



Consideraciones sobre la Petrografía y Diagénesis de los Grupos Guadalupe (Cordillera Oriental) y Palmichal (Piedemonte Llanero)

LUIS VERGARA

INGEOMINAS. Dirección actual: Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 14490, Santa Fé de Bogotá, Colombia

GERMAN RODRIGUEZ

INGEOMINAS. Dirección actual: DUNIA Consultores, Apartado 246159, Santa Fé de Bogotá, Colombia

VERGARA, L. & RODRIGUEZ, G. (1996): Consideraciones sobre la Petrografía y Diagénesis de los Grupos Guadalupe (Cordillera Oriental) y Palmichal (Piedemonte Llanero).- Geología Colombiana No. 21, p. 41 -63, 10 Figs., 4 Láminas, 6 Tablas, Santa Fé de Bogotá.

Palabras Claves: Cordillera Oriental, Piedemonte Llanero, Grupo Guadalupe, Grupo Palmichal, Petrografía, Diagénesis, Colombia.

RESUMEN

El análisis modal a partir de secciones delgadas de arenitas de los Grupos Guadalupe (Formación Arenisca Dura), Palmichal y Formación Arenisca de El Morro, permitió establecer las diferencias petrográficas entre ellas. Las arenitas de la última unidad, en particular, contienen cantidades importantes de fragmentos derivados de rocas metamórficas, lo cual indica cambios en el área de aporte. Las características texturales se evaluaron para calcular la pérdida de porosidad en las unidades mencionadas. Los valores de pérdida de porosidad por compactación y por cementación resultan en índices de compactación que permiten concluir que el factor compactación es el principal responsable de la reducción en la porosidad primaria. La cementación afectó la porosidad primaria en forma significativa solo localmente, excepto en la Formación Arenisca Dura, donde valores altos de cemento no son excepcionales. La arenita superior del Grupo Palmichal junto con la Formación Arenisca de El Morro presentan las mejores características petrofísicas como potenciales reservorios de hidrocarburos o acuíferos.

ABSTRACT

Modal analyses of thin sections from the Guadalupe and Palmichal Groups, and from the Arenisca El Morro Formation, has revealed the petrographic differences between them. Particularly the sandstones from the latter unit bear metamorphic rock fragments that indicate changes in the source area. The textural features enabled calculations of porosity loss for each lithological unit studied. Values of compactional and cementational porosity loss together with the compaction index point towards compaction as the main proxy in obliteration of primary porosity. Significant cementation occurred only locally, except in the Arenisca Dura Formation, where high cement percentages are not unusual. The

arenita intermedia of the Palmichal Group and the Arenisca de El Morro Formation exhibit the best petrophysical attributes to be viewed as potential hydrocarbon reservoirs or aquifers.

INTRODUCCION

El estudio de las características composicionales y texturales de las rocas a partir de análisis de secciones delgadas es una herramienta útil en estratigrafía, especialmente en unidades arenosas donde los fósiles son escasos, porque aporta eventuales elementos de correlación. Sin embargo, la caracterización petrográfica detallada no garantiza por sí sola la correcta identificación de las unidades litoestratigráficas, la cual está supeditada al conocimiento de la sucesión estratigráfica y de su contenido paleontológico. Adicionalmente, una de las aplicaciones más significativas de la petrografía se tiene en la exploración petrolera e hidrogeológica por cuanto permite evaluar y predecir la capacidad de las rocas de alojar hidrocarburos o agua, respectivamente.

A pesar de su importancia, uno de los aspectos geológicos menos divulgados del Cretácico Superior de la vertiente oriental de la Cordillera Oriental y del Piedemonte Llanero son los relacionados con la petrografía. Su conocimiento se debe únicamente a los estudios petrográficos de JULIVERT (1962) y ZAMARREÑO DE JULIVERT (1962) de las Areniscas de Labor y Tierna del Grupo Guadalupe y a algunos datos aislados de la estratigrafía, publicados por AALTO (1971). En este trabajo nos proponemos contribuir al conocimiento micropetrográfico de las arenitas de los Grupos Guadalupe y Palmichal, hasta ahora restringido a las publicaciones arriba mencionadas. Igualmente es nuestra intención intentar evaluar la intensidad de la diagénesis mediante la estimación de la pérdida de

porosidad, cuantificando los dos principales factores de causa: la compactación y la cementación.

La información que se presenta aquí fue obtenida en el marco de un convenio de cooperación entre IINGEOMINAS y ECOPELROL-ICP, destinado a unificar la nomenclatura estratigráfica del Cretácico Superior en el Piedemonte Llanero. Se darán a conocer aquí únicamente los resultados petrográficos; las cuestiones estratigráficas, cronológicas y paleoambientales relacionadas no serán discutidas en este trabajo por ser tema de otra contribución de los autores (en preparación).

LOCALIZACION Y METODOS

En el marco del mencionado proyecto, se adelantaron trabajos de campo en la zona oriental de la Cordillera Oriental y el Piedemonte Llanero (parte central) estudiándose varias secciones estratigráficas que se muestrearon para micropaleontología, palinología y petrografía. Las muestras para petrografía se presentan en este trabajo; provienen de las secciones de El Crucero (vía Sogamoso-Aguazul), las Quebradas Playonera y Palmichal (Tauramena) y el Caño Blanco (Acacias). La localización de estas y otras secciones que se tuvieron en cuenta se encuentra en la Fig. 1. Las columnas donde se ubican las muestras fueron descritas en el campo a escala 1:50 y cartografiadas mediante levantamiento poligonal con brújula y cinta.

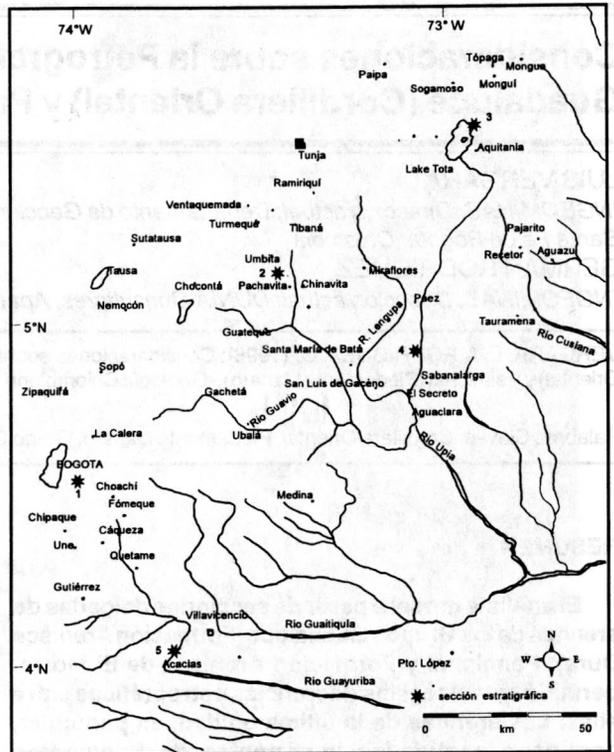


Fig. 1. Localización de columnas estratigráficas:
 1. Páramo del Rajadero; 2. Alto El Volador; 3. El Crucero; 4. Quebradas Playonera y Palmichal; 5. Caño Blanco

Se presentan aquí los resultados del estudio de 59 secciones delgadas de las unidades en cuestión. Se mencionan análisis de otras 9 placas de unidades esencialmente finogranulares (Formaciones Plaeners y Chipaque), los cuales no serán incluidos aquí debido a que nuestros objetivos se concentran en unidades con reconocida capacidad como roca almacenadora. El estudio micropetrográfico del Grupo Guadalupe se enfocó en la Formación Arenisca Dura, ya que esta unidad es la menos conocida, desde el punto de vista petrográfico, de las formaciones areníticas de este grupo.

Las secciones delgadas fueron impregnadas con epóxido azul para facilitar la cuantificación de la porosidad. El análisis modal se llevó a cabo mediante conteo de 300 puntos por sección delgada, donde se determinó el porcentaje de los siguientes elementos: cuarzo mono y policristalino, feldespato potásico, plagioclasa, moscovita, fragmentos de roca, matriz, cemento, fosfatos, glauconita, minerales pesados, porosidad primaria y porosidad secundaria. Para la evaluación de la madurez textural se siguieron los parámetros establecidos por FOLK (1974). La presencia de aceite en los poros fue confirmada mediante examen con luz ultravioleta.

En cuanto a la composición de las arenitas, los resultados que evaluaremos en la discusión ameritaron utilizar la metodología de FOLK (1954), la cual incluye en el extremo derecho del triángulo composicional todos los fragmentos de roca metamórfica, incluidos los de cuarzo policristalino o cuarcita, así como las micas. Este procedimiento fue reevaluado por FOLK (1974), quien incluyó los fragmentos de cuarcita dentro del cuarzo, aunque esto presenta el problema que los elementos que indican un área fuente metamórfica quedan en polos separados en el triángulo composicional. En cuanto a la nomenclatura de las arenitas utilizaremos la de McBRIDE (1963), la cual conserva los ocho campos composicionales definidos por FOLK (1954), eliminando nombres ambiguos tales como grauvaca e introduciendo los nombres de roca ampliamente utilizados en la actualidad. Sin embargo, McBRIDE (1963) introdujo los nombres composicionales graficando el cuarzo policristalino en el polo Q, razón por la cual nos referiremos en este trabajo a "sublitoarenitas" o "litoarenitas" a las rocas denominadas respectivamente subgrauvacas o grauvacas por FOLK (1954) y las utilizaremos entre comillas porque no corresponden exactamente con el sentido dado por McBRIDE.

Para graficar los puntos en los triángulos composicionales el contenido de cuarzo (Q), feldespato (F) y fragmentos de roca metamórfica y mica (M) se recalcularon al 100%, mientras que los valores porcentuales de matriz (Mz), cemento (Cto), porosidad primaria (Pp) y porosidad total (Pt) que aparecen en las tablas se refieren a la totalidad de los elementos contados. En las tablas de datos se usan las abreviaturas arriba mencionadas para los elementos correspondientes y se añaden asteriscos en los valores de F y M para resaltar las muestras diferentes a las cuarzoarenitas, clasificadas como subarcosa o "sublitoarenita", respectivamente.

En cuanto a los principales procesos diagenéticos que afectaron las unidades en cuestión, para calificar la calidad de las arenitas desde el punto de vista de la roca reservorio, hemos intentado cuantificar el efecto de la compactación en la pérdida de porosidad, según la metodología descrita por LUNDEGARD (1992). Según este método, la pérdida de porosidad por compactación (COPL, %) equivale a:

$$P_i - [((100 - P_i) \times P_{mc}) / (100 - P_{mc})]$$

mientras que la pérdida de porosidad por cementación (CEPL, %) se calcula mediante la ecuación:

$$(P_i - COPL) \times (C / P_{mc})$$

donde P_i es la porosidad inicial (se asume del 45%), P_{mc} la porosidad menos-cemento y C es el cemento. P_{mc} corresponde al volumen intergranular y se calcula sumando la porosidad primaria observada al microscopio (P_p) y el cemento (C). El valor de porosidad total (P_t) se incluye en las tablas por ser de interés comercial. Otra de las recomendaciones del método que se tuvo en cuenta fue excluir en los promedios las rocas con valores de matriz (o matriz-cemento) superiores al 10% porque la matriz inhibe la cementación y por ende se tiende a sobreestimar la compactación. La matriz-cemento se contó como cemento pero, de ser mayor al 10%, se excluyó del cálculo de IC. A pesar de esto, los índices en estas muestras se calcularon para confirmar el error que se introduce, y se presentan en las tablas entre paréntesis.

Para evaluar las causas de la pérdida de porosidad se utilizó el índice de compactación (ICOMPACT o IC) obtenido mediante la relación:

$$COPL / (COPL + CEPL)$$

El IC es igual a 1 cuando toda la pérdida de porosidad es por compactación e igual a 0 cuando dicha pérdida es por cementación (LUNDEGARD 1992).

NOMENCLATURA ESTRATIGRAFICA

En este trabajo utilizaremos el Grupo Guadalupe en el sentido de RENZONI (1962), cuyo esquema de nomenclatura es el más difundido para la unidad. Las tres unidades de arenitas de interés desde el punto de vista petrográfico son las Formaciones Arenisca Dura, Arenisca de Labor y Arenisca Tierna, descritas en detalle por UJUETA (1962), JULIVERT (1962, 1968) y posteriormente por PÉREZ & SALAZAR (1978). La edad del Grupo Guadalupe abarca desde el Campaniano hasta el Maastrichtiano.

El nombre de Grupo Palmichal fue introducido oficialmente para el Piedemonte Llanero por ULLOA & RODRÍGUEZ (1979), quienes señalaron la sección de la Quebrada Palmichal como la sección tipo. Según ellos, este Grupo se compone de cinco unidades informales, tres areníticas (conjuntos A, C y E) y dos lodolíticas (conjuntos B y D), con rango formacional. El conjunto A del Grupo Palmichal se denomina aquí informalmente arenita inferior y el conjunto C arenita superior. La primera de ellas se depositó durante el Campaniano y la segunda durante el Maastrichtiano. Por su parte, el conjunto E del Grupo Palmichal equivale a la Formación Arenisca de El Morro (VAN DER HAMMEN 1958), una unidad de arenitas y conglomerados de edad Paleoceno, que infrayace a las denominadas Arcillas de El Limbo. La Formación Arenisca de El Morro equivale en parte a la Formación Barco de la región del Catatumbo (NOTESTEIN *et al.* 1944). Se sigue aquí el esquema estratigráfico en preparación donde se separa la Formación Arenisca de El Morro del Grupo Palmichal en razón a la relación discordante entre ambas unidades.

GRUPO GUADALUPE

Formación Arenisca Dura

Las muestras analizadas para petrografía provienen de los aproximadamente 120 m de la unidad que afloran en la sección de El Crucero (Fig. 2). En esta localidad, la Arenisca Dura está constituida en su parte inferior por arenitas de grano fino en capas muy gruesas. Por encima de un intervalo cubierto aflora una sucesión alternante de limolitas, lodolitas y arenitas, con esporádicas ocurrencias de chert. La parte superior de la sección que aflora la componen predominantemente arenitas finas de cuarzo con diversos grados de bioperturbación.

En este trabajo se analizaron 8 muestras provenientes de la sección El Crucero (Tabla 1, Fig. 3). Se trata de 3 cuarzoarenitas y 5 subarcosas (o rocas muy cercanas a sus límites en el diagrama composicional). Hay que anotar que la presencia de subarcosas en la Arenisca Dura ya había

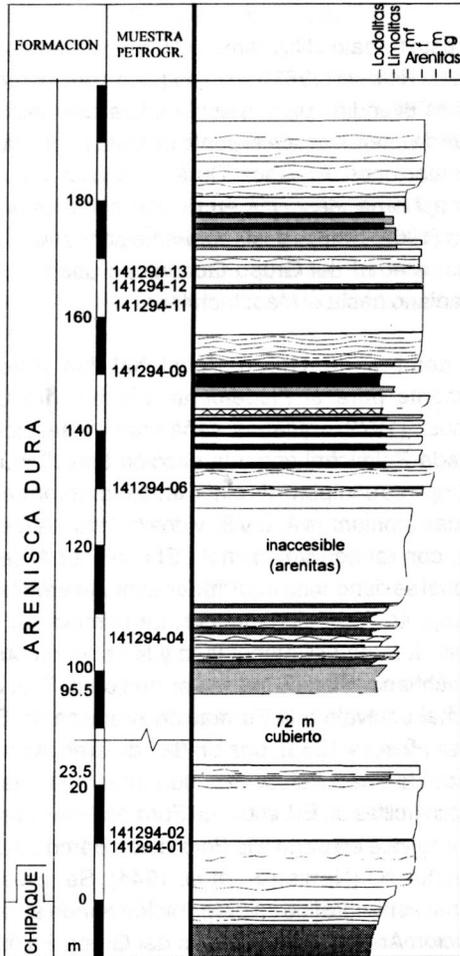


Fig. 2. Columna estratigráfica de la Formación Arenisca Dura en la sección El Crucero.

sido reportada por RODRÍGUEZ & RODRÍGUEZ (1993), en la sección del Alto El Volador.

Las rocas son de grano fino a muy fino, subangulares, inmaduras en su mayoría, con porcentajes variables de matriz, algunas con laminación de materia orgánica. Las arenitas de esta formación presentan alta cementación por sílice o por matriz-cemento, donde se dificulta distinguir entre sílice, óxidos de hierro, arcillas y material fosfático (ver Lámina I, fotografías 1 y 2). La porosidad primaria está pobremente interconectada. Se detectaron peloides fosfáticos en avanzado estado de disolución, lo cual aumenta la porosidad secundaria (ver Lámina I, fotografía 4). Los minerales accesorios más comunes son circón, glauconita, turmalina y trazas de fragmentos de chert. Los contactos entre los granos son cóncavo-convexos a suturados.

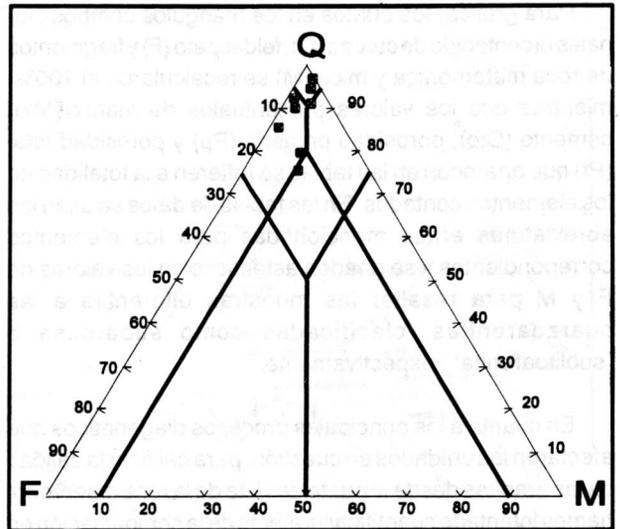


Fig. 3. Triángulo de composición modal de las arenitas de la Formación Arenisca Dura, sección El Crucero (según Tabla 1).

Formaciones Arenisca de Labor y Arenisca Tierna

De las unidades del Grupo Guadalupe, las Areniscas Labor y Tierna son las más conocidas en cuanto a sus características petrográficas se refiere. Han sido estudiadas bajo el punto de vista textural por JULIVERT (1962) y en sección delgada por ZAMARREÑO DE JULIVERT (1962) en la sección del Páramo del Rajadero. Numerosos trabajos de grado de estudiantes del Departamento de Geociencias de la Universidad Nacional en Bogotá, en su mayoría inéditos, han complementado el conocimiento de estas unidades.

Según JULIVERT (1962) en la sección del Páramo del Rajadero el tamaño de grano predominante es muy fino a fino. La mayor parte de las arenitas son inmaduras a submaduras; en ellas los granos son subangulares y el cemento más común es la calcita y la sílice. Estas observaciones son consistentes con las de ZAMARREÑO DE JULIVERT (1962), quien además señala la importancia del cemento ferruginoso en esta unidad. De acuerdo a su composición, las rocas de la Formación Arenisca de Labor en el Páramo del Rajadero son principalmente "ortocuarcitas" (cuarzoarenitas) con contenidos variables de plagioclasas, microclinas y glauconita (ZAMARREÑO DE JULIVERT 1962). En la sección Alto El Volador también se reportó la presencia de arcosas y subarcosas con otros minerales accesorios como fosfatos, moscovita y circón (RODRÍGUEZ & RODRÍGUEZ 1993).

En cuanto a la Formación Arenisca Tierna, los trabajos arriba mencionados coinciden en que la composición de

TABLA 1

Valores porcentuales de los elementos petrográficos e índices estimados de la Formación Arenisca Dura en la sección El Crucero. Los valores de cemento en las muestras 141294-01 y 02 corresponden a matriz-cemento. El significado de las abreviaturas, asteriscos y paréntesis se explica en el texto (ver metodología).

Muestra	Q	F	M	Mz	Cto	Pp	Pt	COPL	CEPL	IC
141294-01	88.0	7.1*	4.8	0.0	28.4	2.0	3.4	(20.97)	(22.44)	(0.48)
141294-02	85.6	11.9*	2.8	0.7	20.0	0.4	0.8	(33.46)	(11.76)	(0.73)
141294-04	76.7	15.5*	11.6	20	0.0	2.0	10.0	(43.87)	(0.0)	(1.0)
141294-06	97.1	0.7	2.2	13.2	0.0	4.4	16.4	(43.87)	(0.0)	(1.0)
141294-09	79.1	11.4*	9.4	12.4	18.8	2.6	4.2	(30.02)	(13.51)	(0.68)
141294-11	91.2	3.6	5.1	6.0	9.4	1.2	7.6	38.47	5.79	0.86
141294-12	93.1	4.0	2.8	15.8	6.8	2.0	4.8	(39.69)	(4.10)	(0.90)
141294-13	91.5	6.4*	1.9	14.0	15.2	0.4	2.0	(34.83)	(9.90)	(0.77)

sus rocas es generalmente de cuarzoarenitas, de variada granulometría con predominancia del grano grueso, con bajos contenidos de matriz, cemento síliceo y caolínico, con frecuencia friables. En cuanto a las estructuras sedimentarias, la estratificación cruzada de alto ángulo parece ser una característica constante regionalmente (ver DÍAZ 1994: Fig. 1).

Consideraciones sobre la diagénesis de la Formación Arenisca Dura

Los procesos diagenéticos a los que han sido sometidas las arenitas de la Formación Arenisca Dura son principalmente físicos. Dentro de estos, la compactación se evidencia en los contactos largos a cóncavo-convexos. Los procesos químicos incluyen los sobrecrecimientos sintaxiales de sílice, mientras que los físico-químicos se manifiestan en la solución-presión, evidente en los contactos suturados de las muestras (e.g. 141294-11). En la muestra 141294-12 se ha disuelto parcialmente la glauconita. En otras muestras se observa alteración de feldspatos a minerales arcillosos (e.g. 141294-09).

Estas observaciones indican que estas rocas estuvieron sometidas a varias etapas de diagénesis. En la Formación Arenisca Dura la primera fase fue física, en donde primó la compactación y a la cual estuvo asociada una fase química primaria, caracterizada por la generación de filosilicatos como glauconita en forma de peloides. La segunda fase fue principalmente química, representada primordialmente por la cementación sílicea. Por último, otra fase de diagénesis

química se reconoce en la disolución de fosfatos, glauconitas y la alteración de feldspatos.

La porosidad observada es en su mayoría de origen secundario por disolución de filosilicatos y fosfatos, seguida por porosidad intercrystalina dentro de la matriz. La porosidad primaria se observa principalmente asociada a la matriz en forma de poros intercrystalinos. Los valores de porosidad primaria de la Tabla 1 están en un rango entre 0 a 5 %, lo cual es coherente con datos de RODRÍGUEZ & RODRÍGUEZ (1993) y de ALZATE & BUENO (1994), obtenidos mediante pruebas de petrofísica. El promedio de porosidad total en las muestras es de 6.15% y la permeabilidad óptica es muy baja, lo cual significa que es altamente improbable que por los poros de esta unidad hayan fluido hidrocarburos. Sin embargo, esto no excluye la posibilidad que la Formación Arenisca Dura sea un acuífero o reservorio de hidrocarburos por fracturamiento.

En el cálculo de la COPL (35.47%), CEPL (8.43%) e IC (0.80) se tomaron en cuenta todas las muestras porque de lo contrario no habría prácticamente muestras con valores de matriz o matriz-cemento adecuadas para los cálculos (ver metodología). En vista de esto, los valores resultantes son aproximaciones que sobrestiman el factor compactación. Sin embargo, tres de las muestras con matriz mayor del 10% contienen cantidades apreciables de cemento, el cual presenta en general porcentajes altos. Los valores de los índices arriba mencionados sugieren que la mayor parte de la reducción de la porosidad en las muestras de la Formación Arenisca Dura ocurrió por compactación,

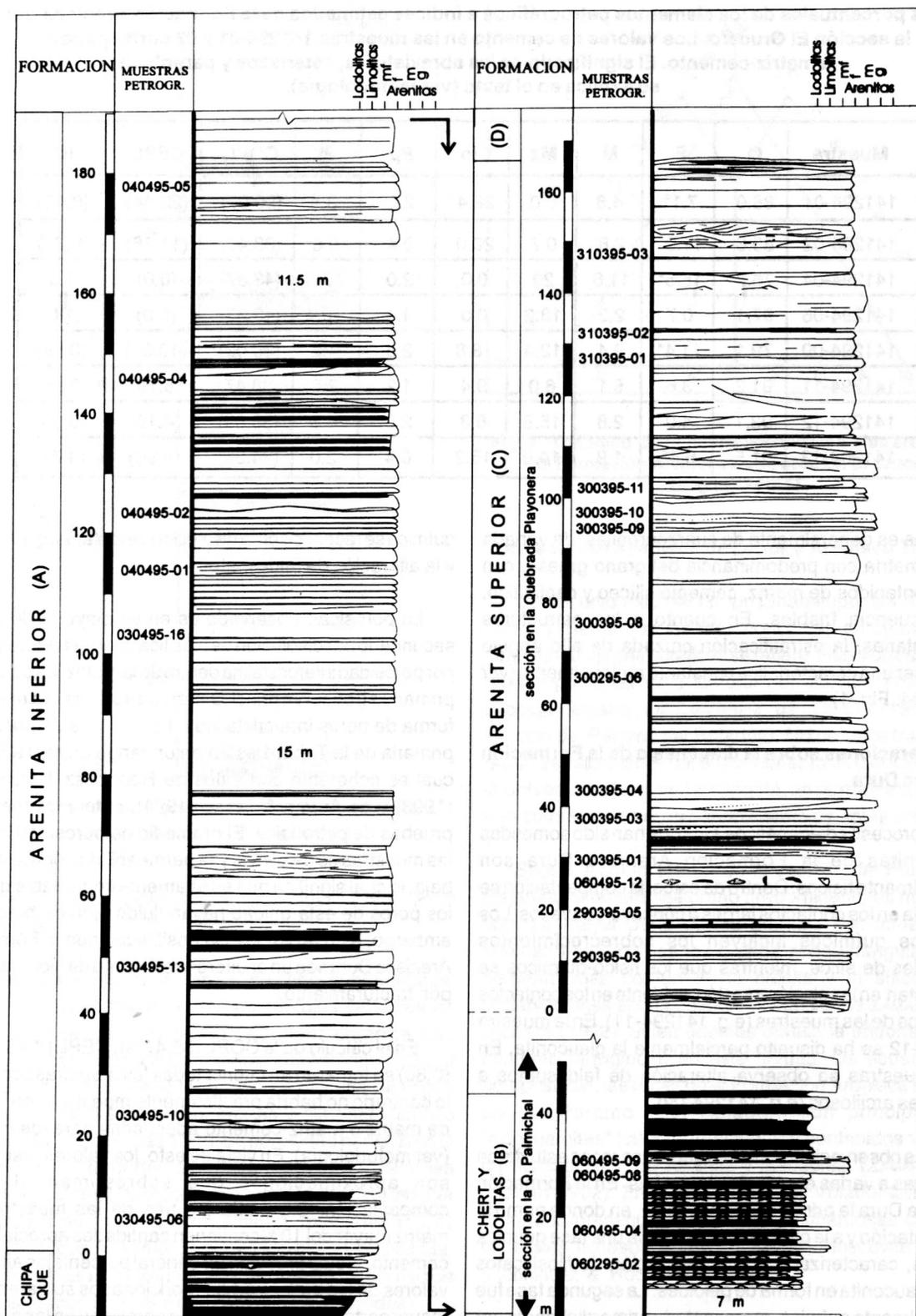


Fig. 4. Columna estratigráfica del Grupo Palmichal en las quebradas Playonera y Palmichal (ver texto).

aunque se debe resaltar el factor cementación, que ha actuado notoriamente a pesar de la cantidad de matriz existente. Ambos factores bien pudieron impedir la migración de fluidos a través de esta unidad litológica.

GRUPO PALMICHAL

El Grupo Palmichal se estudió principalmente en las Quebradas Playonera, Palmichal y el Caño Blanco. En la Fig. 4 se presenta la sucesión litológica del Grupo en forma de columna compuesta: la Arenita inferior (conjunto A) y superior (conjunto C) fueron levantadas en la quebrada Playonera, mientras el conjunto B de chert y lodolitas en la quebrada Palmichal, adyacente a la anterior.

Arenita inferior (A)

El estudio de 8 secciones delgadas provenientes de esta unidad ha revelado que todas, excepto una subarcosa, son cuarzoarenitas (ver Tabla 2, Fig. 5). Las arenitas varían texturalmente en razón a los diversos contenidos de matriz arcillosa, siendo maduras a inmaduras. La granulometría es fina a muy fina; esporádicamente hay granos de tamaño medio. En sección delgada se observan rocas con laminación de lodolitas ricas en materia orgánica y óxidos de hierro. El cemento más común es el silíceo y en menor cantidad fosfático, a veces coexistentes. Además, se presenta cemento calcáreo (muestra 030495-13; ver Lámina III, fotografía 4), donde flotan granos de cuarzo dispuestos en textura poiquilotópica.

Los datos de porosidad obtenidos del conteo de puntos

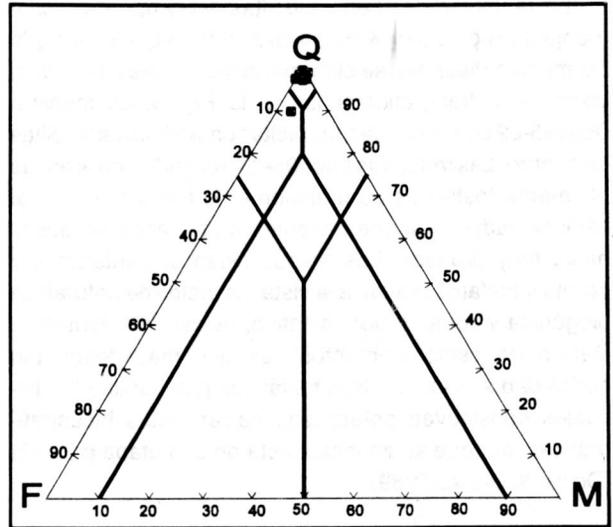


Fig. 5. Triángulo de composición modal de la arenita inferior del Grupo Palmichal, sección Quebrada Playonera (según Tabla 2).

alcanzan hasta cerca del 15%, siendo principalmente porosidad primaria intergranular y en menor proporción porosidad secundaria. La porosidad secundaria más común en este intervalo se generó a partir de disolución de minerales autigénicos como fosfatos y glauconita y en menor grado de la disolución de cemento y la destrucción de minerales del armazón tales como feldespatos potásicos. En las muestras donde ocurre laminación de lodolitas se observa una muy reducida porosidad intercrystalina.

TABLA 2

Valores porcentuales de los elementos petrográficos e índices estimados de la arenita inferior Grupo Palmichal, sección Quebrada Playonera

Muestra	Q	F	M	Mz	Cto	Pp	Pt	COPL	CEPL	IC
030495-06	98.1	0.0	1.80	11.2	5.2	9.2	9.2	(36.48)	(3.30)	(0.91)
030495-10	99.3	0.7	0.0	14.4	7.2	7.2	7.6	(35.74)	(15.3)	(0.53)
030495-13	96.7	1.3	1.90	0.4	27.6	0.0	0.0	24.03	20.97	0.53
030495-16	98.2	1.7	0.0	0.0	12.4	7.6	9.2	31.25	8.52	0.78
040495-01	89.6	7.4*	2.8	9.6	6.0	2.8	5.2	39.69	3.62	0.91
040495-02	97.2	1.8	1.6	4.8	8.0	7.6	8.8	34.83	5.21	0.86
040495-04	99.4	0.6	0.0	1.2	4.4	12.6	15.6	33.73	2.91	0.92
040495-05	97.9	1.5	0.5	1.6	2.0	15.2	15.2	33.57	1.32	0.96

De la unidad de chert y lodolitas del Grupo Palmichal (conjunto B de ULLOA & RODRÍGUEZ 1979), equivalente a la Formación Plaeners, se elaboraron 4 secciones delgadas, ubicadas estratigráficamente en la Fig. 4. La muestra 060495-02 corresponde a una lidita con láminas de limolitas de cuarzo. Las muestras 060495-04, -08 y -09 son arenitas altamente fosfáticas de granulometría fina a media, mal seleccionadas, con componentes de tamaños arcillosos hasta muy gruesos. Los granos están cementados por calcita y fosfatos. Saltan a la vista los restos de naturaleza biogénica y composición fosfática, de variados tamaños. Dentro de estos elementos, los que más despiertan curiosidad son los ictiolitos fosfáticos (ver Lámina III), los cuales constituyen potenciales herramientas bioestratigráficas, aunque su zonación está en una etapa primaria (DOYLE & RIEDEL 1989).

Arenita superior (C)

Se analizaron 12 muestras de esta unidad clasificadas como 7 cuarzoarenitas, 1 subarcosa y 4 "sublitoarenitas" (ver Tabla 3, Fig. 6). Estas últimas presentan altos contenidos de fragmentos de cuarcita. Cabe destacar la muestra 290395-05, una fosforita con un contenido del 58.4% de "pellets" e intraclastos fosfáticos y de apenas un 12% de cuarzo con respecto a la totalidad de la roca. Texturalmente, se observó una variación de base a techo en las características texturales de las muestras, siendo inmaduras

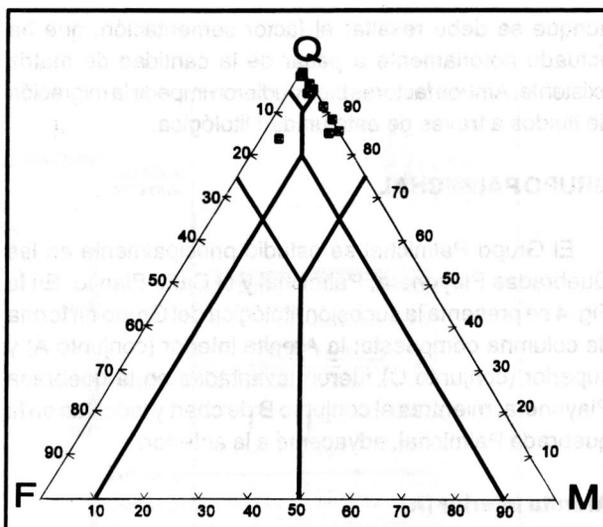


Fig. 6. Triángulo de composición modal de la arenita superior del Grupo Palmichal, sección Quebrada Playonera (según Tabla 3).

a submaduras hacia la base, con tamaños de grano desde muy grueso hasta fino, y maduras hacia el techo, donde prevalece el tamaño de grano medio. Los porcentajes de matriz también son variables, aunque sólo dos muestras tienen valores superiores al 10% y ocurren en la parte inferior de la formación.

TABLA 3

Valores porcentuales de los elementos petrográficos e índices estimados de la Arenita superior Grupo Palmichal, sección Quebrada Playonera.

Muestra	Q	F	M	Mz	Cto	Pp	Pt	COPL	CEPL	IC
290395-03	83.5	12.6*	3.8	12.4	4.8	2.4	3.6	(40.73)	(2.84)	(0.93)
290395-05	85.7	2.8	11.4*	17.6	1.6	2.4	4.4	(42.70)	(0.92)	(0.97)
300395-01	100	0.0	0.0	8.0	6.8	4.4	4.8	38.06	4.21	0.90
300395-03	91.2	0.0	8.7	2.0	3.2	11.2	12.0	35.74	2.05	0.94
300395-04	98.5	0.0	1.5	2.4	6.8	11.2	11.2	32.92	4.56	0.87
300395-06	96.2	0.0	3.7	8.8	1.2	0.0	0.0	44.33	0.67	0.98
300395-08	88.6	0.0	11.3*	7.2	4.4	3.6	4.8	40.21	2.63	0.93
300395-09	98.9	0.0	1.0	2.4	2.4	17.2	17.2	13.40	3.86	0.77
300395-10	86.8	0.0	13.1*	2.4	5.6	11.6	11.6	33.57	3.72	0.90
300395-11	95.5	0.0	4.4	1.2	2.4	4.4	12.8	40.98	5.45	0.88
310395-01	94.7	0.5	4.6	0.8	5.2	11.6	13.6	33.89	3.43	0.90
310395-02	94.5	1.6	3.7	0.8	8.4	12.8	14.4	30.20	5.86	0.83

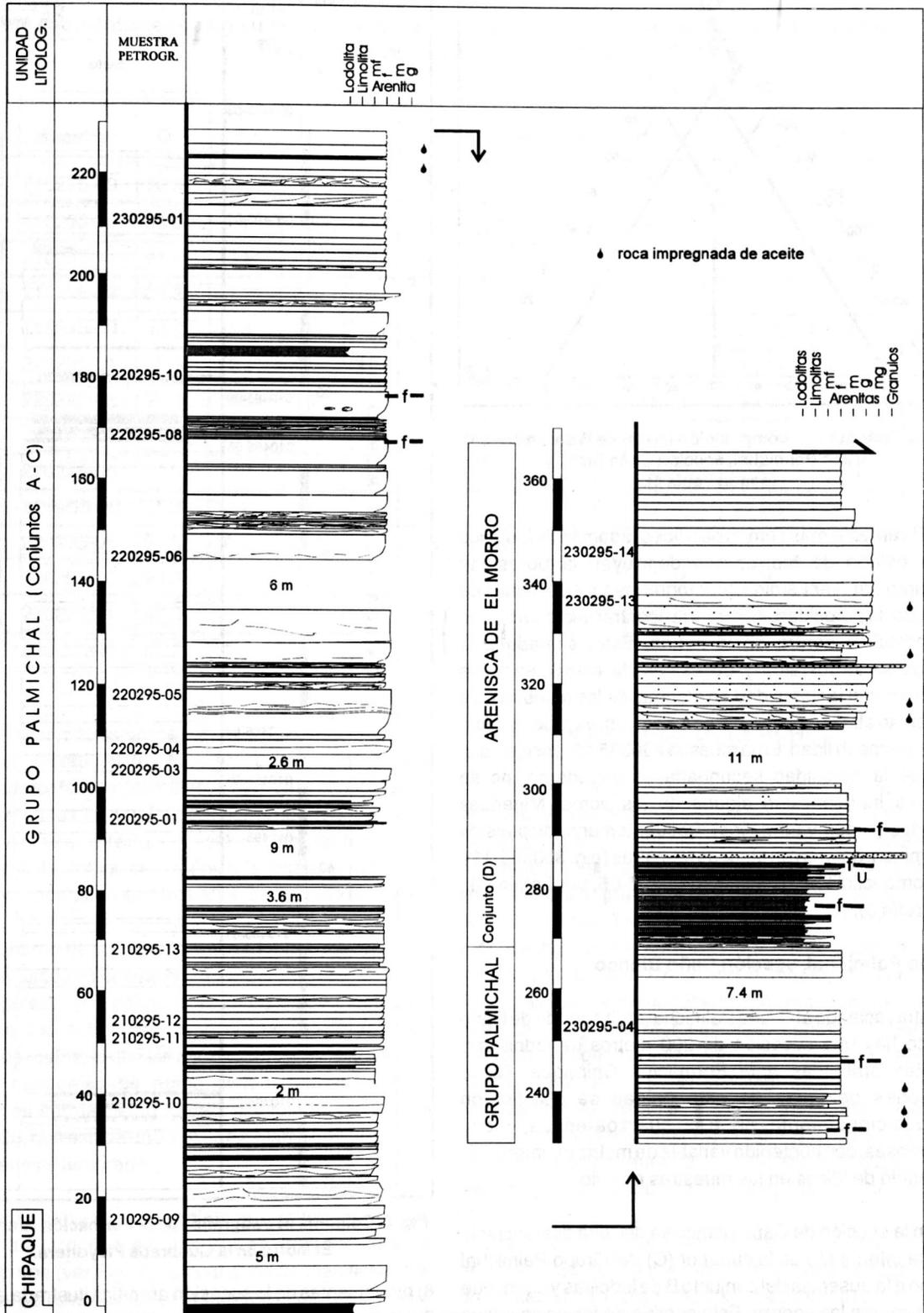


Fig. 7. Columna estratigráfica del Grupo Palmichal y la Formación Arenisca de El Morro en la sección de Caño Blanco (ver texto).

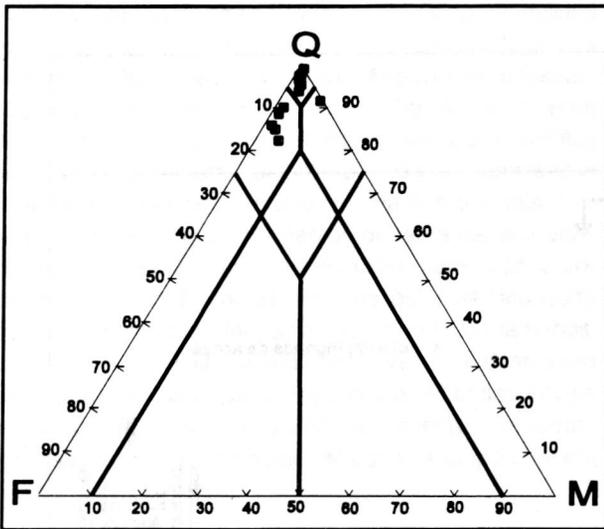


Fig. 8. Triángulo de composición modal de las arenitas del Grupo Palmichal, sección Caño Blanco (según Tabla 4).

El cemento más común es silíceo, además de fosfático y de óxidos de hierro, que destruyen la porosidad intergranular (ver Lámina IV, fotografías 1 y 2). Además de este tipo de porosidad, es común encontrar microporosidad intercrystalina dentro de la matriz. Esto, sumado a la disolución de fosfatos y de óxidos de hierro, aumenta notoriamente la porosidad en algunas de las muestras. La porosidad alta no implica, sin embargo, una relación directa con la permeabilidad. En la muestra 290395-05, por ejemplo, aunque la porosidad secundaria es importante, no se observa interconexión alguna de los poros. Minerales pesados (circón y turmalina), frecuentemente dispuestos en láminas, ocurren en algunas muestras (e.g. 300395-11), así como ictiolitos fosfáticos (290395-05, ver Lámina III, fotografía 3).

Grupo Palmichal, sección Caño Blanco

Infrayaciendo al Grupo Palmichal en la sección de Caño Blanco hay una sucesión de 200 metros de lodolitas y arenitas atribuidas a la Formación Chipaque. Cinco secciones delgadas de esta unidad se clasificaron composicionalmente en tres cuarzoarenitas y dos subarcosas, con contenido variable de matriz y cemento. El contenido de líticos en las muestras es nulo.

En la sección de Caño Blanco se dificulta diferenciar la arenita inferior (A) de la superior (C) del Grupo Palmichal debido a la ausencia del conjunto B de lodolitas y chert, que normalmente las separa. Este cambio de facies se apoya en la información bioestratigráfica. En la Tabla 4 aparecen los valores obtenidos de 14 muestras (graficados en la Fig.

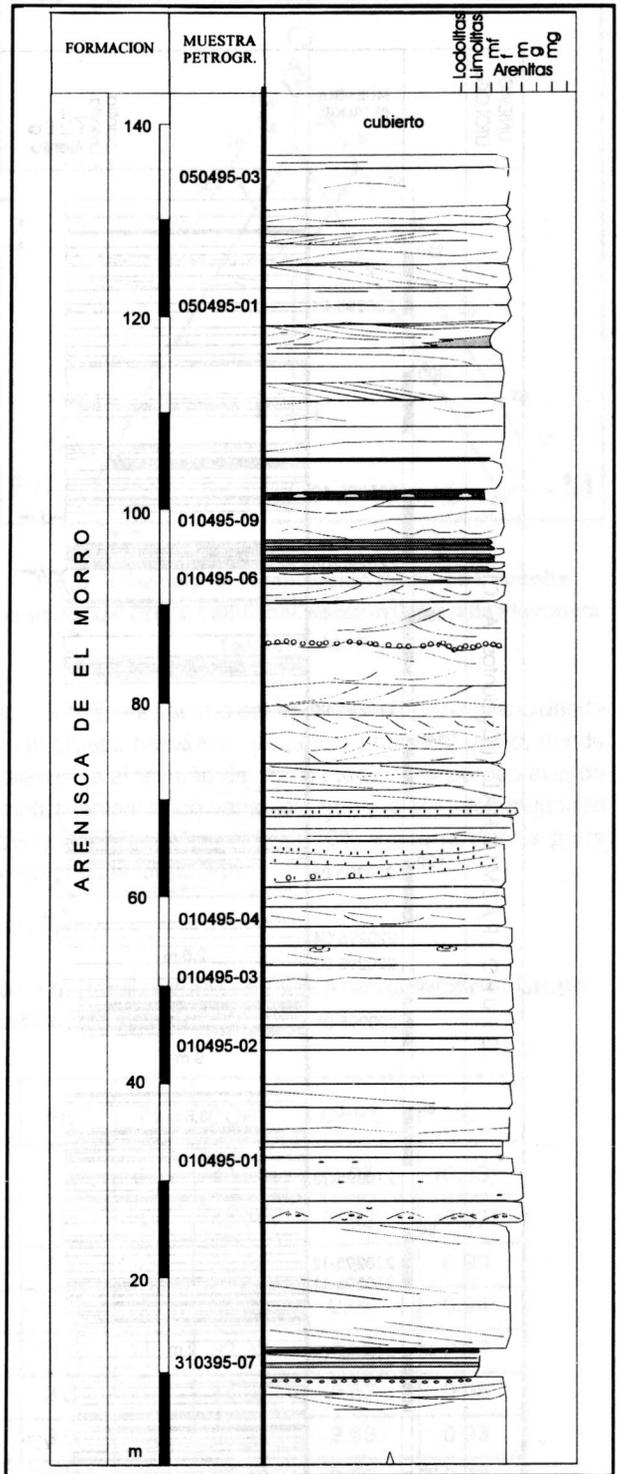


Fig. 9. Columna estratigráfica de la Formación Arenisca de El Morro en la Quebrada Playonera.

8) provenientes de la sucesión arenítica ilustrada en la Fig. 7, que se denota como del Grupo Palmichal no diferenciado.

Las muestras de esta sección se clasifican en 8

TABLA 4

Valores porcentuales de los elementos petrográficos e índices estimados para las arenitas del Grupo Palmichal en la sección de Caño Blanco.

Muestra	Q	F	M	Mz	Cto	Pp	Pt	COPL	CEPL	IC
210295-09	86.9	11.0*	2.1	24.0	2.0	7.6	7.6	(39.16)	(1.22)	(0.97)
210295-10	89.3	9.4*	1.2	18.8	3.2	11.6	13.2	(35.44)	(2.06)	(0.94)
210295-11	81.8	13.6*	4.5	12.8	6.4	2.8	3.2	(39.42)	(3.88)	(0.91)
210295-12	85.3	11.2*	3.4	18.4	3.6	2.4	2.8	(41.48)	(2.11)	(0.95)
210295-13	93.9	3.6	2.4	18.0	4.4	6.8	6.8	(38.06)	(2.72)	(0.93)
220295-01	86.5	11.4*	2.0	22.0	5.2	6.0	9.6	(38.06)	(3.22)	(0.92)
220295-03	95.4	2.8	1.7	11.2	13.2	2.0	2.0	35.14	8.56	0.80
220295-04	97.4	2.1	0.5	1.0	9.3	12.6	18.6	29.57	6.55	0.81
220295-05	97.9	1.0	1.0	4.8	11.6	4.0	5.2	34.83	7.54	0.8
220295-06	95.2	3.2	1.6	0.0	33.6	0.0	0.0	17.16	27.84	0.38
220295-08	90.6	0.6	8.7*	1.2	6.4	0.0	4.0	41.23	3.77	0.91
220295-10	98.9	0.0	1.1	2.4	2.4	0.0	17.2	43.64	1.36	0.96
230295-01	97.2	1.6	1.1	4.4	8.0	0.4	12.0	39.95	4.80	0.89
230295-04	97.2	1.7	1.0	13.6	2.8	6.8	7.6	39.15	1.70	0.95

cuarzoarenitas, 5 subarcosas y una "sublitoarenita". Ocurren elementos fosfáticos tales como "pellets", ictiolitos e intraclastos fosfáticos (fosfolitoclastos). Las subarcosas se presentan en los 70 m inferiores del Grupo (equivalentes con la Arenita inferior) y contienen feldespatos, principalmente potásicos. La única "sublitoarenita" tiene valores composicionales cercanos a los de cuarzoarenitas.

Texturalmente son arenitas inmaduras o maduras, de grano predominantemente fino a medio con intraclastos de tamaño grueso, con porcentajes variables de matriz y de porosidad. Las subarcosas, especialmente, poseen más del 10% de matriz, lo que las clasificaría como "wackes" en algunos esquemas de nomenclatura petrográfica. El cemento es normalmente silíceo, excepto en la muestra 220295-06, que exhibe un 33.6% de esparita poiquilotópica por diagénesis temprana.

Hacia la parte superior del Grupo Palmichal en esta sección las arenitas se encuentran impregnadas de hidrocarburos (ver Fig. 7), lo cual pone de manifiesto sus bondades petrofísicas. La presencia de aceite es evidente en el campo y se observa también en algunas secciones delgadas bajo luz ultravioleta.

FORMACION ARENISCA DE EL MORRO

Esta unidad se identificó en las dos secciones del Piedemonte Llanero que se ilustran aquí (ver Figs. 7 y 9). De la Quebrada Playonera se analizaron 9 secciones delgadas de arenitas clasificadas como "sublitoarenitas" y una "litoarenita" gracias a sus altos contenidos de cuarzo policristalino (ver Tabla 5, Fig. 10; Lámina IV, fotografías 3 y 4). Texturalmente se trata de arenitas submaduras a inmaduras, de grano fino alto a medio, de contornos angulares a subredondeados. La máxima granulometría es de arena muy gruesa, representada por granos de cuarcitas. Presentan moderada selección y porcentajes variables de matriz, hasta del 10%. El cemento más común en las arenitas de esta unidad es el silíceo; en algunas muestras ocurre cemento ferruginoso. Los valores de porosidad total obtenidos oscilan entre 2 y 20%, representada en su mayoría por porosidad intergranular, interconectada.

De la sección del Caño Blanco los valores de las muestras 230295-13 y -14 analizadas para petrografía se presentan en la Tabla 5. Se trata de una subarcosa y una "litoarenita", ambas texturalmente inmaduras. La segunda exhibe un contenido extremadamente alto de fragmentos

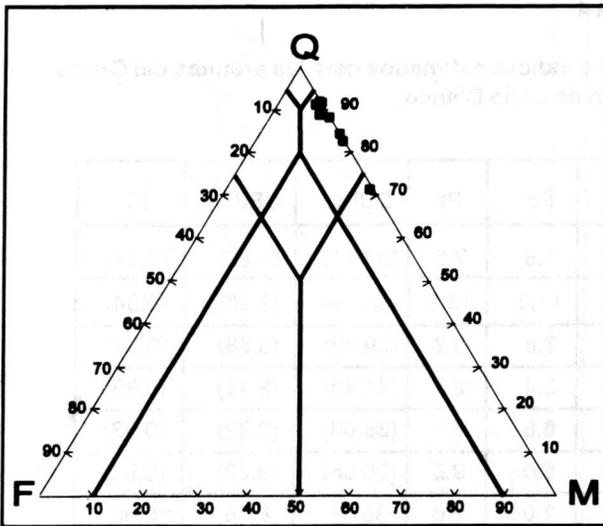


Fig. 10. Triángulo de composición modal de las rocas de la Formación Arenisca de El Morro, sección Quebrada Playonera (según Tabla 5).

de cuarcita (47.9%). Al igual que las de la unidad infrayacente, las capas de la Formación Arenisca de El Morro, que se señalan en la Fig. 7, están altamente saturadas de aceite.

CONSIDERACIONES DIAGENETICAS SOBRE EL GRUPO PALMICHAL Y LA FORMACION ARENISCA DE EL MORRO

Los principales procesos diagenéticos que afectaron las arenitas del Grupo Palmichal son físicos, químicos y fisico-químicos. Los procesos físicos más comunes fueron la compactación, manifiesta en la deformación plástica y en el fracturamiento de los granos, tal como se observa en micas (moscovita) dobladas (ver Lámina IV, fotografía 6) y en el fracturamiento de fosfatos (ver Lámina IV, fotografía 4) y de granos de cuarzo, respectivamente. Los procesos químicos más comunes fueron los sobrecrecimientos sintaxiales de sílice (ver Lámina IV, fotografía 1) y la formación de minerales tales como fosfatos, glauconita y otros filosilicatos autigénicos (ver Lámina IV, fotografías 2 y 5). Además, se evidencia otra fase de diagénesis química en la destrucción de fosfatos y glauconita. Por otra parte, los procesos físico-químicos se ejemplifican mediante la estilolitización, como producto de fenómenos de solución-presión, a lo largo de la cual suelen quedar concentrados los minerales ultraestables y la materia orgánica que han resistido la disolución (ver Lámina II, fotografías 1 a 3).

La porosidad observada fue principalmente intergranular, mientras que la porosidad secundaria no es significativa en

TABLA 5

Valores porcentuales de los principales elementos petrográficos de la Formación Arenisca de El Morro, secciones Quebrada Playonera y Caño Blanco.

Muestra	Q	F	M	Mz	Cto	Pp	Pt	COPL	CEPL	IC
QUEBRADA PLAYONERA										
310395-07	84.5	0.0	15.6*	1.6	4.4	4.4	4.4	39.69	2.65	0.93
010495-01	91.1	2.7	5.9*	10.4	8.4	4.4	7.2	(36.92)	(5.30)	(0.87)
010495-02	91.3	0.0	8.6*	1.6	8.8	9.6	9.6	32.59	1.91	0.94
010495-03	88.7	0.0	11.2*	8.4	6.4	6.4	7.2	36.92	4.04	0.90
010495-04	91.3	0.0	8.6*	0.4	4.4	15.2	16.8	33.25	2.93	0.91
010495-06	71.2	0.8	28.0*	6.8	11.0	5.0	7.0	33.73	7.29	0.82
010495-09	88.8	2.1	9.0*	1.6	4.8	19.2	19.2	27.63	3.47	0.88
050495-01	83.1	0.0	16.9*	2.4	6.4	2.4	2.4	39.69	3.86	0.91
050495-03	92.5	0.0	7.5*	5.6	4.4	4.0	4.4	39.95	2.64	0.93
CAÑO BLANCO										
230295-13	51.0	1.0	47.9*	7.6	2.8	0.4	11.2	43.18	1.59	0.96
230295-14	80.3	13.9*	5.6	16.0	4.4	0.8	1.2	(41.98)	(2.55)	(0.94)

TABLA 6

Valores promedio de porosidad total (Pt), pérdida de porosidad por compactación (COPL), por cementación (CEPL) e índice de compactación (IC), calculados para el Grupo Palmichal y la Formación Arenisca de El Morro en las secciones indicadas.

UNIDAD	SECCION	Pt	COPL	CEPL	IC
Grupo Palmichal	Caño Blanco	7.86	35.08	7.76	0.81
arenita inferior	Quebrada Playonera	8.85	32.85	7.08	0.82
arenita superior	Quebrada Playonera	9.20	34.33	3.64	0.89
Arenisca El Morro	Quebrada Playonera	8.68	35.43	3.59	0.90

ninguna de las muestras. La Tabla 6 muestra los promedios de porosidad e índices diagenéticos estimados. Tanto los porcentajes de pérdida de porosidad por compactación (COPL) como el índice de compactación (IC) indican que la compactación es el principal factor responsable de la destrucción de poros. La porosidad efectiva, entendida como la interconexión poral, se vio favorecida por la poca pérdida de porosidad por cementación (CEPL). Se destaca la arenita superior del Grupo Palmichal por tener el mejor promedio de porosidad total (9.2%), con varios valores superiores al 10%, que es normalmente el valor umbral de interés para los geólogos petroleros. Hay que advertir que estas consideraciones son válidas para la sección de la Quebrada Playonera, puesto que la porosidad puede ser muy variable en distancias cortas (LUNEGARD 1992).

Por otro lado, la Formación Arenisca de El Morro en la sección de Caño Blanco ha sido la menos afectada por la cementación, para lo cual se pueden tomar en cuenta factores sindeposicionales, pues dado su origen parálico, fluidos intersticiales de origen marino (e.g. calcáreos) no quedaron atrapados inicialmente en los poros, como debió ocurrir en varias partes del Grupo Palmichal. La importancia del factor cementación en la arenita inferior y el Grupo Palmichal de la sección de Caño Blanco, expresado en el CEPL, se debe a la abundancia de cemento calcáreo en algunas muestras.

Aparte de esto, a diferencia de lo encontrado por LUNEGARD (1992), no parece haber una relación directa entre el contenido de líticos y la disminución en la porosidad intergranular, ya que la Formación Arenisca de El Morro, caracterizada por su abundancia de líticos de cuarcita, presenta valores comparables a las de las demás unidades.

En cuanto a las muestras con cantidad de matriz mayor al 10%, hemos comprobado que los promedios de la Tabla 6 disminuyen sólo en fracciones decimales al incluir dichas

muestras en los estimativos. La única variación apreciable se registró en el índice CEPL en el Grupo Palmichal, sección Caño Blanco (ver Tabla 4), donde el promedio incluyendo las muestras con alto contenido de matriz disminuyó un 24.6%.

Un factor adicional de error en los cálculos es el asumir una porosidad inicial del 45%, un procedimiento ampliamente discutido por LUNEGARD (1992), quien demuestra que dicho valor es prudente y no introduce un margen de error significativo, aún en arenas fluviales mal seleccionadas. Algo similar ocurre con el calibrado de las arenas, cuyo efecto yace principalmente en la porosidad inicial, pero que no presenta relación alguna con los resultados en la base de datos de dicho autor.

DISCUSION Y CONSIDERACIONES SOBRE LA PROCEDENCIA

Desde el punto de vista metodológico, el poder identificar cambios en la procedencia corrobora la utilidad de seguir a FOLK (1954), lo cual está en desacuerdo con la afirmación de FOLK (1974) según la cual poner todos los fragmentos de roca, sin discriminar su origen, en un solo extremo del triángulo composicional le resta su significado de área fuente. El estudio detallado en sección delgada permite no solo determinar inequívocamente el cuarzo policristalino, sino cuantificarlo, evitando subjetividades en su identificación, lo cual argumenta FOLK (1974) para incluir todos los tipos de cuarzo en el polo Q del triángulo composicional. Los criterios de FOLK (1954) han sido desarrollados más recientemente en el diagrama QmFLt de DICKINSON & SUCZEK (1979), el cual equivale al diagrama QFM de FOLK (1954) que utilizamos en este trabajo y confirma la utilidad del segundo en el análisis de procedencia. Adicionalmente, el diagrama QpLvLs de estos autores también le confiere significado al cuarzo policristalino.

El procedimiento de considerar los agregados policristalinos de cuarzo deformado como fragmentos de roca metamórfica ha sido útil en este trabajo porque refleja una característica con significado estratigráfico. En efecto, se pueden diferenciar de este modo aquellas arenitas con contenidos importantes de cuarzo policristalino y cuarcitas ("sublitoarenitas") que ocurren en la Formación Arenisca de El Morro, de las demás arenitas de los Grupos Guadalupe y Palmichal. De otra forma todas las arenitas estudiadas en este trabajo serían cuarzoarenitas. Hay que anotar que el tipificar la Formación Arenisca de El Morro como rica en cuarzo policristalino no es un factor de correlación por sí solo, simplemente es un parámetro hallado empíricamente que puede ser útil en el reconocimiento de la unidad.

Al respecto, es interesante anotar que NOTESTEIN *et al.* (1944) enfatizaron la existencia de rocas que califican como "sparkling sandstones" en la Formación Barco, equivalente en la zona del Catatumbo a la Formación Arenisca de El Morro. Según ellos, los destellos que se observan en las arenitas de la Formación Barco corresponden a crecimientos secundarios del cuarzo (cuarcita?). Las capas con estas arenitas son las más productivas en algunos yacimientos, alcanzando una porosidad promedio del 12.5%, principalmente intergranular.

En cuanto a la procedencia de las arenitas del Cretácico cuspidal y Terciario inferior en la zona del Piedemonte Llanero, no parece haber discusión acerca del origen oriental de los mismos a partir de rocas precámbricas y paleozoicas del Escudo de Guayana. Si utilizamos diagramas de procedencia según la metodología de DICKINSON & SUCZEK (1979), todas las muestras indicarían aportes de un bloque continental u orógeno reciclado, lo cual es atribuible a dicha procedencia. La presencia casi constante de feldespato en las Formaciones Chipaque, Arenisca Dura y arenita inferior del Grupo Palmichal revela procedencia de rocas plutónicas. Por el contrario, en las Formaciones arenita superior del Grupo Palmichal y Arenisca de El Morro disminuye notoriamente el contenido de feldespato y aumenta el de cuarzo policristalino. Este tipo de cuarzo, por cierto, tiene un origen eminentemente metamórfico, muy poco plutónico (FOLK 1974:141-142).

Lo que indica la presencia de "sublitoarenitas" con elementos metamórficos es un cambio gradual en la zona de aporte, que comenzó en el Maastrichtiano (arenita superior, Grupo Palmichal) y es muy marcado en el Paleoceno (Arenisca de El Morro), con respecto a las demás unidades del Cretácico superior. El registro masivo de cuarzo policristalino en la Formación Arenisca de El Morro está asociado a un cambio deposicional, de ambientes de plataforma interna y de playa en el Cretácico, a depósitos

fluvio-deltáicos en dicha unidad, depósitos que suelen ser muy ricos en fragmentos de roca (FOLK 1974). La regresión responsable de dicho cambio pudo haber dejado al descubierto nuevas zonas de aporte, como se refleja en la composición de las arenitas.

La ocurrencia de fragmentos de cuarcitas junto con moscovita y ausencia de líticos de metamorfitas sugiere depósitos distales de un área fuente metamórfica (FOLK 1974) o procedencia a partir del retrabajamiento de una cubierta sedimentaria levantada, según las figuras 2 y 3 de DICKINSON & SUCZEK (1979), en las cuales los tipos de cuarzo se separan para conferirles significado de área fuente. Desafortunadamente no podemos diferenciar entre estas dos alternativas, es decir, si las arenitas en cuestión son el resultado de uno, o de más ciclos sedimentarios. En casos excepcionales como el que se ilustra en la Lámina I, fotografías 5 y 6 se ha reconocido, al menos en sección delgada y en las fotografías originales, la presencia de granos de cuarzo con dos generaciones de sobrecrecimientos: la primera es silíceo, de tipo sintaxial y la segunda ocurrió después de su retrabajamiento, representado por un recubrimiento glauconítico. La muestra donde se identificó este fenómeno proviene de la Formación Chipaque.

Independiente de esto, la Cordillera Oriental como área fuente debe descartarse ya que se levantó apenas a partir del Mioceno medio (HOORN *et al.* 1995). Un área fuente metamórfica cercana, por ejemplo a partir de remanentes de bloques emergidos del Grupo Quetame, produciría una cantidad apreciable de fragmentos de roca metamórfica, aparte del cuarzo policristalino, lo cual no se observa en las secciones delgadas, ni aún en las de la sección de Caño Blanco localizada al costado oriental del Macizo de Quetame. Un origen a partir de la Cordillera Central es improbable en virtud a su distancia y a que los sedimentos que aportó este elemento hacia el Este se acumularon en el Valle del Magdalena, tal como se ha documentado en numerosas publicaciones e ilustrado en las figuras 11 y 14 de COOPER *et al.* (1995). Por tanto, la única área emergida que pudo aportar sedimentos es el Escudo de Guayana, dentro del cual hay, además de rocas graníticas, rocas metamórficas y metasedimentarias (GONZÁLEZ *et al.* 1988), que suministraron el cuarzo (mono y policristalino) y los feldespatos que reportamos en este trabajo.

CONCLUSIONES

Las arenitas de las Formaciones Arenisca Dura y las del Grupo Palmichal son esencialmente cuarzoarenitas seguidas en cantidad por subarcosas y "sublitoarenitas". A diferencia de ellas, la Formación Arenisca de El Morro es

una unidad de "sublitoarenitas" de procedencia metamórfica, principalmente de cuarcitas. Todo apunta a que sus sedimentos se originaron en la emersión pronunciada de bloques metamórficos del Escudo de Guayana durante el Terciario temprano, que empezaron a suministrar detritos durante el Maastrichtiano.

En ausencia de información de permeabilidad, los valores de COPL, CEPL e IC permitieron cuantificar los procesos diagenéticos y aportar certeza en la evaluación de las formaciones estudiadas como reservorios o acuíferos. El índice de compactación conjugado con los resultados de porosidad indica que la compactación ha sido el factor más importante en la pérdida de porosidad en las arenitas estudiadas. La cementación contribuyó en este proceso en menor grado, con mayor importancia en la Formación Arenisca Dura que en las demás unidades estudiadas del Piedemonte Llanero, donde sólo localmente alcanzó valores significativos. Similarmente, la porosidad primaria y total es muy baja en la Arenisca Dura, mientras que en las unidades del Grupo Palmichal y Formación Arenisca de El Morro, esta presenta valores de interés para la exploración de petróleo.

La evaluación de las observaciones micropetrográficas, de los porcentajes de porosidad y de los índices de pérdida de porosidad calculados permite concluir que las unidades con mejores perspectivas como reservorios por sus características petrofísicas son la arenita superior del Grupo Palmichal y la Formación Arenisca de El Morro. Esto se corrobora con el hallazgo en superficie de arenitas saturadas de hidrocarburos en estas unidades.

AGRADECIMIENTOS

Esta contribución es parte de la segunda fase del proyecto "Estandarización de la Nomenclatura estratigráfica, Piedemonte Llanero", convenio INGEOMINAS - ECOPEL-ICP. Agradecemos a ambas instituciones por su apoyo logístico y financiero.

REFERENCIAS

AALTO, K.R. (1971): Diagenesis of orthoquartzites near Bogotá, Colombia.- *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 42, no. 2, p. 330-340, Tulsa.

ALZATE, J.C. & BUENO, M. (1994): Análisis estratigráfico secuencial de las rocas Cretácicas de la parte oriental del Departamento de Boyacá, Municipios de Sogamoso, Belencito y Aquitania (Trabajo de grado No. 349).- 121 p. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá

COOPER, M., ADDISON, F.T., ALVAREZ, R., CORAL, M., GRAHAM, R., HAYWARD, A., HOWE, S., MARTINEZ, J., NAAR, J., PEÑAS, R., PULHAM, A. & TABORDA, A. (1995): Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera and Magdalena Valley, Colombia.- *Bulletin*

of the American Association of Petroleum Geologists, vol. 79, no. 10, p. 1421-1443, Tulsa

- DIÁZ, L. (1994): Distribución de las facies siliciclásticas correspondientes a la Formación Arenisca Tierna y equivalentes en el Valle Superior del Magdalena.- *Estudios geológicos del Valle Superior del Magdalena*, Universidad Nacional de Colombia, p. IV/1-15, Santafé de Bogotá.
- DICKINSON, W.R. & SUCZEK, C.A. (1979): Plate tectonics and sandstone compositions.- *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* vol. 63, no. 12, p. 2164-2182, Tulsa.
- DOYLE, P. & RIEDEL, W. (1989): Cenozoic and Late Cretaceous ichtyoliths.- *En*: Bolli, H., Sanders, J.B. & Perch-Nielsen, K. (eds.) *Plankton Stratigraphy*, Cambridge University Press, p. 965-995, Cambridge.
- FOLK, R. (1954): The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature.- *The Journal of Geology*, vol. 62, no. 4, p. 344-359, Chicago.
- ____ (1974): *Petrology of sedimentary rocks*.- Hemphill Publishing Co., 178 p., Austin.
- GONZALEZ, H., NUÑEZ, A. & PARIS, G. (1988): Mapa Geológico de Colombia, Memoria explicativa.- INGEOMINAS, 71 p., Bogotá.
- HOORN, C. GUERRERO, J., SARMIENTO, G.A. & LORENTE, M.A. (1994): Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America.- *Geology*, vol. 23, no. 3, p. 237-240, Boulder.
- JULIVERT, M. (1962): Estudio sedimentológico de la parte alta de la Formación Guadalupe al E de Bogotá (Cretácico superior).- *Boletín Geológico*, Universidad Industrial de Santander, no. 10, p. 25-54, Bucaramanga.
- ____ (1968): *Lexique Stratigraphique International*, Colombie, Amerique Latine V/4a.- Centre National de la Recherche Scientifique, 652 p., Paris.
- LUNEGARD, P. D. (1992): Sandstone porosity loss - A "Big Picture" view of the importance of compaction.- *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 62, no. 2, p. 250-260, Tulsa.
- NOTESTEIN, F., HUBMAN, C.W. & BOWLER, J.W. (1944): Geology of the Barco concession, Republic of Colombia, South America.- *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 55, p. 1165-1216.
- PEREZ, G. & SALAZAR, A. (1978): Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe.- *Geología Colombiana* no. 10, p. 1-85, Bogotá.
- RENZONI, G. (1962): Apuntes acerca de la litología y tectónica de la zona al Este y Sureste de Bogotá.- *Boletín Geológico*, vol. X, no. 1-3, p. 72 - 73, Bogotá.
- RODRIGUEZ, G.A. & RODRIGUEZ, I. (1993): Análisis litoestratigráfico de las unidades del Cretácico superior que infrayacen y suprayacen a las Formaciones Guaduas y Chipaque, al NE y SE del Municipio de Nuevo Colón (Depto. de Boyacá) (Trabajo de grado No. 341).- 44 p. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- UJUETA, G. (1962): Geología del Noreste de Bogotá.- *Boletín*

Geológico, Servicio Geológico Nacional, vol. IX, nos. 1-3, p. 23-46, Bogotá.

ULLOA, C. & RODRIGUEZ, E. (1979): Geología del Cuadrángulo K-12 (Guateque).- Boletín Geológico, p. 5-55, Bogotá.

VAN DER HAMMEN, T. (1958): Estratigrafía palinológica de la Sabana de Bogotá (Cordillera Oriental de Colombia).- Boletín Geológico vol. V, no. 2, p. 189-203, Bogotá

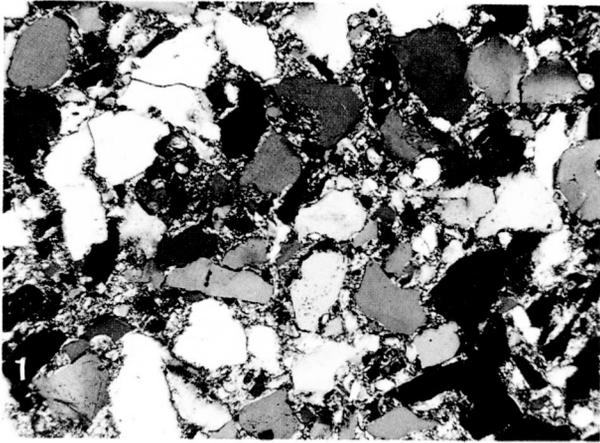
ZAMARREÑO DE JULIVERT, I. (1962): Estudio petrográfico de la parte alta de la formación Guadalupe (Cretácico superior) al E de Bogotá.- Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, no. 10, p. 55 - 61, Bucaramanga.

Manuscrito recibido, Mayo de 1996

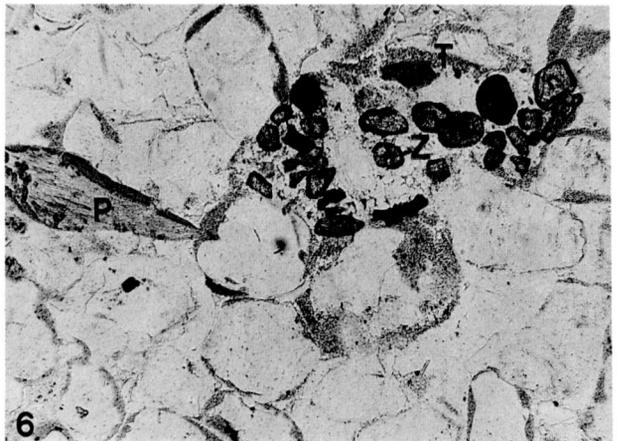
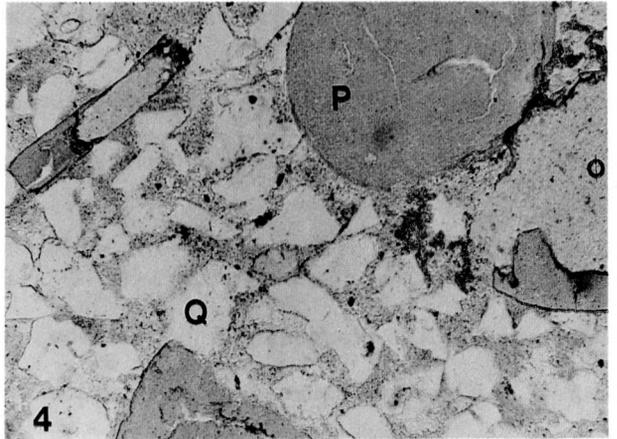
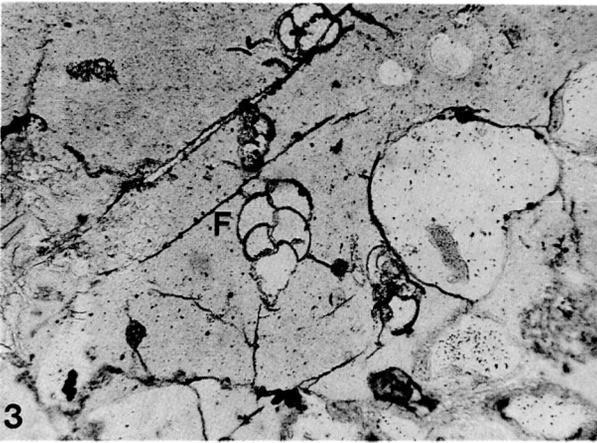
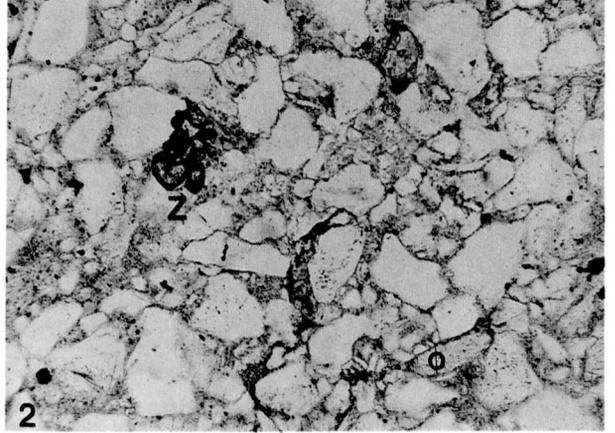
LAMINA I

1. **Microfotografía de una arenita de la Formación Arenisca Dura donde se observan entre otros, granos subangulares de cuarzo, matriz arcillosa y circones. Nicoles cruzados. Muestra 141294-01.**
2. **Vista con nicoles paralelos de la anterior fotografía. En esta se observa claramente la porosidad (Φ) intergranular, mal interconectada y los circones (Z).**
3. **Microfotografía de una fosforita de la Formación Plaeners. Ocurren foraminíferos bentónicos fosfatizados y parcialmente disueltos (porosidad móldica), entre los cuales se descata un ejemplar (F) del género Praebulimina. La porosidad no es evidente debido a que esta sección delgada no fue impregnada con epóxido azul. Muestra 081294-05.**
4. **Microfotografía de una arenita de cuarzo de la Formación Arenisca Dura. Nótese la presencia de porosidad secundaria (Φ) asociada a la disolución de peloides fosfáticos (P). Muestra 141294-06.**
5. **Glauconita (gl) y granos de cuarzo con recubrimientos de glauconita en estado de alteración, evidente en la parte indicada por la flecha. Nótese que algunos granos de cuarzo (Q) presentan dos eventos diagenéticos, el primero representado por sobrecrecimientos silíceos sintaxiales y el segundo por el recubrimiento de la glauconita. Muestra 200295-10, Formación Chipaque, sección Caño Blanco.**
6. **Otra vista en la misma roca donde ocurren también granos de cuarzo recubiertos probablemente por glauconita alterada, restos fosfáticos (P) y acumulación de minerales pesados, especialmente circones (Z) y turmalina (T). Muestra 200295-10, Formación Chipaque, sección Caño Blanco.**

(La longitud de la barra equivale a 0.5 mm; válida para todas las fotografías).



LAMINA I



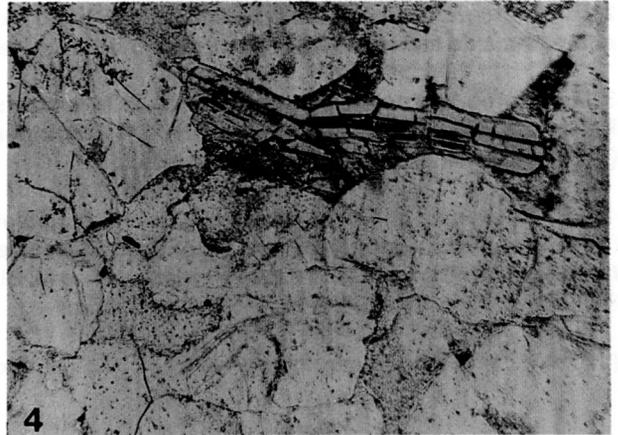
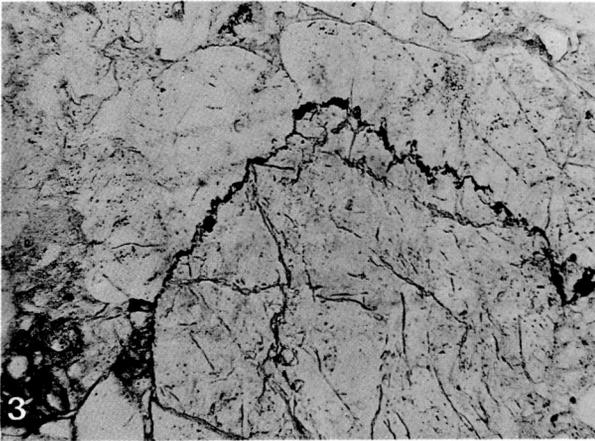
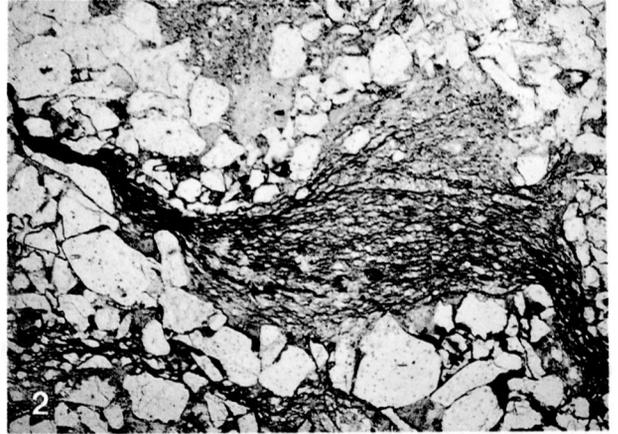
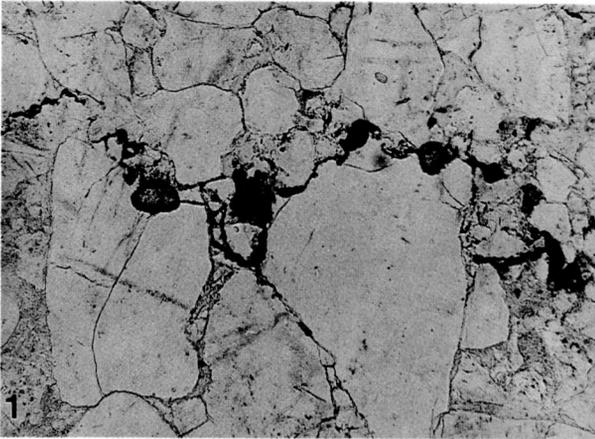
0.5 mm

LAMINA II

1. **Concentración de circones asociada a estilolitos en una arenita de cuarzo de la arenita inferior del Grupo Palmichal. Quebrada Playonera. Muestra 040495-04.**
2. **Laminación de lodolita en arenita fina con abundante matriz y granos subangulares de cuarzo. Nótese la diferencia en la compactación de la lámina según la cantidad de arcilla presente. Arenita inferior, Quebrada Playonera. Muestra 030495-10.**
3. **Otro ejemplo de estilolitos en arenitas, arenita inferior, Quebrada Playonera. Muestra 040495-04.**
4. **Ejemplo del fracturamiento de fosfatos durante la compactación, arenita inferior, Quebrada Playonera. Muestra 030495-06.**
5. **Textura poiquilotópica de esparita (c) en cuarzoarenita, donde sobresalen intraclastos fosfáticos. Arenita inferior, Quebrada Playonera. Muestra 030495-13.**
6. **Corresponde a la anterior con nicoles cruzados.**

(La longitud de la barra equivale a 0.5 mm; válida para todas las fotografías).

LAMINA II



0.5 mm

LAMINA III

1. Microfotografía de un ictiolito fosfático proveniente de la unidad de chert y lodolitas del Grupo Palmichal, sección Quebrada Palmichal. Muestra 060495-04. Nicoles paralelos.

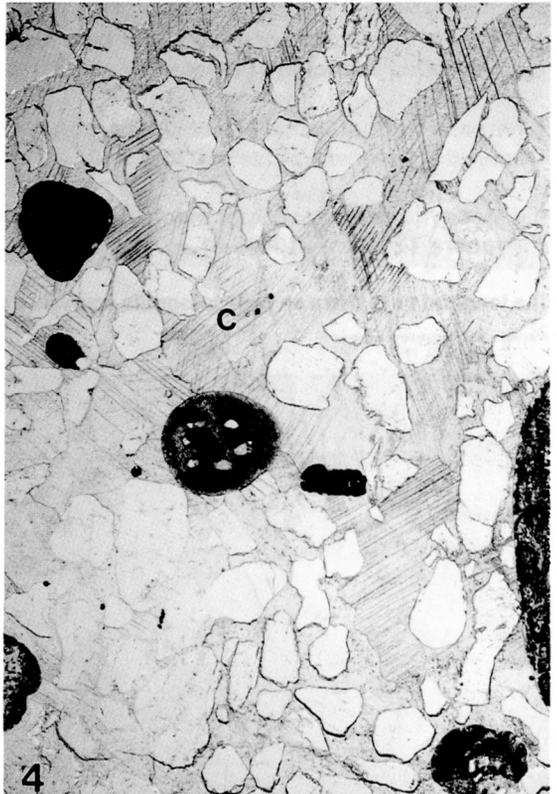
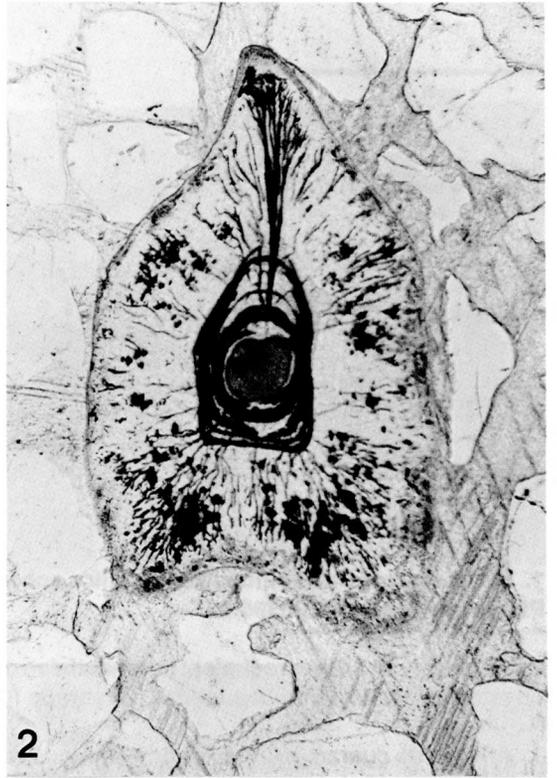
2. Microfotografía de un ictiolito fosfático del Grupo Palmichal, sección Caño Blanco. Nótese la gran abundancia de material carbonoso en su interior. Muestra 220295-06. Nicoles paralelos.

3. Microfotografía de un ictiolito fosfático de la arenita superior del Grupo Palmichal, sección Quebrada Playonera, identificado como "*small triangle long striations*" según las ilustraciones de DOYLE & RIEDEL (1989). Muestra 290395-05. Nicoles paralelos.

4. Microfotografía donde se observa la textura poiquilotópica en una arenita de cuarzo con cemento calcáreo (c) de la arenita inferior del Grupo Palmichal. Sobresale la presencia de un microcoprolito de cangrejo fosfático identificado como *Favreina martellensis* (J. Blau, Ginebra, comunicación escrita). Quebrada Playonera. Muestra 030495-13. Nicoles paralelos.

(Longitud de la barra, 0.1 mm, fotografías 1, 2 y 3; 0.5 mm, fotografía 4).

LAMINA III



LAMINA IV

- 1. Sobrecrecimientos sintaxiales de sílice sobre granos de cuarzo (Q). Arenita superior, sección Quebrada Playonera. Muestra 290395-03**
- 2. Se observan sobrecrecimientos sintaxiales de cuarzo, fosfato autigénico cementando granos de cuarzo y un mineral opaco. Arenita superior, Quebrada Playonera. Muestra 300395-06.**
- 3. Arenita de cuarzo en cuya textura se observa mala selección, matriz arcillosa y fragmentos de cuarzo policristalino (Qp) de tamaño arena gruesa, que se diferencian claramente de los granos de cuarzo monocristalino (Qm) en la siguiente fotografía. Formación Arenisca de El Morro, Quebrada Playonera. Muestra 010495-02.**
- 4. Vista de la microfotografía anterior bajo nicoles cruzados, donde se reconoce el carácter metamórfico del cuarzo por su extinción ondulatoria y contactos suturados.**
- 5. Arenita de cuarzo mal seleccionada, con matriz (m) y glauconita (gl) relleno de los poros. Arenita inferior, Quebrada Playonera. Muestra 030495-10.**
- 6. Moscovita (M) doblada por efecto de la compactación. Formación Arenisca de El Morro, sección Quebrada Playonera. Muestra 010495-01.**

(La longitud de la barra en cada fotografía equivale a 0.5 mm).

LAMINA IV

