



Procesos orogénicos del Paleoceno para la cuenca de Ranchería (Guajira, Colombia) y áreas adyacentes definidos por análisis de procedencia

Provenance analysis and Paleocene orogenic processes in the Rancheria Basin (Guajira, Colombia) and surrounding areas

GERMAN BAYONA¹⁻²

FELIPE LAMUS-OCHOA¹

AGUSTIN CARDONA²

CARLOS JARAMILLO²

CAMILO MONTES³

NADEJDA TCHEGLIAKOVA⁴

¹ Corporación Geológica ARES. Bogotá, Colombia

E-mail: gbayona@cgares.org

² Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales, Balboa, Ancon, Panamá

³ Carbones de Cerrejón, Bogotá, Colombia

⁴ Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Bayona, G., Lamus-Ochoa, F., Cardona, A., Montes, C., Tchegliakova, N. (2007): Procesos orogénicos del Paleoceno para la cuenca de Ranchería (Guajira, Colombia) y áreas adyacentes definidos por análisis de procedencia. - GEOLOGÍA COLOMBIANA, 32, pp. 21-46, 14 Figs., Bogotá.

RESUMEN

La cuenca de Ranchería esta limitada por la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) al Occidente y la Serranía de Perijá (SP) al Oriente, sistemas montañosos de composición diferentes y con procesos tectónicos pre-Eocenos pobremente documentados. Análisis de procedencia realizados en estratos del Paleoceno en la cuenca de Ranchería y flanco oriental de la Serranía de Perijá, junto con datos de paleocorrientes y estudios bio- y litoestratigráficos previos, permiten proponer a la SNSM como área fuente principal de los detritos terrígenos siliciclásticos para el Paleoceno. Los detritos siliciclásticos que señalan a la SNSM como principal área fuente son: microclina, esquistos grafitosos, esquistos micáceos, granates sin zonación y biotitas de altas temperaturas. Estos detritos, junto con plagioclasas, líticos volcánicos y sedimentarios, sugieren un área fuente que incluye los siguientes tipos de rocas: metamórficas de moderado a alto grado, plutónicas, volcánicas y sedimentarias. El reporte de feldespatos y líticos metamórficos en depósitos del Maastrichtiano sugieren suministro de detritos procedentes de la SNSM desde finales del Cretácico. El sistema deposicional propuesto para el Paleoceno Tardío con depósitos fluviales y parálisis hacia el Occidente, y depósitos de plataforma de carbonatos hacia el Oriente (coordenadas presentes) es sustentado por la dirección dominante hacia el Oriente de los indicadores de paleocorrientes y el incremento de la madurez composicional de las areniscas en este mismo sentido. El corto trayecto de transporte del material terrígeno y el rápido enterramiento de sedimentos en la cuenca de Ranchería permite la preservación de detritos químicamente inestables (e.g., feldespatos, esquistos grafitosos, palinomorfos retrabajados, fragmentos de micrita). Los detritos de micrita en la Formación Cerrejón (cuenca de Ranchería) y en mayor proporción en la Formación Marcelina (Occidente de la cuenca de Maracaibo) sugieren inestabilidad en la plataforma de carbonatos (actualmente involucrada en estructuras orientales de la SP). El incremento de la fracción cuarzosa (cuarzo monocristalino, chert, vidrio volcánico devitrificado) y de feldespato potásico al tope de la sucesión del Paleoceno en ambas cuencas junto con la presencia de tobas félsicas interestratificadas son indicios de: (1) mayor actividad tectónica acentuando los procesos de denudación en la SP y (2) actividad magmática en el límite Paleoceno-Eoceno en la esquina nor-occidental de la placa Suramericana.

Palabras Clave: *Cuenca de Ranchería, Análisis de Procedencia, Sierra Nevada de Santa Marta, Paleoceno, Serranía de Perijá.*

ABSTRACT

The Ranchería basin is bordered by the Santa Marta Massif (SMM) and Perija Range (PR), mountain systems with differences in composition and poorly documented pre-Eocene processes of deformation. Provenance analyses carried out in Paleocene strata cropping out in the Ranchería basin and the Eastern flank of the PR, integrated with paleocurrent, bio- and lithostratigraphic data, indicate that Paleocene siliciclastic terrigenous detritus were supplied mainly from the SMM. Microcline, graphic and micaceous schists, unzoned garnets and high-temperature biotites, together with volcanic and sedimentary lithic fragments, are the detritus that point out the SMM as the main source area. The report of feldspars and metamorphic lithic fragments in Maastrichtian rocks suggest that the SMM was a positive area since the latest Cretaceous. The eastward (present coordinates) change of depositional systems is confirmed by our paleocurrent data and the eastward increase of sandstone compositional maturity. Short distance of terrigenous detritus transport and high rates of subsidence in the Ranchería basin contributed to the good preservation of chemically unstable lithics and feldspar grains, detrital micrite fragments and reworked Upper Cretaceous palynomorph grains. Micrite detrital fragments, which are more abundant in the Marcelina Formation than in the Cerrejón Formation, indicate unstable tectonic conditions of the carbonate platform (presently involved in Eastern PR structures). The increase of monocrystalline quartz, chert, devitrified volcanic glass fragments and potassium feldspars in uppermost Paleocene units suggest increasing denudation processes in the PR and magmatic activity during the Late Paleocene-Early Eocene time at the NW margin of the South American plate.

Key words: *Ranchería basin, Provenance analysis, Santa Marta massif, Paleocene.*

INTRODUCCIÓN

El análisis composicional de detritos sin-orogénicos es el procedimiento más utilizado para identificar la composición del área fuente y permite postular posibles zonas de aporte (DICKINSON 1985). La rápida destrucción de fragmentos químicamente inestables en climas tropicales permite inferir una distancia a dichas áreas de aporte (JOHNSON 1993) o cambios en la tasas de subsidencia. La integración de estos resultados con análisis sedimentológicos, estratigráficos, bioestratigráficos, y termocronológicos (e.g. huellas de fisión) permite entender la evolución tectónica de una cuenca y de sus áreas fuentes. Los análisis de procedencia integran métodos (1) petrográficos, (2) identificación y caracterización química de los minerales individuales en la fracción tamaño arena, (3) análisis geoquímicos de roca total o en fracción lodosa, y (4) la asociación de dataciones geocronológicas, que pueden incluir circones o micas (ver consideraciones estadísticas entre métodos en EYNATTEN *et al.* 2003).

Mediante la asociación composicional dentro de la secuencia se pueden designar petrofacies que pueden ayudar en la división estratigráfica informal y aportar criterios de correlación con las unidades formales (DICKINSON 1970, 1985, MARCHESINI *et al.* 2000, WELTJE & EYNATTEN 2004). Las petrofacies puede reflejar semejanzas en la composición de las zonas de aporte; sin embargo, la composición similar en arenas no es un indicador absoluto de procedencia, estilos tectónicos o historia de transporte, enterramiento y levantamiento (JOHNSON 1993). Múltiples factores afectan la composición de los detritos terrígenos en una cuenca sedimentaria (Fig. 1). Desde los procesos de erosión hasta el enterramiento de los detritos interactúan varios factores donde el régimen tectónico, el clima y la composición de la roca fuente son los factores principales.

La energía del sistema de transporte, junto a vegetación y procesos diagenéticos interactúan con los factores de primer orden formando un sistema complejo que define la composición final de una unidad detrítica.

El objetivo de este trabajo es determinar la procedencia de los detritos siliciclásticos extra-cuenca de los estratos Paleoceno expuestos en la cuenca de Ranchería (mina del Cerrejón, Colombia) y flanco oriental de la Serranía de Perijá (SP, mina Paso Diablo, Venezuela) (Fig. 2A), a partir de análisis composicionales de areniscas, conglomerados, minerales pesados y palinología realizados en muestras colectadas en columnas estratigráficas y pozos. La comparación de los análisis de procedencia de estratos hoy expuestos en flancos opuestos de la SP se realizó con el fin de establecer: (1) si la similitud en la composición de las areniscas sugiere una conexión de estas cuencas para el Paleoceno, y (2) el tiempo en que la SP y la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) suministraron detritos siliciclásticos a las cuencas. Medidas de indicadores de paleocorrientes son presentados como soporte a nuestras interpretaciones.

MARCO GEOLOGICO

La cuenca Ranchería está limitada por la SNSM al Occidente, la SP al Oriente y el sistema de fallas de Oca al Norte; la mina del Cerrejón se localiza al sur de la Falla de Oca (Fig. 2A). Los dos sistemas montañosos que limitan la cuenca de Ranchería exponen rocas de composición diferente (Fig. 3). La SNSM esta compuesta por tres cinturones tectono-estratigráficos alineados con dirección NE-SW. Los dos cinturones al Noroccidente (provincias de Sevilla y Santa Marta) son los más jóvenes y se componen de rocas metamórficas de grado bajo a medio afectadas por plutones triásicos, jurásicos y cenozoicos (TSCHANZ *et al.*

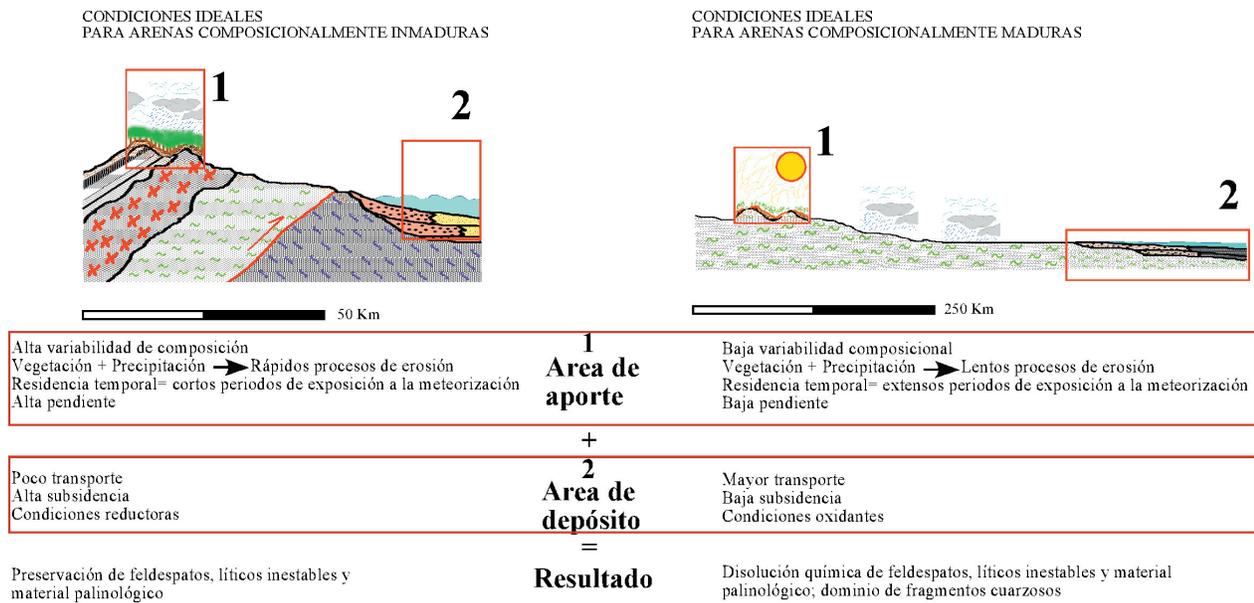


Fig. 1. Diagrama esquemático de factores que afectan la composición de los detritos terrígenos durante los procesos de meteorización, transporte y acumulación (modificado de LAMUS 2006). En la composición final aún se deben considerar efectos diagenéticos por procesos de enterramiento y levantamiento.

1969, 1974). El tercer cinturón al Suroriente incluye rocas metamórficas Precámbricas de alto grado (facies granulita) junto a rocas vulcano-sedimentarias del Triásico-Jurásico (TSCHANZ *et al.* 1969, 1974, RESTREPO-PACE 1995). En la mayor parte de la SP afloran unidades sedimentarias del Paleozoico junto a rocas vulcano-sedimentarias del Jurásico y la secuencia marina Cretácica. En la zona central y sur, cerca al Macizo de Santander, afloran algunas rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico (MILLER 1962, TSCHANZ *et al.* 1969, 1974, KELLOGG 1984, UJUETA & LLINÁS 1990). En el flanco NE de la SP la mina Paso Diablo se localiza en el flanco occidental del sinclinal de Manuelote (Fig. 4B), estructura limitada al Oriente por la Falla del Tigre (MILLER 1962, BELLIZZIA *et al.* 1976, KELLOGG 1984, QUIJADA & CASSANI 1997). En este sinclinal afloran las unidades del Cretácico al Eoceno Inferior; por el contrario en las estructuras al Oriente de la Falla del Tigre, las unidades post-Eoceno Medio reposan en discordancia angular con estratos Cretácicos y pre-Cretácicos (KELLOGG 1984, QUIJADA & CASSANI 1997). La Falla del Tigre ha sido interpretada como una falla transpresiva con vergencia SE (MILLER 1962, QUIJADA & CASSANI 1997, DUERTO *et al.* 2006, Fig. 4D) o de cabalgamiento con vergencia NW (KELLOGG 1984, Fig. 4B).

Un modelo de acumulación transgresivo - regresivo para el Cretácico se ha propuesto a partir del análisis de las rocas del Cretácico-Paleoceno. Durante el Aptiano-Turoniano se registran varias transgresiones marinas permitiendo la acumulación de las calizas de plataforma del Grupo Cogollo, calizas bituminosas y chert de la Formación La Luna, y calizas glauconíticas de los miembros inferiores de la Formación Molino (o Colón) (MILLER 1962, CÁCERES

et al. 1980, MARTÍNEZ & HERNÁNDEZ 1992). El proceso de regresión se extienden hasta el comienzo del Paleoceno (Cáceres *et al.* 1980) y consiste de lodolitas calcáreas con foraminíferos del miembro superior de la Formación Colón (MARTÍNEZ & HERNÁNDEZ 1992), seguido por la acumulación en aguas someras de depósitos mixtos (calcáreos y silici-clásticos) con pelecípodos y ostreidos de las formaciones Hato Nuevo y Manantial (ETAYO-SERNA 1979, CÁCERES *et al.* 1980). Para el Paleoceno Tardío se ha propuesto la migración hacia el Oriente de una sistema deltaico y de ciénagas para la Formación Cerrejón, periodo en el cual se han interpretado sistemas fluviales que parte de las estribaciones de la SNSM y se extienden hasta el Oriente de Maracaibo (VILLAMIL 1999, PARDO 2004). Posibles áreas fuentes propuestas para detritos terrígenos del Paleoceno son el Escudo de Guyana, los macizos de Santa Marta y Santander, y la Serranía de Perijá.

El inicio del levantamiento de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) y la Serranía de Perijá (SP) y el mecanismo de estos levantamientos es aún controversial. En los mapas paleogeográficos del Maastrichtiano-Paleoceno propuestos por VILLAMIL (1999) y GÓMEZ *et al.* (2005) se interpreta la SNSM como una extensión norte del levantamiento de la Cordillera Central, el cual está limitado por fallas inversas. Este levantamiento genera una cuenca de antepaís al oriente de la Cordillera Central-SNSM, con acumulación de sedimentos sinorogénicos más jóvenes hacia el norte del Valle del Magdalena (GÓMEZ *et al.* 2005). Sin embargo, fallas inversas o de cabalgamiento no se reportan al Suroriente de la SNSM; por el contrario, la cartografía muestra un monoclinal buzando al Suroriente donde unidades Cre-

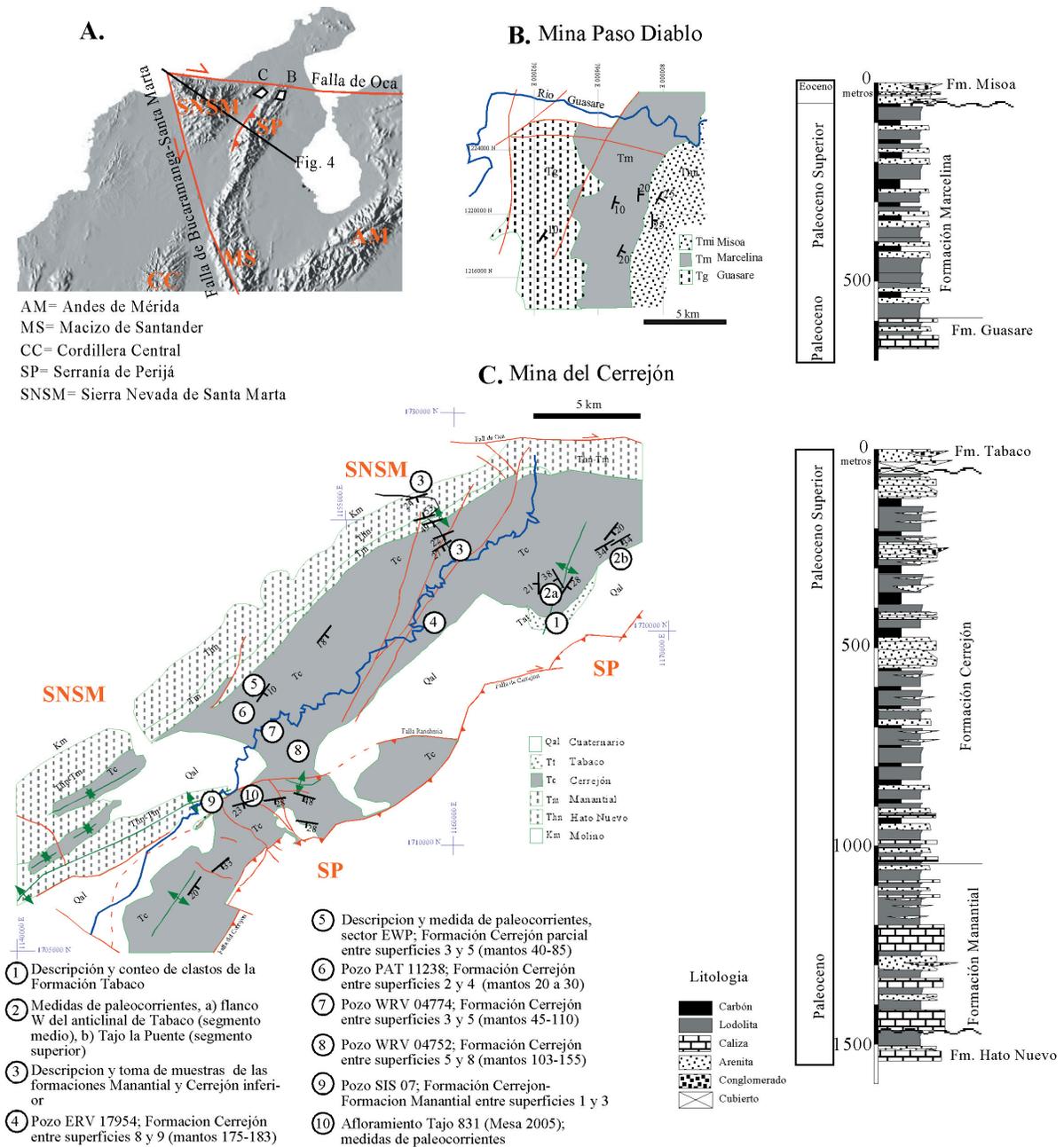


Fig. 2. (A) Mapa regional de localización de las áreas de estudio en lados opuestos de la Serranía de Perijá (SP). **(B y C)** Mapas geológicos y columna estratigráficas generalizadas de las áreas de estudio: la mina Paso Diablo (Venezuela, modificado de AMADO & LEAÑO 1984) y la mina del Cerrejón (Colombia, modificado de TSCHANZ *et al.* 1969, CÁCERES *et al.* 1980, CARDOZO & GÓMEZ 1980, ESPINOSA & ÁLVAREZ 1980, BAYONA *et al.* 2004). Los círculos con número indican la localización de pozos, secciones o lugares donde se realizaron medidas de paleocorrientes o conteo de clastos.

tácicas reposan en contacto discordante y en relación “on-lap” sobre unidades pre-Cretácicas (TSCHANZ *et al.* 1969). El modelo propuesto por MONTES *et al.* (2005a) explica el levantamiento de la SNSM como un basculamiento cortical a lo largo de un eje horizontal; el basculamiento reactiva

estructuras pre-existentes en la SP desde el Paleoceno (Fig. 4A). SHAGAM *et al.* (1984) reporta huellas de fisión en zircones cuyas edades más jóvenes las interpreta como exhumación de la SP durante el límite Cretácico-Terciario. MILLER (1962) y KELLOGG (1984) no consideran actividad

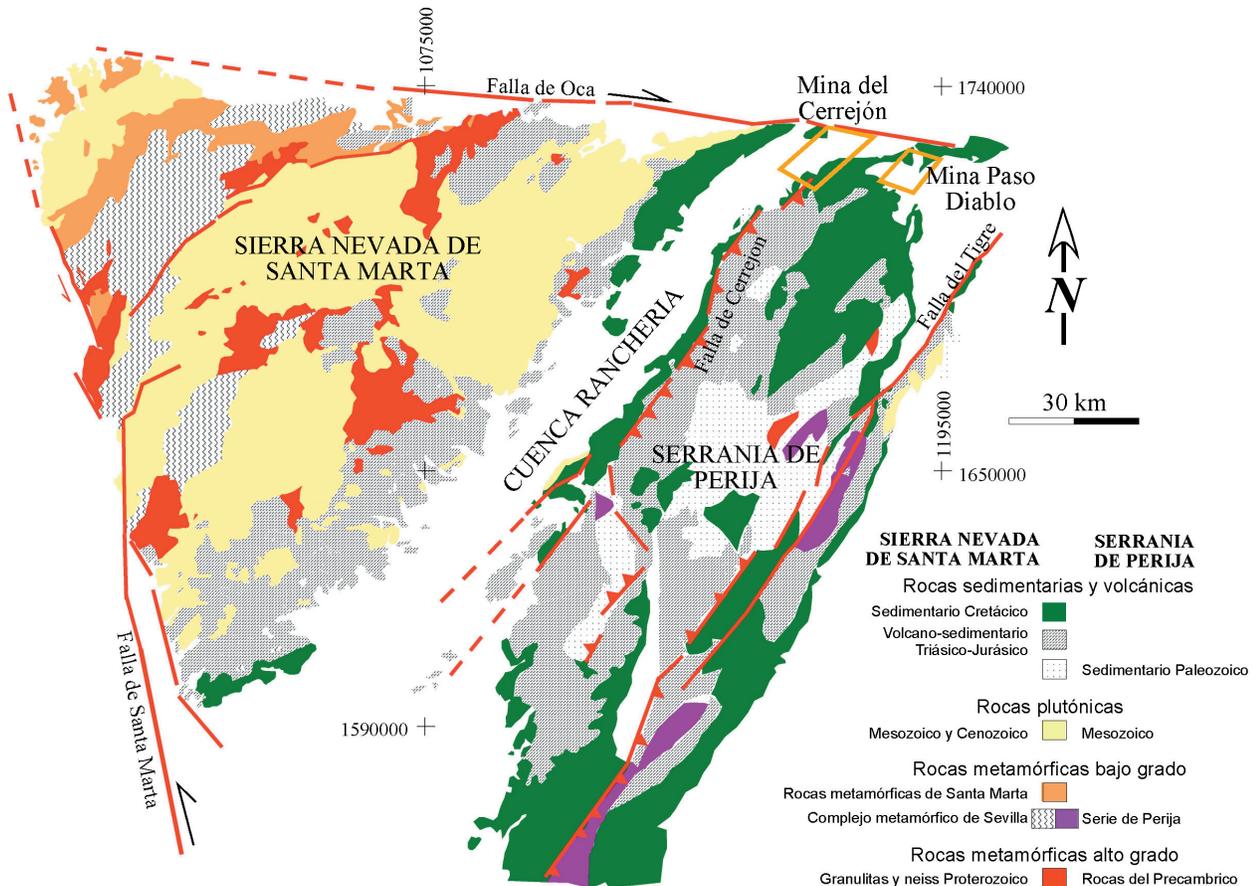


Fig. 3. Mapa generalizado de la Sierra Nevada de Santa Marta y Serranía de Perijá diferenciando unidades pre-Cenozoicas por su edad y composición, y estructuras mayores. Modificado de BELLIZZIA *et al.* (1976) y DUERTO *et al.* (2006) para Venezuela, y TSCHANZ *et al.* (1969) y FORERO *et al.* (2002) para Colombia.

tectónica en la SP durante el Maastrichtiano-Paleoceno. GALLANDO *et al.* (2002) propone un evento compresional del Campaniano medio-Maastrichtiano Temprano seguido por un evento de extensión del Cretácico Superior al Eoceno Medio basado en información sísmica de la parte central del flanco oriental de la SP. QUIJADA & CASSANI (1997) sugieren un episodio de reactivación normal de la Falla del Tigre durante el Paleoceno Tardío-Eoceno Temprano para explicar la ausencia de estratos del Paleoceno Inferior al Oriente de la Falla del Tigre.

Discordancias angulares post-Eocenas medias se reportan en ambos flancos de la SP. MILLER (1962) y KELLOGG (1984) postulan el primer registro de actividad tectónica durante el Eoceno Temprano debido a una discordancia angular infrayaciendo estratos del Eoceno Medio al Oriente de la Falla del Tigre. Según KELLOGG (1984), el levantamiento de bloques incorporando basamento al oriente de la Falla del Tigre ocurrió durante el Oligoceno tardío ("Alto del Palmar", flanco oriental de la SP; Fig. 4B). Una discordancia angular entre estratos post-Eoceno (?) su-

prayaciendo estructuras que involucran estratos del pre-Cretácico – Eoceno Inferior (?) se reporta en la parte sur de la Cuenca de Cesar (MORA & GARCÍA 2006) y al sur de la cuenca de Ranchería (CÁCERES *et al.* 1981). Al norte de la cuenca de Ranchería, depósitos aluviales recientes reposan discordantemente sobre la sucesión Paleocena (CÁCERES *et al.* 1980; Fig. 2C).

Los modelos regionales propuestos para la configuración estructural actual de la SNSM y SP no coinciden en el estilo de deformación. KELLOGG (1984) propone para el Mioceno Tardío-Plioceno un sistema de cabalgamientos de bajo ángulo con vergencia al NW con un despegue a aproximadamente 9 km de profundidad como mecanismo de levantamiento de la SP y los Andes de Mérida (Fig. 4B). CEDIEL *et al.* (2003) propone un sistema de fallas inversas de alto ángulo con vergencia hacia el NW con el cual la SNSM se levanta en asociación a un sistema de fallas de retrocabalgamiento en el flanco SE de la SNSM. Este sistema de fallas de alto ángulo controla la deformación de la SP y los Andes de Mérida con un nivel de despegue regional

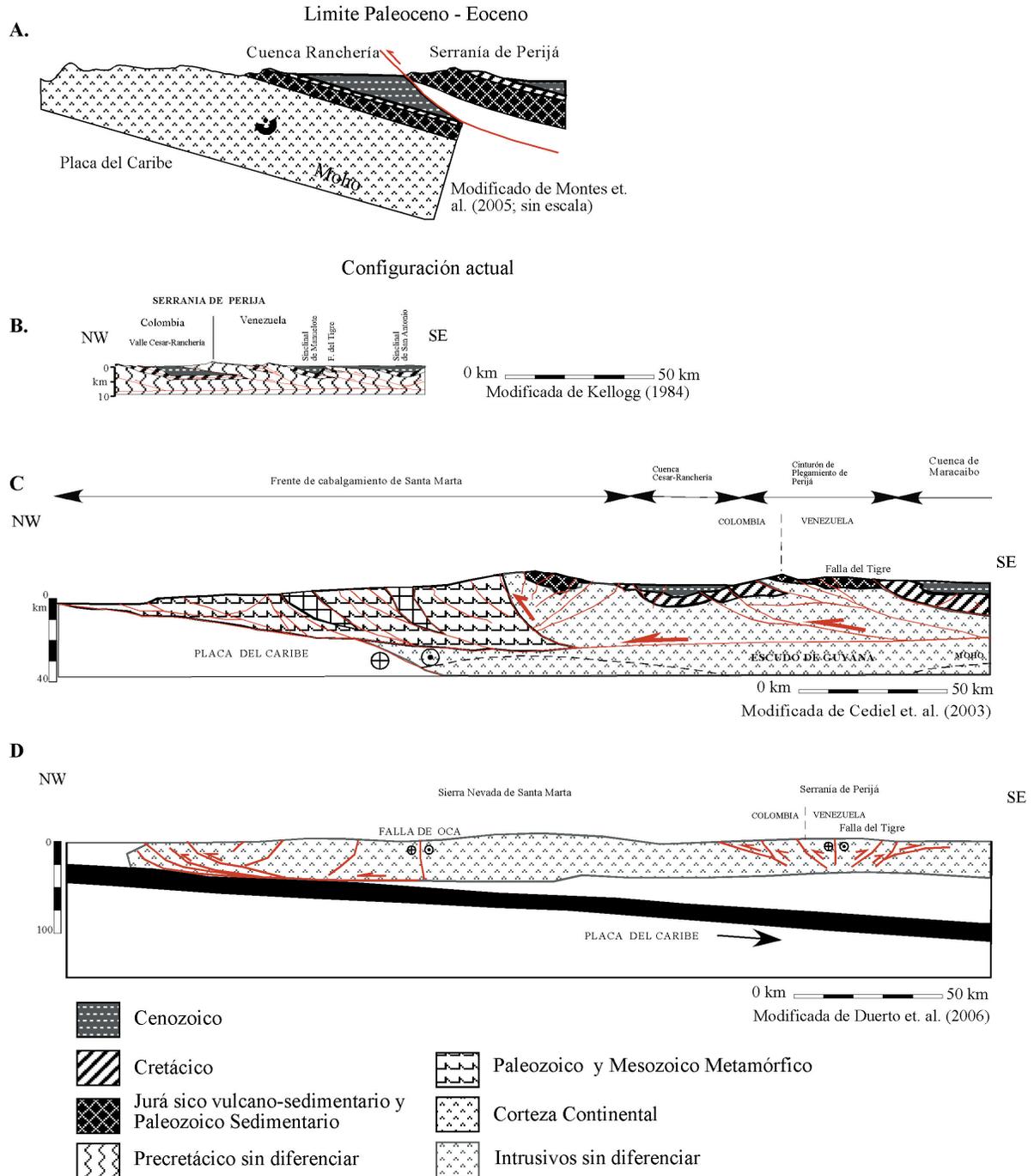


Fig. 4. (A) Modelo conceptual del levantamiento de la Sierra Nevada de Santa Marta para el Paleoceno Tardío-Eoceno Temprano. (B-D) Transectas NW-SE con tres versiones de modelos estructurales propuestos para la Serranía de Perijá y la SNSM. Note las diferentes interpretaciones de vergencia de la Falla del Tigre (ver texto para discusión de los diferentes modelos).

aproximadamente a 25 km de profundidad (Fig. 4C). DUERTO *et al.* (2006) plantea la inversión positiva durante el Cenozoico de sistemas de fallas normales de edad Jurásico para la SP y los Andes de Mérida con zonas triangulares

en profundidad (Fig. 4D). FLOREZ & MAVKO (2002) utilizan modelos elásticos para sugerir el levantamiento actual de la SNSM como resultado de la interacción de la falla sinistral de Santa Marta-Bucaramanga y la falla dextral de Oca

(ver fallas en Fig. 2A), similar a lo propuesto por KELLOGG (1984). MONTES *et al.* (2005b) propone un sistema de traslación y rotación en sentido horario de la corteza continental rígida limitado por las fallas de Oca y Bucaramanga como mecanismo para explicar la interacción de sistemas dextral y sinistral de transpresión con el movimiento de la placa del Caribe. La restauración palinspástica está fuera de los alcances de este artículo, y por ello las orientaciones asignadas en nuestros análisis están dadas en coordenadas geográficas presentes.

Estratigrafía de las unidades Paleocenas y análisis composicionales previos

La sucesión Paleocena consiste de carbonatos gradando a arcillolitas, shales, areniscas, lodolitas y carbones (Fig. 2). Las unidades Paleocenas en la cuenca de Ranchería no están formalmente propuestas (DE PORTA 1974), y seguimos la división informal sugerida por CÁCERES *et al.* (1980). En Venezuela seguimos la nomenclatura sugerida por AMADO & LEAÑO (1984), la cual utiliza nomenclatura válida según el Léxico Estratigráfico Venezolano (PDVSA-INTEVEP 2005; acceso por internet en: www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm).

En la mina Paso Diablo la sucesión Paleocena está compuesta por las Formaciones Guasare y Marcelina (AMADO & LEAÑO 1984) y las cuales no superan 1 km de espesor (Fig. 2B). La Formación Guasare (Paleoceno) corresponde a una sucesión mixta de carbonatos con glauconita y terrígenos acumulados en un delta en condiciones dominantes de mareas y tormentas (PARDO 2004). Suprayaciendo las calizas de la Formación Guasare se encuentran las areniscas masivas calcáreas interestratificadas con shales, lodolitas grises y carbón de la Formación Marcelina de edad Paleoceno Tardío (PARDO 2004, MONTES *et al.* 2005a). La Formación Misoa (Eoceno Inferior) incluye en su parte inferior capas masivas de areniscas gruesas, localmente con conglomerados interestratificados con shales grises; hacia la base se pueden encontrar localmente calizas y areniscas calcáreas.

En la mina del Cerrejón esta sucesión se compone de las Formaciones Hato Nuevo, Manantial, Cerrejón y Tabaco con un espesor total que supera los 2 km (Fig. 2C). La Formación Hato Nuevo (Paleoceno Inferior ?) consiste de arcillolitas grises arenosas con un incremento de calizas en la parte media; hacia el tope dominan las calizas arenosas con gasterópodos y pelecípodos. La Formación Manantial (Paleoceno; ETAYO-SERNA 1979) es una unidad con intercalaciones de calizas arenosas (dominando hacia la base), lodolitas y areniscas lodosas (dominando hacia el tope). La Formación Cerrejón (Paleoceno Superior; VAN DER KAARS 1983, BAYONA *et al.* 2004, JARAMILLO *et al.* 2007) consiste esencialmente de shale, lodolitas arenosas, areniscas grises y carbón, con una notable ausencia de una sucesión siliciclástica conglomerática. La Formación Tabaco (Paleoceno Superior; JARAMILLO *et al.* 2007) incluye areniscas y areniscas conglomeráticas grises a amarillentas

con leves intercalaciones de lodolitas arenosas. Cambios en el patrón vertical de acumulación (BAYONA *et al.* 2004) y geoquímica (RAMOS 1990, LAYTON 2006) permite identificar superficies de inundación de carácter regional (BAYONA *et al.* 2004, MESA 2005, MONTES *et al.* 2006). Las superficies 4 y 7 de BAYONA *et al.* (2004) son utilizadas para dividir informalmente la Formación Cerrejón en los segmentos inferior, medio y superior (Fig. 5A - 5B).

Varios estudios petrográficos cualitativos de las rocas siliciclásticas en la cuenca de Ranchería indican la inmadurez textural de las areniscas de las formaciones Colón y Cerrejón. MARTÍNEZ (1985) y CÁCERES *et al.* (1981) reportan los siguientes fragmentos terrígenos en muestras del miembro superior de la Formación Colón de edad Maastrichtiano: filosilicatos, cuarzo hialino, cuarzo mono y policristalino, feldespatos angulares (albita y potásico), limolitas, chert y fragmentos de rocas plutónicas, volcánicas y metamórficas. Al sur en la cuenca de Cesar, las areniscas de las formaciones Molino, Barco y Cuervos son de composición litoarenitas con un incremento de líticos metamórficos y plutónicos hacia las unidades superiores con respecto a los líticos sedimentarios (MORA *et al.* 2006). GIL & MARTÍNEZ (1989) reportan la presencia de cuarzo mono y policristalino, chert, y feldespatos en tres muestras de areniscas calcáreas estudiadas. GARCÍA (1981, 4 muestras) y RAMOS (1990, 6 muestras) sugieren una composición inmadura de las areniscas de la Formación Cerrejón con cuarzo entre 25-72%; feldespatos entre 5-20% y líticos entre 6-50%, indicando diferentes grados de alteración de los feldespatos y concluyendo que las áreas fuentes no eran distantes. En el bloque colgante de la Falla de Ranchería, CARDOZO & GÓMEZ (1980, 4 muestras) y ESPINOSA & ÁLVAREZ (1980, 10 muestras) reportan una variación de cuarzo entre 20-75%; feldespatos entre 0-45% y líticos entre 0-10%. GARCÍA (1981) indica la presencia de fragmentos de cuarzo y chert de hasta 3 cm de diámetro en la Formación Tabaco. La metodología de conteo de puntos, identificación de tipos de granos y ubicación estratigráfica de estas muestras no son especificados en estos trabajos. Nuestro estudio incluye un muestreo sistemático y análisis riguroso de areniscas colectadas en columnas/pozos de las formaciones Manantial, Cerrejón y Tabaco lo cual nos permite dividir esta sucesión litológicamente monótona por su petrofacies (Fig. 5A - 5B).

METODOLOGIA

Un total de 50 muestras se analizaron petrográficamente, de las cuales se tificaron 31 muestras para la identificación de feldespato potásico con sodio cobaltinitrito. El muestreo está diseñado para controlar cambios de composición en cada unidad estratigráfica del Paleoceno. Debido al tamaño fino a muy fino de las areniscas, se seleccionaron las secciones cuya granulometría no fuera menor de tamaño arena fina para realizar un conteo de 300 granos del armazón (desviación estándar de $\pm 5\%$ según VAN DER PLAS & TOBI 1965). El método Gazzi-Dickinson

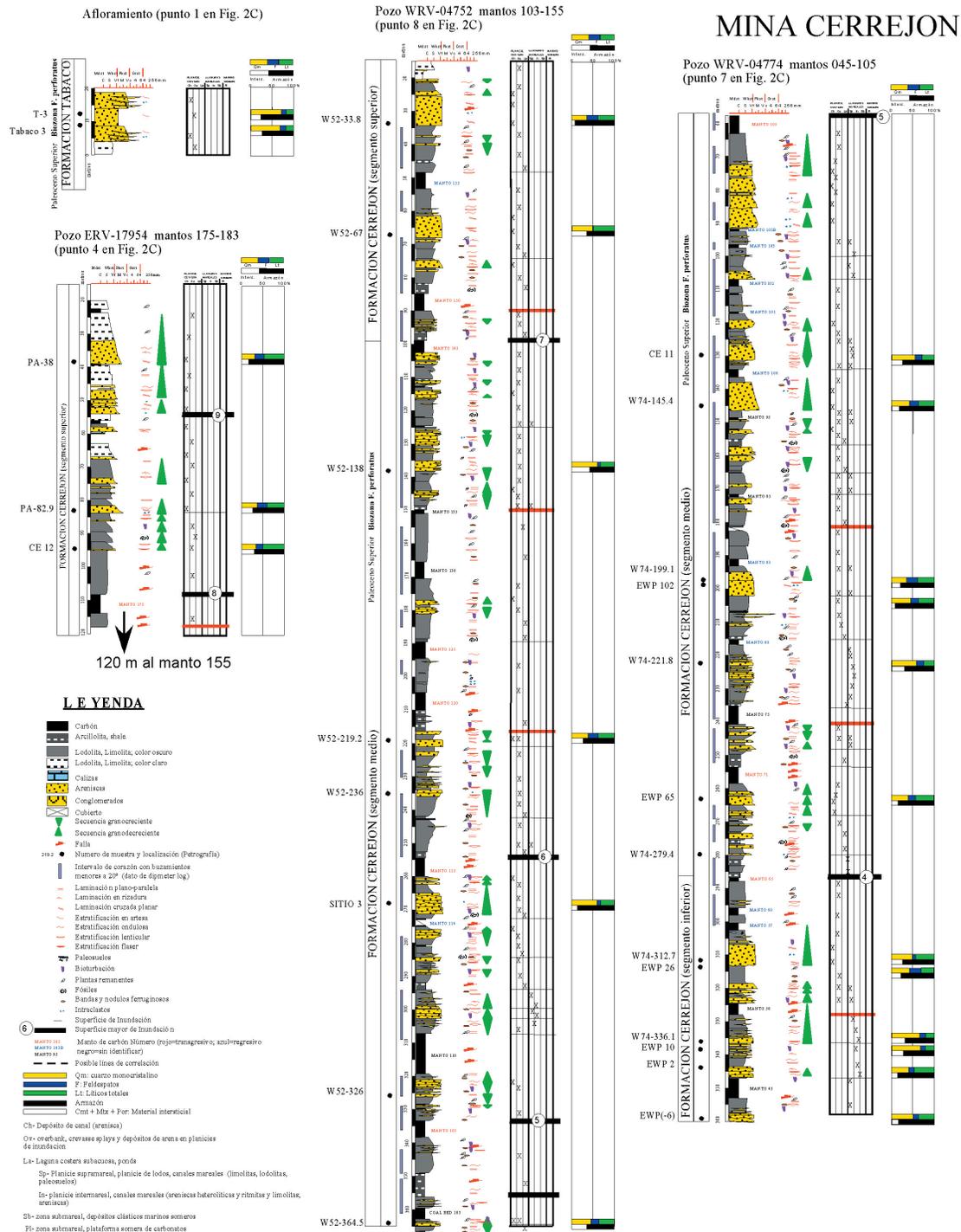


Fig. 5A

Fig. 5. (A y B) Columna Estratigráfica de las formaciones Manantial, Cerrejón y Tabaco en la mina Cerrejón (modificada de BAYONA et al. 2004) y de la Formación Marcelina en la mina Paso Diablo. Las muestras colectadas en secciones estratigráficas de superficie fueron proyectadas a los pozos. Los resultados petrográficos son presentados para comparar las variaciones en la composición, en la madurez textural y los ambientes de acumulación a lo largo de la sucesión.

son se utilizó para eliminar los problemas derivados de la variación de composición por el tamaño de grano (INGER-

SOLL et al. 1984). Los fragmentos de carbonatos, minerales pesados e intraclastos siliciclásticos fueron incluidos

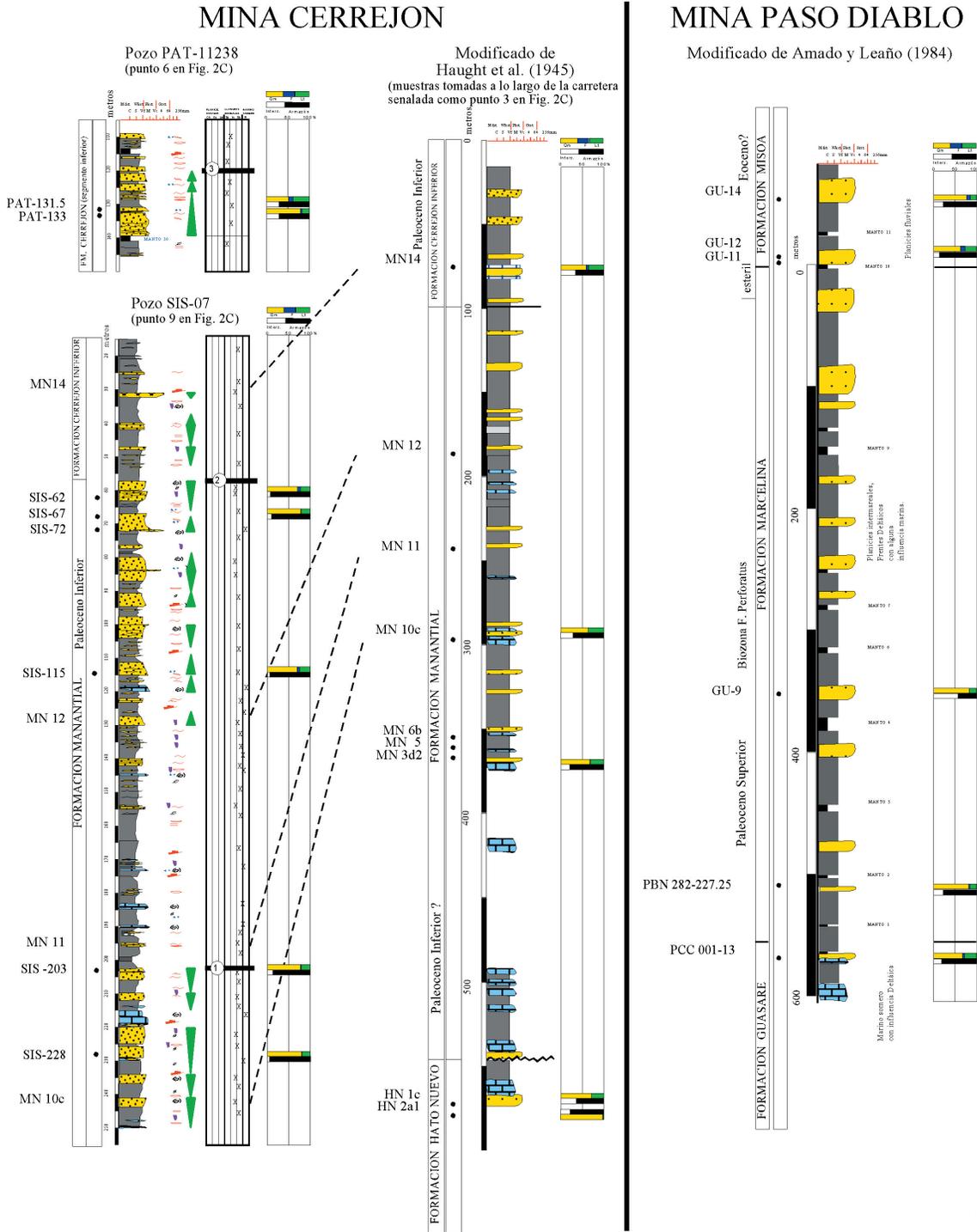


Fig. 5B

como parte del armazón y considerados en la subdivisión de petrofacies, pero no se tuvieron en cuenta para los cálculos modales de los triángulos QtFL y QFLt de DICKINSON (1985). Debido al alto contenido de matriz y cemento, se consideraron las muestras con material intersticial inferior al 30% para evitar la influencia de la alta concentración

de matriz/cemento en los resultados estadísticos del armazón. En secciones delgadas de las formaciones Manantial, Cerrejon, y Misoa con clastos mayores a 2 mm se realizó un conteo de clastos e identificación macroscópica de clastos. La fracción conglomerática en las formaciones Manantial y Misoa se encuentra en lentes a la base de ca-

nales, mientras en la Formación Cerrejón los fragmentos conglomeráticos aparecen en la estratificación cruzada. En el afloramiento de la Formación Tabaco (punto 1 en Fig. 2C) se realizó un muestreo de 80 clastos mayores a 1 cm a lo largo de las artesas y a una distancia de 20 cm entre punto de control.

Análisis de minerales pesados se realizaron en las formaciones Manantial (1 muestra), Cerrejón (2 muestras) y Tabaco (1 muestra). A 50 gramos de cada muestra

TABLA 1. Definición de tipos de granos del armazón (granos >0,0625mm).

CODIGO	NOMBRE	DESCRIPCION
Qm	Cuarzo monocristalino	Granos de caras limpias con extinción ligeramente a muy ondulosa; algunos fragmentos de cuarzo presentan bahías en sus bordes (cuarzo volcánico)
Qps	Cuarzo policristalino sedimentario	Tamaño de grano limo grueso a arena muy fina dentro del fragmento homogéneo. En nicoles paralelos se distinguen los bordes de retrabajamiento de los granos de cuarzo que forman el grano y el material intergranular
Qpf	Cuarzo policristalino foliado	Presenta cristales alargados y orientados en una dirección preferencial; contactos suturados.
Qpd	Cuarzo policristalino de bordes difusos	Contactos suturados entre los cristales de cuarzo haciendo muy difícil reconocer los puntos de contacto entre ellos. No hay orientación en los cristales.
Ch	Chert	Variación criptocristalina de sílice con una textura bastante homogénea y de caras con material arcilloso en nicoles paralelos.
Fpl	Feldespato Plagioclasa	Presente en distintos grados de meteorización incluyendo fragmentos euhedrales tabulares con maclas y fragmentos con superficies totalmente sericitizadas.
Fk	Feldespato Potásico	Reconocibles por la tinción amarilla en nicoles paralelos. Ortoclasa: fragmentos tabulares con bordes angulares y algunos con micas en las superficies. Microclina: se identificó por su macla enmallada característica
Fi	Feldespatos indiferenciados	Granos en los que no es posible reconocer claramente el tipo de feldespato debido a que son fragmentos parcialmente disueltos o muy alterados.
Lmm	Líticos metamórficos micáceos y cuarzo-micáceos	Fragmentos de forma tabular y fábrica esquistosa-pizarrosa con cristales de micas y de cuarzo orientados.
Lmg	Líticos metamórficos grafitosos	Fragmentos de forma tabular con fábrica esquistosa-pizarrosa constituida por grafito y micas.
Ls	Líticos sedimentarios	Fragmentos con granos tamaño de limo y arcilla, algunas veces laminados, y micas diseminadas. Muestran un alto grado de selección y homogeneidad.
Lso	Líticos sedimentarios oxidados	Estos fragmentos se reconocen por presentar superficies con óxidos. Estos fragmentos son muy débiles y por compactación mecánica forman una pseudomatriz.
Lp	Líticos plutónicos,	No muy abundantes y difíciles de reconocer debido a la granulometría de las arenas; en su interior presentan texturas mirmequíticas que definen de su origen intrusivo.
Lv	Líticos volcánicos	Fragmentos con texturas porfiríticas en la que se distinguen cristales embebidos en una matriz microcristalina (vidrio devitrificado?)
Li	Líticos indiferenciados	Fragmentos inestables que por su grado de meteorización o tamaño de grano no permiten diferenciarlos de los otros tipos de líticos.
Mp	Minerales pesados	Fragmentos opacos, con bordes de oxidación y algunos con bordes angulares
Ca	Fragmentos de Carbonatos	Los granos de arena fina a gruesa en las areniscas de las Formaciones Cerrejón y Marcelina son de micrita. Posible origen extracuenca (erosión unidades Paleocenas ó Cretácicas) o intracuenca (erosión de la plataforma de carbonatos del Guasare, al Oriente de Ranchería).
GI	Glauconita	Mineral de color verde con nicoles paralelos, bordes difusos a subredondeados. Posible origen extracuenca (erosión de la Fm. Molino) o intracuenca.
IntSil	Intraclastos Siliciclásticos	Fragmentos de clastos limosos; en algunas muestras superan 1 cm. de diámetro. Debido a la similitud con la matriz y armazón de las arenas, se consideran como fragmentos retrabajados.

TABLA 2. Cálculos utilizados para la composición modal

CODIGO	CALCULOS
Armazón	%Armazón = (300/ Total de puntos)* 100
Cm+Mx+Por	%Material Intersticial = (Cemento +Matriz +Poros / Total de puntos)* 100
% Fragmento Normalizado (se excluye Ca+Mp+IntSil) Ej: Qpf	%Qpf = (número de granos de Qpf*100) / (300 - N° de granos de Ca+Mp+IntSil)
Qt	%Cuarzo Total = %Qm+%Qps+%Qpd+%Qpf+%Ch
Qm	%Cuarzo monocristalino
F	%Feldespatos= %Fpl+%Fk+%Fi
L	%Líticos = %Ls+%Lso+%Lmm+%Lmg+%Lp+%Lv+%Li
Lt	%Líticos totales = %Ls+%Lso+%Lmm+%Lmg+%Lp+%Lv+%Li+%Qpd+%Qps+%Qpf+%Ch

Tabla 3. Resultados análisis petrográficos con cálculos de composición modal para muestras con material intersticial <30% (ver diagramas triangulares en Fig. 6).

Formación	Sección	Total Puntos	Armazon	Cm+Mx+Por	FRAGMENTOS DEL ARMAZON (% NORMALIZADO)														COMPOSICION MODAL					Ca	Fpl+I/Fk+1	Petrofactes	
					Qm	Qjs	Qpf	Qpd	Ch	Fpl	Fk	Fi	Lmm	Lmg	Lso	Ls	Lp	Ly	Li	Qt	Qm	F	L				Li
Tabaco	TABACO 3	411	73.0	27.0	69.3	1.0	0.3	4.1	2.4	4.8	7.8	0.0	1.0	0.0	6.1	0.3	0.0	2.7	0.0	77.1	69.3	12.6	10.2	18.1	0.0	0.7	E
	T 3	396	75.8	24.2	70.5	0.7	0.3	3.4	1.0	6.2	5.8	0.0	1.7	0.0	6.2	1.0	0.0	3.1	0.0	76.0	70.5	12.0	12.0	17.5	0.0	1.1	E
Cerrejón sup.	Pa 38	357	84.0	16.0	30.7	5.0	1.3	9.7	1.3	14.3	8.0	0.0	9.7	2.3	12.3	4.7	0.0	0.0	0.7	48.0	30.7	22.3	29.7	47.0	0.0	1.7	D
Cerrejón sup.	Pa 82,9	404	74.3	25.7	37.2	1.4	0.0	14.5	1.1	17.7	5.3	0.0	3.9	2.8	6.7	2.5	0.0	4.3	2.5	54.3	37.2	23.0	22.7	39.7	3.5	3.0	D
Cerrejón sup.	CE 12	429	69.9	30.1	34.3	3.4	1.1	6.8	2.3	7.5	8.3	0.0	3.4	1.5	27.9	1.9	0.0	0.0	1.5	47.9	34.3	15.8	36.2	49.8	5.6	0.9	D
Cerrejón sup.	W52 33,8	322	93.2	6.8	34.7	1.1	0.0	9.2	0.8	17.6	8.4	0.0	7.6	2.7	9.2	1.5	0.0	5.0	2.3	45.8	34.7	26.0	28.2	39.3	11.5	2.0	D
	Promedio	80.3	19.7	34.2	2.7	0.6	10.0	1.4	14.3	7.5	0.0	6.1	2.3	14.0	2.6	0.0	2.3	1.7	49.0	34.2	21.8	29.2	44.0	5.1			
	Desviación	10.4	10.4	2.7	1.8	0.7	3.3	0.6	4.8	1.5	0.0	3.0	0.6	9.5	1.4	0.0	2.7	0.8	3.7	2.7	4.3	5.6	5.3	4.8			
Cerrejón med.	W52 219,2	403	74.4	25.6	38.2	2.7	3.1	15.6	1.8	12.0	11.6	0.0	8.0	2.7	4.0	0.4	0.0	0.0	0.0	61.3	38.2	23.6	15.1	38.2	18.6	1.0	D
Cerrejón med.	SITIO 3	343	87.5	12.5	59.3	1.3	0.0	4.4	2.4	8.4	0.0	0.0	4.7	0.0	9.1	4.0	0.0	5.7	0.7	67.3	59.3	8.4	24.2	32.3	0.0	9.4	D
Cerrejón med.	CE 11	400	75.0	25.0	54.9	2.7	0.0	2.7	0.3	11.9	5.1	0.0	4.7	1.7	14.9	0.0	0.0	1.0	1.0	60.7	54.9	16.9	22.4	28.1	0.0	2.1	D
Cerrejón med.	W74 145,4	364	82.4	17.6	41.9	1.4	0.0	9.3	1.1	12.5	9.0	0.0	4.7	1.8	4.3	0.7	0.0	10.0	3.2	53.8	41.9	21.5	24.7	36.6	5.5	1.4	D
Cerrejón med.	W74 199,1	380	78.9	21.1	35.2	0.4	0.4	6.9	0.4	19.8	6.1	0.0	6.1	2.8	6.9	4.9	0.0	8.5	1.6	43.3	35.2	25.9	30.8	38.9	13.7	2.9	D
Cerrejón med.	EWP 102	327	91.7	8.3	44.6	4.1	1.0	4.4	0.0	13.9	4.4	0.0	4.1	3.4	13.9	0.0	0.0	6.1	0.3	54.1	44.6	18.2	27.7	37.2	0.0	2.8	C
Cerrejón med.	EWP 65	353	85.0	15.0	38.7	7.9	0.7	5.5	3.8	13.0	4.1	0.0	5.1	3.1	17.5	0.0	0.0	0.0	0.7	56.5	38.7	17.1	26.4	44.2	0.0	2.7	C
Cerrejón med.	W74 279,4	425	70.6	29.4	51.6	2.2	0.0	6.9	1.5	17.5	2.2	0.0	4.7	3.6	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	62.2	51.6	19.6	18.2	28.7	4.0	5.8	C
	Promedio	80.7	19.3	45.6	2.8	0.7	7.0	1.4	13.6	5.3	0.0	5.3	2.4	10.0	1.3	0.0	3.8	0.9	57.4	45.6	18.9	23.7	35.5	5.2			
	Desviación	7.2	7.2	8.7	2.3	1.1	4.0	1.2	3.5	3.6	0.0	1.2	1.2	5.0	2.0	0.0	4.3	1.1	7.3	8.7	5.3	5.1	5.5	7.2			
Cerrejón inf.	W74- 312,7	402	74.6	25.4	49.2	4.2	0.0	6.9	2.3	5.8	1.2	0.0	1.2	1.5	11.9	14.6	0.0	0.0	1.2	62.7	49.2	6.9	30.4	43.8	4.7	3.1	C
Cerrejón inf.	EWP 26	383	78.3	21.7	42.3	2.0	0.0	10.4	1.3	22.1	5.4	0.0	4.7	2.3	6.4	2.3	0.0	0.0	0.7	56.0	42.3	27.5	16.4	30.2	0.3	3.6	C
Cerrejón inf.	EWP 10	410	73.2	26.8	67.8	2.4	1.4	3.1	0.0	6.2	4.5	0.0	1.0	0.3	12.5	0.7	0.0	0.0	0.0	74.7	67.8	10.7	14.5	21.5	0.0	1.3	C
Cerrejón inf.	EWP 2	349	86.0	14.0	39.6	0.0	2.2	14.1	0.0	10.4	3.0	0.0	10.7	3.7	9.3	3.3	0.0	0.0	3.7	55.9	39.6	13.3	30.7	47.0	1.7	2.9	C
Cerrejón inf.	EWP -6	359	83.6	16.4	50.5	2.2	0.4	10.4	0.0	11.8	0.7	0.0	4.3	3.2	12.5	2.2	0.0	0.0	1.8	63.4	50.5	12.5	24.0	36.9	3.9	7.5	C
Cerrejón inf.	PAT 131,5	423	70.9	29.1	51.1	6.3	0.0	7.7	0.9	9.0	1.8	0.0	3.2	3.6	15.8	0.5	0.0	0.0	0.0	66.1	51.1	10.9	23.1	38.0	1.4	3.6	C
	Promedio	77.8	22.2	50.1	2.9	0.7	8.8	0.8	10.9	2.8	0.0	4.2	2.5	11.4	3.9	0.0	0.0	1.2	63.2	50.1	13.7	23.2	36.2	2.0			
	Desviación	6.0	6.0	9.9	2.2	0.9	3.7	0.9	6.0	1.9	0.0	3.6	1.3	3.2	5.3	0.0	0.0	1.4	7.0	9.9	7.1	6.8	9.3	1.9			
Cerrejón inf.	PAT 133	426	70.4	29.6	79.3	0.0	0.0	5.0	3.7	3.3	0.0	0.0	0.0	1.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.7	88.0	79.3	3.3	8.7	17.3	0.0	4.3	B
Manantial	SIS 62	323	92.9	7.1	70.1	0.7	0.3	5.5	4.5	6.5	0.0	0.0	1.4	1.4	2.1	1.7	0.0	3.8	2.1	81.1	70.1	6.5	12.4	23.4	0.0	7.5	B
Manantial	SIS 67	335	89.6	10.4	77.5	0.0	0.0	7.4	3.0	1.3	0.0	0.0	1.3	0.0	2.3	0.7	0.0	5.7	0.7	87.9	77.5	1.3	10.7	21.1	0.0	2.3	B
Manantial	SIS 115	319	94.0	6.0	69.3	0.3	0.0	7.0	4.7	5.3	0.0	0.0	1.3	0.3	1.7	0.0	0.0	8.3	1.7	81.3	69.3	5.3	13.3	25.3	0.0	6.3	B
Manantial	SIS 203	345	87.0	13.0	77.0	1.0	0.0	2.3	1.3	2.3	0.0	0.0	1.3	1.0	2.7	0.0	0.0	10.3	0.7	81.7	77.0	2.3	16.0	20.7	0.0	3.3	B
Manantial	SIS 228	315	95.2	4.8	78.6	1.7	0.0	1.7	7.1	0.7	0.0	0.0	0.7	0.7	6.1	2.7	0.0	0.0	0.0	89.1	78.6	0.7	10.2	20.7	1.9	1.7	B
Manantial	MN 10 C	415	72.3	27.7	63.8	0.3	1.0	3.8	10.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.2	5.2	0.0	0.0	0.0	79.7	63.8	0.0	20.3	36.2	0.2	1.0	B
Manantial	MN 3d2	378	79.4	20.6	68.5	0.0	0.3	2.7	11.9	0.7	0.0	0.0	2.0	0.0	12.9	0.0	0.0	1.0	1.0	83.4	68.5	0.7	15.9	30.8	0.0	1.7	B
	Promedio	87.2	12.8	72.1	0.6	0.2	4.3	6.2	2.4	0.0	0.0	1.2	0.5	6.1	1.5	0.0	4.0	0.9	83.5	72.1	2.4	14.1	25.5	0.3			
	Desviación	8.5	8.5	5.6	0.6	0.4	2.3	3.9	2.5	0.0	0.0	0.6	0.6	5.6	1.9	0.0	4.3	0.8	3.6	5.6	2.5	3.6	6.0	0.7			
Hato Nuevo	HN 2a1	386	77.7	22.3	98.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	99.2	98.0	0.0	0.8	2.0	11.7	1.0	A
Misoa	GU-14	386	77.7	22.3	76.7	0.0	0.0	2.8	3.5	3.8	2.4	1.7	3.5	0.0	1.7	2.8	0.0	0.0	1.0	82.9	76.7	8.0	9.1	15.3	0.0	1.4	E
Misoa	GU-12	345	87	13	62.1	2.0	2.7	10.4	2.3	3.4	5.4	2.0	0.3	0.0	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0	79.5	62.1	10.7	9.7	27.2	0.0	0.7	E
Marcelina	PBN-282-227.25	385	77.9	22.1	80.9	0.0	0.0	4.8	5.5	3.3	0.0	0.0	1.1	0.0	2.6	0.0	0.0	0.0	1.8	91.2	80.9	3.3	5.5	15.8	6.5	4.3	C
Guasare	PCC-001-13	364	82.4	17.6	67.0	0.3	0.3	4.2	2.8	4.9	0.0	0.0	3.5	1.4	9.4	1.0	0.0	3.5	1.7	74.7	67.0	4.9	20.5	28.1	1.1	5.9	B
	Promedio	81.3	18.8	71.7	0.6	0.8	5.5	3.5	3.8	2.0	0.9	2.1	0.3	5.8	1.0	0.0	0.9	1.2	82.1	71.7	6.7	11.2	21.6	1.9			
	Desviación	4.4	4.4	8.6	1.0	1.3	3.4	1.4	0.7	2.6	1.1	1.6	0.7	4.2	1.3	0.0	1.7	0.8	7.0	8.6	3.3	6.5	7.0	3.1			

se realizó una digestión ácida con HCl y se tamizó con una malla 230 µm. Posterior al secado a 50 °C se procedió a la separación en centrifuga utilizando Bromoformo con

densidad de 2,89 g/cm³. Para cada muestra se preparó una sección delgada para la identificación y conteo de 300 granos de minerales pesados. La composición química de

fragmentos de granates y biotita aislados en la muestra de la Formación Tabaco fue posteriormente comparada con el análisis composicional de los mismos minerales en un neis biotítico de la Granulita de los Mangos siguiendo las condiciones analíticas especificadas en CARDONA-MOLINA *et al.* (2006). Estos análisis se realizaron en la microsonda JEOL JXA-8600 del Instituto de Geociencias de la Universidad de Sao Paulo (Brasil).

Medidas de indicadores de paleocorrientes fueron to-

madas en (1) el segmento medio de la Formación Cerrejón en puntos ubicados en los bloques colgante y yacente de la Falla de Ranchería, así como en diferentes dominios estructurales (Fig. 2C) y (2) en el segmento superior de la Formación Cerrejón. Estas medidas se tomaron en ejes de canal, caras opuestas de artesas/canales para determinar ejes de canal y rizaduras de corrientes. Por cada juego de estructuras sedimentarias (e.g., cosets de artesas) se tomó la medida únicamente si la estructura estaba expuesta en tres dimensiones.

Tabla 4. Resultados análisis petrográficos con cálculos de composición modal para muestras con material intersticial >30%.

Formación	Sección	Total Puntos	Armazon	Cm+Mx+Por	FRAGMENTOS DEL ARMAZON (% NORMALIZADO)																	COMPOSICION MODAL						
					Qm	Qps	Qpf	Qpd	Ch	Fpl	Fk	Fi	Lmm	Lmg	Lso	Ls	Lp	Lv	Li	Ca	Qt	Qm	F	L	Lt	Ca	Fpl+L/Fk+1	Petrofacies
Marcelina	GU-9	703	42.7	57.3	83.0	0.0	0.0	1.8	0.9	0.0	0.0	0.0	4.1	0.9	7.3	0.0	0.0	0.0	1.8	10.5	85.8	83.0	0.0	14.2	17.0	10.5	1.0	C
Cerrejón sup.	W52-67	464	64.7	35.3	47.9	2.6	0.0	12.6	0.0	1.6	0.0	0.0	11.6	2.1	8.4	2.6	0.0	7.9	2.6	23.5	63.2	47.9	1.6	35.3	50.5	23.5	2.6	D
Cerrejón med.	W52-138	514	58.4	41.6	59.8	3.9	0.0	15.0	3.5	6.7	0.0	0.0	1.6	0.0	8.3	1.2	0.0	0.0	0.0	7.4	82.3	59.8	6.7	11.0	33.5	7.4	7.7	D
Cerrejón med.	W52-364,5	459	65.4	34.6	44.9	1.5	2.5	10.1	0.0	6.1	13.1	0.0	3.0	2.5	13.6	1.0	0.0	0.0	1.5	20.0	59.1	44.9	19.2	21.7	35.9	20.0	0.5	D
Cerrejón med.	W74-221,8	435	69.0	31.0	58.3	0.3	0.0	6.4	0.3	12.9	4.1	0.0	1.7	4.7	10.5	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	65.4	58.3	16.9	17.6	24.7	0.0	2.7	C
Cerrejón inf.	W74-336,1	437	68.6	31.4	65.7	1.4	0.0	7.6	0.0	6.1	8.3	0.0	0.0	0.7	9.7	0.4	0.0	0.0	0.0	4.3	74.7	65.7	14.4	10.8	19.9	4.3	0.8	C
Cerrejón inf.	MN 14	453	66.2	33.8	58.9	1.3	1.7	9.4	3.0	5.7	0.0	0.0	6.7	0.3	11.8	1.0	0.0	0.0	0.2	74.4	58.9	5.7	19.9	35.4	0.2	6.7	B	
Hato Nuevo	HN 1C	470	63.8	36.2	70.8	0.0	0.0	0.4	3.9	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	19.9	0.0	0.0	0.0	0.0	2.3	75.1	70.8	0.0	24.9	29.2	2.3	1.0	A

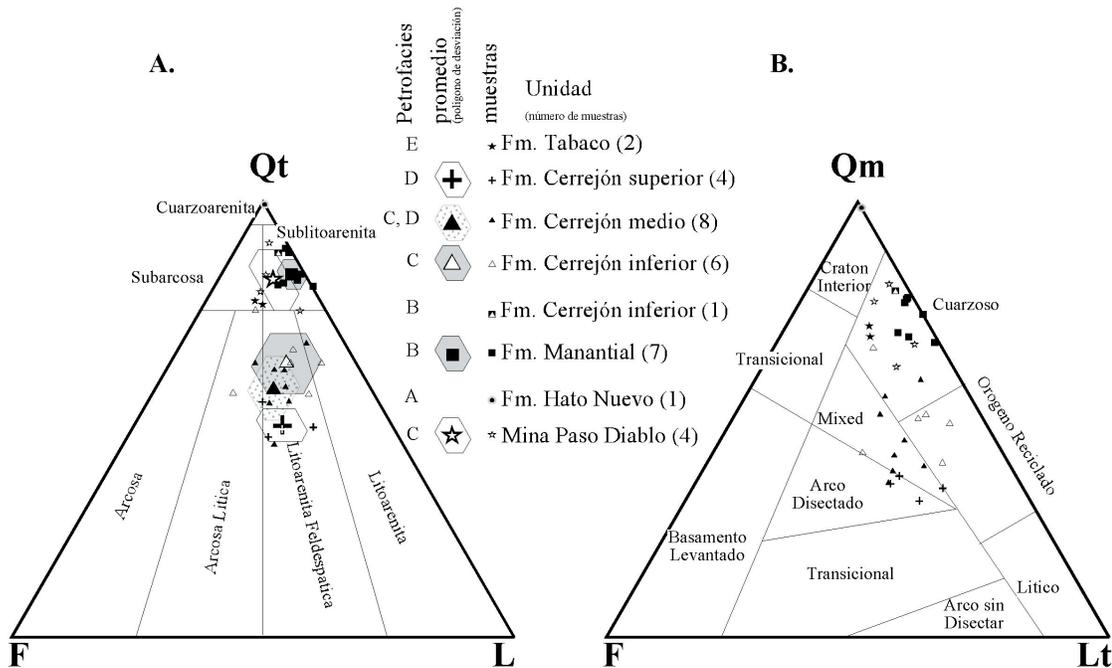


Fig. 6. Diagramas triangulares indicando la composición (QtFL) y procedencia (QmFLt) (DICKINSON 1985) de las areniscas del Paleoceno con conteo de puntos y matriz <30%. Las muestras están discriminadas por unidad para la mina del Cerrejón. Ver Tabla 3 para datos de entrada y Figuras 7 y 8 para de petrofacies por unidad.

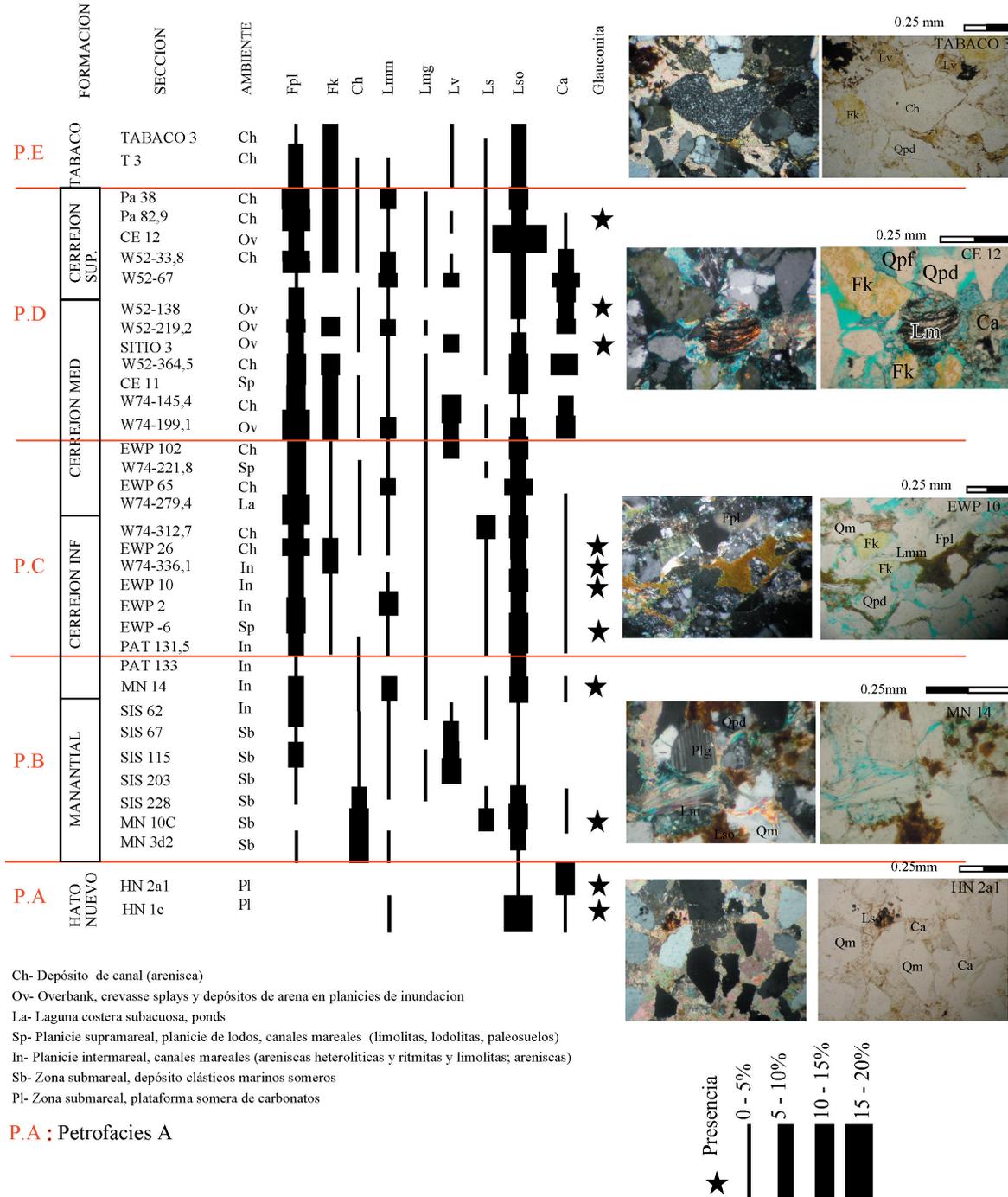


Fig. 7. Petrofacies de la sucesión Paleocena de la cuenca Ranchería y fotografías de secciones delgadas representativas de cada petrofacies. Ver Tabla 1 para convenciones y Tablas 3 y 4 para porcentajes.

Composición de areniscas

En general, la inmadurez textural de las areniscas es alta (variando el armazón entre 42-93%) y la granulometría dominante es arena fina. Los granos son angulares a subangulares sugiriendo poca abrasión durante el proceso

de transporte. En las 50 muestras analizadas se identificaron 5 variedades de cuarzos, 3 de celadspatos, 7 de líticos inestables, fragmentos de carbonatos, glauconita, minerales pesados e intraclastos siliciclásticos (Tabla 1). Los resultados del conteo de puntos y cálculos modales se resumen en las Tablas 2, 3 y 4.

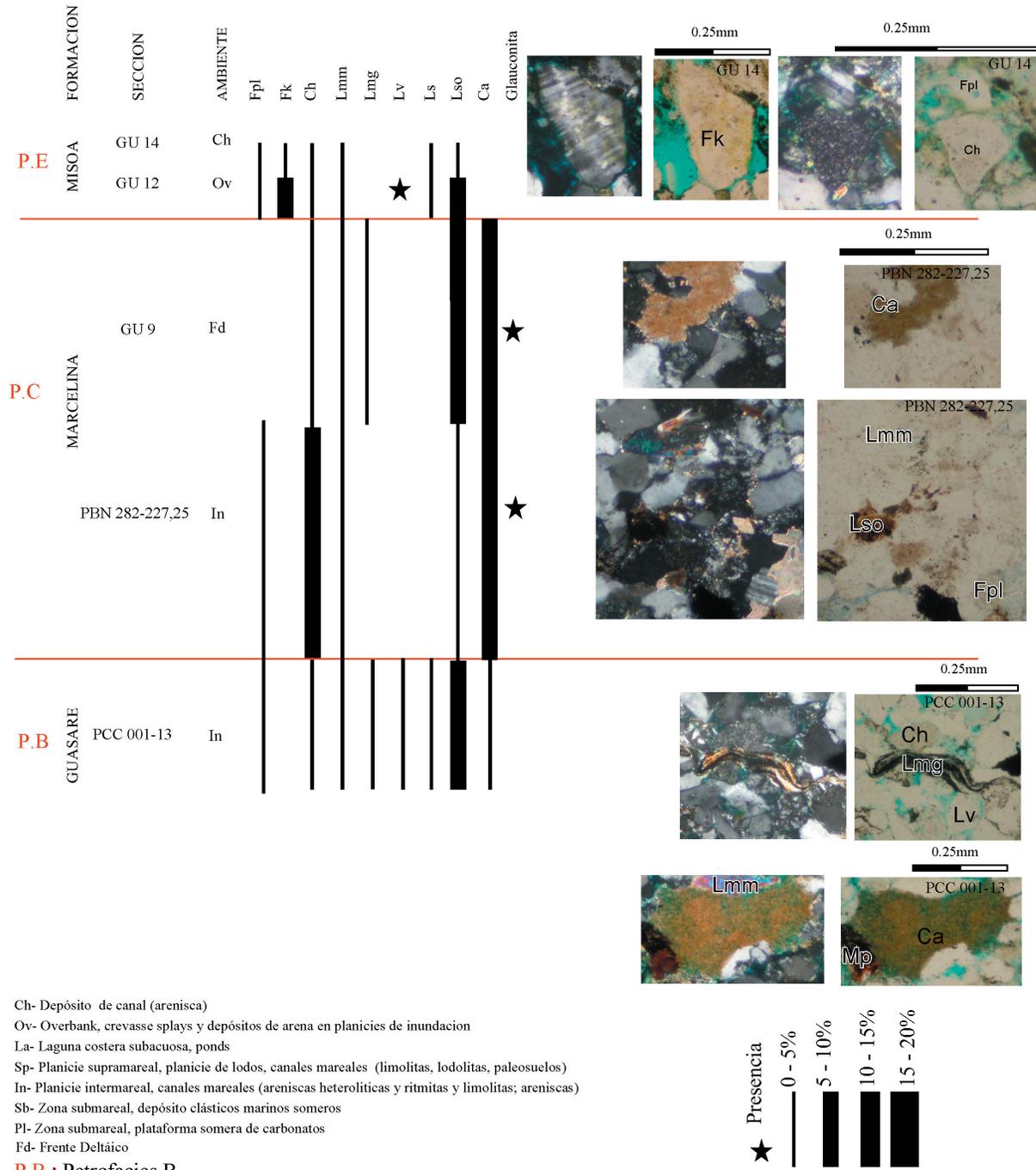


Fig. 8. Petrofacies de la sucesión Paleocena en la mina Paso Diablo y fotografías de secciones delgadas representativas de cada petrofacies. Ver Tabla 1 para convenciones y Tablas 3 y 4 para porcentajes.

En la mina del Cerrejón se observa un incremento de la inmadurez composicional de las areniscas entre las formaciones Hato Nuevo y Cerrejón (Fig. 6A). Para las formaciones Hato Nuevo y Manantial se tienen Cuarzoarenita a Sublitoarenita, siendo notable la presencia de líticos sedimentario y chert en la Formación Manantial. La plagiocla-

sa es el feldespato dominante y los líticos volcánicos se incrementan al tope de esta unidad. La madurez composicional decrece en la Formación Cerrejón clasificándose como Litoarenita Feldespática. Los fragmentos de plagioclasa dominan a lo largo de casi toda la secuencia, pero el feldespato potásico (ortoclasa y microclina) aparece en

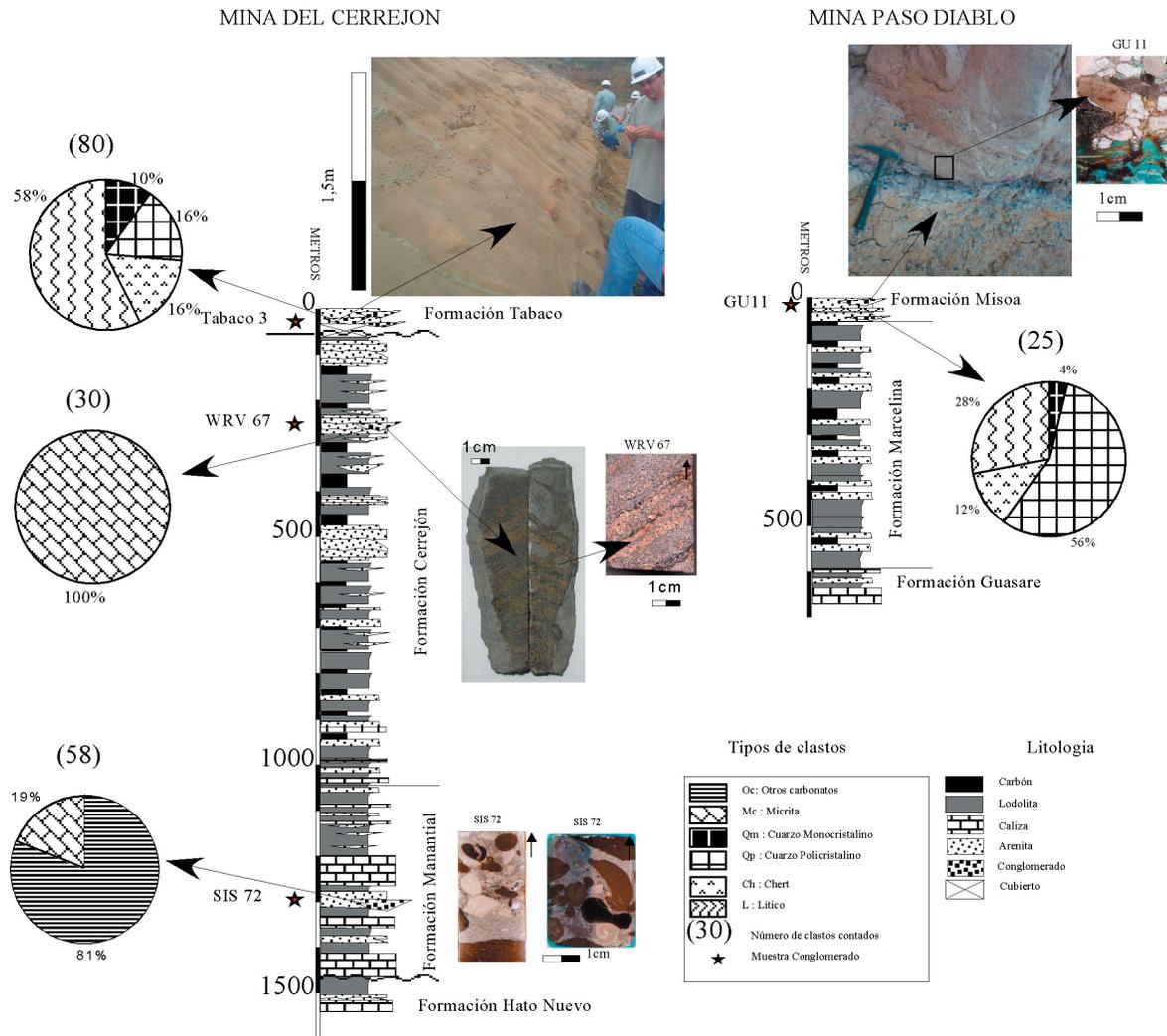


Fig. 9. Resultados del conteo de puntos de conglomerados y ubicación de las muestras en columnas generalizadas. Fotografías de afloramiento, pozos y secciones delgadas ilustran el aspecto de estos depósitos de conglomerados.

la parte inferior de la Formación. Cerrejón e incrementa su presencia hacia el tope (Fig. 7, Tabla 3). Los líticos sedimentarios y metamórficos son los más constantes a lo largo de la sucesión, mientras los líticos volcánicos y los fragmentos de carbonatos se observaron constantemente en la parte media y superior (Fig. 7, Tabla 3). Las areniscas de la Formación Tabaco muestran un aumento considerable de cuarzo total (Qt) y feldespato potásico situándose en el campo de Subarcosa.

La composición de las areniscas analizadas en la mina Paso Diablo es uniforme como Sublitoarenita (Fig. 6A). Las cuatro muestras analizadas permiten inferir una mayor presencia de líticos inestables en la Formación Guasare, y una mayor fracción cuarzosa de las formaciones Marcelina y Misoa y una mayor presencia de feldespatos en la parte inferior de la Formación Misoa (Fig. 5B).

Los fragmentos de carbonatos tamaño arena y composición micrítica, así como la glauconita, son frecuentes dentro de la sucesión Paleocena en ambas áreas estudiadas y su presencia incide en la definición de las petrofacies (Figs. 7 y 8). Los máximos porcentajes de fragmentos de carbonatos se observan en areniscas de las formaciones Hato Nuevo, Cerrejón medio-superior y Marcelina. La disolución de estos fragmentos explica el cemento calcáreo en varias de las unidades Paleocenas. Los fragmentos de carbonatos y la glauconita desaparecen en la Formación Tabaco y en la Formación Misoa.

Petrofacies

La asociación de fragmentos en el almacén, incluidos carbonatos y glauconita, sustenta una subdivisión independiente de las unidades Paleocenas dirigida a aportar

critérios en el procedimiento de identificación de unidades y correlación estratigráfica. A lo largo de la sucesión Paleocena en las zonas estudiadas se pueden definir 5 petrofacies (Figs. 7 y 8), las cuales se definen a continuación.

PETROFACIES A. La parte inferior de la secuencia se caracteriza por alto contenido de cuarzo monocristalino (70-98%), la ausencia de feldespatos, y la presencia de líticos sedimentarios oxidados ó de fragmentos de carbonatos. Las areniscas de la petrofacies A corresponden a la Formación Hato Nuevo las cuales han sido interpretadas como depósitos de plataforma somera (CÁCERES *et al.* 1980, BAYONA *et al.* 2004).

PETROFACIES B. Las areniscas de esta petrofacies se caracteriza por la aparición de fragmentos de chert, plagioclasas y líticos volcánicos. Areniscas de la Formación Manantial y parte inferior de la Formación Cerrejón y la muestra de la Formación Guasare se incluyen en este grupo. Estos depósitos fueron acumulados en un perfil que abarca desde ambientes marinos someros, llanuras intermareales y canales de marea (ETAYO-SERNA 1979, BAYONA *et al.* 2004).

PETROFACIES C. En las areniscas de esta petrofacies se identificaron fragmentos de feldespatos potásico (ortoclasa), pero sigue dominando la plagioclasa. Los líticos sedimentarios oxidados aumentan en porcentaje con respecto a la petrofacies B y se observan fragmentos de carbonatos y glauconita. Las areniscas de estas petrofacies incluye el segmento inferior y parte inferior del segmento medio de la Formación Cerrejón (Fig. 7). Los ambientes de acumulación propuestos se hacen aun más continentales, pero para algunos intervalos se indica la influencia estuarina (BAYONA *et al.* 2004).

PETROFACIES D. El aumento de los fragmentos de carbonatos, feldespatos potásicos (ortoclasa y microclina) y líticos metamórficos, la más frecuente presencia de líticos volcánicos y el bajo porcentaje de cuarzo monocristalino caracteriza las areniscas de la parte superior del segmento medio y el segmento superior de la Formación Cerrejón. Los depósitos de este intervalo se acumularon en llanuras de inundación y canales, sugiriendo sistemas de acumulación más fluviales (BAYONA *et al.* 2004). En las areniscas de la Formación Marcelina, la ausencia de feldespato potásico y la presencia de plagioclasa y chert, junto con fragmentos de carbonatos y glauconita sugiere

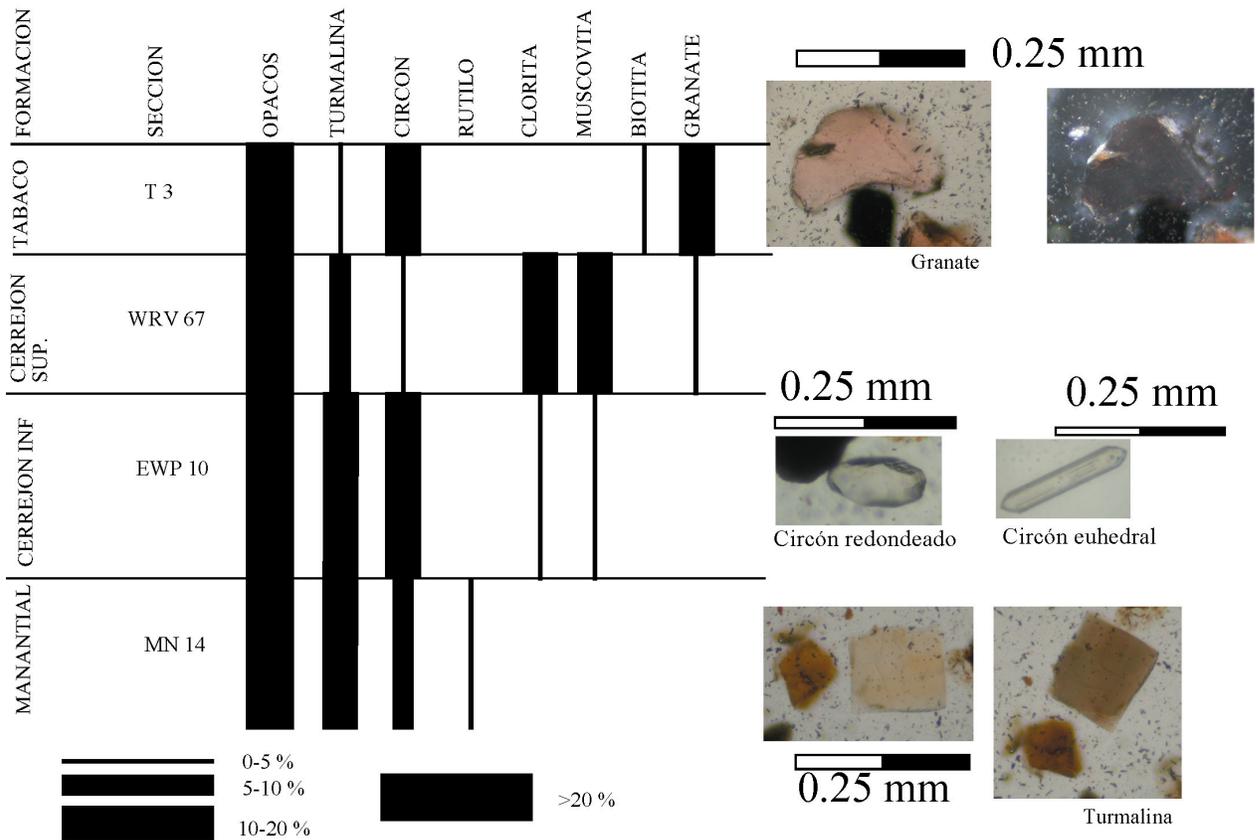


Fig. 10. Distribución de minerales pesados dentro de la sucesión Paleocena de la mina del Cerrejón.

Tabla 5. Análisis de química mineral.

Muestra Análisis	Granate 1- Granulita de los Mangos					Granate 2- Granulita de los Mangos					Granate 1- Formación Tabaco				Granate 2- Formación Tabaco			
	borde 1	borde 2	interno 1	núcleo 1	interno 2	borde	interno 1	interno 2	interno 3	interno 4	borde 1	borde 2	interno 1	interno 2	borde 1	borde 2	interno 1	interno 2
SiO2	37.96	38.12	38.21	38.25	38.22	38.43	38.34	38.68	38.39	38.28	36.77	37.66	37.07	37.19	37.35	36.35	36.62	36.87
TiO2	0.05	0.01	0.06	0.02	0.01	0.07	0.08	0.10	0.09	0.00	0.08	*	0.05	0.09	0.21	0.12	0.22	0.18
Al2O3	22.37	22.41	22.48	22.59	22.33	22.37	22.48	22.44	22.53	22.46	21.38	21.66	21.47	21.34	21.15	20.95	21.10	21.14
FeO	27.66	28.74	28.57	27.66	28.19	27.67	27.85	27.97	28.49	29.23	30.14	30.99	30.17	30.20	21.34	20.09	21.31	20.56
MnO	0.38	0.41	0.37	0.39	0.39	0.30	0.33	0.41	0.37	0.41	1.51	1.48	1.51	1.55	7.05	7.23	7.16	7.25
MgO	7.19	7.48	7.36	7.67	7.62	7.67	7.72	7.80	7.61	7.01	3.91	3.87	3.90	3.94	1.43	1.41	1.42	1.37
CaO	2.52	2.57	2.56	2.48	2.46	2.53	2.45	2.36	2.46	2.57	4.18	4.42	4.31	4.16	11.04	11.12	10.96	11.29
TSi	6.00	5.93	5.96	5.98	5.98	6.01	5.98	6.00	5.96	5.96	5.95	5.98	5.95	5.99	5.96	5.93	5.90	5.94
TAl	0.00	0.07	0.05	0.03	0.02	0.00	0.02	0.00	0.04	0.04	0.05	0.03	0.06	0.01	0.04	0.07	0.10	0.06
Sum_T	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.01	6.00	6004.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
AlVI	4.16	4.04	4.08	4.13	4.09	4.12	4.11	4.10	4.08	4.08	4.03	4.02	4.00	4.04	3.94	3.96	3.29	3.95
Ti	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02
Sum_A	4.17	4.04	4.09	4.13	4.09	4.13	4.12	4.11	4.09	4.08	4.04	4.02	4.00	4.05	3.97	3.97	3.92	3.97
Fe2	3.66	3.74	3.73	3.61	3.68	3.62	3.63	3.63	3.97	3.81	4.08	4.11	4.12	4.07	2.85	2.74	2.87	2.77
Mg	1.70	1.74	1.71	1.79	1.77	1.79	1.80	1.81	1.76	1.63	0.95	0.92	0.93	0.95	0.34	0.34	0.34	0.33
Mn	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.21	0.20	0.21	0.21	0.95	1.00	0.98	0.99
Ca	0.43	0.43	0.43	0.41	0.41	0.42	0.41	0.39	0.41	0.43	0.73	0.75	0.74	0.72	1.89	1.94	1.89	1.95
Sum_B	5.83	5.96	5.91	5.87	5.91	5.87	5.88	5.88	5.91	5.92	5.96	5.98	6.00	5.95	6.03	6.03	6.08	6.03
Sum_cat	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
Alm	62.72	62.77	63.01	64.61	62.22	61.65	61.78	61.71	62.51	64.32	68.50	68.80	68.70	68.45	47.24	45.48	47.21	45.89
Gross	7.33	7.20	7.23	7.06	6.94	7.22	6.96	6.68	6.92	7.25	12.17	12.58	12.35	12.09	31.31	32.24	31.11	32.27
Pyrope	29.09	29.12	28.92	30.44	29.97	30.44	30.53	30.69	29.76	27.51	15.85	15.30	15.54	15.96	5.64	5.71	5.60	5.46
Spess	0.87	0.91	0.84	0.89	0.86	0.68	0.74	0.91	0.81	0.92	3.48	3.32	3.41	3.56	15.81	16.58	16.08	16.38

Sample Analysis	Biotitas B1 a B7 - Granulita de los Mangos							Biotita - Formación Tabaco					
	B1 borde	B1 núcleo	B2	B3 borde	B4 borde	B5 borde	B6 borde	B6 Núcleo	B7 Núcleo	borde 1	borde 2	borde 3	interno
SiO2	36.69	35.88	37.18	35.60	36.26	36.15	36.47	36.39	37.11	35.81	34.85	35.78	36.03
TiO2	4.57	4.32	3.95	4.21	3.88	4.51	4.47	4.47	4.35	3.47	3.08	3.26	3.53
Al2O3	14.71	14.65	15.07	14.82	14.77	14.84	14.99	14.99	15.07	14.80	14.75	14.75	15.03
FeO	12.76	13.62	13.37	16.30	15.96	13.84	12.31	12.31	11.35	16.07	17.40	16.85	16.50
MnO	0.00	0.03	0.00	0.03	0.04	0.04	*	*	*	0.16	0.27	0.19	0.23
MgO	14.46	14.54	14.79	12.33	12.54	13.88	15.31	15.31	15.92	13.23	13.09	13.14	13.29
BaO	0.23	0.15	0.11	0.08	0.07	0.13	0.06	0.06	0.16	0.99	0.80	0.76	1.04
CaO	12.00	0.02	0.00	0.01	*	*	0.02	0.02	*	*	*	*	*
Na2O	0.10	0.10	0.08	0.12	0.10	0.08	0.09	0.09	0.10	*	0.72	0.86	0.81
K2O	11.33	10.60	10.94	10.51	10.72	10.67	10.97	10.97	11.06	9.35	8.45	9.40	9.32
F	0.80	0.73	0.96	0.74	0.89	0.76	0.99	0.99	0.81	0.32	0.14	0.21	0.21
Cl	0.05	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04	0.08	0.08	0.05	0.02	0.02	0.03	0.02
Si	5.32	5.72	5.81	5.74	5.81	5.75	5.73	5.72	5.77	5.77	5.68	5.74	5.72
AlIV	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Ti	0.50	0.52	0.46	0.51	0.47	0.54	0.53	0.53	0.51	0.42	0.38	0.39	0.42
Fe2	1.55	1.82	1.75	2.20	2.14	1.84	1.62	1.62	1.48	2.17	2.37	2.26	2.19
Mn	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03	0.03
Mg	3.12	3.46	3.44	2.96	3.00	3.29	3.59	3.59	3.69	3.18	3.18	3.14	3.15
Ba	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.05	0.05	0.07
Ca	1.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.23	0.27	0.25
K	2.09	2.16	2.18	2.16	2.19	2.17	2.20	2.20	2.20	1.92	1.76	1.92	1.89
Fe FeMg	0.25	0.25	0.25	0.50	0.50	0.25	0.25	0.25	0.25	0.40	0.40	0.40	0.40
Mg FeMg	0.75	0.75	0.75	0.50	0.50	0.75	0.75	0.75	0.75	0.60	0.60	0.60	0.60

ren una mayor afinidad con las petrofacies C que con las petrofacies D.

PETROFACIES E. La disminución de la relación de plagioclasas frente a feldespatos potásicos (Tabla 3), el incremento de fragmentos cuarzosos y la ausencia de fragmentos de carbonatos caracterizan las areniscas subarcosas de las formaciones Tabaco y Misoa (Fig. 6A). El ambiente en el que se depositaron estas subarcosas es de canales fluviales en llanuras aluviales.

Composición de conglomerados

Aunque la composición de los conglomerados de las formaciones Manantial y Cerrejón son de carbonatos, la variedad de tipo de clastos permite inferir su origen. En la base de una sucesión granodecreciente de la Formación Manantial, una muestra de conglomerados (muestra SIS-72, Fig. 9) incluye 81 % de fragmentos de moluscos, gasterópodos, intramicrita, intrabiomicrita, biointramicrita, biomicrita, oomicrita y carbonatos fibroso. El restante 19% es de micrita. El tope de dicha sucesión está representado por la muestra de arenisca SIS-67 la cual no incluye fragmentos de carbonatos. Por el contrario, los clastos de conglomerados en la Formación Cerrejón superior (muestra WRV 67) no superan los 5mm y son fragmentos de carbonatos con textura micrítica presentes en la estratifi-

cación cruzada de las areniscas.

En contraste, los conglomerados de la parte superior de la sucesión Paleocena (Formaciones Tabaco y Misoa) son de composición siliciclástica. En la Formación Tabaco los clastos de conglomerados de composición cuarzosa son del 43%, mientras los clastos de rocas sedimentarias y metamórficas es del 57%. Esta relación es inversa a la reportada en las areniscas donde el cuarzo total es la fracción dominante. Los conglomerados de la Formación Misoa incluyen un 72% de fragmentos cuarzosos frente a un 28% clastos de otros tipos de roca, incluyendo fragmentos de carbonatos silicificados (Fig. 9).

Minerales pesados y química mineral de granates y biotita

La asociación de minerales pesados es diferente para cada unidad litológicas del Paleoceno en la mina del Cerrejón (Fig. 10). Los minerales opacos representan más del 50% del total de los granos en todas las muestras, seguido en importancia de circones y turmalinas. En la Formación Manantial se identificó rutilo, en la Formación Cerrejón se identificaron clorita y muscovita, y en la parte superior de la Formación Cerrejón y en la Formación Tabaco biotita y granates.

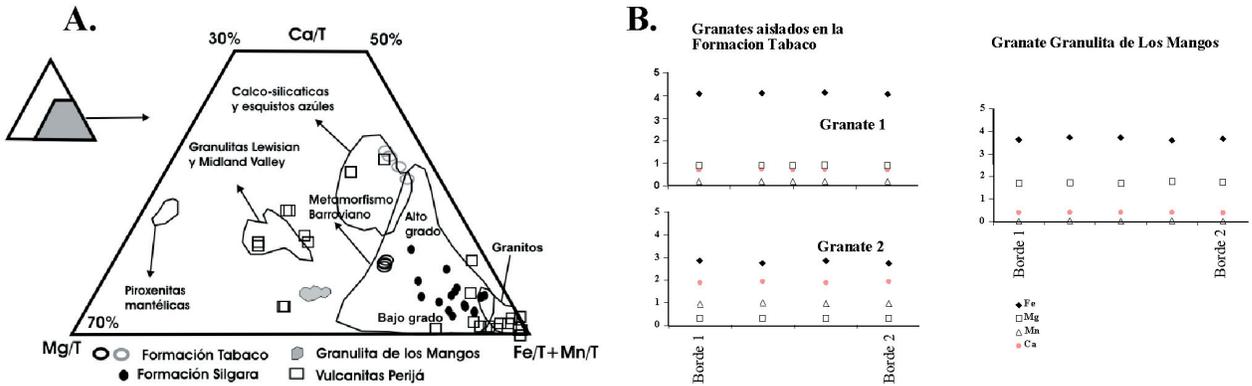


Fig. 11. (A) Diagrama de tipos composicionales de granates (modificado de OLIVER 2001); T=Fe+Mn+Mg+Ca. La composición de los granates de la Formación Silgara es de RIOS *et al.* (2003) y de la Serranía de Perijá es de MAZE (1983). (B) Perfiles indicando la ausencia de zonación en los granates de la Formación Tabaco y la Granulita de los Mangos. La distancia entre perfiles es de 0.5 mm y los extremos corresponden a los bordes (ver datos en Tabla 5).

El granate ha sido utilizado como guía en la identificación de las características químicas/tectónicas de áreas fuentes por su resistencia al transporte y los procesos diagenéticos, así como por su variación composicional (HUTCHINSON & OLIVER 1998, NODA *et al.* 2004, MANGE & MORTON 2007, MORTON & HALLSWORTH 2007). Las características químicas de la biotita pueden permitir la identificación de rocas magmáticas formadas en diferentes ambientes tectónicos, o con diferente grado de metamorfismo (ABDEL-RAHMAN 1994, BATCHELOR 2003, HENRY *et al.* 2005).

Para este estudio se analizaron dos cristales de granate y un cristal de biotita de la Formación Tabaco con el fin de establecer preliminarmente si este método nos puede indicar características química/tectónicas de las posibles rocas fuente. Utilizamos como referencia los mismos minerales en un neis biotítico de la Granulita de los Mangos (SNSM) y de los reportados en la Formación Silgará (Macizo de Santander, RIOS *et al.* 2003). Adicionalmente se comparó la composición con los granates asociados a las rocas volcánicas félsicas de la Formación La Quinta expuestas en la Serranía de Perijá (MAZE 1983). Las características composicionales (% CaO y MnO) y texturales (inclusiones y ehedralismo) permitieron a MAZE (1983) postular su origen magmático o como xenocristales que tendrían relación con la corteza inferior o el basamento no expuesto de la Sierra del Perija (MAZE 1983; HARANGI *et al.* 2001). Las abreviaciones minerales presentadas siguen el patrón propuesto por KRETZ (1983).

Los dos cristales de granates analizados de la Formación Tabaco tienen composiciones químicas diferentes ($Alm_{68.9} Grs_{12.29} Pyr_{15.64} Sps_{3.44}$) ($Alm_{46.45} Grs_{31.73} Pyr_{5.60} Sps_{16.21}$) (Tabla 5). Al comparar con las áreas definidas por OLIVER (2001), los granates de la Formación Tabaco tienen afinidad con rocas metamórficas de alto grado y

rocas calco-silicatadas o esquistos azules (Fig. 11A). La química de estos granates no es semejante a: (1) la determinada en los granates del neis biotítico ($Alm_{62.46} Grs_{7.153} Pyr_{29.51} Sps_{0.87}$), (2) con los granates de la Formación Silgara, los cuales registran la historia metamórfica de un terreno barroviano formado entre la zona del granate y la silimanita (RIOS *et al.* 2003), y (3) con los granates de la Formación La Quinta, los cuales son de composición almadino-pyropo ($Alm_{50-60} Grs_{5-20} Pyr_{25-35}$) y spessartine-almadino ($Alm_{32} An_{13} Sps_{50}$) (MAZE 1983). La mayoría de los granates reportados en la Formación La

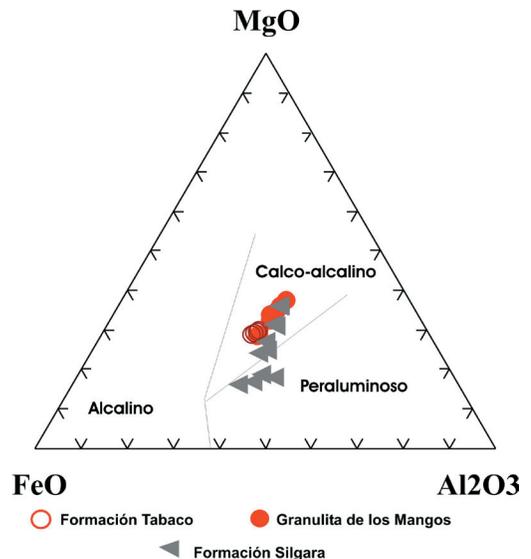


Fig. 12. Diagrama de discriminación de biotitas magmáticas (ABDEL-RAHMAN 1994).

Tabla 6. Datos de medidas de paleocorrientes sin corregir y corregidos por buzamiento de los estratos. Abreviaciones: DB= azimuth de la dirección de buzamiento; buz= buzamiento; Cabeceo= azimuth de la dirección de cabeceo. Ver localización de puntos en la Fig. 2C y representación en la Fig. 13.

Punto	DB	buz	estructura	Datos sin corregir								Datos corregidos	
				plano 1		plano 2		eje calculado		eje medido		Cabeceo	bz
				DB	bz	DB	bz	Cabeceo	bz	Cabeceo	bz		
2a	215	20	canal- eje							241	16	60	2
2a	215	20	canal- eje							249	4	70	13
2a	240	38	canal- eje							220	35	43	1
5	125	10	canal- eje							50	27	55	24
2a	215	20	bordes de canal	311	21	155	24	234	5			54	14
2a	240	38	par de artesas	310	19	225	28	281	17			100	12
2a	240	38	par de artesas	235	10	219	33	303	4			126	13
2a	240	38	par de artesas	284	8	190	18	257	7			80	30
10	165	23	par de artesas	160	37	141	22	84	14			89	9
10	165	23	par de artesas	158	40	150	18	73	4			75	4
10	166	29	par de artesas	144	24	180	32	135	23			318	2
10	132	26	par de artesas	125	24	74	29	112	23			294	2
10	132	26	par de artesas	133	28	85	25	101	24			104	1
2a	240	38	cara de artesa	291	26							104	0
2a	240	38	cara de artesa	290	21							106	5
2a	240	38	cara de artesa	278	13							99	17
2a	125	10	cara de artesa	102	33							104	24
2a	125	10	cara de artesa	145	34							143	24
10	164	38	cara de artesa	152	35							334	2
10	166	29	cara de artesa	139	14							319	12
10	166	29	cara de artesa	130	30							135	5
10	166	29	cara de artesa	133	26							137	1
10	166	29	cara de artesa	90	7							272	1
2a	215	20	rizadura- foreset	128	12							132	10
2a	224	36	rizaduras- foreset	301	19							292	8
2a	224	36	rizaduras- foreset	262	27							77	3
2a	309	16	rizadura recta	115	4							114	15
10	164	38	rizadura - foreset	169	40							168	2
10	166	29	rizadura - foreset	130	17							311	7
2b	160	33	cara de artesa	152	54							155	21
2b	144	39	rizadura- foreset	140	42							141	3
2b	150	34	cara de artesa	182	36							175	6
2b	140	36	par de artesas	196	24	217	30	171	22			349	9
2b	140	36	cara de artesa	168	38							162	5
2b	140	36	par de artesas	174	16	216	21	174	15			354	15
2b	140	36	rizadura- foreset	150	22							329	13
2b	146	40	par de artesas	144	40	103	33	104	32			111	1
2b	146	40	par de artesas	139	51	121	52	136	51			139	11
2b	146	40	cara de artesa	120	55							131	17
2b	151	35	par de artesas	159	43	186	34	206	32			195	9
2b	151	35	rizadura- foreset	180	46							171	14
2b	151	35	par de artesas	124	44	164	50	128	44			134	11
2b	151	35	par de artesas	143	52	165	48	174	47			167	14
2b	151	35	par de artesas	160	40	140	37	133	36			136	2
2b	151	35	par de artesas	122	52	156	45	161	45			158	10
2b	158	38	cara de artesa	134	46							141	10
2b	158	38	cara de artesa	124	51							136	17
2b	150	34	cara de artesa	135	41							139	8
2b	150	34	cara de artesa	145	59							147	25
2b	150	34	cara de artesa	144	53							146	19
2b	150	47	par de artesas	149	50	121	45	115	45			126	3

Quinta tienen un origen magmático (HARANGI *et al.* 2001) y se encuentran en el campo de los granitos (Fig. 11a), o corresponden a granates que podrían tener relación con la corteza inferior o el basamento no expuesto de la Sierra del Perijá.

Los perfiles composicionales indican que los granates de la Formación Tabaco y en el neis biotítico no tienen zonación composicional (Fig. 11b). Estos perfiles son característicos en granates de rocas metamórficas de alto grado (granulitas) donde la difusión química ha permitido el reequilibrio iónico (TRACY 1982, SPEAR 1993). Por el contrario, los granates de carácter no magmático de la Sierra del Perijá presentan una zonación irregular (MAZE 1983).

La biotita de la Formación Tabaco presenta concentraciones de Ti entre 0.378-0.421 afines con una biotita formada en un ambiente ígneo o metamórfico de alta temperatura (DEER *et al.* 1992). Las relaciones FeO-MgO-Al₂O₃ utilizadas para discriminar biotitas magmáticas de diferentes ambientes tectónicos (ABDEL-RAHMAN 1994) colocan a las biotitas de la Formación Tabaco y del neis biotítico en ambientes calco-alcalinos (Fig. 12), contrastando con las biotitas de la Formación Silgara. La biotita de la Formación Tabaco presenta temperaturas en un rango de 716° - 735° (±24°C) según la aplicación del termómetro de sustitución de Ti en la biotita (HENRY *et al.* 2005).

Retrabajamiento de material Palinológico

El estudio palinológico detallado de la Formación Cerrejón (JARAMILLO *et al.* 2007) permitió identificar re trabajamiento de palinomorfos en la parte superior de la Formación Cerrejón. Entre los mantos 145-155 del pozo WRV 04752 (Fig. 5A) se identificaron *Echimonocolpites protofranciscoi* y *Dinogymnium* sp, el primero reportado en unidades del Maastrichtiano y el segundo en un rango del Santoniano-Maastrichtiano. La presencia de estos palinomorfos re trabajados indica (1) muy breve exposición de la roca a procesos de oxidación en el área fuente, y (2) condiciones reductoras en el ambiente de depósito.

Paleocorrientes

Las estructuras sedimentarias dominantes en las areniscas con geometría canaliforme del segmento medio de la Formación Cerrejón son la estratificación horizontal, masiva y ondulosa irregular. En menor proporción se observa estratificación inclinada en artesa y hacia la parte superior de los estratos laminación ondulosa y rizaduras de corriente y ondulosa. Los indicadores de paleocorrientes obtenidos en los tres puntos de control del segmento medio de la Formación Cerrejón (Fig. 2C, Tabla 6), indican una dirección de flujo dominante hacia el E-SE (Fig. 13A) y una menos dominante hacia el NW-W. Los datos de ejes de canal y artesas en el bloque yacente de la Falla de Ranchería indican una dirección dominante hacia el Oriente, mientras los mismos indicadores en el bloque colgante de la Falla de Ranchería sugieren la influencia

de las dos direcciones. En este sector, MESA (2005) documenta depósitos con frecuente influencia mareal. Las medidas tomadas en rizaduras también indican esas dos tendencias de dirección de flujo en ambos bloques.

En el segmento superior de la Formación Cerrejón las areniscas incluyen una mayor presencia de estratificación inclinada en artesa. Los indicadores de paleocorrientes muestran una dirección dominante al S-SE (Fig. 13B); sin embargo, direcciones hacia el N-NW se reportan en las areniscas con alto contenido de fragmentos de micrita y en las asociaciones litofaciales de areniscas fluviales. Indicadores de paleocorrientes no fueron medidos en las areniscas de la Formación Tabaco.

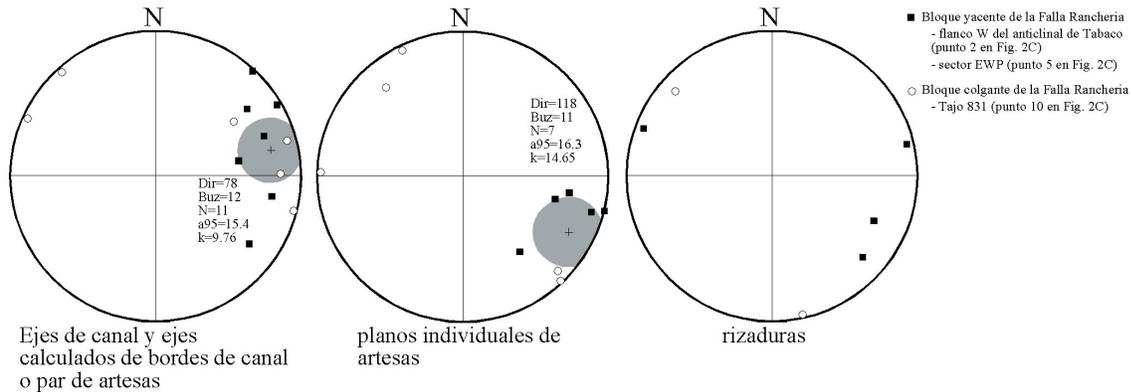
DISCUSIÓN

De acuerdo con el diagrama de procedencia (Fig. 6B), las areniscas del Paleoceno proceden de fuentes cuyas rocas son de diferente composición y se originaron en distintos regímenes tectónicos. Las areniscas en la mina del Cerrejón indican un cambio de un orógeno cuarzoso a un arco disectado, y retornando a finales del Paleoceno a un orógeno cuarzoso. Las muestras de la mina Paso Diablo indican procedencia de un orógeno cuarzoso. La exposición de estratos Cretácicos y de unidades volcánicas pre-Cretácicas en la SNSM y la SP llenan los requerimientos de posibles áreas fuentes según este diagrama. Lo anterior indica que la plagioclasa junto con los líticos sedimentarios y volcánicos no permite discriminar aportes entre la SNSM y SP.

Sin embargo, la continuidad del aporte de microclina y líticos metamórficos desde la Formación Manantial, y la presencia de turmalina, biotitas de altas temperaturas y granate no zonado sugiere un mayor aporte de una fuente con rocas plutónicas y metamórficas de moderado a alto grado, como las expuestas en la SNSM. No hay coincidencia composicional entre los granates analizados de la Granulita de los Mangos con los analizados en la Formación Tabaco, ni con los reportados en el Macizo de Santander (RIOS *et al.* 2003) y Serranía de Perijá (MAZE 1983). La ausencia de zonación en los granates de la Formación Tabaco así como en la Granulita de los Mangos, sugiere que las primeras están relacionadas con rocas de alto grado. Las diferencias composicionales estarían muy probablemente relacionadas con otras rocas granulíticas de otra composición presentes en la SNSM, que van a formar granates con composiciones variables (SPEAR 1993). Adicionalmente, el reporte de fragmentos de rocas de origen metamórfico y plutónico en lodolitas calcáreas de la Formación Molino de la cuenca de Ranchería (MARTÍNEZ 1985, CÁCERES *et al.* 1981) indica denudación del sector Occidental de la SNSM desde el Maastrichtiano, donde rocas metamórficas Precámbricas están hoy expuestas.

La inmadurez composicional de las areniscas del Paleoceno en las minas del Cerrejón y Guasare indica cer-

A. Formación Cerrejon entre mantos 40-100



B. Formación Cerrejon entre mantos 140-160 Formación Cerrejon entre mantos 160-183

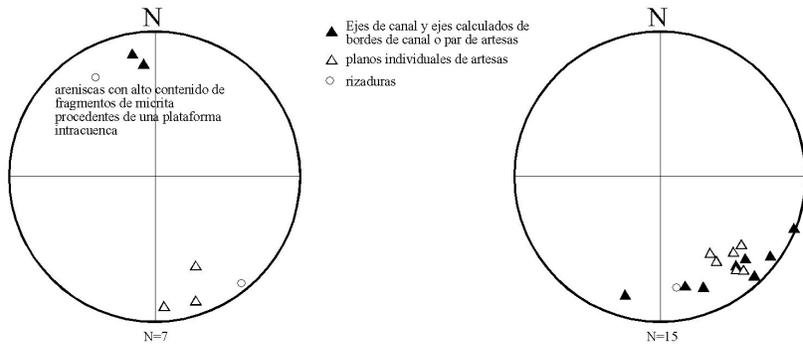


Fig. 13. Diagrama de igual área ilustrando los datos individuales de paleocorrientes corregidos por buzamiento (ver Tabla 6), y clasificados por estructura sedimentaria y localización (cuadrado y círculo) para el segmento medio de la Formación Cerrejón (A) y el segmento superior de la Formación Cerrejón (B). La dirección media (cruz) y el círculo de confianza (a95=95% de confianza) se indican si número de muestras N>5 en el diagrama A.

canía a área(s) fuente(s) y/o rápido enterramiento de los sedimentos en condiciones reductoras. Una proximidad al área fuente y rápido enterramiento es sugerido por la preservación de los tres tipos de feldespatos, la constante presencia de líticos inestables (e.g., líticos metamórficos grafitosos), y la preservación de fragmentos detríticos de micrita y palinomorfos retrabajados procedentes de rocas del Cretácico Superior. La alta energía de los depósitos fluviales (estratificación horizontal y maciza; BAYONAN *et al.* 2004, MESA 2005) en condiciones de alta precipitación para el Paleoceno (HERRERA 2004), favorece la interpretación de (1) breve exposición de las rocas expuestas en las áreas fuente a condiciones de meteorización y (2) rápido transporte de sedimentos con periodos mínimos de residencia temporal. Todo lo anterior permite la preservación de los fragmentos químicamente inestables (Johnsson 1993) en cuencas afectadas por climas tropicales, como el área de Ranchería en el Paleoceno (HERRERA 2004), y excluye posibles áreas fuentes activas en este tiempo a

>100 km de distancia, como el Macizo de Santander (FABRE 1981) y la Cordillera Central (GÓMEZ *et al.* 2005). La profunda meteorización del protolito y el transporte fluvial de alta energía son posibles procesos que explicarían la ausencia de conglomerados siliciclásticos detríticos en la base de los canales o depósitos fluviales de alta energía.

La dirección de flujo dominante hacia el Oriente y luego hacia el Suroriente, junto con el incremento de la madurez composicional de la fracción siliciclástica en la misma dirección, confirman la orientación dominante del sistema deposicional propuestos por correlación cronoestratigráfica (PARDO 2004, MONTES *et al.* 2005a). Para el Paleoceno Tardío, depósitos fluviales y parálicos (llanuras de marea, ciénagas, influencia de mareas en canales) se acumulaban hacia la fuente principal de sedimentos (SNSM), donde los sedimentos son atrapados en una cuenca de alta subsidencia (MONTES *et al.*

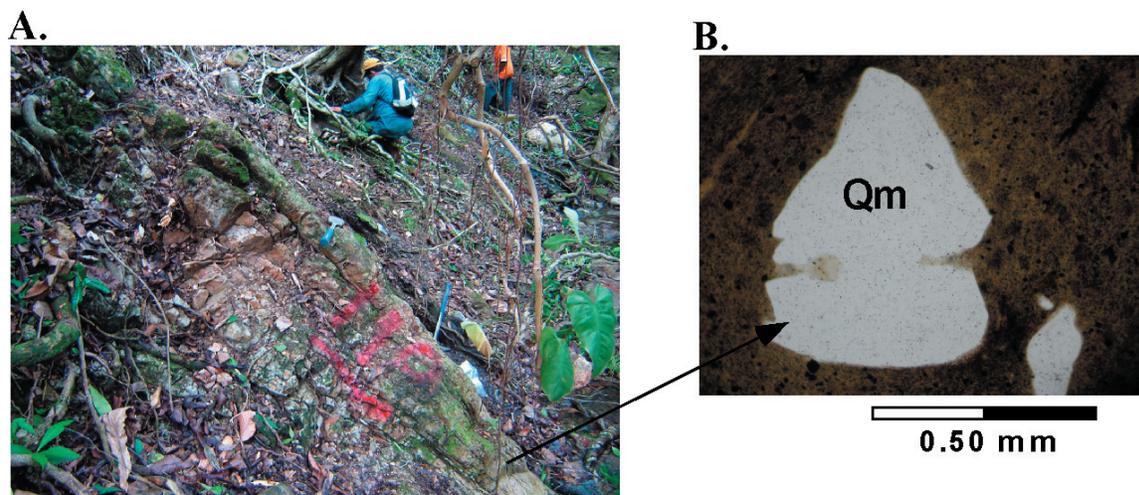


Fig. 14. (A) Interestratificación de rocas volcánicas (tobas) félsicas en la parte inferior de la Formación Misoa en el riecito Mache, al sur de la mina Paso Diablo (N 10° 48.954'; W 72° 20.550'). **(B)** Sección delgada (nicoles paralelos) de la toba vítreo-cristalina mostrando un cuarzo monocristalino con bahías embebido en material vítreo. Localización, foto y muestra suministrada por el grupo de estratigrafía del Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales (Agosto del 2007).

2005a). Hacia el Oriente, la acumulación de carbonatos de plataforma somera continuaba en el borde occidental de la cuenca de Maracaibo (estratos actualmente involucrados en el flanco oriental de la SP). La mayor madurez de los detritos terrígenos siliciclásticos presentes en las areniscas de la mina Paso Diablo se explica por la mayor distancia de transporte desde la SNSM hasta el sitio de acumulación final.

Los fragmentos de carbonatos micríticos pueden proceder de la plataforma de carbonatos de Guasare (detritos intra-cuenca) ó de rocas Cretácicas expuestas en la SNMS y SP (detritos extra-cuenca). El mayor contenido de fragmentos de carbonatos en la Formación Marcelina que en unidades equivalentes en la mina del Cerrejón es un indicador de proximidad al área que suministra estos fragmentos. La actividad tectónica de la SP durante el Paleoceno Tardío contribuye a la inestabilidad y erosión de la plataforma somera de carbonatos del Paleoceno, los cuales son transportados en canales fluviales con dirección de flujo hacia el Noroccidental (Fig. 13B), como se ilustra en el modelo de evolución tectónica sugerida para la SNSM y SP en MONTES *et al.* (2005a). Por el contrario, la alta diversidad de fragmentos reportados en la Formación Manantial sugiere que estos fragmentos son de origen extra-cuenca y proceden de la erosión de rocas Cretácicas expuestas en la SNSM.

El predominio de depósitos de origen continental al tope de la sucesión del Paleoceno en ambas secciones, la ausencia de fragmentos de carbonatos, el incremento de la fracción cuarzosa (Qm, chert) y de feldespatos potásicos en las arenas, y el dominio de clastos de conglome-

rados procedentes de rocas sedimentarias indican que rocas de la SP aportaban detritos siliciclásticos tanto a la cuenca de Ranchería como a la cuenca de Maracaibo a finales del Paleoceno-Eoceno Temprano. El aporte de estos sedimentos se pudo haber producido a partir de un frente de cabalgamiento activo y con relieve significativo, probablemente en condiciones climáticas menos húmedas a las registradas durante la acumulación de las unidades infrayacentes.

Trabajos recientes en el flanco en flanco Occidental del Sinclinal de Manuelote (Serranía de Perijá, al sur de la mina Paso Diablo) documentan interestratificación de rocas volcánicas félsicas en el intervalo inferior de la Formación Misoa (Fig. 14). Este material volcánico está asociado probablemente con los cuerpos intrusivos Paleógenos reportados por TSCHANZ *et al.* (1974) en la SNSM. Un cuidado adicional debe tenerse en cuenta en futuros estudios petrográficos debido a la dificultad de diferenciar fragmentos de vidrio devitrificado procedente de la erosión de estas rocas con fragmentos de chert (WOLF 1984). Adicionalmente, edades de huellas de fisión en circones reportadas en la SP corroboran procesos de exhumación de la SP durante el límite Cretácico-Terciario (SHAGAM *et al.* 1984). En resumen, la deformación de la SP y volcanismo félsico durante el Paleógeno temprano contribuyó al cambio composicional de las areniscas entre las formaciones Cerrejón y Tabaco en la mina del Cerrejón, o entre las formaciones Marcelina y Misoa en la mina Paso Diablo.

El cambio composicional de las areniscas del Paleoceno en la mina del Cerrejón permite subdividir uni-

dades litológicamente homogéneas por sus petrofacies. A pesar de encontrar similitudes entre las petrofacies de la mina del Cerrejón y de la mina de Guasare, dichas petrofacies tiene mayor validez para correlaciones locales debido al diferente grado de contribución de detritos a la cuenca de las posibles áreas fuentes. En la mina del Cerrejón es necesario probar si esta subdivisión es válida en rocas expuestas en el bloque colgante de la Falla de Ranchería, ya que las medidas de paleocorrientes indican direcciones de flujo procedentes de la SP.

CONCLUSIONES

La integración de análisis petrográficos y químicos en areniscas y minerales pesados, junto con direcciones de paleocorrientes hacia el Oriente, indica que los detritos terrígenos siliciclásticos presentes en las unidades Paleocenas en la cuenca de Ranchería proceden de un terreno metamórfico de medio a alto grado, con unidades magmáticas de carácter calco-alkalino, rocas volcánicas y sedimentarias. Lo anterior señala a la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) como la fuente principal de aporte de sedimentos. El incremento de la inmadurez composicional de las areniscas en esta cuenca coincide con el proceso de denudación de estratos del Cretácico, rocas volcánicas pre-Jurásicas, y rocas ígneas y metamórficas presentes en la SNSM. Fragmentos de microclina, la gran variedad de líticos metamórficos, y la presencia de granates no zonados y biotitas de altas temperaturas son los detritos claves en señalar a la SNSM como el principal área de aporte. Indicios de aporte de rocas metamórficas expuestas en la parte occidental de la SNSM se reportan desde el Maastrichtiano en rocas de la Formación Molino (CÁCERES *et al.* 1981, MARTÍNEZ 1985).

El dominio de dirección de flujo hacia el Oriente, el incremento de la madurez composicional de los detritos terrígenos siliciclásticos en la mina Paso Diablo (Occidente de la cuenca de Maracaibo) y la acumulación coetánea de carbonatos de plataforma somera permiten definir una polaridad del sistema deposicional hacia el Oriente para el Paleoceno Tardío. La excelente preservación de los fragmentos de feldespatos, líticos químicamente inestables, y palinomorfos re trabajados permite inferir pobre acción de los procesos de meteorización tanto en el área fuente como en los sistemas deposicionales. Las altas tasas de subsidencia (Montes *et al.* 2005a) contribuyeron en gran parte a la preservación de los fragmentos químicamente inestables, a pesar de las condiciones de climáticas de selva tropical propuestos para la cuenca de Ranchería (HERRERA 2004).

Áreas en la actual Serranía de Perijá (SP) también aportaron detritos a la cuenca, pero en proporciones que incrementaron en el tiempo. Las variadas proporciones de líticos sedimentarios y volcánicos en la mina del Cerrejón y el aporte de material micrítico en mayor cantidad en la Formación Marcelina (mina Paso Diablo) que en la Formación Cerrejón sugiere un inicio de inestabilidad de la

plataforma de Guasare. El incremento del tectonismo en la SP y un evento magmático para finales del Paleoceno contribuyó al suministro de material cuarzoso y feldespatos potásico en las unidades del Paleoceno más superior (formaciones Tabaco y Misoa) en las minas de Cerrejón y Paso Diablo, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo reúne información de varias fases de campo realizadas entre el 2003 al 2007, y los resultados del trabajo de grado de Felipe Lamus en la Universidad Nacional, sede Bogotá. A la Compañía Carbones del Cerrejón y Carbones del Guasare S.A. por el acceso a los pozos y afloramientos en la mina. Los pozos WRV-04752 y WRV-04774 se pueden consultar en la litoteca nacional (ICP-Bucaramanga). Agradecemos a Angus Christie y Germán Hernández (Carbones de Cerrejón) y Luis Alfredo Contreras, José Antonio Paredes (Carbones de Guasare S.A.) por su apoyo logístico durante las fases de campo en el 2003-2004. A Jairo Roncancio y Carolina Ayala por su asistencia en la fase de campo en la mina Paso Diablo (2004). El Instituto Colombiano del Petróleo y la Universidad Nacional de Colombia suministraron las secciones delgadas y la separación de minerales pesados. Al INGEOMINAS, en especial a Elizabeth Cortés, por acceso al laboratorio de Petrografía. A Juan Carlos Caicedo (Universidad Nacional, Bogotá) por su apoyo durante la pasantía de Felipe Lamus en ARES. Luis Quiroz (STRI) suministró la muestra e información de las rocas volcánicas reportadas en la Figura 14. A Andrés Bustamante (Universidad de San Pablo, Brasil) y Marion Weber (Universidad Nacional, sede Medellín) por facilitar la realización de los análisis de química mineral, el acceso a la muestra de la Granulita de los Mangos, y por sus oportunas sugerencias en los análisis químicos. Los comentarios de un revisor anónimo contribuyeron a fortalecer la discusión de la procedencia de los minerales pesados y el contenido del manuscrito.

REFERENCIAS

- ABDEL-RAHMAN, A. F. M. (1994): Nature of biotites from alkali-
ne, calc-alkaline and peraluminous magmas. *Journal of Petrology*, v. 35, p 525-541.
- AMADO, Z. & LEAÑO, A. (1984): Informe Geológico Área Planta
Mina Paso Diablo, Carbones del Zulia- Carbozulia - subge-
rencia de Geología de minas, Informe interno 25 p., Vene-
zuela.
- BATCHELOR, R. A. (2003): Geochemistry of biotite in metaben-
tonites as an age discriminant, indicator of regional magma
sources and potential correlation tool. *Mineralogical Magazine*.
v. 67, p 807-817.
- BAYONA, G., JARAMILLO, C., RUEDA, M., PARDO, A., CHRIS-
TIE, A. & HERNANDEZ, G. (2004): Important Paleotectonics
and chronostratigraphic considerations of the Late Paleocene
in the northernmost Andes as constrained by Paleocene
rocks in the Cerrejón coal mine, Guajira, Colombia. *Memo-
rias en CD de la Tercera Convención Técnica de la Asocia-
ción Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo*, 14
p.
- BELLIZZIA, G. A., PIMENTEL, M. N. & BAJO, O. R. (1976):
Mapa Geológico Estructural de Venezuela. Plancha NC-18-I
Manchiques: Foninves, Caracas, Venezuela.

- CÁCERES, H., CAMACHO, R. & REYES, J. (1980): The Geology of the Ranchería basin. Geotec, ed., Geological Field-Trips, Colombia 1980-1989: Bogotá, Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, p 1-31.
- CÁCERES, C., MOLINA, J. & BERNAL, J. (1981): Informe Geológico Final Pozo: El Molino 1X. Reporte interno de ECOPE-TROL S.A., 77 p.
- CARBONES DE CERREJON (2003): Mapa Geológico Cerrejón Zona Norte, Escala 1:50000: Reporte Interno, Carbones de Cerrejón.
- CARDONA-MOLINA, A., CORDANI, U. & MACDONALD, W. D. (2006): Tectonic correlations of pre-Mesozoic crust from the northern termination of the Colombian Andes, Caribbean region. *Journal of South American Earth Sciences*. v. 21, p 337-354.
- CARDOZO, L. & GÓMEZ, C. (1980): Geología del Deposito "El Cerrejón" en el Sector de Sarahita-Guajira (Tesis de pregrado). 118 p., Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá..
- CEDIÉL, F., SHAW, R. P. & CACERES, C. (2003): Tectonic assembly of the Northern Andean Block, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and J. Blickwede, eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics*. AAPG Memoir 79, p 815-848.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A. & ZUSSMAN, J. (1992): *An introduction to rock forming minerals*. 2nd ed. Longman House, Burnt Mill, Harlow, UK, 696 p.
- DICKINSON, W.R. (1970): Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 40, n. 2, p 695-707.
- DICKINSON, W.R. (1985): Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones- Zuffa, G.G. Eds. *Provenance of Arenites*, p 333-361.
- DUERTO, L., ESCALONA, A. & MANN, P. (2006): Deep structure of the Mérida Andes and Sierra de Perijá mountain fronts, Maracaibo Basin, Venezuela. *AAPG Bulletin*, v. 90, n. 4, p 505-528.
- ESPINOSA, J. & ÁLVAREZ, R. (1980): Geología del Área de Corazonal, Cuenca Carbonífera del Cerrejón-Guajira (Tesis de pregrado). 125 p., Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- ETAYO-SERNA, F. (1979): Moluscos de una capa del Paleoceno de Manantial (Guajira): *Boletín de Geología de la Universidad Industrial de Santander*, v. 13, n. 27, p 5-55.
- EYNATTEN, V. H., BARCELO-VIDAL, C. & PAWLOWSKY-GL-AHN, V (2003): Composition and discrimination of sandstones: a statistical evaluation of different analytical methods. *Journal of Sedimentary Research*, v. 73, n. 1, p 47-57.
- FABRE, A. (1981): Estratigrafía de la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá y Arauca, Cordillera Oriental (Colombia): *Geología Norandina*, v. 4, p 3-12.
- FLOREZ, M. & MAVKO, G. (2002): Elastic Geomechanic model of the Bucaramanga and Oca faults, and the origin of the Sierra Nevada de Santa Marta; northern Andes. *Eos.Trans. AGU*, 83 (47), Fall Meet. Suppl.
- FORERO, G., FERREIRA, P., MAYA, M., GRACIA, E. & MARTINEZ, J. (1997): Atlas Geológico Digital de Colombia, Versión 1.1, Planchas 5-01 y 5-04, INGEOMINAS, Bogotá
- GALLANGO, O., NOVOA, E. & BERNAL, A. (2002): The petroleum system of the Central Perijá fold belt, western Venezuela. *AAPG Bulletin* v. 86, n. 7, p 1263-1284.
- GARCIA, H. (1981): Ambientes sedimentarios de la Formación Cerrejón. 95 p., Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- GIL, A., & MARTINEZ H. (1989): Análisis microfacial del Grupo Cogollo, y Formación La Luna, cuenca Cesar-Ranchería, Guajira, Colombia (Tesis de pregrado). 53 p., Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- GÓMEZ, E., JORDAN, T., ALLMENDINGER, R. W. & CARDOSO, N. (2005): Development of the Colombian foreland-basin system as a consequence of diachronous exhumation of the northern Andes: *Geological Society of America Bulletin*, v. 117, p. 1272-1292; doi: 10.1130/B25456.1.
- HARANGI, SZ., DOWNES, H., KÓSA, L., SZABO, CS., THIRLWALL, M. F., MASON, P. R. D., MATTEY, D., 2001. Almandine garnet in Calc-alkaline volcanic rocks of the Northern Pannonian basin (Eastern-Central Europe): Geochemistry, petrogenesis and geodynamic implications. *Journal of Petrology*, v. 42, 1813-1843
- HENRY, D., GUIDOTTI, C. V. & THOMSON, J. (2005): The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *American Mineralogist*, v. 90, p 316-328.
- HERRERA, F. (2004): Paleotemperatura y paleoprecipitación del Paleoceno Superior en zonas tropicales usando plantas megafósiles de la Fm. Cerrejón (Trabajo de Grado). 44 p., Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Bucaramanga.
- HUTCHINSON, A. R. & OLIVER, G. J. H., (1998): Garnet provenance studies, juxtaposition of Laurentian marginal terranes and timing of the Grampian Orogeny in Scotland. *Journal of the Geological Society of London*, v.155, p 541-550.
- INGERSOLL, R.V., BULLARD, T. F., FORD, R. L., GRIMM, J. P., PICKLE, J. D. & SARES, S. W. (1984): The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson Point-Counting Method. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 54, n 1, p. 103-116.
- JARAMILLO, C., BAYONA, G., PARDO-TRUJILLO, A., RUEDA, M., TORRES, V., HARRINGTON, G., & MORA, G. (2007): The Palynology of the Cerrejón Formation (Upper Paleocene) Northern Colombia. *Palynology*, v. 131, p. 153-189.
- JOHNSSON, M.J. (1993): The system controlling the composition of clastic sediments. Johnsson, M.J. & Basu, A., eds. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*, Geological Society of America Special Paper 284, p 1-19.

- KELLOGG, J. (1984): Cenozoic tectonic history of the Sierra de Perijá, Venezuela-Colombia, and adjacent basins. Bonini, W. E. & others, eds., *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*, Geological Society of America Memoir 162, p 239-261.
- KRETZ, R., (1983): Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, v. 68, p 277-279.
- LAMUS, F. (2006): Análisis de la sucesión Paleocena en el sector norte de la cuenca Cesar-Ranchería: Implicaciones en los Modelos Tectónicos de la Sierra Nevada de Santa Martha y Serranía de Perijá (Tesis de Pregrado). 20 p., Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- LAYTON, R. (2006): Petrografía y Geoquímica Orgánica y su Aplicación en la Estratigrafía de Secuencias en la Formación Cerrejón, Guajira (Tesis de Pregrado). 62 p., Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Bucaramanga.
- MANGE, M. A., MORTON, A. C., 2007. Geochemistry of heavy minerals. In : Mange, M. A., Wright, D., Ed : *Heavy Minerals in use. Developments in Sedimentology*, v. 58, p 345-392
- MARCHESINI, L., AMOROSI, A., CIBIN, U., ZUFFA, G. G., SPADAFORA, E. & PRETI, D. (2000): Sand composition and sedimentary evolution of a late Quaternary depositional sequence, northwestern Adriatic coast, Italy. *Journal of Sedimentary Research* v. 70, n. 4, p 829-838.
- MARTÍNEZ, J. (1985): Estratigrafía y paleoambientes de la sección del Río Molino, (Guajira, Cretácico Superior), Informe 1942: Ingeominas, Bogotá.
- MARTÍNEZ, J. & HERNANDEZ, R. (1992): Evolution and drowning of the Late Cretaceous Venezuelan carbonate platform: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 5, n. 2, p 197-210.
- MAZE, W. B. (1983): Jurassic La Quinta Formation in the Sierra de Perija, Northwestern Venezuela: Geology, Tectonic Environment, Paleomagnetic Data and Copper Mineralization of Red Beds and Volcanics (Tesis Doctoral). 331 p., Universidad de Princeton, Departamento de Ciencias Geológicas y Geofísicas.
- MESA, L. A. (2005): Análisis Facial de la parte Inferior de la Formación Cerrejón en los Tajos Patilla, 831 y 45 (mina El Cerrejón) (Tesis de Pregrado). 81 p., Universidad de Caldas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Manizales.
- MILLER, J. B. (1962): Tectonic trends in Sierra de Perijá and adjacent parts of Venezuela and Colombia. *AAPG Bulletin*, v. 46, n. 9, p 1565-1595.
- MONTES, C. BAYONA, G. JARAMILLO, C. OJEDA, C. MOLINA, M. & HERRERA, F. (2005a): Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar-Ranchería Valley: rigid-beam pivot model. *Memorias ampliadas del 6ª International Symposium of Andean Geodynamics*, p 520-523.
- MONTES, C., HATCHER, R.D., Jr. & RESTREPO-PACE, P. A. (2005b): Tectonic reconstruction of the northern Andean blocks: Oblique convergence and rotations derived from the kinematics of the Piedras-Girardot area, Colombia. *Tectonophysics*, v. 399, n.1-4, p. 221-250.
- MONTES, C., BAYONA, G., MESA, L.A. & MARTINEZ, C. (2006): Estudios Estratigráficos en la Formación Cerrejón: Aplicabilidad de Herramientas Estratigráficas Predictivas en una Cuenca Sedimentaria Paleocena. *Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo, Memorias del IX Simposio Bolivariano de Cuencas Subandinas*, 5 p (en CD).
- MORA, A. & GARCÍA, A. (2006): Cenozoic Tectono-Stratigraphic Relationships between the Cesar Sub-Basin and the Southeastern Lower Magdalena Valley Basin of Northern Colombia. Libro de resúmenes, convención anual 2006 de la AAPG, Houston, USA, p 74-75.
- MORA, A., GARCÍA, A. & TRIANA, R. (2006): Regional stratigraphic framework of the Paleocene in the Cesar Sub-Basin of Colombia. Libro de resúmenes, convención anual 2006 de la AAPG, Houston, USA, p 75.
- MORTON, A. C., HALSSWORTH, C., 2007. Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis. In : Mange, M. A., Wright, D., Ed : *Heavy Minerals in use. Developments in Sedimentology*, v. 58, p 215-246.
- NODA, A., TAKECUCHI, M. & ADACHI, M. (2004): Provenance of the Murihiku Terrane, New Zealand: evidence from the Jurassic sandstones and conglomerates in Southland. *Sedimentary Geology*, v. 164, p 203-222.
- OLIVER, G. J. H. (2001): Reconstruction of the Grampian episode in Scotland: its place in the Caledonian Orogeny. *Tectonophysics*, v. 332, p 23-49.
- PARDO, A. (2004): Paleocene – Eocene Palynology and Palynofacies from Northeastern Colombia and Western Venezuela (Disertación Doctoral). 103 p. Universite de Liege, Bélgica.
- PDVSA-INTEVEP (2005): Léxico estratigráfico de Venezuela, editado por el Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura (CIEN). Página de internet consultado en Noviembre del 2007: www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm
- PORTA, J.D. (1974): *Colombie. Lexique Stratigraphique International Vol V. Fasc 4a, deuxième partie: Tertiaire et Quaternaire*: Paris, Centre National for la Recherche Scientifique, 692 p.
- QUIJADA, E. & CASSANI, F. (1997): Tectonismo e historia tectónica durante el Paleógeno Temprano en el area Norte de la Sierra de Perijá, Venezuela Occidental. *Memorias del VI Simposio Bolivariano, Cartagena, Colombia, Tomo II* p 244-247.
- RAMOS, J. G. (1990): Ambientes de depósito relacionados con los parámetros de calidad de los carbones del Cerrejón Bloque B (Tesis de pregrado). 158 p., Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- RESTREPO-PACE, P.A. (1995): Late Precambrian to Early Mesozoic Tectonic Evolution of the Colombian Andes, based on new Geochronological, Geochemical and Isotopic Data (Disertación Doctoral). 115 p., University of Arizona.

- RIOS, C., GARCIA, C. & TAKASU, A. (2003): Tectono-metamorphic evolution of the Silgara Formation metamorphic rocks in the southwestern Santander Massif, Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 16, p 133-154.
- SHAGAM, R., KOHN, B. P., BANKS, P. O., DASCH, L. E., VARGAS, R., RODRIGUEZ, G. I. & PIMENTEL, N. (1984): Tectonic implications of Cretaceous-Pliocene fission-track ages from rocks of the circum-Maracaibo Basin region of western Venezuela and eastern Colombia. Bonini, W. E. & others, eds., *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*, Geological Society of America Memoir 162, p 385-412.
- SPEAR, F.S. (1993): Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths. *Mineralogical Society of America Monograph 1*. Washington DC p 799.
- TRACY, R.I. (1982): Compositional zoning and inclusions in metamorphic minerals. *Reviews in Mineralogy*, v. 10, p 355-397.
- TSCHANZ, C. M., JIMENO, A. & CRUZ, J. (1969): Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta area (Colombia). Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras, Informe 1829. 305 p.
- TSCHANZ, C., MARVIN, R., CRUZ, J., MEHNERT, H. & CEBULLA, G. (1974): Geologic Evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Northeastern Colombia. -Geological Society of American Bulletin v. 85, p 273-284.
- UJUETA, G. & LLINÁS, R. D. (1990): Reconocimiento Geológico de la parte más septentrional de la sierra de Perijá. *Geología Colombiana*, v. 17, p 197-209.
- VAN DER KAARS, W. A. (1983): A palynological-Paleoecological study of the Lower Tertiary coal-bed sequence from El Cerrejón: *Geología Norandina*, v. 8, p. 33-48.
- VAN DER PLAS, L. & TOBI, A. C. (1965): A chart for judging the reliability of point counting results. *American Journal of Science*, v. 263, p 87-90.
- VILLAMIL, T. (1999): Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 153, p 239-275.
- WELTJE, J.G. & EYNATTEN, V.H. (2004): Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. *Sedimentary Geology*, v. 171, p 1-11.
- WOLF, K. H. (1971): Textural and compositional transitional stages between various lithic grain types (with a comment on "Interpreting detrital modes of graywackes and arkose": *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 41, p 328-332.

Manuscrito recibido Marzo 2007; aceptado Octubre 2007