

LITOFACIES Y AMBIENTES DE ACUMULACIÓN DE LA FORMACIÓN GUADUAS EN LA PARTE CENTRAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL – IMPLICACIONES PALEOGEOGRÁFICAS

Erika Amaya¹. Jorge Mariño². Carlos Jaramillo³.

RESUMEN

La Formación Guaduas fue depositada durante la transición Cretácico – Terciaria en la parte central de la Cordillera Oriental Colombiana y ha sido reconocida como una sucesión principalmente lodolítica, con algunos niveles areníticos y carbón. Se decidió determinar un patrón de apilamiento de facies de la Formación Guaduas aplicable al Altiplano Cundiboyacense. Para esto, se describieron y caracterizaron 12 litofacies predominantes – basadas en litología, estructuras sedimentarias y ocurrencia - en 10 perfiles estratigráficos en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, sumado a esto se analizaron 400 metros de perforación. Adicionalmente se analizó la información estratigráfica existente.

La asociación de las litofacies permitió establecer 4 sistemas deposicionales. Adicionalmente a partir del examen de las facies se observó la ciclicidad de las mismas dentro del registro estratigráfico, lo que permitió desarrollar un análisis Markoviano para los depósitos de la Formación Guaduas que junto a la correlación de las columnas estratigráficas (teniendo en cuenta la posición del nivel del mar) permitió la producción de dos mapas preliminares de facies para una parte del altiplano Cundiboyacense, sobre los que se observa la predominancia de ambientes transicionales hacia la parte SW de la cuenca con una somerización progresiva en dirección NE producto de una subsidencia diferencial.

Palabras Clave: Litofacies, Ambientes de Depósito, Mapas de Facies, Formación Guaduas, Mapas de litofacies

LITOFACIES AND DEPOSITIONAL ENVIRONMENTS OF THE GUADUAS FORMATION IN THE CENTRAL PART OF THE COLOMBIAN EASTERN CORDILLERA - PALEOGEOGRAPHIC IMPLICATIONS

ABSTRACT

The Guaduas Formation was deposited during the Cretaceous- Tertiary transition, in the central part of the Colombian Eastern Cordillera, and it has been recognized as a mudstone succession, with some sand levels, and coal. The Goal is to determine a stacking pattern of Guaduas Formation's Lithofacies, which can be applicable to the Cundiboyacense Altiplano (plateau). So, 12 Lithofacies were described and characterized - based on sedimentary structures and their occurrence on 10 stratigraphic columns and 400m of coal drillings cores, plus the analysis of previous stratigraphic information.

The Lithofacies assemblage allowed the interpretation of –sedimentary environments and helped to establish 4 depositional Systems. Additionally, from examination of facies cyclicity observed within the stratigraphic record, a Markov chain Analysis was developed for the Guaduas Formation deposits, that together with the correlation of the stratigraphic columns (taking into account the position of sea level) enabled the production of preliminary facies maps for part of the Cundiboyacense Altiplano, on which it is noticed the predominance of transitional environments toward the SW of the basin with a gradual shallowing toward NE as a result of differential subsidence.

Keywords: Lithofacies, Depositional environments, Facies Maps, Guaduas Formation, Lithofacies Maps.

¹ Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Geológica, Sogamoso, Colombia. Cll 4-Sur N° 15-134 Sogamoso ,amayaer@gmail.com.

² Universidad Pedagógica y tecnológica de Colombia, Escuela de Ingeniería Geológica, Sogamoso, Colombia. Jorge.marino@uptc.edu.co

³ Tropical Research Institute ,Center for Tropical Paleocology and Archeology, Balboa, Ancon, Panama; jaramilloC@si.edu

INTRODUCCIÓN

La Formación Guaduas es la principal fuente de carbones térmicos y coquizables para el interior colombiano. Dicha formación fue depositada durante la transición Cretácico - Terciaria, más específicamente entre el Maastrichtiano Tardío y el Paleoceno Temprano (Sarmiento, 1992). Restringida a la parte central de la Cordillera Oriental Colombiana, ha sido reconocida como una sucesión principalmente lodolítica, con algunos niveles areníticos, caracterizada por poseer varios mantos de carbón que le dan importancia económica (Sarmiento, 1994).

Esta unidad ha sido sujeta a diferentes subdivisiones basadas en estratigrafía tales como miembros, conjuntos, segmentos y niveles carboníferos productivos (Higuera, 1993; Sarmiento, 1992); en tales divisiones, basadas en estudios estratigráficos, sedimentológicos y palinológicos, se reconocen ambientes transicionales con influencias de frente costero en varios sectores, desde la base hacia el contacto con las areniscas superiores del grupo Guadalupe, hasta el contacto con las areniscas de la Formación Socha Inferior.

La Formación Guaduas muestra un adelgazamiento sistemático en dirección norte y este, dichos cambios de espesor ocurren a lo largo de las principales fallas en la Cordillera Oriental (Cooper *et al*, Amaya 2009). Estos adelgazamientos se han tratado de explicar de diferentes formas. Una posible hipótesis es que estos adelgazamientos repentinos sean consecuencia de una discordancia de tipo erosivo (Sarmiento, 1994), Otra explicación es que sean resultado de un onlap progresivo (Cooper *et al*, 1995), adicional a una subsidencia diferencial de las subcuencas de Cundinamarca y Boyacá para el Cretácico tardío y principios del Paleógeno (Sarmiento-Rojas *et al*, 2006).

El objetivo del presente estudio es determinar cuál de las dos hipótesis es más sustentable mediante el análisis de las litofacies y el mapeo de las mismas, y la visualización de la distribución espacial regional de los sedimentos de la Formación Guaduas para poder discriminar alguna tendencia durante el retiro del mar Cretácico, lo que aportaría a la comprensión de la dinámica que permitió la acumulación de los sedimentos en la parte central de la Cordillera Oriental Colombiana a finales del Cretácico y principios del Paleógeno.

ANTECEDENTES

Hetner (1892) fue el primero en describir la Formación Guaduas como una secuencia de arcillolitas intercaladas con limolitas y areniscas. Posteriormente el término se aplicó a la Formación que en los alrededores de la Sabana de Bogotá contenía los carbones (Hubach, 1957). A pesar de los muchos estudios sobre dicha Formación, solamente (Laverde, 1979) y Sarmiento (1992) proponen modelos de interpretación ambiental.

La Formación Guaduas restringida a la parte central de la Cordillera Oriental (Sarmiento, 1994) muestra un adelgazamiento sistemático en dirección norte y este. Así, el mismo autor reportó un espesor de 1100m en el área de Sutatausa (Sinclinal de Checua -Lenguazaque), 800 m En el Sinclinal de Tunja, 700 m en el área de Guatavita y 450 m en el Sinclinal de Sueva, también sugirió que en el área del piedemonte llanero el espesor correlacionable con la formación Guaduas sería menor de 80 m, y estaría en la base del último conjunto del grupo Palmichal, sin establecer una correlación palinológica ni litoestratigráfica precisa.

Estos repentinos cambios en el espesor ocurren a lo largo de las principales fallas de la Cordillera Oriental y son considerados por Sarmiento (1992) como resultado de una discordancia de tipo erosivo, sin embargo Cooper *et al* (1995) consideran que este adelgazamiento puede representar un onlap progresivo (“progressive onlap onto de hinterland”), por otro lado Sarmiento-Rojas *et al* (2006) registran valores de subsidencia diferencial para las subcuencas de Cundinamarca y el Cocuy durante el Cretácico tardío y principios del paleógeno, con valores mayores para la subcuenca de Cundinamarca, que es donde se registra el mayor espesor de las secuencias cretácicas. Para finales de Cretácico y principios del Paleoceno se tiene los siguientes valores de subsidencia Subcuenca de Cundinamarca 1250 m, Zona del Macizo de Santander-Floresta 650 m, Subcuencas del oeste del cocuy y de Cundinamarca 800-900 m, Subcuenca de Cocuy 1500 m. De acuerdo con esto, para la cuenca del Cocuy se registran los valores más altos de subsidencia con valores uniformes durante todo el cretáceo, pero para finales del Cretácico la subsidencia disminuyó lo que favoreció la continentalización (Fabre, 1983); Mientras que para la Cuenca de Cundinamarca ocurriría un incremento en la subsidencia a lo largo del eje de la misma durante el Cretácico tardío y principios de Paleoceno (Sarmiento- Rojas *et al*, 2006).

Más al W de Sutatausa, en la zona de levantamiento de la proto-cordillera central, se habrían erosionado totalmente la Formación Guaduas y sus equivalentes,

al tiempo que en zonas inmediatas adyacentes se produciría un depósito de molasa, dominado por abanicos proximales con ríos trezados de alta energía. Tal depósito corresponde en el flanco W de la actual Cordillera Oriental, con la parte inferior de la Formación Hoyón, donde se encuentra una granulometría muy gruesa que alcanza tamaños de cantos gruesos y bloques. La parte inferior de la Formación Hoyón y las Formaciones Cacho, Socha Inferior y Barco corresponden al mismo evento tectónico- Sedimentario y tendrían la misma posición estratigráfica discordante sobre la Formación Guaduas.

MARCO GEOLÓGICO

En la zona de estudio la mayoría de las rocas expuestas son de edad cretácica (Figura 1 y 2). En una escala amplia estas rocas cretácicas representan un ciclo principal transgresivo - regresivo (Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006); superimpuesto a esta tendencia de gran escala están presentes varios ciclos transgresivos-regresivos más pequeños. La subsidencia de la cuenca fue rápida, y la predominancia de facies de aguas marinas poco profundas sugiere que la deposición fue igualmente rápida (Cooper *et al.*, 1995).

La parte Noreste de la cuenca estuvo separada hasta el cretáceo medio por el alto de Santander (macizos de floresta y Santander), lo que permitió el desarrollo de dos subcuencas: la subcuenca del Cocuy y la subcuenca de Tablazo –Magdalena, esta barrera controló la deposición durante todo el cretáceo basal, con la acumulación de facies marinas de aguas poco profundas principalmente (Fabre 1986), hacia el sur estas subcuencas se juntaban en la subcuenca de Cundinamarca, donde las secuencias cretácicas alcanzaron su mayor espesor (Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006). Las subcuencas de Tablazo y Cocuy comenzaron a ser una sola cuenca durante el Hauteriviano debido a la inundación del alto de Santander-Floresta (Fabre, 1986). Durante el Aptiano una importante transgresión seguida de un aumento relativo en el nivel del mar, causó una inundación en toda el área de la actual cordillera oriental, incluyendo la subcuenca de Cundinamarca, así para el Albiano

el paleoalto de Santander dejó de ser una barrera significativa para el movimiento de sedimentos (Cooper *et al.*, 1995). En el Albiano una caída relativa en el nivel base, favoreció la progradación de arenas deltaicas y litorales -Formación Une (Fabre 1983). Durante el Albiano – Cenomaniano una disminución relativa del nivel del mar, permitió la progradación de la parte superior de la Formación Une y una tendencia en la somerización de los ambientes (Sarmiento-Rojas *et al.*, 2006). Para el Cenomaniano-Turoniano-Coniaciano el nivel eustático alcanzó su máximo durante el mesozoico (Sarmiento - Rojas *et al.*, 2006). Para el Santoniano, Campaniano, Maastrichtiano y Paleoceno, una regresión y progradación general permitió la acumulación de facies litorales a transicionales con la acumulación del Grupo Guadalupe y la Formación Guaduas (Sarmiento, 1994) en la que predominan facies de llanuras costeras, llanuras aluviales y carbón.

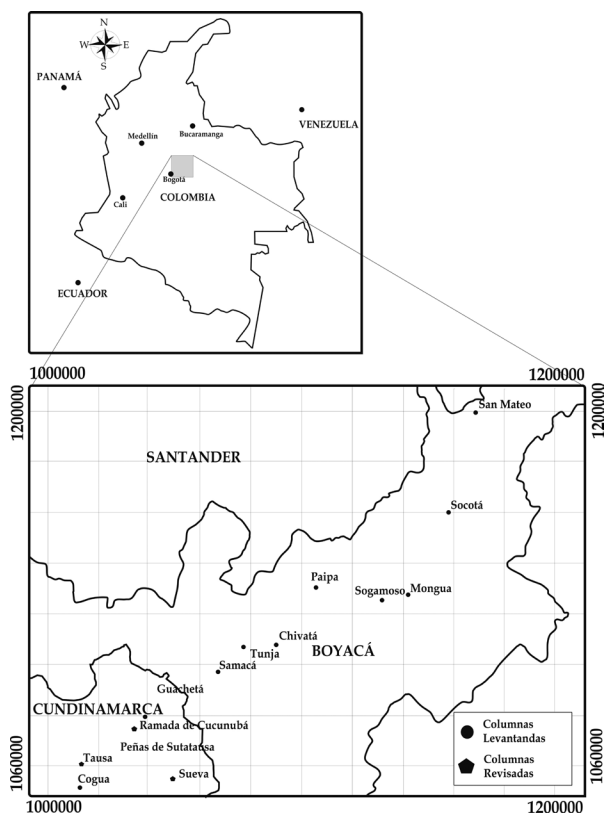


FIGURA 1. Localización

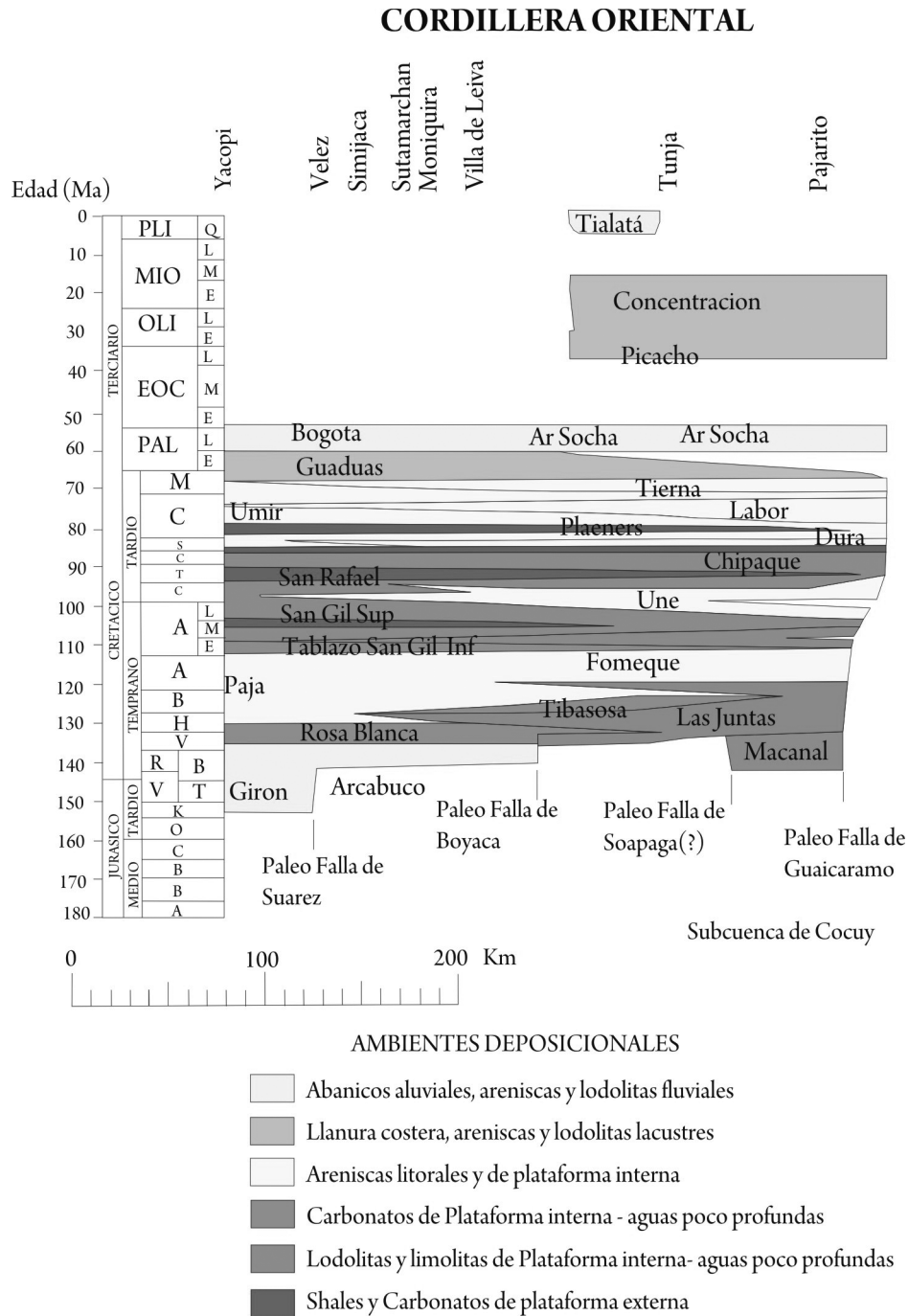


FIGURA 2. Columna estratigráfica regional para el Cretácico y Terciario, modificada de Sarmiento-Rojas *et al* (2006).

METODOLOGÍA

Para la construcción de los mapas preliminares de facies y la relación de la distribución de las mismas con las diferentes hipótesis se desarrolló el trabajo en 5 fases:

(1) Recolección de datos estratigráficos, (2) Definición y descripción de litofacies y determinación de los ambientes de depósito, (4) Análisis Markoviano para las litofacies, (5) Correlación estratigráfica y construcción de los mapas preliminares de litofacies.

La recolección de datos estratigráficos se basó en un trabajo de campo regional en el que se describieron 10 perfiles estratigráficos en afloramientos naturales, cortes de carretera, quebradas, minas y perforaciones entre los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, junto con la revisión de la información estratigráfica existente (Figura 2).

La definición de las facies se basó en la descripción de las características litológicas distintivas, incluyendo el rango limitado de tamaño de grano y tipo de roca, para lo que se utilizó la clasificación según Folk (1974), las estructuras sedimentarias características, espesor de las capas, relación entre los cambios verticales y laterales apoyados mediante secciones panorámicas (Miall, 1984), y eventualmente por el color y la textura, de esta forma se caracterizaron 12 litofacies que se resumen en la tabla 1 con su respectiva litología, estructuras sedimentarias y procesos que dieron lugar a la formación de dicha facies apoyado por los trabajos de (Miall, 1992. Mariño and Morris, 1996. Kvale, 2006 Kvale and Archer, 1990. Mccubbin, 1982 . Miall, 1984. Vega ,2006 . Weimer *et al.*, 1982, Reineck and Singh, 1980). La asociación de estas litofacies permitió identificar los ambientes de depósito de la Formación Guaduas (Tabla 2).

Las cadenas de Markov se utilizaron para analizar la ciclicidad de las litofacies, discriminar procesos geológicos, y observar las tendencias de las agrupaciones de litofacies, para el presente estudio se escogió el método conocido como “Embedded Markov Chain Analysis”, en el que no se considera el espesor de las capas, y los elementos de la diagonal principal son todos cero (Krumbein and Dacey, 1969). Estas cadenas utilizan matrices de transición en las que se tabula el número de veces que ocurre transiciones entre las litofacies en una sucesión estratigráfica (Ethier, 1975). Así este método se utiliza con el fin de explorar el orden vertical de las asociaciones de facies (Amaya, 2009).

A partir de la recolección y el procesamiento de los datos estratigráficos, así como de la caracterización de las litofacies y la interpretación de los ambientes de depósito, se construyó una curva relativa del nivel del mar para cada perfil estratigráfico, lo que permitió establecer una correlación aproximada de las columnas y definir los intervalos a mapear (Figuras 4A y 4B). A partir de esta correlación y teniendo en cuenta las tendencias observadas en las cadenas de Markov, se construyeron los mapas de facies. Para esta reconstrucción existen varios métodos, en el presente estudio se utiliza la metodología propuesta por Miall (1990) y Carpentier (2007), la cual consiste en plotear la asociación de litofacies dentro de la cuenca (Tabla 2). Para plotear y contornear estas asociaciones se utilizó ARCGIS 9.2.

RESULTADOS

Definición y caracterización de las litofacies de la Formación Guaduas. Dentro de sucesión sedimentaria estudiada, fueron identificadas 12 litofacies sedimentarias, las cuales se resumen en la Tabla 1 y se ilustran en la Figura 3.

Asociación de facies y ambientes de acumulación de la Formación Guaduas. La agrupación de las litofacies descritas previamente, permitió establecer un modelo facial para los depósitos de la Formación Guaduas e interpretar los ambientes de acumulación, con lo que se establecieron 4 sistemas deposicionales que van desde lagunas costeras hasta llanuras aluviales pasando por llanuras mareales, los que se resumen en la tabla 2. Este modelo progradacional parece tener cierta ciclicidad y se observan tendencias en las variaciones del nivel del mar con ambientes mareales sobre ambientes fluviales (Figuras 4A y 4B), de esta forma la transición entre ambientes transicionales a continentales parece ser oscilatoria, lo que refleja las variaciones del nivel del mar para esa época.

Correlación estratigráfica y construcción de los mapas preliminares de litofacies. A partir de la correlación estratigráfica hecha para dos intervalos de la formación Guaduas (Figuras 4A y 4B), teniendo como base las variaciones del nivel del mar y correlacionando a partir del comportamiento de las curvas relativas del nivel del mar, se observan varias flexiones importantes que se pueden seguir en todos los perfiles estratigráficos, y que en alguna medida representan periodos de invasiones marinas, donde se destacan 3 episodios transgresivos principales dentro de la cuenca, a partir de los cuales se realizó la correlación, lo que concuerda con las secuencias genéticas propuestas por Sarmiento (1994).

Con base en esto se escogió el intervalo a mapear que está delimitado por el primer y segundo episodio de invasión marina, de esta forma se intentó realizar una correlación aproximada para este intervalo y se tomaron tentativamente dos periodos representados por T1 y T2 (Figuras 4A y 4B). En ambos casos se nota la progresiva continentalización de las facies con la prevalencia hacia el techo de las llanuras aluviales. Para tener una idea de la distribución espacial y el comportamiento ambiental de la Formación para estos dos intervalos, se intentó plasmar en dos mapas las facies correspondientes con los tiempos T1 y T2 (Figuras 5A y 5B). En dichos mapas es evidente la prevalencia de los depósitos aluviales hacia el NE y hacia el T2 o parte más reciente de la formación.

TABLA 1. Resumen de las Litofacias de la Formación Guaduas (Amaya, 2009)

Código de Litofacias	Litología	Estructura Sedimentaria	Proceso
1	Arenisca con estratificación cruzada bidireccional.	Flaser de varios tipos, (Reineck y Singh 1980), estratificación en espina de pescado (Walker y James 1992; Choi y Dalrymple, 2004), cruzada de ondulitas y masiva. Estructuras de sedimentación blanda.	Combinación de procesos tractivos y de suspensión bajo condiciones hidrodinámicas variables. Periodos de corriente alternando con periodos de quiescencia bajo corrientes bidireccionales, (Walker y James 1992; Weimer <i>et al</i> 1982). Con disponibilidad de arena, arcilla y material orgánico.
2	Arenisca con estratificación ondulada irregular	Estratificación ondulada no paralela continua.(Reineck y Singh, 1980)	Periodos de corrientes tractivas alternando con periodos de quiescencia bajo condiciones favorables para deposición de arena y arcilla.(Reineck y Singh, 1980)
3	Intercalaciones rítmicas de arenisca y arcillolita (Ritmitas)	Laminación plana paralela arena/arcilla en forma rítmica. (Reineck y Singh, 1980; Choi y Dalrymple, 2004)	Depositación por suspensión con cambios cortos y regulares de corta duración relativos al transporte o producción de material.(Reineck y Singh 1980)
4	Areniscas con estratificación heterogénea. (Heterolithic Bedding)	Estratificación heterogénea- se puede presentar estratificación de ondulitas (ripple bedding), con superficies de reactivación, estratificación lenticular y ondulada. (Walker y James, 1980, Reineck y Singh 1980). Estructuras de sedimentación blanda.	Combinación de procesos tractivos y de suspensión, con producción y migración de ondulitas pequeñas bajo la acción de corrientes bidireccionales, con procesos de retrabajamiento intermitente. (Reineck y Singh,1980).
5	Arcillolita con estratificación lenticular de areniscas	Estratificación lenticular de varios tipos. (Reineck y Singh, 1980) el tamaño de los lentes puede variar de unos pocos milímetros a varios centímetros, Estructuras de sedimentación blanda (Boggs,1987)	Formación incompleta de ondulitas de arena formadas sobre substratos arcillosos, relativo a influjos esporádicos de arena. Preservadas por la deposición de la siguiente lamina de arcilla, bajo condiciones de corriente y olas (Reineck y Singh, 1980).
6	Arcillolitas con laminación tenue y macrorestos vegetales y carbón.	Laminación tenue a plana paralela o no visible (masiva), grietas de desecación, marcas de raíces. (Reineck y Singh, 1980), restos de hojas, pirita. Pliegues sin sedimentarios (Boggs,1978)	Suspensión , con eventual influjo de materiales clásticos finos, y material orgánico (Boggs, 1987)
7	Arcillolitas y limolitas silíceas, paleosuelos	Marcas de raíces, grietas de desecación, características pedogeneticas (Miall, 1985)	Periodos de intensa evaporación, procesos pedogenéticos (Walker y James, 1992)
8	Arenisca con estratificación cruzada en artesa.	Estratificación Cruzada en artesa, Rip up clasts (Reineck y Singh, 1980)	Depositación por migración de macroformas bajo flujo unidireccional (Reineck y Singh, 1980).
9	Areniscas con estratificación cruzada tabular.	Estratificación cruzada tabular, ripples de corriente. (Reineck y Singh, 1980)	Depositación por migración de ondulas de gran escala. (Boggs, 1987)
10	Areniscas con estratificación plana.	Estratificación horizontal (Miall, 1984)	Depositación durante Alto Régimen de flujo (Cant,1982)
11	Areniscas con estratificación cruzada cabalgante	Estratificación cruzada cabalgante (Reineck y Singh , 1980)	Migración y crecimiento simultaneo de ondulas de corriente. (Reineck y Singh, 1980).
12	Areniscas Masivas	Masivas, estratificación cruzada. (Reineck y Singh, 1980)	Depositación rápida a partir de suspensión, bioturbación. (Walker y James, 1992)

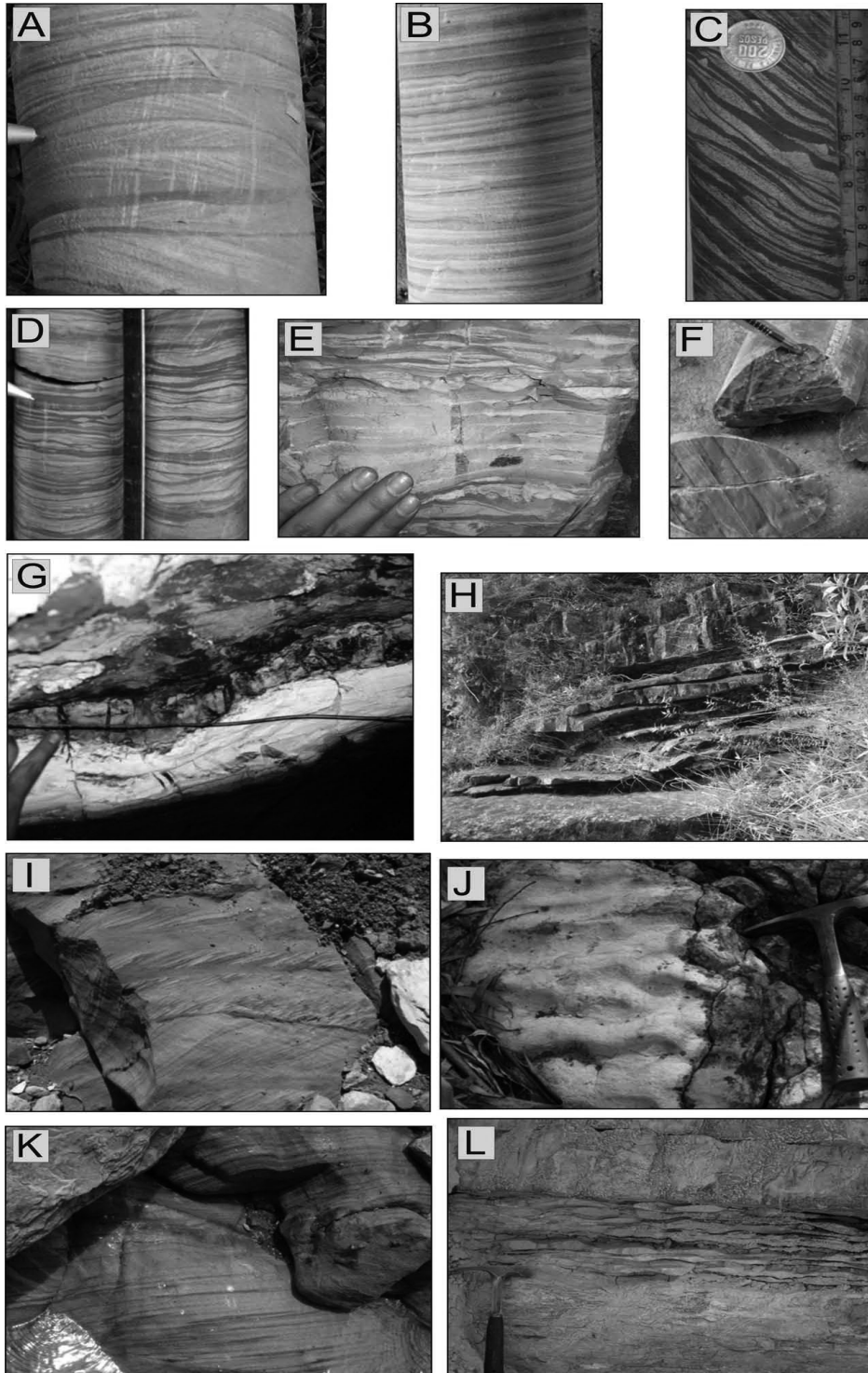


FIGURA 3. Fotografías litofacias de la Formación Guaduas A) Arenisca con estratificación cruzada bidireccional. B) Intercalaciones rítmicas de arenisca y arcillolita (Ritmitas) C) Arenisca con estratificación ondulada irregular. D) Areniscas con estratificación heterogénea. E) Arcillolita con estratificación lenticular de areniscas F) Arcillolitas con laminación tenue, macrorestos vegetales y carbón. G) Arcillolitas y limolitas silíceas, paleosuelos H) Arenisca con estratificación cruzada en artesa I) Areniscas con estratificación cruzada tabular. J) Ripples de corriente hacia el techo de la litofacies areniscas con estratificación cruzada en artesa K), Areniscas con estratificación plana paralela. L) Areniscas con estratificación cruzada cabalgante.

TABLA 2. Interpretación de los Ambientes de Depósito de la Formación Guaduas (Amaya, 2009)

Asociación de Litofacias		Asociación de Litofacias	Ambiente de Depósito		
A	1,5,6,12	Intercalación e interdigitación de Areniscas, limolitas laminadas y arcillolitas con estratificación lenticular. Abundante material carbonoso finamente diseminado.	Lagunas Costeras		
B	B1	1,2,4	Areniscas con estratificación flaser, en espina de pescado, intercalada con arcillolita y limolitas con estratificación heterogénea. Abundante material carbonoso finamente diseminado	Zona Submareal	Llanura Mareal
	B2	1,2,3,4,5	Areniscas con estratificación flaser, arcillolitas y limolitas con estratificación heterogénea, areniscas con laminación ondulada, arcillolitas con laminación lenticular. Abundante material carbonoso finamente diseminado, ritmitas mareales, carbón.	Zona Intermareal	
	B3	4,5,6,7	Arcillolitas con laminación tenue, a masivas, localmente piríticas, intercaladas con carbón, desarrollo de grietas de desecación, marcas de raíces, hojas fósiles.	Zona Supramareal	
C	6,12	Arcillolitas tenuemente laminadas y masivas, características pedogenéticas, concreciones de óxidos de hierro, restos de hojas y troncos, carbón, eventualmente intercaladas con capas delgadas de areniscas masivas.	Pantanos	Llanura de inundación aluvial	
	7,12	Arcillolitas silíceas duras, restos de material orgánico finamente diseminado, paleosuelos, concreciones de óxidos de hierro.	Depositos de sobrebanca (overbank deposits)		
	12	Areniscas estratificación cruzada tabular y masiva.	Rompimiento de canal (Crevasse Splay)		
D	8	Areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada en artesa.	Canal Fluvial	Canal Meandrico	
	9	Areniscas con estratificación cruzada tabular de alto ángulo.	Barras laterales		
	10	Areniscas con estratificación Plana, ricas en material orgánico.	Canal de alto régimen de flujo.		
	11	Estratificación cruzada cabalgante (Climbing ripple cross lamination)	Dique Fluvial. (Levee deposits)		

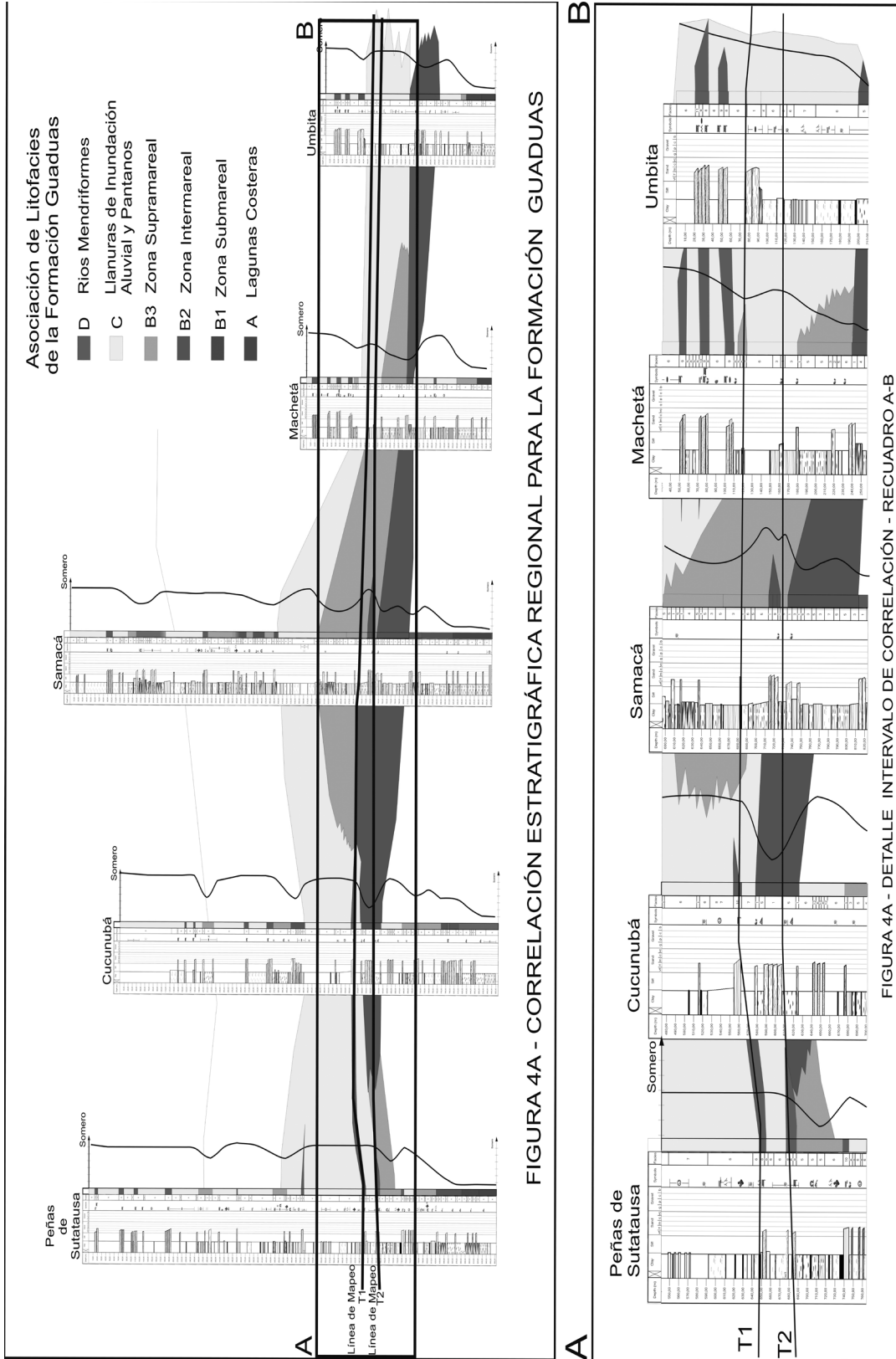


FIGURA 4A. Correlación estratigráfica para la Formación Guaduas Peñas de Sutatausa – Umbita

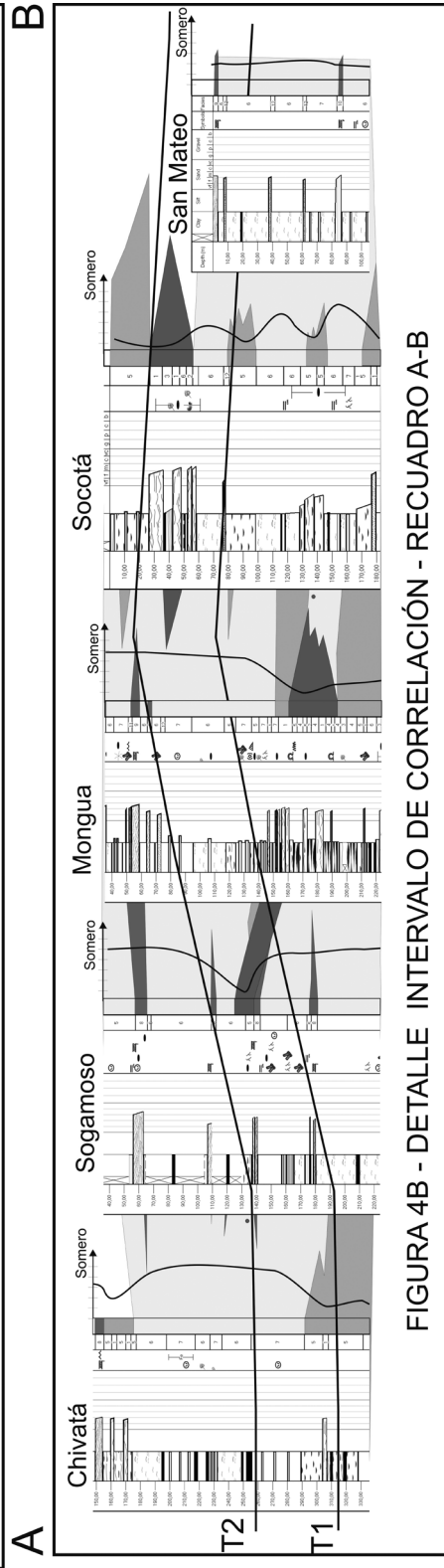
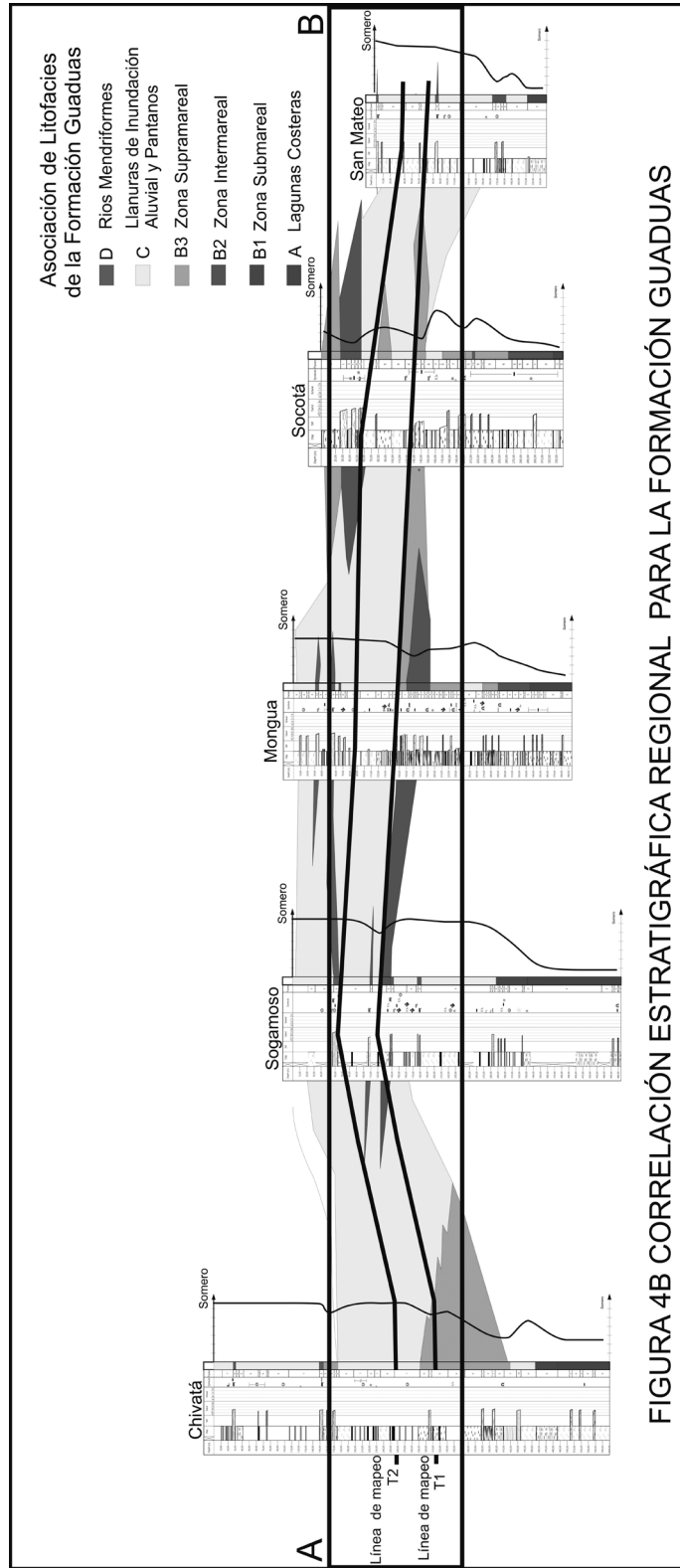


FIGURA 4B. Correlación estratigráfica para la Formación Guaduas Chivatá – San Mateo

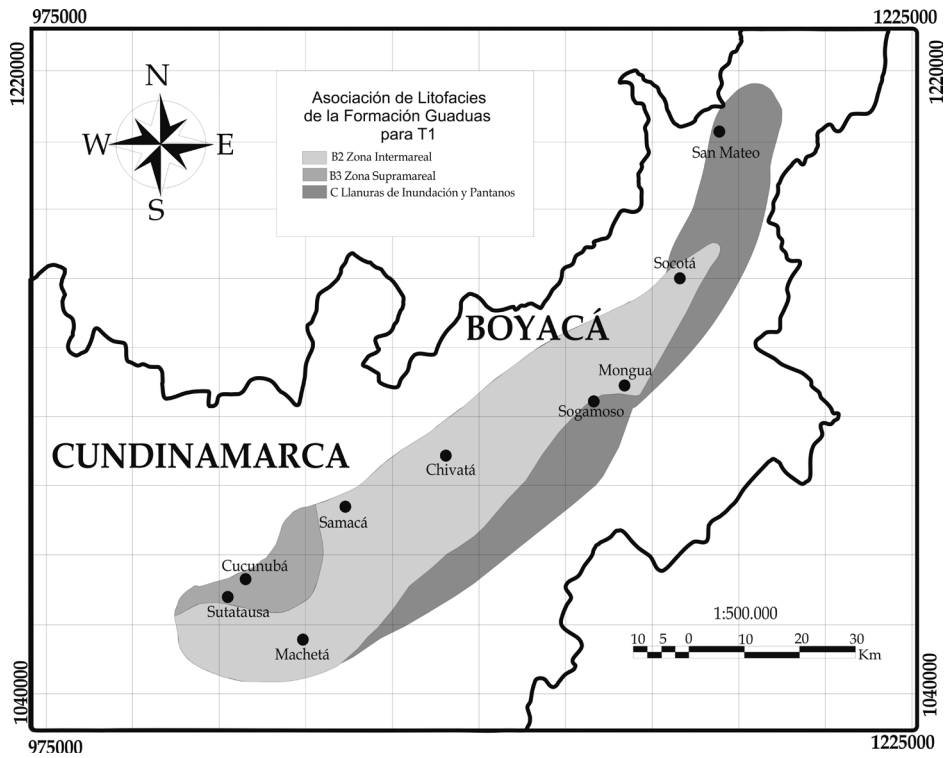


FIGURA 5A. Mapa de Litofacies para T1 - Formación Guaduas

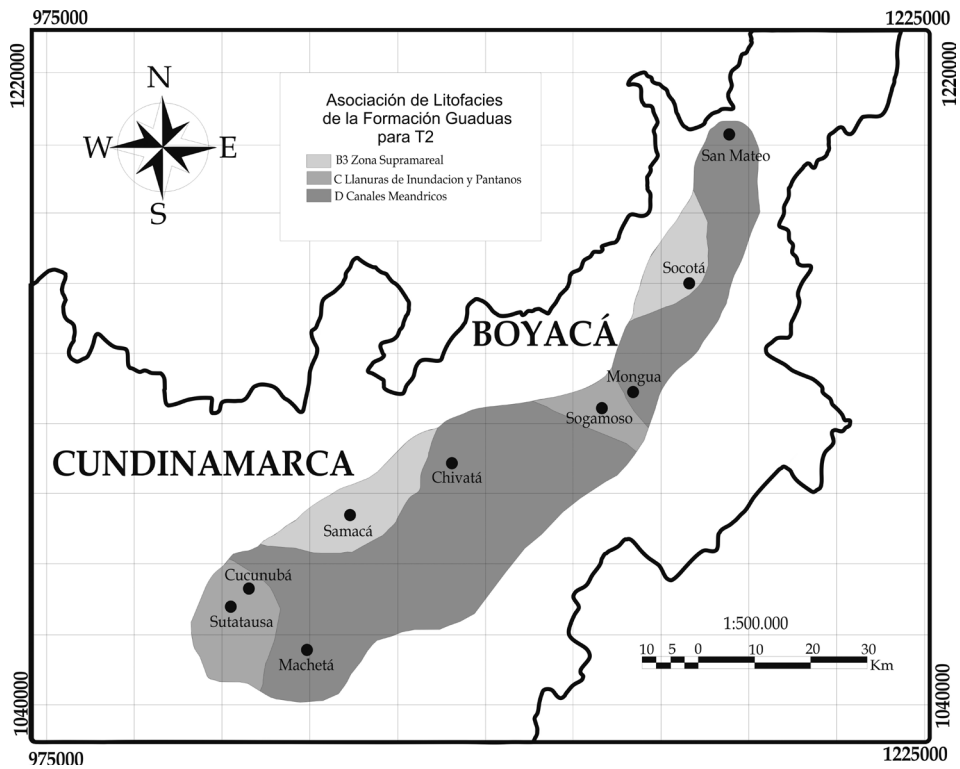


FIGURA 5B. Mapa de Litofacies para T2 - Formación Guaduas

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La Formación Guaduas parece ser una secuencia cíclica en la que las mismas asociaciones de facies se repiten dentro de los perfiles estratigráficos, lo que permitió realizar un análisis Markoviano (Amaya, 2009). A partir del análisis se deduce que se mantiene el predominio de ambientes mareales y fluviales hacia la parte noreste de la cuenca, pero con una reducción evidente en el espesor de la sucesión estratigráfica en dirección S-N y W-E, comenzando con facies más marinas hacia la base, lo que se puede generalizar para toda la cuenca (Figuras 4A y 4B), pasando progresivamente a llanuras mareales, llanuras de inundación Aluvial y Canales Meandriiformes, donde se hace evidente una tendencia en la somerización. Sin embargo, entre cada transición se pueden observar comportamientos cíclicos más pequeños dentro de cada subambiente, es decir la repetición de una misma litofacies dentro de un ambiente particular en una escala pequeña y la repetición de los ambientes si se observa en una escala grande. Esta ciclicidad pone de manifiesto varios episodios transgresivos que están marcados por el avance de los ambientes mareales sobre las facies aluviales (Figuras 4A y 4B), sin embargo se mantiene una tendencia generalizada en la continentalización de los ambientes acompañado por un adelgazamiento progresivo de los depósitos en dirección S-N y preferencialmente W-E. El área Socotá es la excepción donde parece mantenerse los ambientes transicionales hacia el techo.

Aunque el adelgazamiento y la continentalización de la formación hacia el norte es evidente en las figuras 4 y 5, este no se explica bien a partir de las dos hipótesis iniciales (erosión y onlap progresivo), sino que se explica mejor a partir de una menor subsidencia de la cuenca en el norte de Boyacá durante el tiempo de la depositación de la Formación Guaduas (Fabre, 1983). El adelgazamiento de la parte norte (Sogamoso-San Mateo, Fig. 4A) podría explicarse parcialmente por la hipótesis de tipo erosivo (Sarmiento, 1994). Dicha hipótesis explicaría el por qué en Cundinamarca la Formación Guaduas presenta mayor espesor con dos niveles carboníferos, mientras que en Boyacá, especialmente hacia el norte, solo se tiene un nivel de carbones, lo que correspondería al nivel inferior ya que el superior fue posiblemente erosionado (Figura 4A). En esta forma la existencia de una discordancia de tipo erosivo (Sarmiento, 1994) explicaría el menor espesor de la Formación Guaduas hacia el Norte de Boyacá y merecería estudios adicionales.

Si se tiene en cuenta que un mapa de facies no se considera el espesor relativo de los sedimentos y que estos son

mapas preliminares debido a los alcances del presente trabajo, se puede observar de manera muy generalizada la somerización de los ambientes al incrementarse la presencia de facies fluviales hacia el techo en dirección preferencial W-E y S-N (Figura 5). La distribución de los sedimentos para los tiempos T1 y T2 muestra que probablemente el avance o retroceso del mar tenía dos componentes, así para T1 parece haber tenido una tendencia de SW-NE y para T2 una componente más W-E. Dicha tendencia parece tener un control tectónico debido a la acción de las grandes fallas de cabalgamiento, como la Falla de Soapaga, causando subsidencia diferencial.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, el apoyo técnico de: Kyunk Choi, Cedric Carpentier, Angela Leguizamón, a Josh Reed por su colaboración con el manejo de PSICAT en el que se graficaron las columnas estratigráficas, a las empresas CARBONES DE LOS ANDES, CARBONES DEL CARIBE, COPROCARBÓN, MINERGÉTICOS por su colaboración al permitir la recolección de datos estratigráficos en minas y perforaciones. A Sandra Pedraza por su colaboración en la diagramación de las figuras, a La Dirección de Investigaciones (DIN) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia por el uso de los laboratorios, A dos evaluadores anónimos que dieron sus valiosos aportes para que este trabajo pudiera ser publicado.

REFERENCIAS

- Amaya, E. 2009. Litofacies y ambiente de acumulación de la Formación Guaduas (Maastrichtiano tardío – Paleoceno). Proyecto de grado. UPTC Sogamoso – Ingeniería Geológica. Biblioteca UPTC.
- Boggs, S. 1987. Principles of Sedimentology and Stratigraphy. Columbus, Merrill Publishing Co., 784 p.
- Choi, K., Dalrymple, R. 2004. Recurring tide-dominated sedimentation in Kyonggi Bay. Marine Geology, 81-96.
- Cooper, M., Addison, F., Alvarez, R., Coral, M., Graham, H., Hayward, B., Howe, S., Martinez, J., Naar, J., Peñas, R., Pulham, A., Taborda, A. 1995. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. A.A.P.G Bulletin, 1421-1443.

- Ethier, V. 1975. Application of Markov Analysis to the Banff Formation (Mississippian). *Journal of Mathematical Geology* , 47-65.
- Fabre, A. 1986. Geologie de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillère Orientale de Colombie). Tesis doctorado, Fac. Sciences, U. Genève. Genève.
- Fabre, A. 1983. La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental Colombiana) durante el Cretáceo y el Terciario Inferior. *Geología Norandina* N. 8 Bogotá.
- Folk, R.L. 1974. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Hemphill, 182 p.
- Higuera, C. 1993. Relaciones Estratigráficas Regionales de La Formación Guaduas. Bogotá, Colombia: Tesis de Pregrado - Universidad Nacional de Colombia. Biblioteca Geociencias Universidad Nacional.
- Kvale, E. 2006. The origin of neap-spring tidal cycles. *Marine Geology* , 5-18.
- Kvale, E., Archer, A. 1990. Tidal deposits associated with low-sulfur coals, Brazil Fm. (lower pennsylvanian), Indiana. *Journal of sedimentary petrology* , 563-574.
- Krumbein, W., Dacey, M. 1969 Markov chains and embedded Markov chains in geology, *Journal of Mathematical Geology* 1, 79-96.
- Laverde, F. 1979. Espesor, estratigrafía y facies de la Formación Guaduas en algunos sitios del cuadrángulo K-11. Tesis de Grado. Universidad Nacional Bogotá. Biblioteca de Geociencias Universidad Nacional.
- Mariño, J. y Morris, T. 1996. Erg Margin and Marginal Marine Facies Analysis of the Entrada Sandstone, Utha. *Museum of Northern Arizona* , 483-496.
- McCubbin. 1982. Barrier-Island and Strand-Plain Facies. In Shoelle y Spearing (ed), *Sandstone Depositional Environments AAPG*, (pp. 274-279).
- Miall, A. (1992). Alluvial Deposits. In R. y WALKER, *Facies Models: Response to Sea Level Change Geological Association of Canada*, (pp. 119-142).
- Miall, A.D. 1984. *Principles of Sedimentary Basin Analysis*. Springer-Verlag, New York, 483 p.
- Reineck, H., Singh, I. 1980. *Depositional sedimentary environments*. Springer, Berlin 551 p.
- Reinson, G. 1992. Transgressive Barrier Island and Estuarine Systems. In R. W. James, *Facies Models: Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada*. (pp. 179-194).
- Sarmiento, G. 1994. Estratigrafía y medios de depósito de la Formación Guaduas. *Boletín Geológico Volumen 32 N.1-3. INGEOMINAS Bogotá*.
- Sarmiento-Rojas, L., Van Wess, J., Cloetingh, S. 2006. Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera. *South American Earth Sciences* , 21, 383-411.
- Vega, A. 2006. Reconstituição paleoambiental dos depósitos miocenos da porção leste da bacia do solimões. Manaus, Brazil: Tesis de Maestria.
- Walker, R., James, W. 1990. *Facies Models: Response to Sea Level Change. Canada: Geological Association of Canada*. 530p.
- Walker, R. 1992. Facies Models and Modern Stratigraphic Concepts. In R. W. James, *Facies Models, Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada*, (pp. 1-14).
- Weimer, R., Howard, J., Lindsay, D. 1982. Tidal Flats and Associated Tidal Channels. In Shoelle and Spearing (ed), *Sandstone Depositional Environments. AAPG*, (pp. 191-245).

Trabajo recibido: Diciembre 2 de 2009

Trabajo aceptado: Junio 15 de 2010