



**DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE APORTE DE LA FORMACIÓN PENDALES,
CUENCA SINÚ-SAN JACINTO, MEDIANTE GEOCRONOLOGÍA U-Pb DE
CIRCONES DETRÍTICOS: UN APORTE A LA EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL
NOROCCIDENTE COLOMBIANO**

Alejandra Abreu Heredia.

aabreu@unal.edu.co

Director:

José María Jaramillo M.

jjaramillo@laef.com

Firma: _____

Codirector:

Uwe Martens

uwe.martens@yahoo.com

RESUMEN

Con base en estudios de campo y el análisis petrográfico de 5 muestras del Arroyo Henequén, ubicado al noroccidente de la población de Repelón, departamento del Atlántico, se determinó que la Formación Pendales esta constituida por litoarenitas conglomeráticas y conglomerados polimícticos, cuyos clastos están compuestos de cuarzo grueso granular, feldespato potásico, plagioclasa, fragmentos de rocas volcánicas, serpentinitas, chert, epidota, turmalina y actinolita. Se separaron los circones detríticos de una de estas muestras y al azar se tomaron 19 granos para desarrollar geocronología U-Pb, a partir de la cual se establece que los circones se generaron entre los 65 y 80Ma. Se sugiere que el ambiente tectónico del área de aporte de la Formación Pendales es un orógeno reciclado, producto de la orogenia Pre – Andina, desarrollada durante el Eoceno Medio en el noroccidente colombiano. Por otra parte la familia de circones identificada usando geocronología detrítica puede estar relacionada con los cuerpos ígneos intrusivos de la Cordillera Central o del Arco de las Antillas de Sotavento (“Leeward Antilles Arc”), producidos durante la misma época a causa del límite convergente entre las placas Suramericana y Caribe.

Palabras Clave: Evolución de la Placa Caribe, Formación Pendales, Prisma de Acreción de Sinú – San Jacinto, Proveniencia.

ABSTRACT

Based on field observations and petrography analysis of Arroyo Henequén samples, northwest of Repelón town, Atlántico, it was established that The Pendales Formation consist of conglomeratic litoarenites and polymictic conglomerates with quartz, potassium feldspars, plagioclase, serpentinite, chert, epidote, tourmaline, actinolite and volcanic rock fragments. Detrital zircons were separated from one of those samples and 19 were analyzed using LA-ICP-MS to determine the U-Pb geochronology. The results indicate that the zircon sample were formed between 65 and 80My. It is suggested that Pendales Formation rocks could come from the recycled orogen uplifted by the Pre-Andean orogeny, during the Middle Eocene on the northwestern Colombia. The identified zircons family could be related with the Cordillera Central or the Leeward Antilles Arc intrusive igneous rocks, formed by the South American – Caribbean convergent margin, during this time.

Key Words: Caribbean Plate Evolution, Pendales Formation, Provenance, Sinú – San Jacinto Accretionary Prism.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo al modelo de Kennan & Pindell (en prensa) la subducción de la placa Caribe bajo la placa Suramericana ha acrecionado corteza oceánica al continente desde hace aproximadamente 100Ma, formado un prisma de acreción. Sin embargo no es sino hasta los 71Ma que este evento ocurre al noroccidente colombiano. Posteriormente, durante el Eoceno Medio, se produjo la orogenia Pre-Andina (Duque-Caro, 1978), la cual levantó el prisma de acreción formado al noroccidente colombiano y generó el cinturón plegado de Sinú – San Jacinto, dejando expuestas nuevas áreas de aporte para unidades detríticas como la Formación Pendales. A partir de esto se deduce que en las rocas de esta formación se puede encontrar material transportado y acrecionado por la placa Caribe con edades mayores a los 71Ma aproximadamente. Para comprobar esta hipótesis se desarrollarán análisis petrográficos en muestras de la Formación Pendales, caracterización de la catodoluminiscencia de sus circones detríticos y datación de los mismos por el método U-Pb.

MARCO GEOLÓGICO

A mediados del Eoceno la placa Caribe estaba ubicada en medio de las placas Norte y Sur americana y continuaba con su desplazamiento oblicuo hacia el este con relación a la placa Suramericana. De acuerdo al modelo tectónico de este periodo, propuesto por Kennan & Pindell (en prensa), en el occidente colombiano la sutura de Urumita no se ha formado aún y existe un tramo en forma de “V” entre el Arco de Panama y el borde noroccidental de Sur América. El Arco de las Antillas de Sotavento (“Leward Antilles Arc”) se encuentran al noreste de la península de la Guajira, ya se ha acrecionado el complejo Arquía – Quebrada Grande, la Falla de Palestina ha disminuido su movimiento dextral y se han intruído el Batolito de Antioquia, el Stock de Altavista y el granito de Buga a lo que Kennan & Pindell

(en prensa) denominaron Terreno Antioquia. La corteza Caribe se subduce bajo la placa Suramericana y ha acrecionado terrenos formando el prisma de acreción de Sinú – San Jacinto y la parte más norte de la Cordillera Occidental (ver Figura 1). Esta subducción es 250% más rápida que en el cretácico tardío, alcanzando los 23-30Km/Ma (Kenan & Pindell, en prensa). No obstante la subducción no es lo suficientemente rápida y su ángulo no es tan alto como para producir un arco de islas en esta parte del país. Producto de esta subducción la fosa de Romeral se cierra y pasa en este momento a ser una sutura y la nueva fosa es conformada por el lineamiento del Sinú (López, 2005).

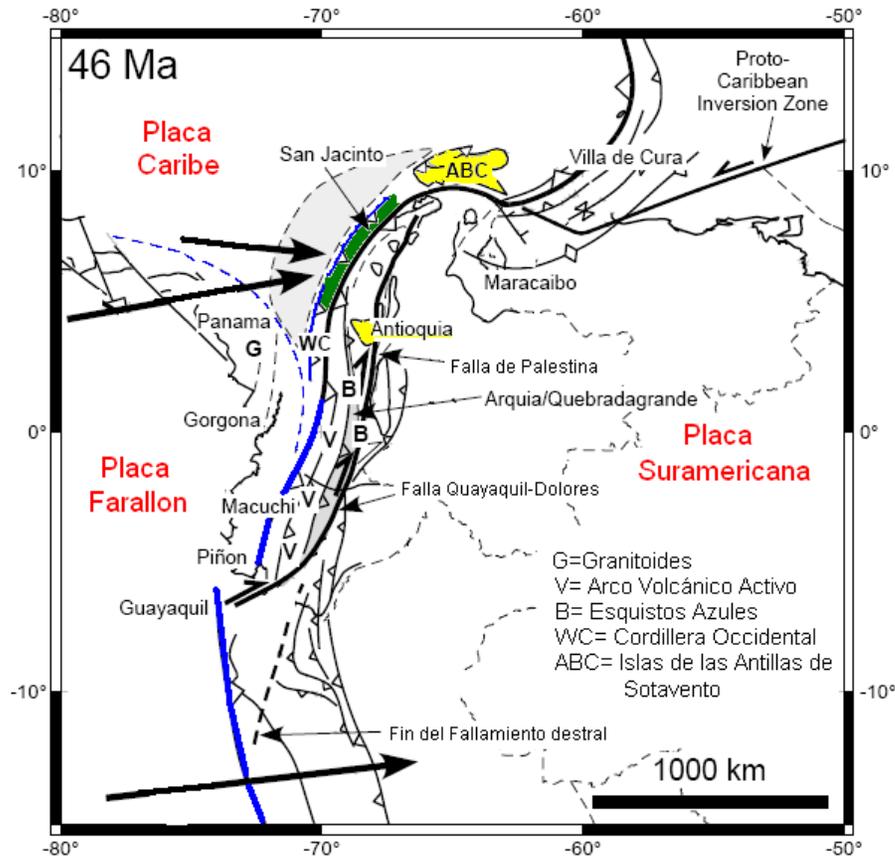


Figura 1. Mapa simplificado de la Tectónica Regional del noroccidente suramericano. Las líneas azules muestran los límites de placa. Las flechas negras gruesas indican el movimiento de las placas Caribe y Farallón con respecto a la placa Suramericana. El área gris al noroccidente colombiano es la parte de la placa Caribe que fue subducida entre los 46 y 33Ma. Las áreas amarillas son los cuerpos ígneos intrusivos generados aproximadamente a los 84Ma. El área verde es el Cinturón Plegado de San Jacinto. (Modificado de Kenann & Pindell, en prensa)

Duque-Caro (1978) establece que en el Eoceno Medio ocurre la Orogenia Pre-Andina, la cual exhuma el prisma y forma el Cinturón Plegado de San Jacinto, dejando emergidas las áreas de San Antero y San Onofre, así como la Cordillera Occidental. Como consecuencia de este levantamiento, hacia la periferia de la placa Suramericana, la sedimentación durante esta época es principalmente siliciclástica conglomerática, debido a que ocurren algunos abanicos submarinos que cubren la zona entre la Sutura de Romeral y la Fosa del Sinú, alimentados por complejos fluvio - lacustres desarrollados en la parte occidental del Arco de Magangue (López, 2005). Estos depósitos están representados por las Formaciones Pendales y Arroyo de Piedra.

Estratigrafía

En el Cerro Cansona, se encuentran 655m de rocas de ambiente batial profundo a pelágico correspondientes a la Formación Cansona. Estas rocas se componen principalmente de lodolitas silíceas y cherts con intercalaciones menores de tobas, conglomerados con fragmentos volcánicos y areniscas líticas y arcósicas de grano fino a medio (Guzmán et al. 1994; Guzmán et al. 2004; Unión Temporal B&G 2006). Su edad es Santoniano – Maastrichtiano (Guzmán et al. 2004) y por lo tanto es considerada la unidad más antigua en el cinturón plegado de San Jacinto. Esta unidad no aflora dentro del área de estudio (ver Figura 2), sin embargo se considera que puede encontrarse a profundidad subyaciendo discordantemente a la Formación San Cayetano, tal y como lo hace en el Cerro Cansona.

En el área de Luruaco (ver Figura 2) se inicia la secuencia con la Formación San Cayetano de edad Paleoceno Tardío y Eoceno Temprano (Duque – Caro 1973). Esta se constituye de 184m de Litoarenitas de grano fino a grueso intercaladas con lodolitas negras y cherts, las cuales se depositaron en un ambiente turbidítico de abanicos submarinos distales (Reyes y Zapata 2001; Guzmán et al. 2004).

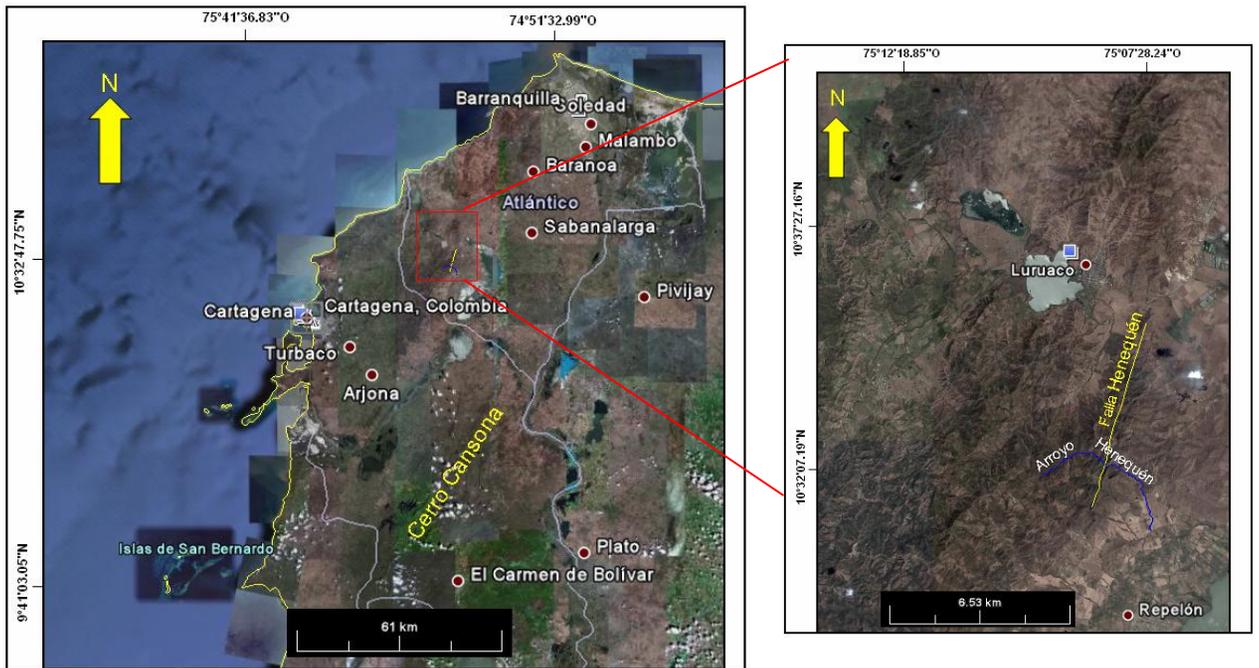


Figura 2. Localización del área de estudio. Se observa el Arroyo Henequén donde se tomaron las muestras que acá se estudian y la Faja Henequén, contacto entre las Formaciones San Cayetano al occidente y Pendales al oriente (Tomado y modificado de Google Earth, 2009)

Sobre la Formación San Cayetano descansa, en contacto fallado, la Formación Pendales de edad Eoceno medio a Tardío (Reyes y Zapata 2001; Guzmán *et al.*, 2004). En esta Formación predominan los conglomerados polimícticos con clastos de cuarzo, chert y rocas volcánicas, intercalados con litoarenitas de grano medio a grueso. Estas rocas tienen un espesor de 500m, el cual fue depositado en un ambiente turbidítico de abanicos proximales (Reyes y Zapata 2001).

La secuencia continua con La Formación Arroyo de Piedra, la cual presenta 200m de Calizas con rodolitos de algas, lodolitas calcáreas e intercalaciones de margas, de ambiente de plataforma marina somera (Reyes y Zapata 2001; Guzmán *et al.* 2004). La presencia de clastos de calizas del tipo Formación Arroyo de Piedra en conglomerados de la Formación Pendales y la edad de Eoceno medio a Tardío de ambas formaciones sugieren una

interdigitación entre estas dos unidades, a pesar de que la Formación Arroyo de Piedra suprayace concordantemente la Formación Pendales (Guzmán et al 2004).

Suprayaciendo la Formación Arroyo de Piedra, en contacto discordante, se encuentran 500m de lodolitas varicoloreadas con intercalaciones de cuarzo arenitas de grano fino, de edad Oligoceno Medio a Mioceno Temprano, las cuales pertenecen a la Formación Perdices de acuerdo a Reyes y Zapata (2001). Guzmán et al. (2004) atribuyeron el nombre de Formación El Carmen a rocas con la misma descripción litológica que afloran al norte de la Serranía de Luruaco, argumentando que el nombre de Formación Perdices fue asignado a sedimentos finos de varios sectores que estaban separados entre sí por una discordancia, por lo que se adoptará esta nomenclatura.

Debido a la complejidad estratigráfica y estructural del Cinturón Plegado de San Jacinto diversos autores han propuesto columnas estratigráficas de las unidades que allí afloran en donde varían espesores, contactos, nomenclatura e incluso edad. La Figura 3 muestra las secciones descritas por Reyes y Zapata (2001), Guzmán et al. (2004) y Unión temporal B&G (2006) desde el Cretácico Superior hasta el Mioceno, para el área de Luruaco, sobre las cuales se basa el presente trabajo. La Formación Cansona se añade a las columnas suponiendo que esta se encuentra a profundidad como se mencionó anteriormente.

Formación Pendales

La Formación Pendales fue descrita por primera vez por Henao (1951) en los alrededores del caserío de Pendales, ubicado en el departamento del Atlántico. Allí la definió como un “potente y compacto conglomerado”.

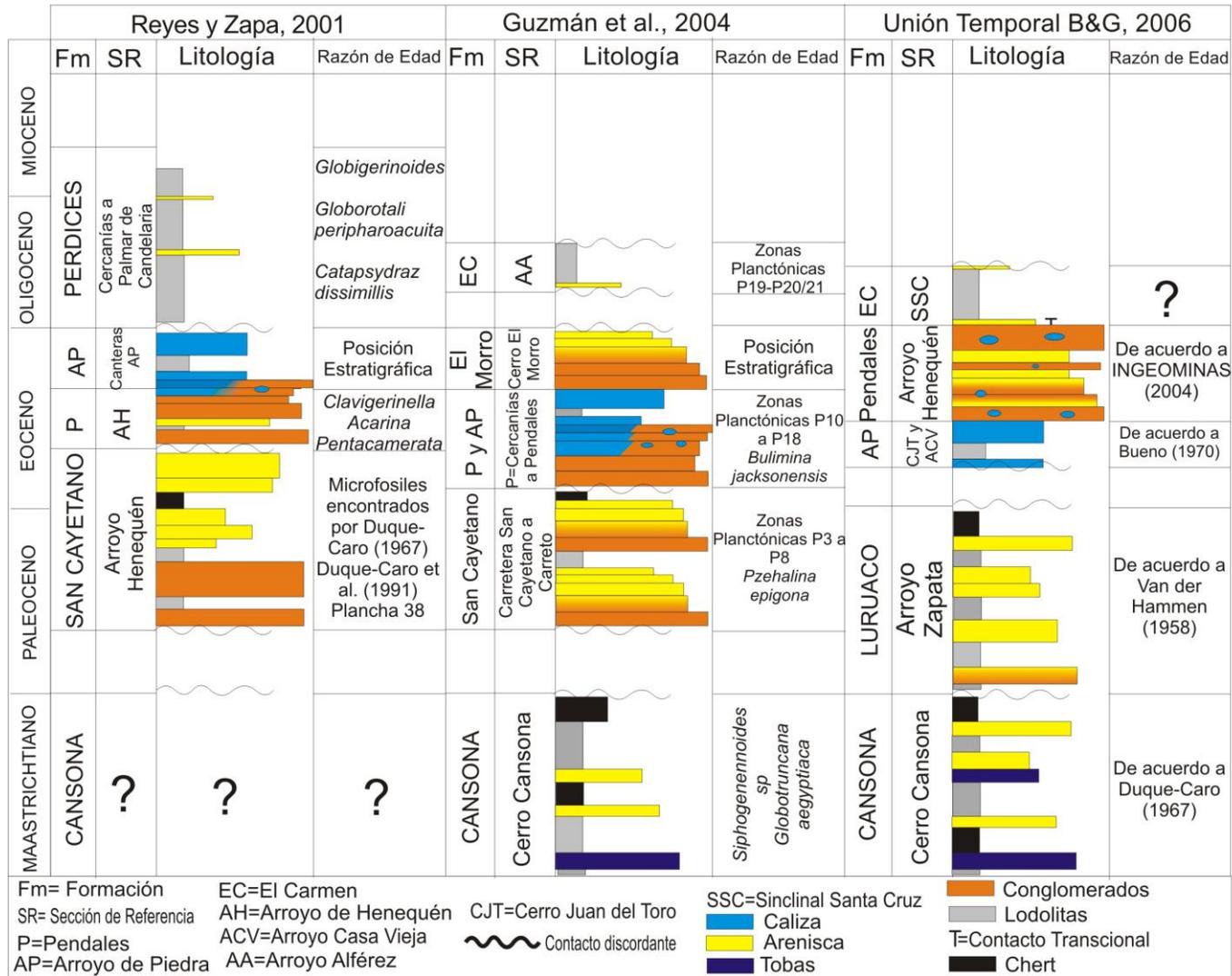


Figura 3. Columnas estratigráficas de las unidades que afloran en el área de Luruaco desde el Cretácico Superior hasta el Mioceno Temprano. La Formación Canzona se añade a las columnas suponiendo que esta se encuentra a profundidad. Las referencias aquí documentadas son hechas por los autores de cada una de las columnas. (Modificado de Reyes y Zapata 2001; Guzmán et al. 2004; Unión Temporal B&G 2006)

En el Arroyo Henequén aflora la Formación Pendales y consiste de capas métricas de conglomerados polimícticos con fragmentos redondeados, mal seleccionados, tamaño guijo, canto y bloques matriz soportados por granos de arena media o cemento calcáreo. Intercaladas se encuentran capas métricas y centimétricas de litoarenitas conglomeráticas de grano grueso a muy grueso y algunos niveles centimétricos de lodolitas. Los conglomerados están compuestos por fragmentos de chert, cuarzo, fragmentos líticos volcánicos porfiríticos de basaltos y andesitas, rocas ígneas hipoabisales y rocas metamórficas en facies esquistos verde, como cuarcitas (ver Figura 4) (Reyes y Zapata 2001; Unión Temporal B&G 2006)

El tamaño de grano de las rocas que conforman la Formación Pendales, la forma acuñada de algunas capas y la presencia de grano decrecimiento, evidente en las litoarenitas, sugieren fuertes flujos de corrientes asociados con depósitos de abanicos proximales de plataforma marina somera. El contacto con la infrayacente Formación San Cayetano es fallado y la falla que pone en contacto estas unidades es la Falla Henequén (ver Figura 2). El contacto superior no se observa en esta sección.

Reyes & Zapata (2001) no reportan fauna fósil en la sección del Arroyo Henequén y establecen, por relaciones estratigráficas con la infrayacente Formación San Cayetano y la suprayacente Formación Arroyo de Piedra, una edad de Eoceno Medio a Superior para la Formación Pendales. Pese a lo anterior Reyes *et al.* (2001) reportan *Acarinina pentacamerata* y *Clavigerinella akerssi*, indicativos del Eoceno Medio y por las zonas planctónicas P.10 a P.18 y a la zona bentónica *Bulimina jacksonensis* (Guzmán et al. 2004) se asigna una edad de Eoceno Medio a Tardío.

PETROGRAFÍA

Con base en la columna estratigráfica sobre el Arroyo Henequén, desarrollada por la Unión Temporal B&G (2006), se tomaron 5 muestras de roca (ver Figura 4) de la Formación Pendales, de las cuales se elaboraron su respectiva sección delgada. Debido a que las rocas son de grano tamaño gránulo y arena gruesa se analizaron las secciones delgadas contando puntos cada 4mm, sobre líneas espaciadas cada 2mm. Aunque el número de puntos no es mayor de 100 el resultado es el más representativo de la muestra ya que con esta metodología se cubre toda el área de la placa y se impide el sesgo al contar un mismo fragmento más de una vez.

Utilizando la clasificación textural de rocas siliciclásticas de Folk (1954) y a la tabla granulométrica de Wentworth (1922) se determinó que 4 de las muestras de la Formación Pendales (SSJ-9, SSJ-10, SSJ-12, SSJ-13, en la Figura 4 son conglomerados y 1 muestra (SSJ-11, en la Figura 4) es una arenisca de grano muy grueso. De acuerdo a Folk (1974) estas rocas son conglomerados polimícticos y Litoarenitas, con granos redondeados, mal seleccionados y cementados con material calcáreo. Los fragmentos que componen a estas rocas son feldespato potásico, plagioclasa, chert, epidota, turmalina, actinolita, cuarzo grueso monocristalino, cuarzo policristalino, líticos volcánicos y líticos metamórficos en facies de fondo oceánico y esquisto verde. La tabla 1 muestra los porcentajes de cada uno de estos constituyentes en las muestras de la Formación Pendales, a partir de los cuales se construyen los diagramas de la Figura 5.

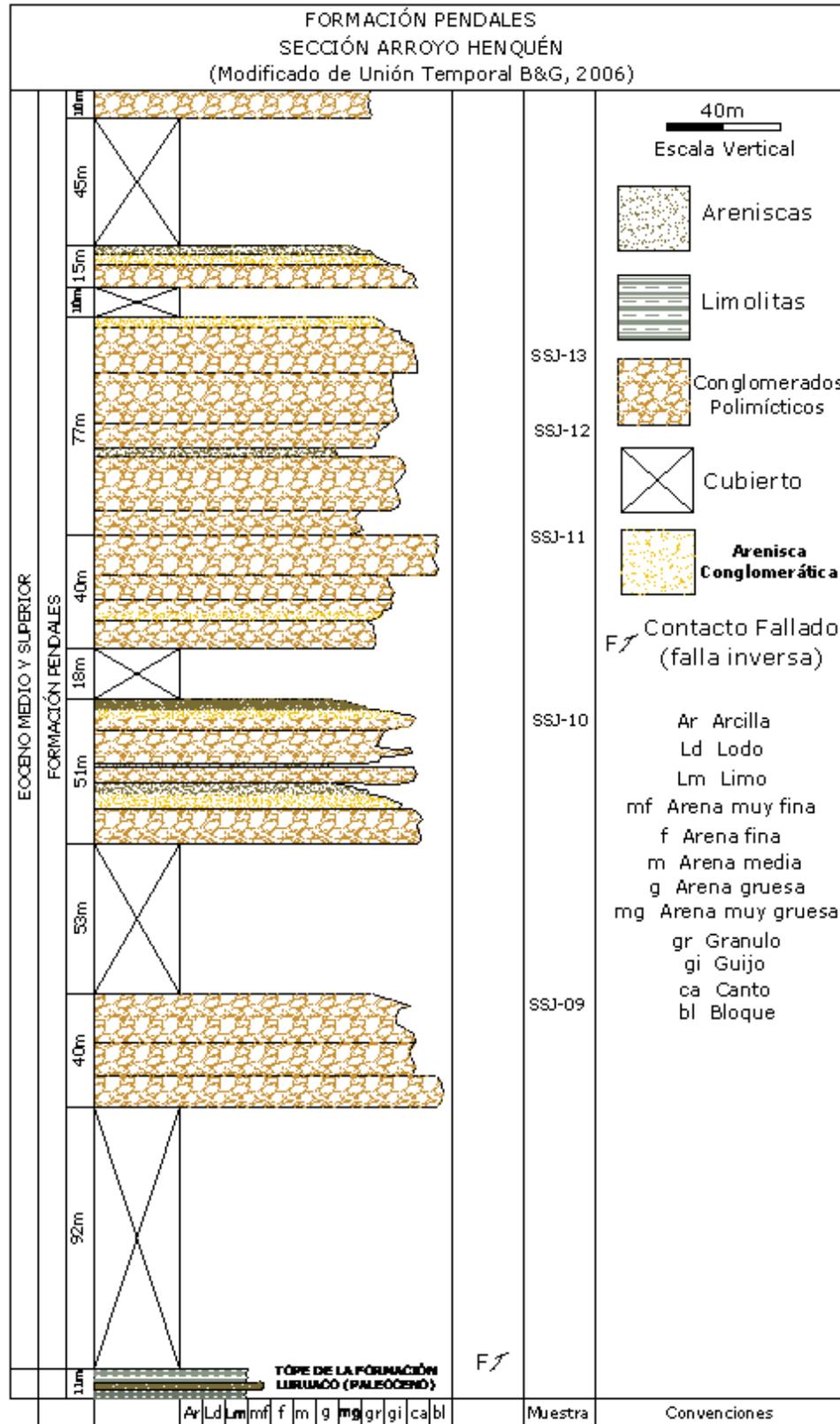


Figura 4. Columna estratigráfica simplificada de la Formación Pendales, sección Aroyo Henequén, mostrando la ubicación de las muestras recolectadas (Modificado de Unión Temporal B&G 2006)

Tabla 1. Porcentajes de minerales y fragmentos de roca que constituyen las 5 muestras de la Formación Pendales. Qm=Cuarzo Monocristalino, Qp= Cuarzo Policristalino, Fld K= Feldespato Potásico, Plg= Plagioclasa, Lv= Líticos Volcánicos, Li= Líticos ígneos intrusivos, Lm= Líticos metamórficos, Ls= Líticos Sedimentarios.

Muestra	Qm	Qp	Chert	Fld K	Plg	Lv	Li	Lm	Ls	Epidota	Actinolita	Turmalina	Pumpelita
SSJ-9	19.8	1.6	16.4	8.2	1.6	16.4	16	9.8	0	9.8	0	0	0
SSJ-10	31.6	1.3	11.4	7.6	5.1	20.2	10	3.8	0	6.3	1.3	1.3	0
SSJ-11	27.8	2.8	8.3	9.7	5.5	23.6	11	0	0	6.9	2.8	1.3	0
SSJ-12	18.8	10.1	27.5	7.2	4.3	17.4	2.9	4.3	1.4	1.4	2.9	0	1.4
SSJ-13	14.9	6.9	13.8	10.3	2.3	31	5.7	3.4	5.7	4.6	1.1	0	0

De acuerdo al diagrama de terrenos tectónicos (Qm-F-Lt) elaborado por Dickinson & Suczeck (1979) (ver Figura 5) se determina que el ambiente tectónico del área fuente de la Formación Pendales es un orógeno reciclado, con una relación chert/cuarzo grande. Haciendo uso del Diagrama Qp-Lv-Ls, propuesto por el mismo autor, se puede especificar que las muestras provienen de un ambiente transicional entre un Arco Orogénico y un complejo de subducción.

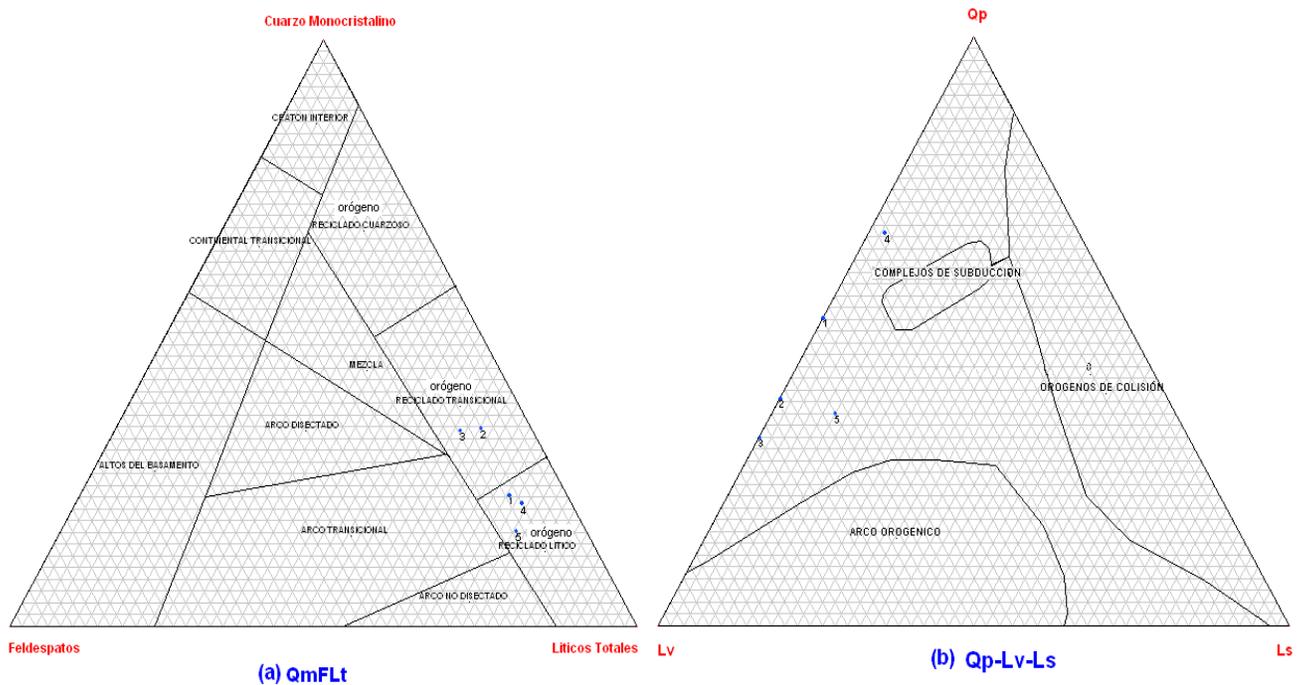


Figura 5. Diagramas Triangulares de Dickinson (1979). Los puntos numerados del 1 al 5 representan sucesivamente cada una de las muestras analizadas (a) Diagrama de Terrenos tectónicos Qm-F-L, donde se muestra un ambiente de Orogeno Reciclado para el área de aporte de la Formación Pendales (b) Diagrama Qp - Lv - Ls donde se observa una ambiente entre Arco orogénico y Complejo de Subducción.

GEOCROLOGÍA

De la muestra SSJ-11 localizada en la parte media de la Formación Pendales (Figura 4) se separaron circones detríticos y se tomaron 19 al azar para analizar sus texturas internas mediante catodoluminiscencia (Figura 6) y realizar determinaciones del contenido de isótopos de U-Pb con el objeto de fechar cada uno de los granos de circón. Los circones presentan formas euhedrales donde es fácil identificar el prisma tetragonal con apuntamientos piramidales, típicos de este mineral. Los granos son traslucidos e incoloros y la mayoría presentan pátinas de óxidos producto de la meteorización de la roca. Morfológicamente no se reconocen diferentes grupos de circones ya que todos presentan aproximadamente el mismo tamaño y la misma forma.

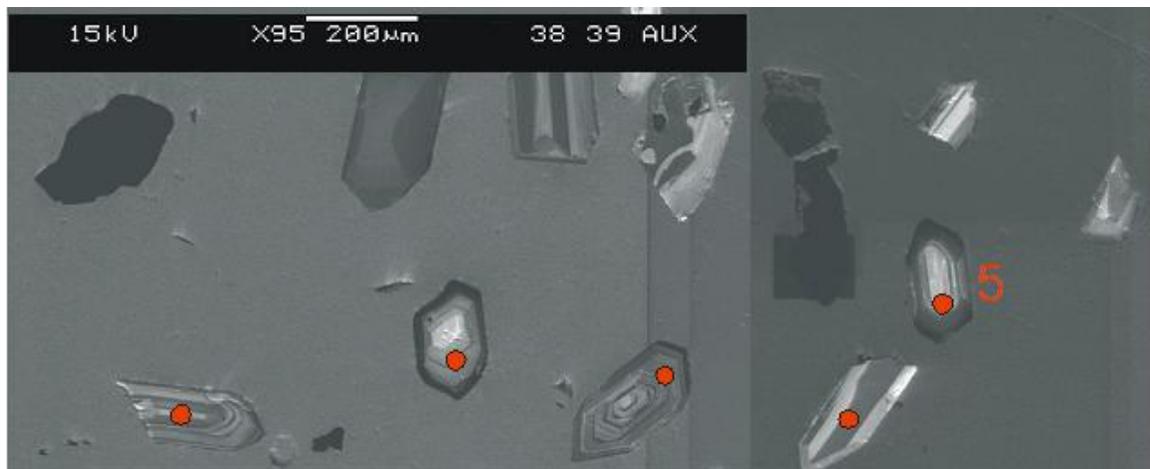


Figura 6. Imagen de Catodoluminiscencia de circones detríticos de la Formación Pendales (muestra SSJ-11), tomada en un microscopio electrónico de barrido JEOL- JSM-5600LV. Los círculos rojos reflejan el lugar donde el láser tomó la muestra para datación U-Pb. Las texturas zonadas concéntricas de los circones indican una génesis magmática.

En las imágenes de catodoluminiscencia (Figura 6), las texturas internas de los circones son zonadas concéntricas, sin evidencia de núcleos ni disolución y recristalización de una nueva zona de circón. Esto se puede atribuir a una génesis magmática en donde la zonación interrumpida, sin presencia de límites definidos, es producto de reabsorción en el magma durante su cristalización (Corfu et al. 2003). Lo anterior se justifica cuando al realizar la

datación U-Pb tanto en el núcleo como en los bordes de diferentes circones no se reconoce ninguna diferencia de edad significativa entre el núcleo y el borde de uno u otro cristal.

La geocronología U-Pb se realizó haciendo uso de un LA-ICPMS (“Laser Ablation Inductively Coupled Mass Spectrometry”), con el cual es posible datar un área aproximadamente circular con un diámetro no mayor de $20\mu\text{m}$ de un cristal de circón (Gehrels et al. 2006). En la Figura 6 se observan los puntos datados en 5 de los 19 circones de la muestra SSJ-11. De las 19 edades producto de la geocronología U-Pb 18 son concordantes y muestran una familia de circones entre 85 y 62Ma aproximadamente y un circón de 90Ma (Figura 7).

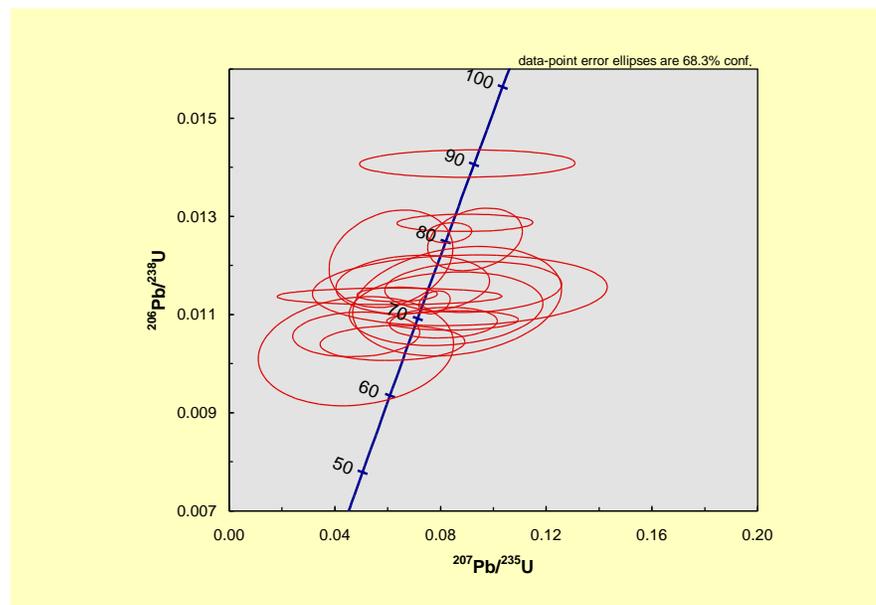


Figura 7. Diagrama de la Concordia de los 19 circones detríticos datados de la Formación Pendales (muestra SSJ-11). Se observa una familia concordante entre 85 y 62Ma y un circón concordante a los 90Ma.

La Figura 8 muestra un diagrama de densidad de probabilidad que también permite reconocer la familia de circones establecida con el diagrama de concordia de la Figura 7. Con este diagrama se puede diferenciar que las edades entre 68 y 74Ma son las más

representativas de esta familia. Se identifica otra familia de 90Ma caracterizada por un solo circón.

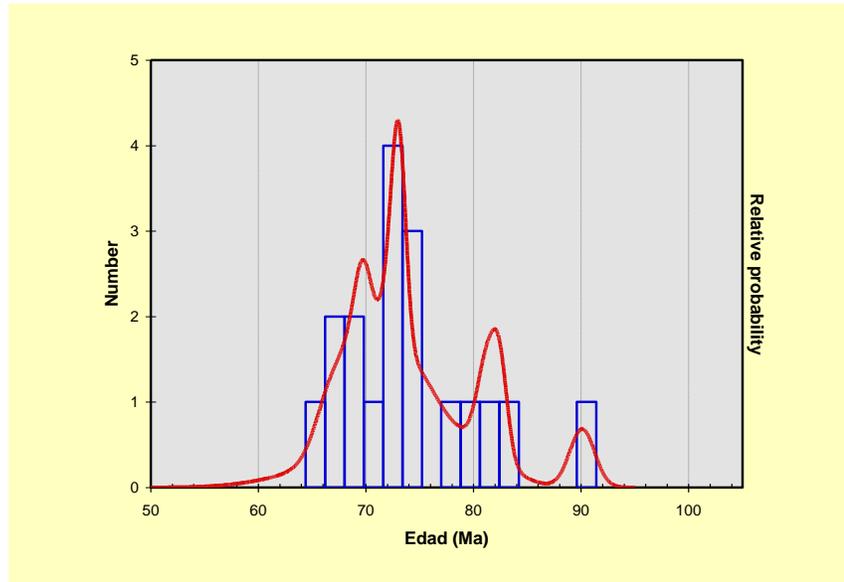


Figura 8. Diagrama de densidad de probabilidad de edades presentes en 19 los circones detríticos de la Formación Pendales (muestra SSJ-11). Se observa una familia de circones con edades representativas entre 68 y 74Ma y otra caracterizada por un circón de 90Ma, por lo que no es considerada en este estudio.

Reuniendo todas las características descritas (morfología, textura interna y edad) se puede deducir que los circones detríticos que se encuentran en la Formación Pendales son producto de tres eventos magmáticos que ocurren en un periodo de tiempo relativamente corto (68 a 90Ma aproximadamente). La Figura 9 muestra el promedio y la mediana de las edades de los circones detríticos, cuyos valores establecen la edad más precisa para los eventos magmáticos a partir del cual se generaron los circones. Es importante aclarar que el promedio tiende a valores altos debido al sesgo que genera el circón de 90Ma, lo cual indica un valor de edad menos representativo de la población de circones estudiada que aquel que arroja la mediana.

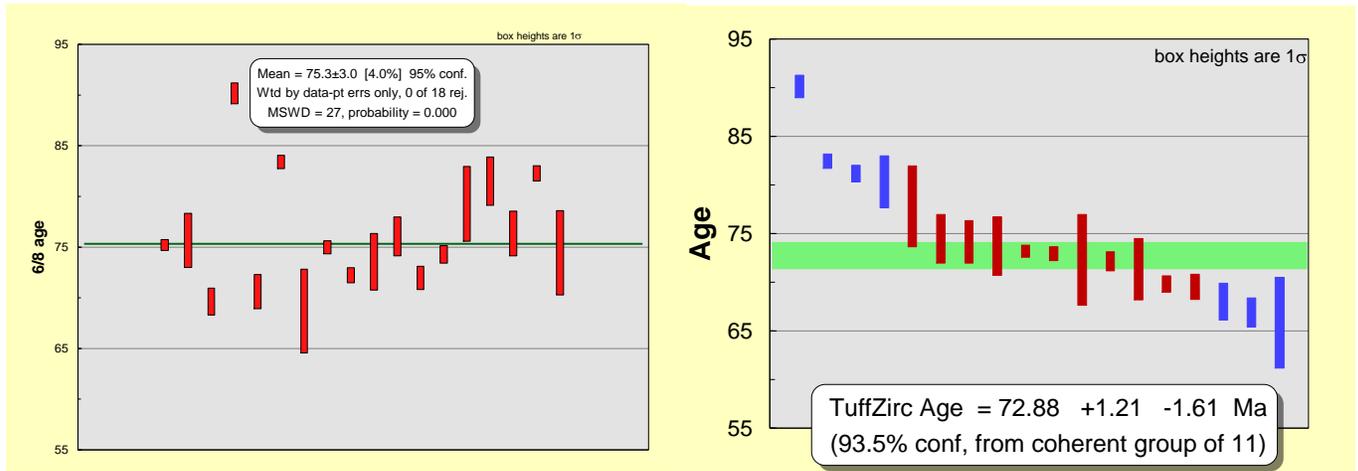


Figura 9. Valores del promedio (izquierda) y de la mediana (derecha) de las edades de los 19 circones detríticos de la Formación Pendales (muestra SSJ-11). El promedio está dominado por el valor de 90Ma, mientras que la mediana es un valor más representativo de los datos obtenidos en la datación de los circones.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El modelo tectónico propuesto por Kenann & Pindell (en prensa) determina que la Placa Caribe subduce de forma oblicua dextral bajo la Suramericana desde los 100Ma. Los mismos autores proponen que en el noroccidente colombiano esto ocurre desde los 71Ma y forma el prisma de acreción de Sinú- San Jacinto. Por lo tanto es factible pensar que desde esta época se ha acrecionado material que conforma el fondo oceánico, más los sedimentos que se hayan depositado sobre el mismo.

Durante el Eoceno Medio ocurre la orogenia Pre-Andina la cual deja emergidas las áreas de San Antero y San Onofre (Duque-Caro 1978). Antes de la orogenia estas áreas constituyeron zonas de depositación para las Formaciones Cansona y San Cayetano, de edades Santoniano – Maastrichtiano y Paleoceno Medio – Eoceno Temprano respectivamente. De acuerdo a esto es de esperarse que dichas áreas emergidas estuvieran constituidas principalmente por rocas de las Formaciones Cansona y San Cayetano.

La asociación de minerales y clastos encontrados en la Formación Pendales permite deducir que las principales rocas que aportaron detritos a esta Formación fueron rocas oceánicas

como basaltos, cherts y rocas de bajo grado de metamorfismo como cuarcitas con albita, clorita y epidota (Facies Esquisto Verde) y fragmentos de rocas con minerales característicos de facies de metamorfismo de fondo oceánico como serpentina, pumpelita, epidota actinolita y turmalina. Estas de rocas pudieron formarse dentro de la placa Caribe y después fueron acrecionadas al continente gracias a la subducción de ésta bajo la placa Suramericana.

Junto con el chert y los líticos volcánicos, que presentan composición intermedia a ácida inferida a partir de su alta concentración de plagioclasa y ausencia de cuarzo y feldespato, se observa que los fragmentos de rocas que constituyen los conglomerados y litoarenitas de la Formación Pendales presentan una composición semejante a aquellas descritas por Gálvez (1998) para las infrayacentes Formaciones Cansona y San Cayetano. El tamaño de los clastos y la preservación de fragmentos de roca y minerales que se esperan que alteren fácilmente, indica que el área de aporte no se encontraba muy lejos de la zona donde se depositaron los abanicos submarinos que conforman a la Formación Pendales.

Siguiendo el modelo propuesto por Duque-Caro (1978) para el Eoceno Medio se presume que las áreas fuente de la Formación Pendales fueron San Antero y San Onofré, ya que estas conformaron los altos más cercanos a la zona de depositación de esta formación. Estos altos expusieron a la erosión rocas de las Formaciones Cansona y San Cayetano, cuyos fragmentos se pueden encontrar en las rocas que constituyen la Formación Pendales. Esta afirmación se sustenta también con los resultados obtenidos de los diagramas de terrenos tectónicos de Dickinson & Suczek (1979) donde el ambiente tectónico del área fuente para esta formación es un orógeno reciclado, es decir un terreno levantado de estratos fallados y plegados compuesto de detritos sedimentarios reciclados, características que se presentan en el prisma de acreción levantado de Sinú-San Jacinto.

Es importante anotar que las rocas que constituyen las Formaciones Cansona y San Cayetano como el chert, las serpentinitas y los líticos volcánicos intermedios a básicos no suelen contener circones del tamaño ni características encontradas en este trabajo para la Formación Pendales. Por lo tanto se asume que las rocas que contienen estos minerales son rocas intrusivas de composición más ácida que las anteriores y que están representadas por cuarzos, feldespatos y plagioclasas grueso granulares, así como algunos cuarzos policristalinos con biotita, en las rocas de la Formación Pendales. A partir de esta conclusión se puede afirmar que las rocas intrusivas que aportaron a la Formación Pendales se generaron entre los 68 y 90Ma aproximadamente, teniendo en cuenta que solo se reconoce una familia representativa de circones dentro de la muestra.

Debido a que en las arenitas de las Formaciones Cansona y San Cayetano también se encuentran fragmentos de feldespato potásico, cuarzo y plagioclasa, el área de aporte propuesta para la Formación Pendales sigue siendo la misma. A pesar de esto es importante precisar el área fuente de estos minerales, ya que en las rocas que caracterizan el fondo oceánico no es normal encontrar rocas de composición ácida. Gálvez (1998) propone que una de las posibles áreas de aporte de este tipo de sedimentos fue el Batolito Antioqueño, el cual se constituye de granitoides con edades de $83.75 \pm 0.36\text{Ma}$ y $88.46 \pm 0.63\text{Ma}$ (Ibáñez et al. 2007), lo cual sería aproximadamente consistente acorde a la edad encontrada en los circones (entre 68 y 90Ma) y la composición de los fragmentos. No obstante es posible que para el Eoceno Medio el Batolito Antioqueño aún no se haya exhumado y se mantega cubierto por unidades Paleozoicas y Precámbricas como el Complejo de Puquí, Neis de Palmitas y Neis de Naranjales, edades que no se encuentran registradas en los circones de la Formación Pendales. Por otra parte, si se supone que el Batolito Antioqueño estaba expuesto para esta época, la meteorización hubiese sido suficiente para destruir el

feldespato y la plagioclasa presentes en este cuerpo y estarían ausentes en las rocas de las Formaciones Cansona, San Cayetano y Pendales.

La búsqueda de una roca fuente para fragmentos de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa que pudieron hacer parte de rocas intrusivas intermedias a ácidas, con edades entre 65 y 80Ma aproximadamente, lleva a pensar en rocas con composición y edades semejantes a aquellas características del Batolito Antioqueño, que ocuparan una posición cercana al prisma de acreción de Sinú – San Jacinto. La geoquímica y geocronología desarrollada por White et al (1999) para el Batolito de Aruba en el Arco de las Antillas de Sotavento muestra una similitud con el Batolito Antioqueño. Por otro lado el modelo de evolución tectónica del noroccidente suramericano propuesto por Kenann & Pindell (en prensa) indica que a los 84Ma el Arco de las Antillas de Sotavento se encontraba en la posición en donde posteriormente se generaría el prisma de acreción de Sinú – San Jacinto. Acogiéndose a estas afirmaciones se puede proponer que los fragmentos de cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa grueso granular provienen de la erosión de las rocas del Batolito de Aruba, el cual aportó a la corteza oceánica que posteriormente se acecionaría formando el prisma de Sinú – San Jacinto y permitiría la buena preservación de estos fragmentos. Cabe aclarar que esta afirmación se basa en la suposición de que las rocas que constituyen el batolito de Aruba estuvieran expuestas a la erosión antes y durante el Eoceno Medio.

CONCLUSIONES

El ambiente tectónico del área de aporte de la Formación Pendales es un orógeno reciclado, el cual se generó a partir del prisma de acreción de Sinú – San Jacinto, durante el Eoceno Medio, producto de la orogenia Pre-Andina.

La roca fuente de la Formación Pendales esta constituida por aquellas que hacen parte de las Formaciones San Cayetano y Cansona, las cuales fueron expuestas cuando las áreas de San Antero y San Onofre quedaron emergidas debido a los esfuerzos producidos por la orogenia Pre- Andina.

Debido su gran tamaño, su textura interna concéntrica y su forma prismática con apuntamientos piramidales definida se sugiere que la familia de circones de edad entre 65 y 80Ma hace parte de rocas ígneas intrusivas formadas en un evento magmático durante este periodo de tiempo. Estas rocas pueden estar representadas por los fragmentos de feldespato potásico, cuarzo y plagioclasa grueso granulares que se encuentran en las rocas de la Formación Pendales.

El modelo tectónico que se sugiere a partir de los análisis desarrollados en este trabajo comprende la generación de las rocas del Batolito de Aruba en el Arco de las Antillas de Sotavento a los 84Ma aproximadamente. La erosión del mismo y aporte de fragmentos de rocas de composición ácida a la corteza oceánica. Esta corteza oceánica empieza a subducir y a acrecionarse al norocidente colombiano a los 71Ma, formando el prisma de acreción de Sinú – San Jacinto. En el Eoceno Medio este prisma fue levantado gracias a los esfuerzos originados por la Orogenia Pre-Andina y deja emergidas rocas de la Formación Cansona y San Cayetano en las áreas de San Antero y San Onofre. De la erosión de estas rocas se generan los abanicos submarinos proximales que conforman la Formación Pendales.

Se recomienda desarrollar un estudio en el que se determine cuando ocurrió la exhumación de cuerpos ígneos intrusivos como el Batolito Antioqueño y el Batolito de Aruba, con el fin de verificar la hipótesis que en este trabajo se propone.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Director José María Jaramillo y al Codirector Uwe Martens, por su contribución académica y su gran interés en dar vida al trabajo que aquí se presenta. A la Agencia Nacional de Hidrocarburos y al Laboratorio Gmas Ltda ya que sin su colaboración y su aporte técnico al trabajo este no se hubiese llevado a cabo. A mi Familia por creer en mí y darme alientos cada vez que lo necesitaba, fueron el más grande apoyo. A la Universidad Nacional y a sus profesores por su formación para mi vida profesional. A trabajadores como Armando Sánchez por su incondicional disposición a la elaboración de una parte de lo que aquí se presenta. A mis compañeros: Christian Perdomo, Daniel Gómez, Santiago Rodríguez, Daniel Barbosa, Johanna Ramírez, Manuel Rodríguez, Sergio Mayorga, Catalina Suárez, Juanita Sierra y a todos los que me acompañaron a lo largo de este viaje, porque juntos lo logramos.

BIBLIOGRAFÍA

CORFU, F., HANCHAR, J.M., HOSKIN, P., KINNY, P (2003): An atlas of zircon textures. In: Hanchar, J. M. and Hoskin, P. W. O., eds, *Zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 53, Mineralogical Society of America, Washington, D.C., pp. 468–500.

DICKINSON, W. & SUCZEK, C. (1979): Plate Tectonics and Sandstone Compositions. – *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 63, 12, p. 2164-2182.

DUQUE-CARO, H. (1978): Geotectónica y evolución de la Región Noroccidental de Colombia. – *Boletín Geológico*. v. 23, 3, p. 4 – 37, Bogotá.

FOLK, R. (1974): *Petrology of sedimentary rocks*. -179p., Hemphill, Austin.

FOLK, R.L. (1954): The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclature.- *Journal of Geology*, v. 62, p. 344-359.

GALVEZ, E (1998): Caracterización Petrográfica y Determinación de la fuente de aporte, de los niveles conglomeráticos de las Formaciones: Cansona (Campaniano – Maastrichtiano) y San Cayetano (Paleoceno Superior), en el Cinturón de San Jacinto, Plancha 37. (Trabajo de Grado).- Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.

GUZMAN, G., CLAVIJO, J. y BARRERA, R. (1994). Geología Bloque Santero, Secciones estratigráficas. Informe inédito. INGEOMINAS. Bogotá.

GUZMÁN, G., GÓMEZ, E. & SERRANO, B.E. (2004). Geología de los Cinturones Sinú, San Jacinto y Borde Occidental del Valle Inferior del Magdalena, Caribe Colombiano.- Memorias del Mapa Caribe escala 1:300.000, 128 p., INGEOMINAS, Bogotá

HENAO, L. D., (1951). Geología del departamento del Atlántico. Servicio Geológico Nacional, Informe 754 inédito, Bogotá.

IBAÑEZ, M; TASSINARI, C.C.G & JARAMILLO, J.M. (2007): U-Pb zircon ages of the “Antioquian Batholith” geochronological constrains of the Late Cretaceous magmatism in the Central Andes of Colombia. – XI Congreso Colombiano de Geología, 11p, Bucaramanga, Colombia.

KENANN & PINDELL (en prensa): Destral shear, terrane accretion and basin formation in the Northern Andes: best explained by interaction with a Pacific-derived Caribbean Plate. - James, K., Lorente, M. A. & Pindell, J. The geology and evolution of the region between North and South America, Geological Society of London, Special Publication, London.

LÓPEZ, E. (2005). Evolución Tectónica de la Región Caribe de Colombia. – 46 p., INGEOMINAS. Bogotá.

REYES, A., GUZMAN, O.G., BARBOSA, C. G. & ZAPATA, G.G (2001). Memoria Explicativa Geología de las Planchas 23 Cartagena, 29 y 30 Arjona. Esc 1:100000 INGEOMINAS. p 69.

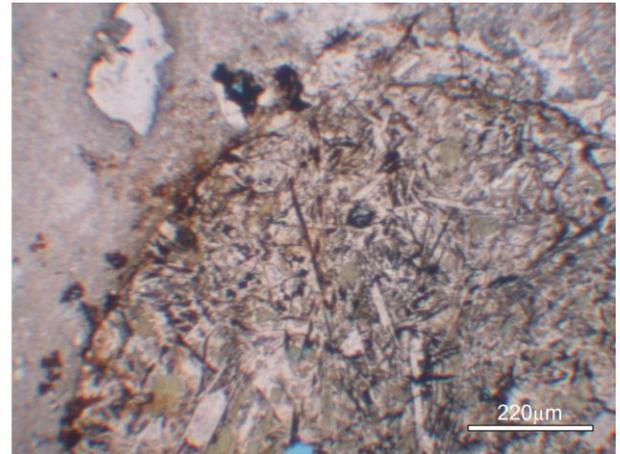
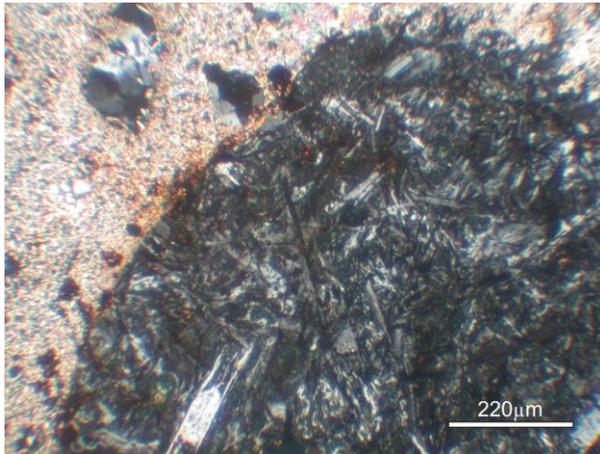
REYES, A & ZAPATA, G (2001): Memoria Explicativa, Geología de la Plancha 24 – Sabanalarga. Escala 1:100.000. – 49 p., INGEOMINAS, Bogotá.

UNIÓN TEMPORAL B&G (2006): Cartografía Geológica en los Cinturones Plegados Sinú – San Jacinto. -162p-, Bogotá D.C.

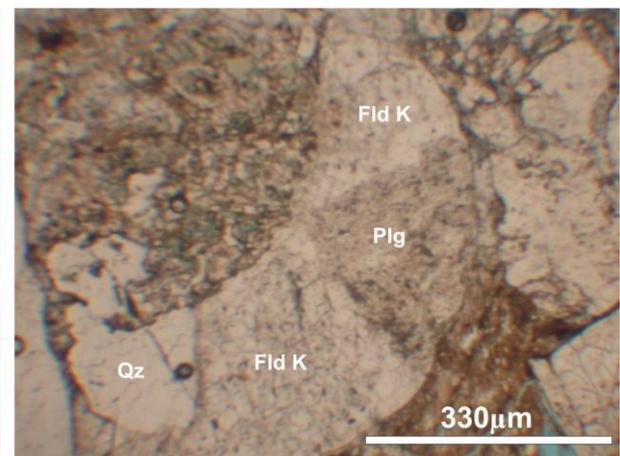
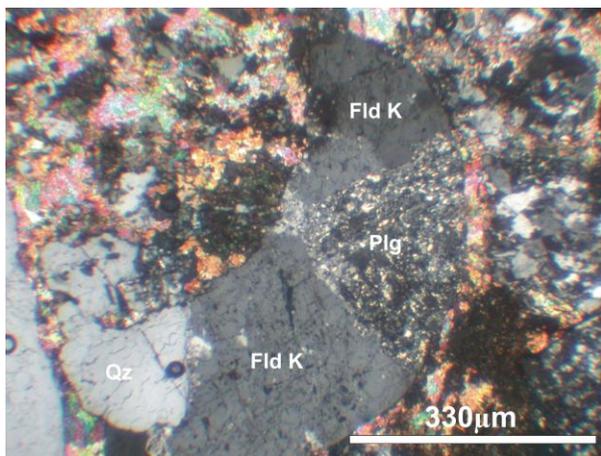
WENTWORTH, C.K. (1922): A scale of grade and class terms for clastic sediments. - The Journal of Geology, v. 30, p. 377–392.

WHITE, R. V., TARNEY, J., KERR, A. C., SAUNDERS, A. D., KEMPTON, P. D., PRINGLE, M. S. & KLAVER, G. T. (1999): Modification of an oceanic plateau, Aruba, Dutch Caribbean: Implications for the generation of continental crust. -*Lithos*, v 46, p. 43-68.

ANEXO 1
IMÁGENES DE MINERALES EN LAS SECCIONES DELGADAS DE LA
FORMACIÓN PENDALES



Lítico volcánico perteneciente a la muestra SSJ-12. Con los polarizadores cruzados (izquierda) se observa que parte del vidrio volcánico se encuentra devitrificado. Con luz paralela plana (derecha) se observa que el lítico está epidotizado



Lítico ígneo intrusivo de la muestra SSJ 12 (vista con polarizadores cruzados a la izquierda y con luz paralela plana a la derecha). Se determina que es este tipo de lítico por sus granos gruesos granulares y anhedrales, además de no observar contornos definidos en cada grano que se observan en una roca sedimentaria. Esta conformado por una plagioclasa cericitizada, feldespato potásico y cuarzo. La presencia de feldespato potásico sugiere una composición ácida.



De izquierda a derecha líticos pumpelicitizados (muestra SSJ 12), serpentinizados y epidotizados (muestra SSJ-13) de la Formación Pendales.

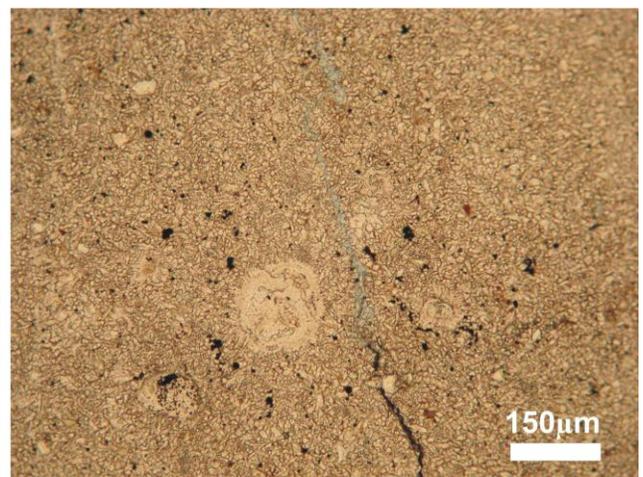
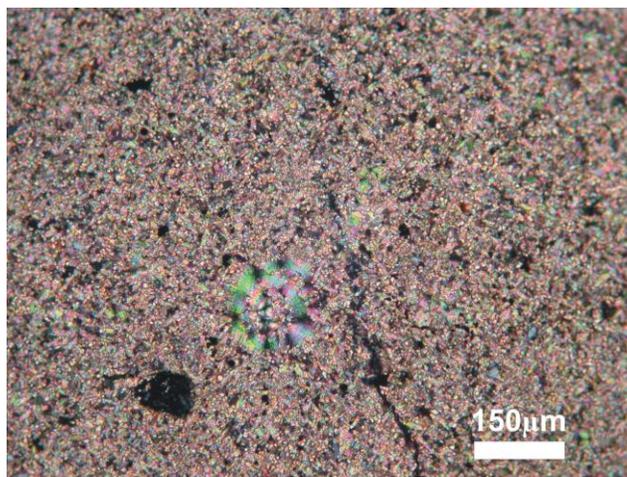


Imagen con polarizadores cruzados (izquierda) y con luz paralela plana (derecha) de un rodolito de alga en un grano tamaño guijo fino de caliza, perteneciente a la Formación Pendales (muestra SSJ-13)

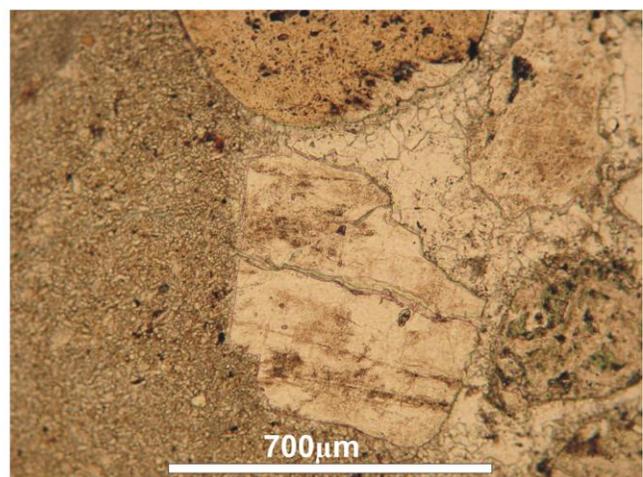
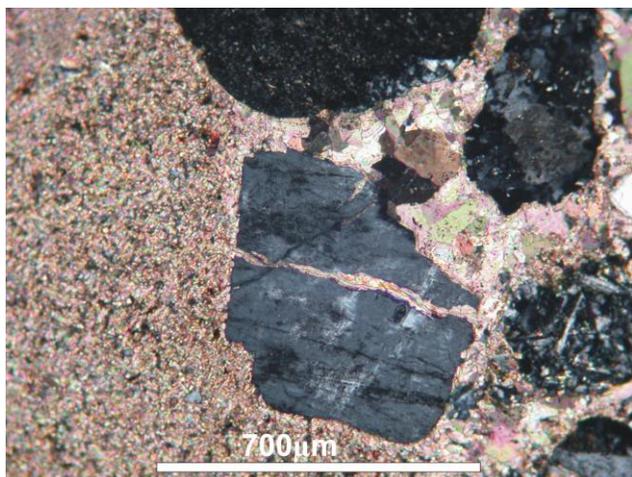
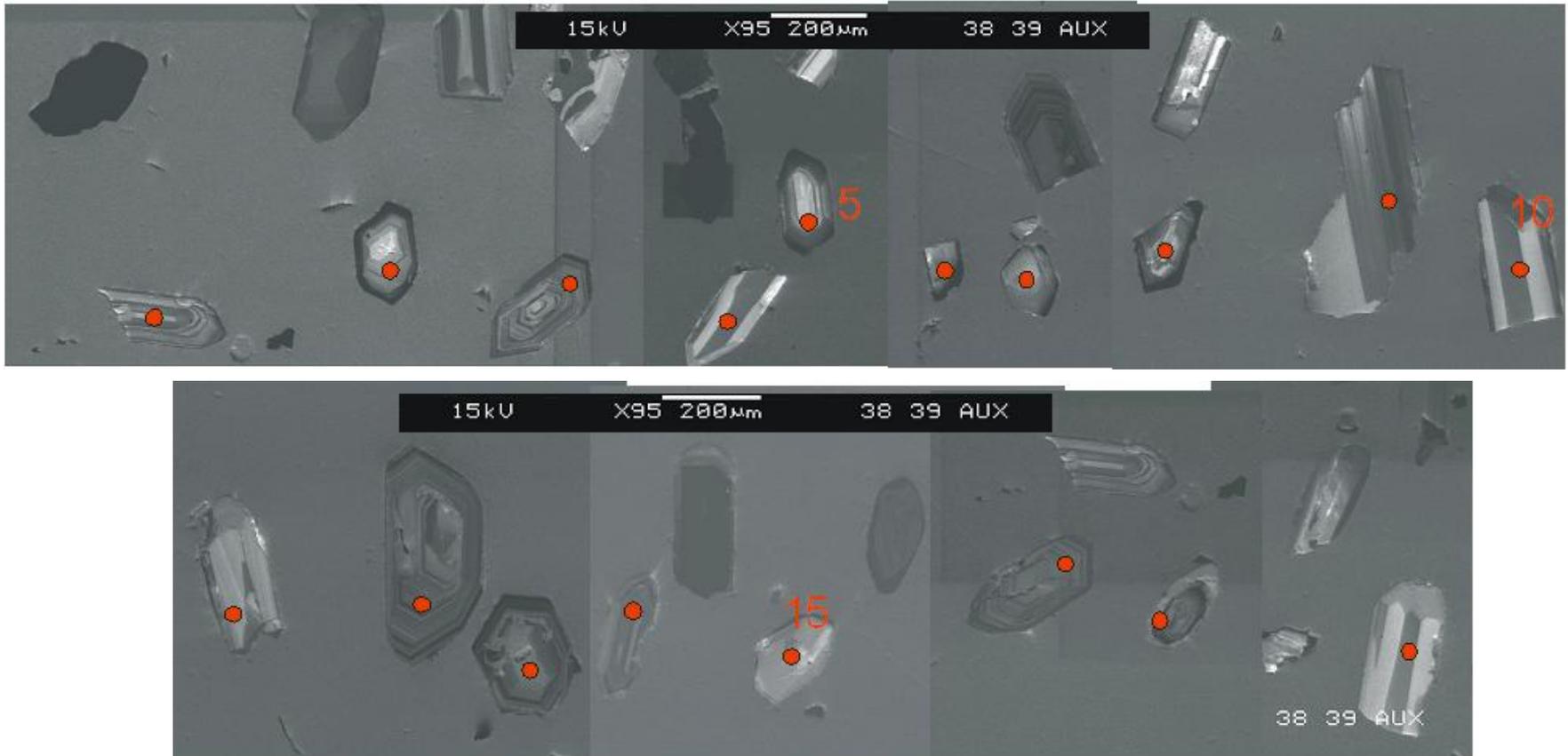


Imagen con polarizadores cruzados (izquierda) y con luz paralela plana (derecha) de un Feldespato potásico en muestra SSJ-13 de la Formación Pendales.

ANEXO 2



Imágenes de Catodoluminiscencia de los 19 circones detríticos de la Formación Pendales (muestra SSJ-11), tomadas en el Microscopio electrónico de Barrido JEOL- JSM-5600LV. Los círculos rojos reflejan el lugar donde el láser tomó la muestra para datación U-Pb. Las texturas zonadas concéntricas de los circones indican una génesis magmática.