la Isla de Malpelo. Colombia Servicio Geológico Nacional. Informe 634, 9p. Bogotá.
- PÉREZ, G., SALAZAR, A. 1978. Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. *Geología Colombiana* 10: 7-86. Bogotá.
- PETTIJOHN, F., POTTER, P., SIEVER, R., 1973. *Sand and Sandstone*. Springer Verlag, Berlin, 618p.
- POSAMENTIER, H., VAIL, P. 1988. *Eustatic controls on clastic deposition. II. Sequence and systems tract models*. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (Eds.), *Sea Level Changes—An Integrated Approach*, vol. 42. SEPM Special Publication. 125– 154p.
- PUF AHL P.; GRIMM, K.; ABED, A.; SADAQAH, R. 2003. Upper cretaceous (Campanian) phosphorites in Jordan: implications for the formation of a south Tethyan phosphorite giant. *Sedimentary Geology* 161: 175-205.
- RENZONI, G. 1963. Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al este y sureste de Bogotá. *Boletín Geológico* 10 (1-3): 59-79. Servicio Geológico Nacional. Bogotá.
- RENZONI, G.; OSPINA C.; ROSAS, H. 1967. Fosfatos en el Departamento de Boyacá. INGEOMINAS, Informe 1530. Bogotá.
- REINECK, H., SINGH, I. 1980. *Depositional sedimentary environments, with reference to terrigenous clastics*. Springer-Verlag. Berlín, 549p.
- SARMIENTO, G. 1994a. Estratigrafía y medios del depósito de la Formación Guaduas. INGEOMINAS, *Pub. Geol. Esp.*, 20. 1-44. Bogotá.
- SARMIENTO, G. 1994b. Visión regional de la Formación Guaduas. INGEOMINAS. *Pub. Geol. Esp.*, 20:167-184. Bogotá.
- SLANSKY, M. 1963. Contribution a l'étude du problema du phosphate en Colombia. Colombia Servicio Geológico Nacional. Informe 1471, 92p. Bogotá.
- TAYLOR, J. 1950. Pore-space reduction in sandstones. *American Association Petroleum Geologist, Bulletin* 34: 701-715.
- TERRAZA, R. 2003. Origen diagenético de cherts y porcelanitas en las formaciones Lidita Inferior y Lidita Superior (Grupo Olini), al sur de San Luis (Tolima), Valle Superior del Magdalena, Colombia. *Geología Colombiana* 28 79-94p. Bogotá.
- TRAPPE, J. 2001. A nomenclature system for granular phosphate rocks according to depositional texture. *Sedimentary Geology* 145: 135-150.
- ULLOA, C; RODRIGUEZ, E; ESCOBAR, R. 1973 (a). Mapa geológico escala 1:100.000 de la plancha 192, Laguna de tota. Mapa preliminar inédito. INGEOMINAS. Bogotá.
- ULLOA, C.; RODRIGUEZ, E.; FUQUEN, J.; ACOSTA, J. 2001. Memoria explicativa Plancha 192 – Laguna de Tota. INGEOMINAS. Bogotá.

-
- VAN WAGONER, J., POSAMENTIER, H., MITCHUM, R., VAIL P., SARG, J., LOUTIT, T., HARDENBOL, J. 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. Special Publication 42: 39-46.
 - VAN WAGONER, J., MITCHUM, R., CAMPION, K., RAHMANIAN, V. 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores and outcrops. AAPG Methods in Exploration, 7-55p.
 - WALKER, R., PLINT, A. 1992. Wave and storm-dominated shallow marine systems. In: Facies Models: Response to sea-level change. Geological Association of Canada, 219-238p. St John's, Newfoundland.
 - WENTWORTH, C. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. The Journal of Geology 30: 377-392. Chicago.