

Procedencia de la Formación El Cerrito en el Cinturón Plegado de San Jacinto: implicaciones paleogeográficas para el Caribe colombiano

Valentina Vargas-González^{1*} ; Andrés Pardo-Trujillo¹ ;
Nelson Fabián Gallego-Bañol¹ ; Sergio Andrés Restrepo-Moreno^{2,3} ;
Jaime Andrés Muñoz-Valencia¹ 

¹Grupo de Investigación en Estratigrafía y Vulcanología -GIEV- “Cumanday”, Instituto de Investigaciones en Estratigrafía, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. (*) valentina.vargas@ucaldas.edu.co; andres.pardo@ucaldas.edu.co; nelson.gallego@ucaldas.edu.co; andresmuz37@gmail.com

²Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. sarestrepom@unal.edu.co

³Department of Geological Sciences, University of Florida, Gainesville, USA.

Resumen

Con el fin de contribuir al conocimiento de las fuentes de aporte y ambientes sedimentarios en el Cinturón Plegado de San Jacinto, se estudió la secuencia sedimentaria del Mioceno superior recuperada por el pozo ANH-Los Pájaros-1X. Esta se depositó en sistemas deltaicos que oscilaron entre ambientes de prodelta-frente del delta y llanura deltaica. La relación promedio de cuarzo-Q, feldespato-F y líticos-L de las areniscas es $Q_{36}F_{24}L_{40}$; los líticos identificados corresponden a andesitas, cuarcitas, esquistos, granitos, lodolitas y areniscas, lo que indica múltiples fuentes de aporte. El estudio de los minerales densos muestra una alta proporción de hornblenda que, sumado a la presencia de piroxeno, indica una posible fuente ígnea; el contenido en proporciones inferiores de apatito, biotita, moscovita, turmalina y circón sugiere una posible afinidad con rocas ígneas ácidas, sin embargo, no se descartan rocas plutónicas intermedias y volcánicas o de rocas metamórficas. Las edades U/Pb indican que el pozo no es más antiguo que el Mioceno tardío (9,7-9,1 Ma), y corresponde a la Formación El Cerrito. De acuerdo con las reconstrucciones paleogeográficas disponibles para este periodo, grandes sistemas fluviales y deltaicos progradaron hacia el NW de Colombia. La principal fuente de aporte de detritos se encontraba al sur, en las cordilleras Central y Occidental, así como en los paleoaltos en el Valle Inferior del Magdalena. Para este tiempo se produjo además aporte de sedimentos con edades afines a las reportadas en rocas del bloque Panamá-Choco, (p. ej., 43,4-40,7 Ma). Por otra parte, la presencia frecuente de circones del Mioceno tardío, junto con la alta proporción de líticos volcánicos, permite sugerir influencia de la actividad magmática que se produjo en la Cordillera Occidental y el cañón del Cauca.

Palabras clave: Andes del Norte; Edades U/Pb circón; Petrografía convencional; Minerales densos; Mioceno superior.

Forma de citar: Vargas-González, V.; Pardo-Trujillo, A.; Gallego-Bañol, N.F.; Restrepo-Moreno, S.A.; Muñoz-Valencia, J.A. (2022). Procedencia de la Formación El Cerrito en el Cinturón Plegado de San Jacinto: implicaciones paleogeográficas para el Caribe colombiano. *Boletín de Geología*, 44(3), 39-63. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022002>

Provenance of the El Cerrito Formation in the San Jacinto Folded Belt: Paleogeographic implications for the Colombian Caribbean

Abstract

A provenance study of an Upper-Miocene sedimentary sequence drilled by the ANH-Los Pájaros-1X well was carried out to unravel the sediment sources and sedimentary environments of the San Jacinto Folded Belt. Our findings indicate that the sequence studied was deposited in deltaic systems that oscillated between prodelta-front and delta plain environments. The average ratio of sandstones samples is $Q_{36}F_{24}L_{40}$; where the lithics identified correspond to andesites, quartzites, shales, granites, mudstones and sandstones, which indicates multiple sources of detrital materials delivered into the basin by a complex fluvial network. Analyses of heavy minerals show a high proportion of hornblende and pyroxene, perhaps implying an igneous source. The minor content of apatite, biotite, muscovite, tourmaline, and zircon suggests a provenance related to felsic igneous rocks, although intermediate plutonic and volcanics or metamorphic rocks cannot be discarded. The maximum deposition age given by the U/Pb dates indicates that the sedimentary sequence is not older than the late Miocene (9.7-9.1 Ma), which allows a stratigraphic correlation with the El Cerrito Formation. According to available paleogeographic reconstructions for this period, large rivers, and deltaic systems prograded towards NW of Colombia. The main sources of sediments were thus located to the south in the Central and Western cordillera, as well as in paleo-highs of the Lower Magdalena Valley associated with tectonic environments of magmatic arcs and recycled orogens. Contribution of sediments with geochronologic signatures typical of rocks with Panama-Choco Block affinity seem to be evidenced by detrital U/Pb ages between 43.4-40.7 Ma. On the other hand, the frequent presence of late Miocene zircons, together with the high proportion of volcanic lithics suggest the influence of magmatic activity from the Western Cordillera and the Cauca river trough.

Keywords: Northern Andes; Age U/PB Zircon; Conventional petrography; Heavy minerals; Upper Miocene.

Introducción

Los Andes del noroccidente de Colombia se caracterizan por ser una región geológicamente compleja cuya evolución tectónica presenta procesos de subducción-colisión de la placa oceánica del Caribe, con sus arcos oceánicos asociados, incluido el bloque Panamá-Chocó, contra la placa continental suramericana. Esta interacción inició en el Cretácico tardío y se mantiene a lo largo del Cenozoico, aunque con variaciones importantes en las tasas y la geometría de los patrones de convergencia (Cediell *et al.*, 2003; Pindell *et al.*, 2005; Pindell y Kennan, 2009; Villagómez *et al.*, 2011b; Villagómez y Spikings, 2013). Como consecuencia de esta geodinámica compleja, las rocas que conforman el Cinturón Plegado de San Jacinto (CPSJ) se originaron en una cuenca antearco, controlada por la subducción de bajo ángulo que va desde el Oligoceno hasta el reciente (Mantilla-Pimiento *et al.*, 2009; Bernal-Olaya *et al.*, 2015; Mora *et al.*, 2018; Osorio-Granada *et al.*, 2020).

Si bien los estudios estratigráficos, sedimentológicos y de procedencia en el Caribe colombiano (Duque-Caro, 1984; Guzmán *et al.*, 2004; Bayona *et al.*, 2007; ANH-Universidad de Caldas, 2009, 2016; Zapata *et al.*, 2010; Cardona *et al.*, 2012; Silva-Arias *et al.*, 2019; Osorio-Granada *et al.*, 2020) han permitido conocer, entre

otros, las áreas fuente de los detritos, los ambientes de depósito, los cambios tanto en la sedimentación como en sus áreas de aporte, y han ayudado a comprender mejor la evolución geológica y paleogeográfica de la región, específicamente del Cenozoico, el presente estudio enfatiza el conocimiento detallado de las fuentes de aporte de sedimentos en el CPSJ durante el Mioceno tardío. La importancia de esta contribución radica en el papel fundamental de la procedencia al momento de evaluar la historia de levantamiento y exhumación por erosión de los macizos cordilleranos aportantes a la cuenca (adyacentes o distales), la evolución de la paleored fluvial, y de la influencia del magmatismo al momento de la sedimentación en la esquina noroccidental de Colombia (Figura 1). Adicionalmente, a partir de análisis petrográficos y de geocronología detrítica de muestras de pozos perforados en el sector central del CPSJ y en el Valle Inferior de Magdalena (VIM) (subcuenca San Jorge), se presenta información que permite identificar variaciones en las áreas de aporte de sedimentos durante el Mioceno tardío (ANH-Universidad de Caldas, 2011, 2020b), una época marcada por eventos geológicos regionales tales como el adosamiento del Bloque Panamá-Chocó (BPC) a la margen NW de Colombia (Pindell y Kennan, 2009), el levantamiento de las cordilleras Occidental y Oriental (Mora *et al.*, 2013; Restrepo-Moreno *et al.*, 2019; Noriega-Londoño *et*

al., 2020; Duque-Palacio *et al.*, 2021; Barbosa-Espitia *et al.*, en revisión), el óptimo climático del Mioceno medio (Herold *et al.*, 2010; Scholz *et al.*, 2020) y el magmatismo-vulcanismo en el cañón del Cauca entre las cordilleras Central y Occidental de Colombia (Ramírez *et al.*, 2006; Rodríguez y Zapata, 2014, 2012; Restrepo-Moreno *et al.*, 2013; Zapata y Rodríguez, 2011; Borrero y Toro-Toro, 2016).

Con el fin de entender la estratigrafía de las secuencias sedimentarias que constituyen el sistema petrolífero en la región del Sinú-San Jacinto, la Agencia Nacional

de Hidrocarburos (ANH) adelantó una campaña de perforación de pozos estratigráficos en el año 2014. En dicha campaña se perforó el pozo ANH-Los Pájaros-1X, el cual permitió recuperar un registro continuo de una sucesión siliciclástica del Mioceno superior. En este trabajo, a partir de una metodología multiherramienta (petrografía convencional y de minerales densos traslucidos, edades U/Pb en circones detriticos), se interpretaron las posibles áreas de aporte de material detrítico que llegaba al CPSJ y se discutieron las implicaciones de los resultados en las reconstrucciones paleogeográficas del Caribe colombiano.

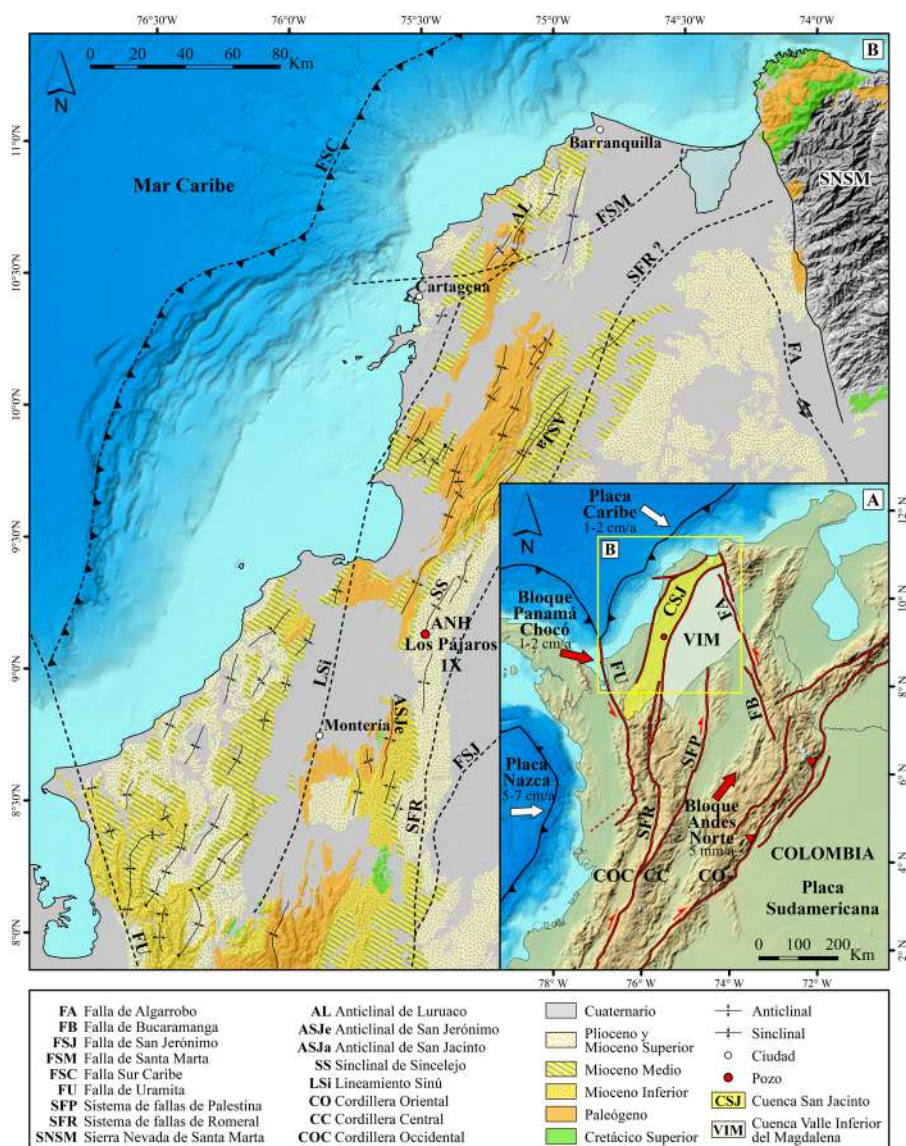


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. **A.** Contexto tectónico-geodinámico regional, se muestran las placas Caribe, Nazca y Suramericana, y los bloques Panamá-Chocó y Norandino, los principales lineamientos estructurales y el Cinturón Plegado de San Jacinto (CPSJ). **B.** Contexto lito-estructural del margen noroccidental de Colombia, se muestra la cartografía geológica de las unidades del Cretácico superior al reciente, los anticlinales del CPSJ (ASJe: anticlinorio de San Jerónimo, ASJa: anticlinorio de San Jacinto, AL: anticlinal de Luruaco), lineamientos estructurales regionales y la localización del pozo ANH-Los Pájaros-1X. Modificado de Gómez *et al.* (2015) y Duque-Palacio *et al.* (2021).

Aspectos Geológicos

Estratigrafía del Cinturón Plegado de San Jacinto

Las rocas más antiguas del CPSJ corresponden a basaltos, tobas básicas, lodolitas, cherts y calizas micríticas acumuladas en ambientes marinos abiertos durante el Cretácico Tardío (Guzmán *et al.*, 2004, 2007). Durante el Paleoceno-Eoceno temprano se acumularon depósitos marinos someros y profundos, asociados a deltas-abanicos y abanicos submarinos (Guzmán *et al.*, 2004; ANH-Universidad de Caldas, 2020a). En el intervalo Eoceno medio al Oligoceno temprano se encuentran depósitos de *fan deltas* y, localmente, calizas

desarrolladas en ambientes de rampas carbonatadas y mixtas (Guzmán *et al.*, 2004; ANH-Universidad de Caldas, 2020a; Salazar-Ortiz *et al.*, 2020). Estas últimas se encuentran cubiertas por depósitos del Oligoceno al Mioceno inferior, acumulados en deltas progradantes y arrecifes coralinos (Mora *et al.*, 2018; ANH-Universidad de Caldas, 2020b). En los depósitos del Mioceno inferior a medio, se evidencia una fase de trasgresión marina (ANH-Universidad de Caldas, 2020a). A partir del Mioceno tardío hasta la actualidad se da una acumulación de sedimentos fluviales a transicionales, principalmente progradantes (Dueñas y Duque, 1981; Clavijo y Barrera, 2001) (Figura 2).

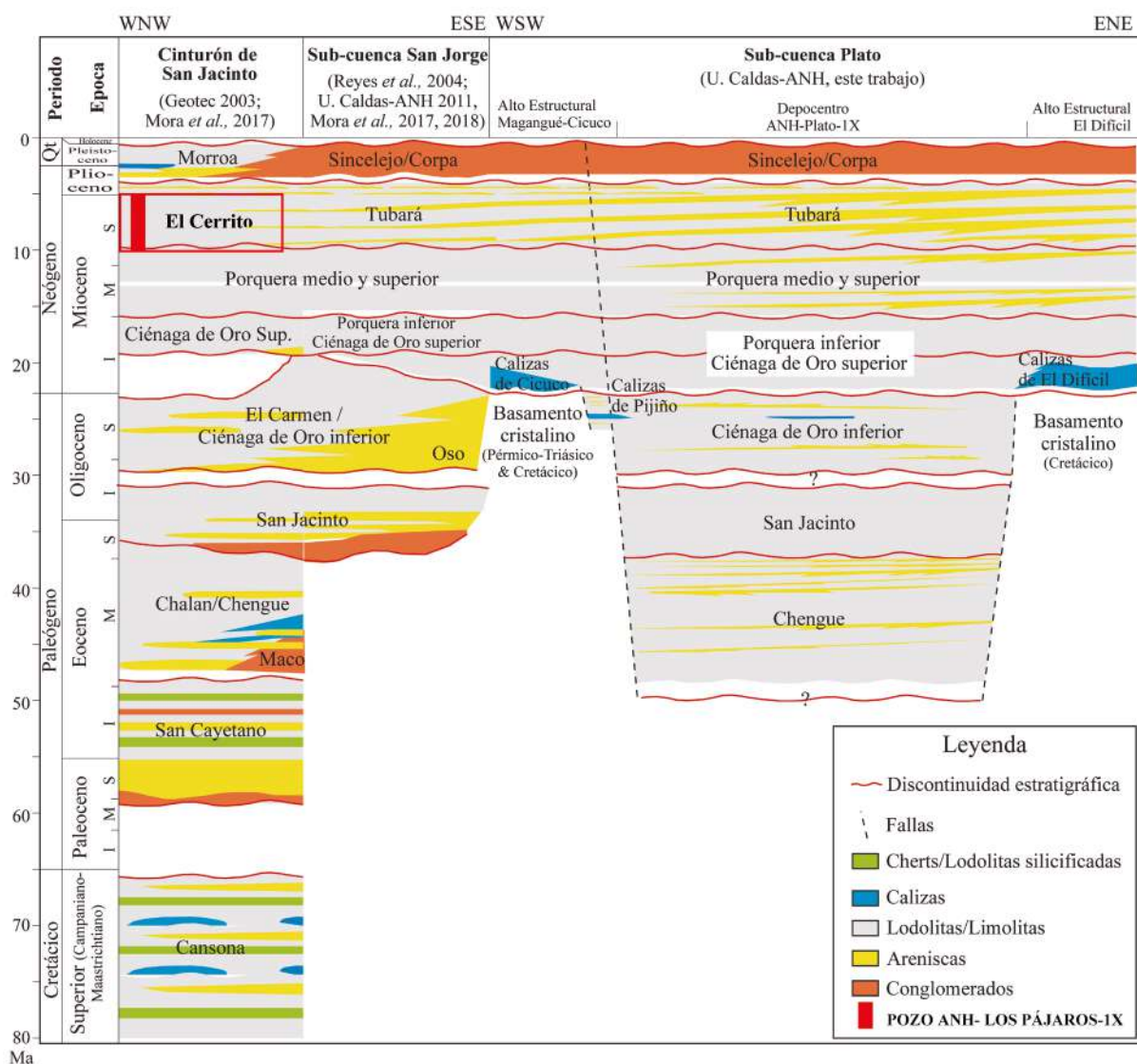


Figura 2. Carta cronoestratigráfica del Cinturón Plegado de San Jacinto, y las subcuencas San Jorge y Plato, y localización del pozo ANH-Los Pájaros-IX. Modificada de ANH-Universidad de Caldas (2020b) y Pardo-Trujillo *et al.* (2020).

Ambiente de depósito de la sucesión perforada por el pozo ANH-Los Pájaros-1X

Sedimentológicamente, la secuencia recuperada por el pozo ANH-Los Pájaros-1X se puede dividir en dos segmentos (Figura 3): el segmento T1, desde la base del pozo hasta ~650 pies (~189 m), que contiene sucesiones de areniscas y lodolitas que forman secuencias grano-crecientes depositadas en un ambiente deltaico. La base de las secuencias presenta heterolitas, lodolitas y areniscas de grano fino, ocasionalmente bioclásticas y bioturbadas, interpretadas como depósitos de prodelta y frente deltaico. Hacia el techo de la secuencia, las areniscas aumentan en tamaño de grano hasta areniscas conglomeráticas, con ocasionales niveles de carbón y lodolitas con óxidos de hierro, que se interpretan como depósitos de llanura deltaica superior e inferior. El segmento T2 se extiende desde ~650 pies (~189 m) hasta la parte superior del pozo, y presenta alternancia de sucesiones grano-decrecientes y grano-crecientes, asociadas a un ambiente deltaico. La presencia de lodolitas abigarradas, lodolitas carbonosas, mantos de carbón, conglomerados matriz o clastosoportados masivos y palinomorfos terrestres sugiere un dominio más continental de los ambientes de la llanura deltaica superior e inferior.

El registro sedimentario del pozo ANH-Los Pájaros-1X permite interpretar una continentalización de base a techo en los ambientes de depósitos con oscilaciones entre prodelta-frente del delta y la llanura deltaica. Esta interpretación se apoya además en la información palinológica que muestra una disminución del porcentaje de palinomorfos marinos (quistes de dinoflagelados, envolturas orgánicas de foraminíferos, huevos de copépodos, *pellets* fecales y escolecodontes) y de manglar hacia la parte superior de la secuencia estudiada (Díaz-Jaramillo, 2017). De acuerdo con este autor, la asociación palinológica hallada en el pozo indica una edad Mioceno Medio-Tardío (zonas T-15 y T-16 de Jaramillo *et al.* (2011)). Por otra parte, reconoce palinomorfos redepositados del Eoceno y el Cretácico-Paleoceno, lo cual sugiere que hubo erosión de unidades sedimentarias preexistentes.

Teniendo en cuenta las características litológicas y edad, las rocas del pozo ANH-Los Pájaros-1X se pueden correlacionar con las de la Formación El Cerrito. Guzmán *et al.* (2004) le asignan a esta última una edad Mioceno tardío a Plioceno temprano a partir de foraminíferos reportados por Duque-Caro (1973). Cáceres y de Porta (1972) describen las intercalaciones de lodolitas y areniscas con abundantes fósiles de

gasterópodos y bivalvos; estos autores también interpretan el cambio de las condiciones marinas a continentales, indicado por la presencia de areniscas de grano grueso, conglomerados y lodolitas rojizas con disminución del contenido fosilífero hacia la parte superior de la unidad.

Métodos

En este estudio se utilizó una metodología de trabajo multiherramienta que involucró petrografía convencional, tipología de cuarzos, análisis de minerales densos y geocronología U/Pb en circones detríticos. Se realizó el muestreo sistemático de las areniscas recuperadas en el pozo ANH-Los Pájaros-1X para 103 análisis de petrografía convencional distribuidos a lo largo de toda la secuencia, 3 análisis de minerales densos y 3 análisis de geocronología detrítica por U/Pb en circones con muestras localizadas hacia la base, la porción central y el techo de la secuencia.

En la petrografía se adoptó el método de conteo de 300 puntos de Gazzi-Dickinson (Ingersoll *et al.*, 1984), las partículas menores a 0,0625 mm de diámetro se consideraron como matriz y las partículas mayores se clasificaron como granos o fragmentos líticos. Los conteos se normalizaron a porcentajes y los resultados se expresaron de acuerdo con el promedio del porcentaje de los componentes esenciales de la roca.

Se usaron diagramas ternarios (Dickinson, 1985) para discriminación de fuentes de aporte y ambiente tectónico. Cabe resaltar que el diagrama Qt-F-L hace énfasis en la estabilidad mineral, y el diagrama Qm-F-L hace énfasis en la granulometría de las rocas que componen la fuente de aporte (Dickinson, 1985). Para este trabajo solo se tienen en cuenta las areniscas cuyo contenido de matriz, cemento y materia orgánica no superara el 30% de la composición total de la roca.

En el análisis de las tipologías de cuarzo se identificaron cuarzo monocristalino con extinción plana (Qmr), cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria (Qmo), cuarzo policristalino con dos o tres unidades cristalinas (Qp2-3) y cuarzo policristalino con más de tres unidades cristalinas (Qp>3). Posteriormente, se proyectaron los porcentajes relativos de las cuatro tipologías de cuarzo en el diagrama rómbico de Tortosa *et al.* (1988), modificado de Basu *et al.* (1975). Los resultados de la tipología de cuarzos se expresan en porcentaje.

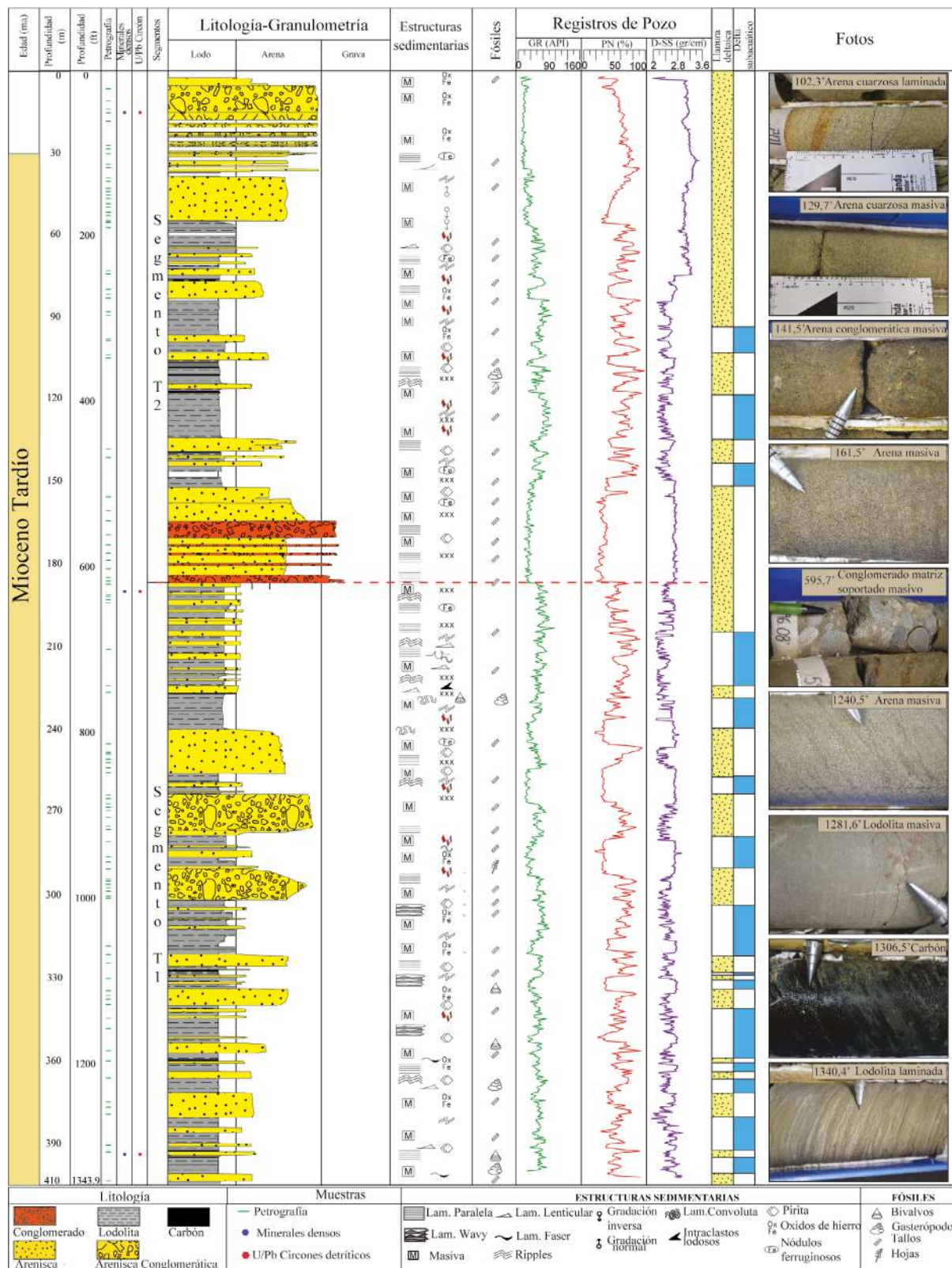


Figura 3. Registro litológico del pozo ANH-Lo Pájaros-IX, localización de las muestras estudiadas, estructuras sedimentarias, registros de pozo y ambientes de depósito interpretados. Se incluyen algunas fotografías donde se indica la profundidad en pies y sus características litológicas principales.

Los minerales densos fueron preparados en una primera fase de desagregación por tamaño (0,063-0,125 mm), para luego ser concentrados por diferencia de densidades mediante batea. La fracción densa se depuró usando líquidos densos ($\rho > 2,8$). Posterior a este tratamiento, se realizó el análisis con la identificación de 350 granos traslucidos por montaje de granos empleando el método Ribbon-Counting (Mange y Maurer, 1992). A partir de la clasificación de Pettijohn *et al.* (1973) se definieron las asociaciones mineralógicas.

La separación de circones se realizó siguiendo los métodos estándar que incluyen trituración de la muestra, tamizado, separación por densidades, depuración de concentrados utilizando líquidos densos y separación por susceptibilidad magnética mediante Frantz Isodinámico®. Posteriormente, se realizó el montaje de circones en resina epóxica con la mayor cantidad de granos; en el caso de las muestras empobrecidas en circones, se dató el máximo número recuperado. Los análisis isotópicos para dataciones U/Pb se realizaron utilizando el sistema de ablación láser y plasma inductivamente acoplado (LA-ICP-MS). Como la técnica de ablación láser tiene una limitación relacionada con el tamaño de las zonas de crecimiento frente al tamaño del núcleo de los circones (Leisen *et al.*, 2015), previo a la ablación se tomaron imágenes de catodoluminiscencia para garantizar la datación de los núcleos de los circones detríticos y, de esta forma, obtener las edades de cristalización/metamorfismo en el sistema isotópico U/Pb de los circones provenientes de macizos cordilleranos. Los resultados se filtraron usando un porcentaje de discordia 7/5 mínimo de -5% y máximo de 30% para las edades <40 Ma, de 20 % para edades >40 Ma <200 Ma y filtro de 10% para edades >200 Ma, con el fin de no dejar fuera del análisis circones con edades que pueden ser útiles en el estudio, sin despreciar el posible efecto de la pérdida de Pb radiogénico o la presencia de Pb común en las muestras. Finalmente, para la interpretación, las poblaciones de edades representativas se consideran como las conformadas por mínimo tres circones de edades concordantes (Kochelek *et al.*, 2011) mientras que la edad máxima de depósito de la secuencia

sedimentaria se calculó utilizando la media ponderada de tres granos de circón con las edades concordantes más jóvenes (Dickinson y Gehrels, 2009).

Resultados

Petrografía convencional de areniscas

Con base en el estudio de petrografía convencional se identificaron dos tendencias composicionales: T1 entre 1344 y ~650 y T2 desde los 650 pies hasta el techo del pozo. Para el segmento T1, y de acuerdo con el esquema de clasificación composicional de Folk (1974), las areniscas se clasifican como litoarenitas feldespáticas y, en menor proporción, arcosas líticas y subarcosas (Figura 4), con un promedio composicional de $Q_{49} F_{20} L_{31}$. El constituyente más abundante es el cuarzo, en su mayoría monocristalino, desde 8 a 38% (promedio de 22%) y, en menor proporción, policristalino desde 0,3 a 7,3% (promedio de 2%), seguido de la fracción lítica (Figura 5), que se compone en orden de abundancia de fragmentos de rocas volcánicas (basaltos, andesitas) desde 1,3 a 20% (promedio 10%), rocas sedimentarias (chert, lodolitas y areniscas) desde 1 a 15% (promedio 3%) y rocas metamórficas (esquistos, cuarcitas) desde 0,3 a 7% (promedio de 2%). Por último, los feldespatos son dominados por plagioclasa desde 1 al 22% (promedio de 11%) y, en menor proporción, feldespatos potásicos desde 0 a 1%. El principal mineral accesorio es hornblenda, presente en todas las secciones delgadas descritas, seguido de zeolitas, minerales opacos, micas, glauconita, circón y apatito. Las areniscas presentan cementos de calcita, calcita ferrosa, siderita, óxidos de hierro y sílice.

De acuerdo con los diagramas ternarios de clasificación de Dickinson (1985), las rocas analizadas del segmento T1 se posicionan en las áreas de arco magmático disectado u orógeno reciclado para el diagrama Qt-F-L; además, según el diagrama Qm-F-Lt, tienen afinidad con un arco disectado y mezcla, con una baja proporción en arco transicional y orógeno reciclado transicional. La tipología de cuarzos (Tortosa *et al.*, 1988), permite posicionar las muestras analizadas en los campos de rocas metamórficas de medio a alto grado y en granitos (Figura 4).

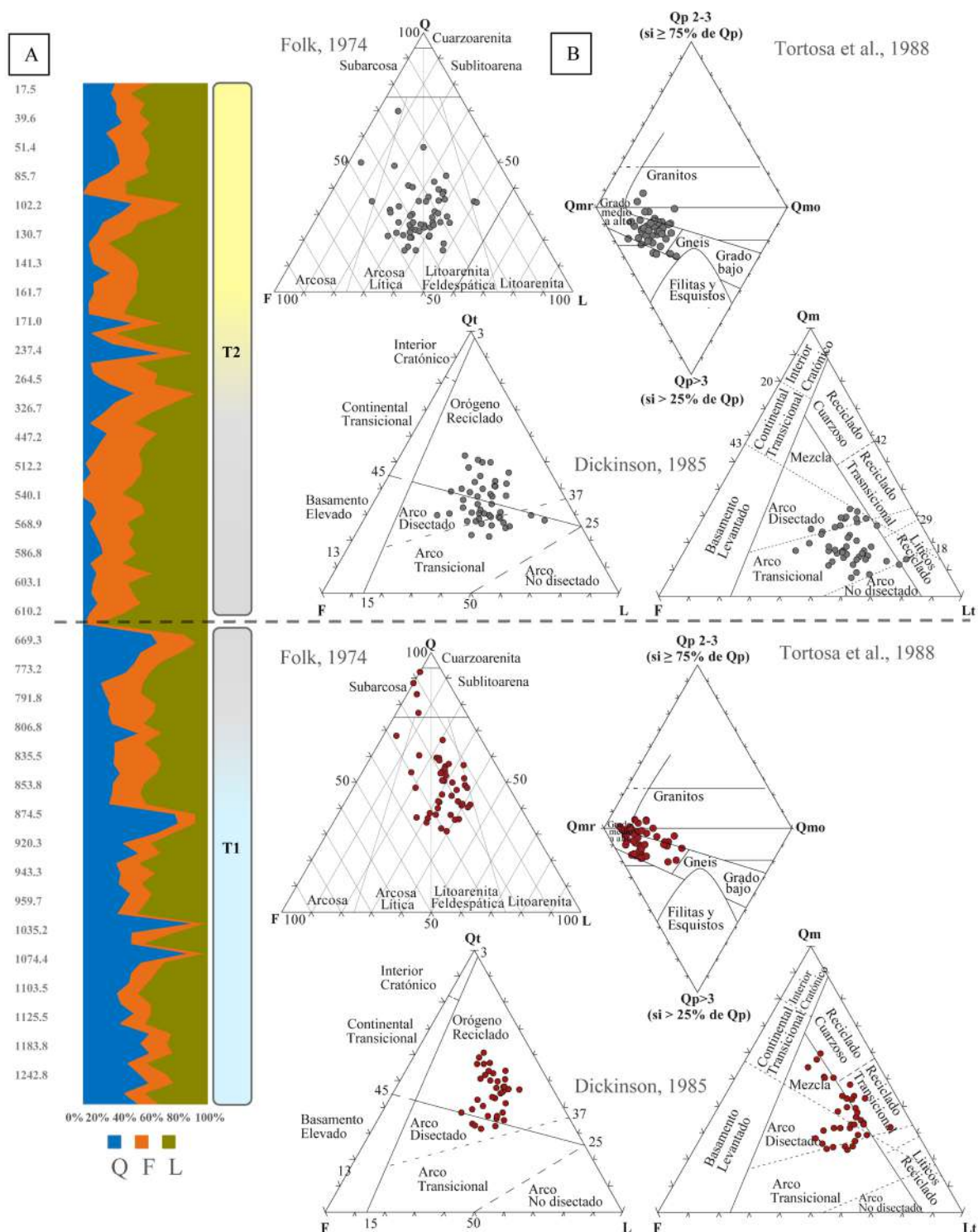


Figura 4. A. Tendencias composicionales de las muestras analizadas (segmentos T1 y T2). B. Clasificación de las areniscas (Folk, 1974), diagramas de procedencia tectónica Qt-F-L y Qm-F-Lt (Dickinson, 1985), tipología de cuarzos (Tortosa *et al.*, 1988). Escala en pies.

Para el segmento T2, el esquema de clasificación composicional de Folk (1974), indica que las areniscas se clasifican como litoarenitas feldespáticas y arcosas líticas (Figura 4), con un promedio composicional de $Q_{26}F_{35}L_{39}$. El constituyente más abundante es la fracción lítica (Figura 5), que se compone en orden de abundancia de fragmentos de rocas volcánicas (basaltos, andesitas) desde 0,3 a 25% (promedio 11%), rocas sedimentarias (chert, lodolitas y areniscas) desde 2 a 20% (promedio 4%) y rocas metamórficas (esquistos, cuarcitas) desde 0,3 a 7% (promedio de 3%), seguido de feldespatos, dominados por plagioclasa desde 4 al 22% (promedio de 14%) y en menor proporción feldespatos potásicos desde 0,3 a 4,7%. El cuarzo es en su mayoría monocristalino desde 4,3 a 43% (promedio de 12%), y en menor proporción, policristalino desde 1,3 a 5% (promedio

de 3%). El principal mineral accesorio es hornblenda, presente en todas las secciones delgadas descritas, seguido de zeolitas, minerales opacos, micas, glauconita, circón y apatito. Las areniscas presentan cementos de calcita, calcita ferrosa, siderita, óxidos de hierro y sílice.

De acuerdo con los diagramas ternarios de clasificación de Dickinson (1985), las areniscas del segmento T2 se posicionan en las áreas de arco magmático disectado u orógeno reciclado para el diagrama Qt-F-L, además, según el diagrama Qm-F-Lt, tienen afinidad con un arco transicional. La tipología de cuarzos (Tortosa *et al.*, 1988), permite posicionar las muestras en el campo de rocas de medio a alto grado de metamorfismo y granitos, con unos pocos niveles (2) que se acercan al campo de los gneises (Figura 4).

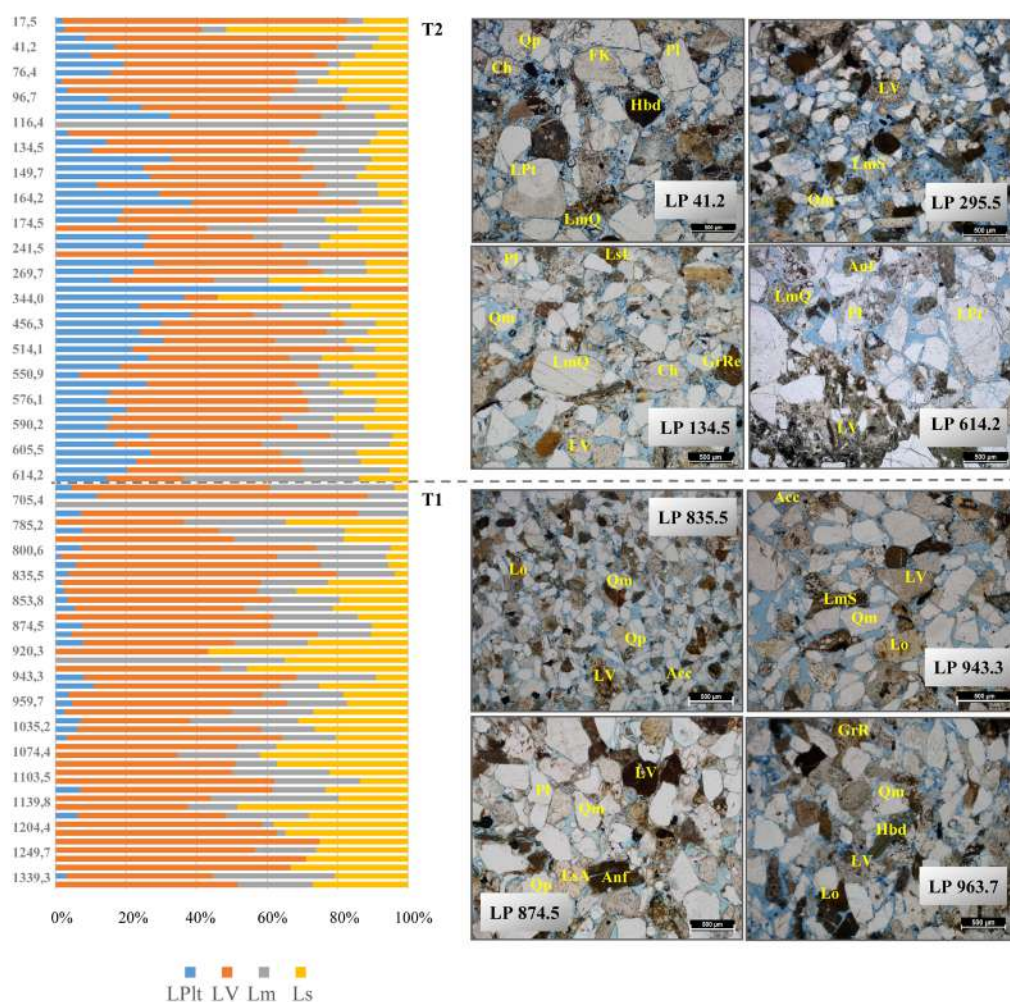


Figura 5. Distribución normalizada a porcentaje de los líticos a lo largo del pozo. Líticos identificados en el análisis petrográfico (fotografías). Abreviaturas, LPlt: fragmentos plutónicos, LV: fragmentos volcánicos, Lm: fragmentos metamórficos, Ls: fragmentos sedimentarios. Algunas fotografías en donde se indican diferentes tipos de líticos LmQ: cuarcita, LsL: lodolita, LsA: arenisca, Qm: cuarzo monocristalino, Qp: cuarzo policristalino, Ch: chert, Fk: feldespato potásico, Pl: plagioclasa, Hbd: hornblenda, Anf: anfíbol, GrRe: grano reemplazado. T1 y T2: segmentos indicados en la columna de la Figura 5. Escala en pies.

Petrografía de minerales densos

Para la petrografía de minerales densos se analizó una muestra en la base del pozo, otra en la parte media y la última hacia el techo. En cada una se estimó el porcentaje de distribución de los minerales traslucidos identificados (Tabla 1). Se presentan los resultados en orden de abundancia y promedio encontrado en las tres muestras analizadas. El mineral denso más abundante es la hornblenda (38%), el cual aumenta su contenido hacia el techo del pozo. Otros minerales con abundancias relativas importantes son moscovita (16%), circón (12%) y epidota (7%). También se identificaron otros minerales densos en menor proporción como turmalina (4%), apatito (4%), granate (4%), estaurolita (1%), titanita (4%), clinozoisita (4%), piroxeno (2%), biotita (2%) y clorita (2%). Se observó granate en la base y parte media de la sucesión, al igual que estaurolita, titanita, clinozoisita y clorita. La biotita solo se observó en la muestra de la parte superior y el piroxeno en la muestra de la parte media (Figura 6).

En términos del grado de estabilidad a la meteorización (Tabla 1), se reconoce hacia la base del pozo (muestra LP 1302,2) una distribución homogénea de las fases ultraestables (24%), estables (28%) y moderadamente estables (30%), que domina sobre las fases inestables (18%). En la porción media del pozo (muestra LP 602,1) dominan las fases minerales inestables (41%) y estables (32%) sobre las fases minerales moderadamente estables (11%) y ultraestables (16%). Hacia el techo (muestra LP 43,0) existe dominio de las fases minerales inestables (73%) sobre las fases minerales estables (14%), ultraestables (10%) y moderadamente estables (3%). Vale la pena mencionar que en esta muestra se observaron trazas de zeolita. En síntesis, de base a techo las fases minerales inestables van aumentando con una consecuente disminución de las fases ultraestables, estables y moderadamente estables (Figura 6).

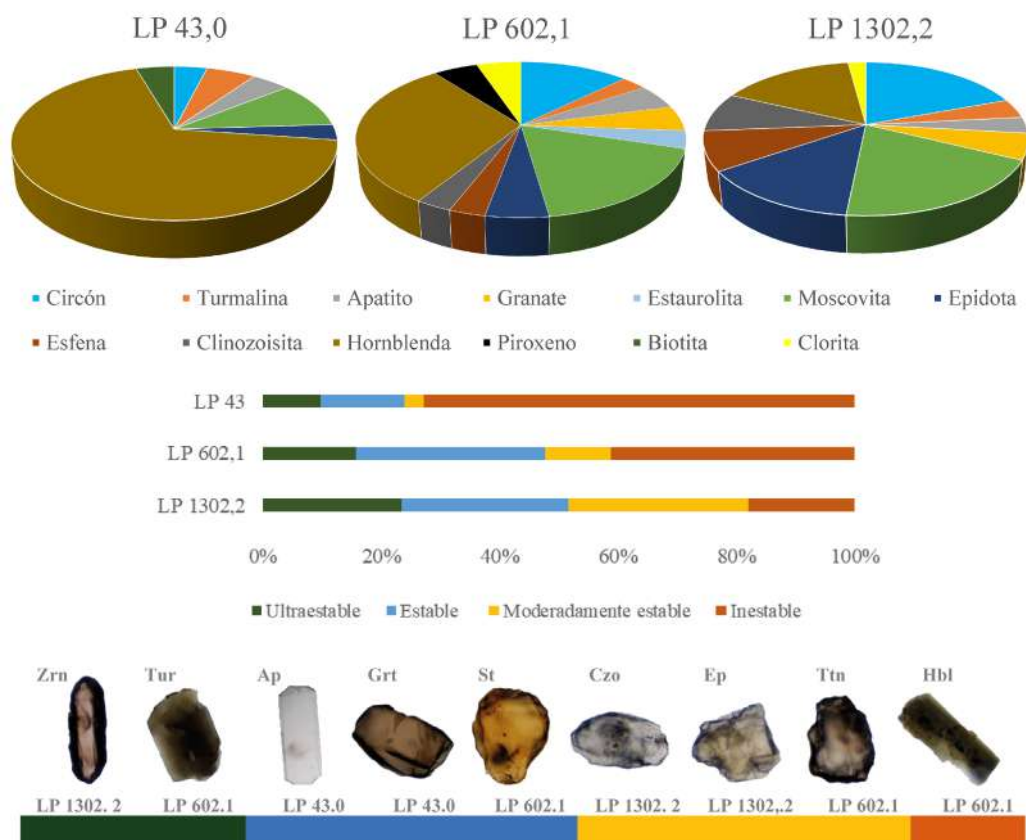


Figura 6. Distribución de minerales densos a partir de los resultados de análisis petrográfico. El número de la muestra corresponde a la profundidad en pies en el pozo. Fotografía de algunos de los minerales densos identificados. Abreviaturas: Zrn: circón, Tur: turmalina, Grt: granate, Ap: Apatito St: estaurolita, Czo: clinozoisita, Ep: epidota, Ttn: titanita, Hbl: hornblenda. El número de la muestra corresponde a la profundidad en pies en el pozo.

Tabla 1. Resultados porcentuales del conteo de puntos de minerales densos normalizados en porcentajes de distribución.

Muestras	Ultraestables		Estables				Moderadamente estables			Inestables			
	Circón	Turmalina	Apatito	Granate	Estaurolita	Moscovita	Epidota	Titanita	Clinozoisita	Hornblenda	Piroxeno	Biotita	Clorita
LP 43,0	3,9	5,8	4,6	0,0	0,0	9,7	3,2	0,0	0,0	68,2	0,0	4,6	0,0
LP 602,1	12,7	3,0	5,2	5,2	3,7	17,9	5,2	3,0	3,0	30,7	5,2	0,0	5,2
LP 1302,2	19,3	4,1	3,4	5,5	0,0	19,3	13,8	8,3	8,3	15,9	0,0	0,0	2,1

Geocronología U/Pb de circones detríticos

Se analizaron tres muestras para geocronología detrítica por el método U/Pb en circones, las cuales corresponden a muestras sobre las que se realizó el estudio de minerales densos. Para la parte superior del depósito, se analizaron 100 circones de la muestra LP 43,0. La población de circones detríticos más abundante en esta muestra corresponde al Mioceno (9,9 Ma, Tortoniano), representada por 17 granos de circón; se encuentran además poblaciones del Eoceno (43,8-38,3 Ma, Bartoniano-Luteciano) en 3 granos, del Paleoceno (64,2 Ma, Daniano) en 3 granos, del Cretácico tardío (80,4 Ma, Campaniano) en 9 granos, del Cretácico temprano (128,9 Ma, Barremiano) en 5 granos, del Jurásico (180,9 Ma, Toarciano) en 5 granos de circón y del Pérmico (276,3 Ma, Kunguriano) en 8 granos. Los otros circones presentes de forma aislada son del Oligoceno (33,0-27,5 Ma), del Triásico (239,8-215,8 Ma) y circones del Proterozoico (Figura 7). Dada esta distribución de edades, la edad máxima de depositación corresponde al Tortoniano.

En la muestra LP 602,1 de la porción media del núcleo, se analizaron 59 circones. Las poblaciones con mayor probabilidad son del Mioceno tardío (10,0 Ma, Tortoniano) representado por 7 granos de circón; Cretácico tardío (79,0 Ma, Campaniano) representado por 8 granos; Cretácico inferior (143 Ma, Berriasiano), 6 granos; Jurásico (179,0 Ma, Toarciano), 3 granos; y Triásico (231,0 Ma, Carniano) representado también por 3 circones. Se encuentra un solo circón de edad Plioceno (5,25 Ma), el cual no es estadísticamente representativo y, por tanto, no se tuvo en cuenta para calcular la edad máxima de depositación. Se encuentran además edades del Oligoceno (33,2-26,0 Ma), Eoceno (50,3-48,7 Ma), Paleoceno (67,0-64,6), Pérmico (289,2-260,2 Ma) y circones aislados del Proterozoico (Figura 7). Las edades U/Pb obtenidas permiten

sugerir una edad máxima de depósito correspondiente al Mioceno tardío (10 Ma).

En la muestra LP 1302,2 se analizaron 36 circones. Corresponden a granos con edades individuales del Oligoceno (24,3 Ma), Eoceno (41,2 Ma), Cretácico tardío (83,6-73,5 Ma), Jurásico (179,7-155,2 Ma), Triásico (237,8 Ma), Pérmico (298,2-254,4 Ma) y del Proterozoico (Figura 8). La edad máxima de depósito corresponde al Oligoceno tardío (25,1 Ma).

Discusión

Procedencia de las areniscas del pozo ANH-Los Pajaros-1X

Los resultados de la petrografía convencional de areniscas muestran que la fracción lítica posee componentes de rocas ígneas (plutónicas y volcánicas), metamórficas (esquistos y cuarcitas) y sedimentarias (chert, lodolitas y areniscas). Los componentes volcánicos se acentúan al techo de la sección, al igual que los fragmentos de granito, y los fragmentos sedimentarios y metamórficos permanecen constantes en el registro composicional (Figura 5).

La tipología de los cuarzos sugiere que los detritos se derivan de granitos y de rocas metamórficas de medio a alto grado (Figura 4B). La petrografía de areniscas permite separar dos segmentos composicionales en el pozo, que se diferencian por la abundancia de los componentes, donde el más maduro composicionalmente es la base del pozo. En términos de procedencia los diversos componentes se mantienen presentes durante todo el pozo, lo que indica que las fuentes son semejantes en los dos segmentos lo cual sugiere monotonía en cuanto a los macizos cristalinos establecidos como zonas aportantes.

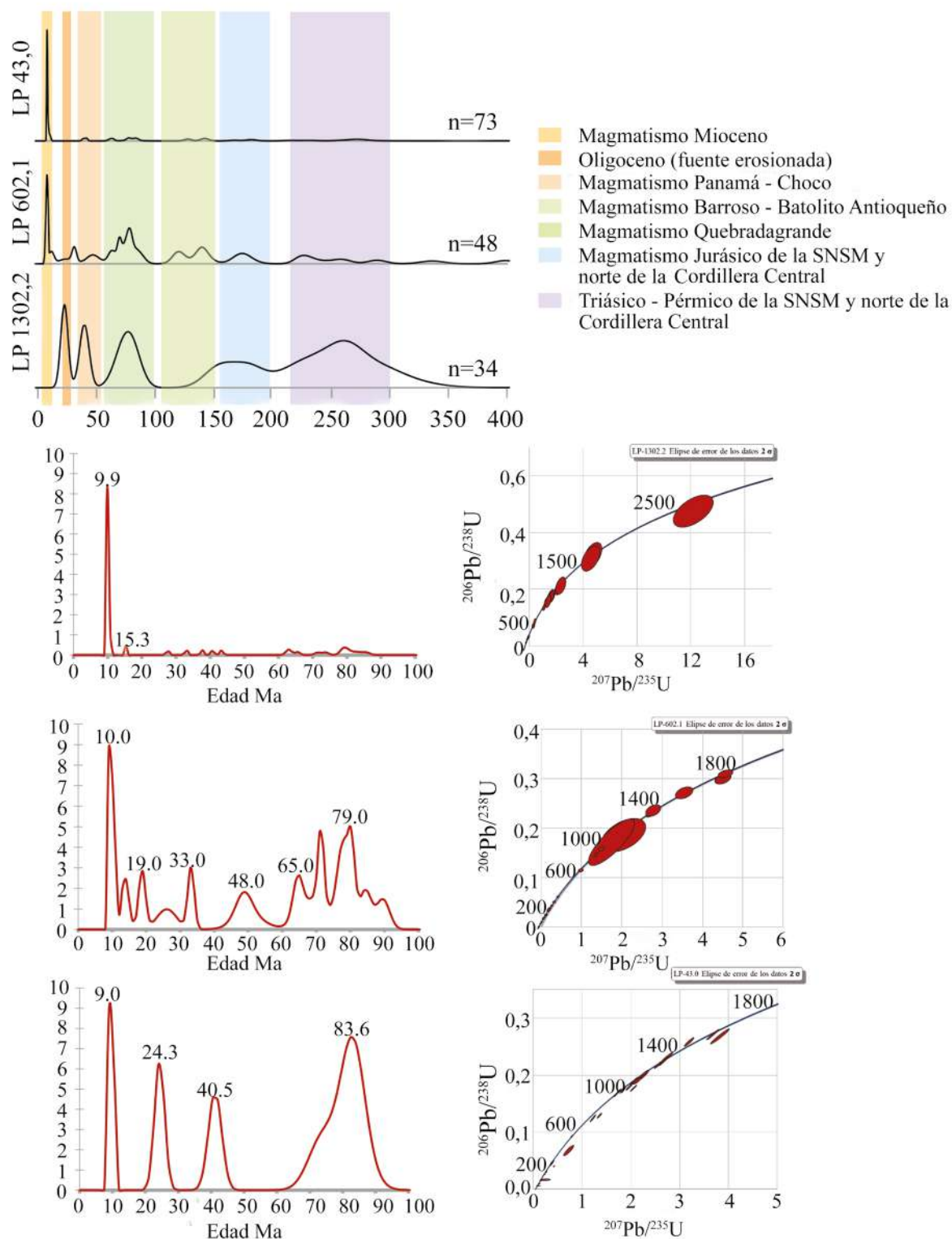


Figura 7. Diagramas de densidad de probabilidad con los resultados de la geocronología U/Pb en circones detriticos y diagramas de concordia Wetherill de las muestras analizadas.

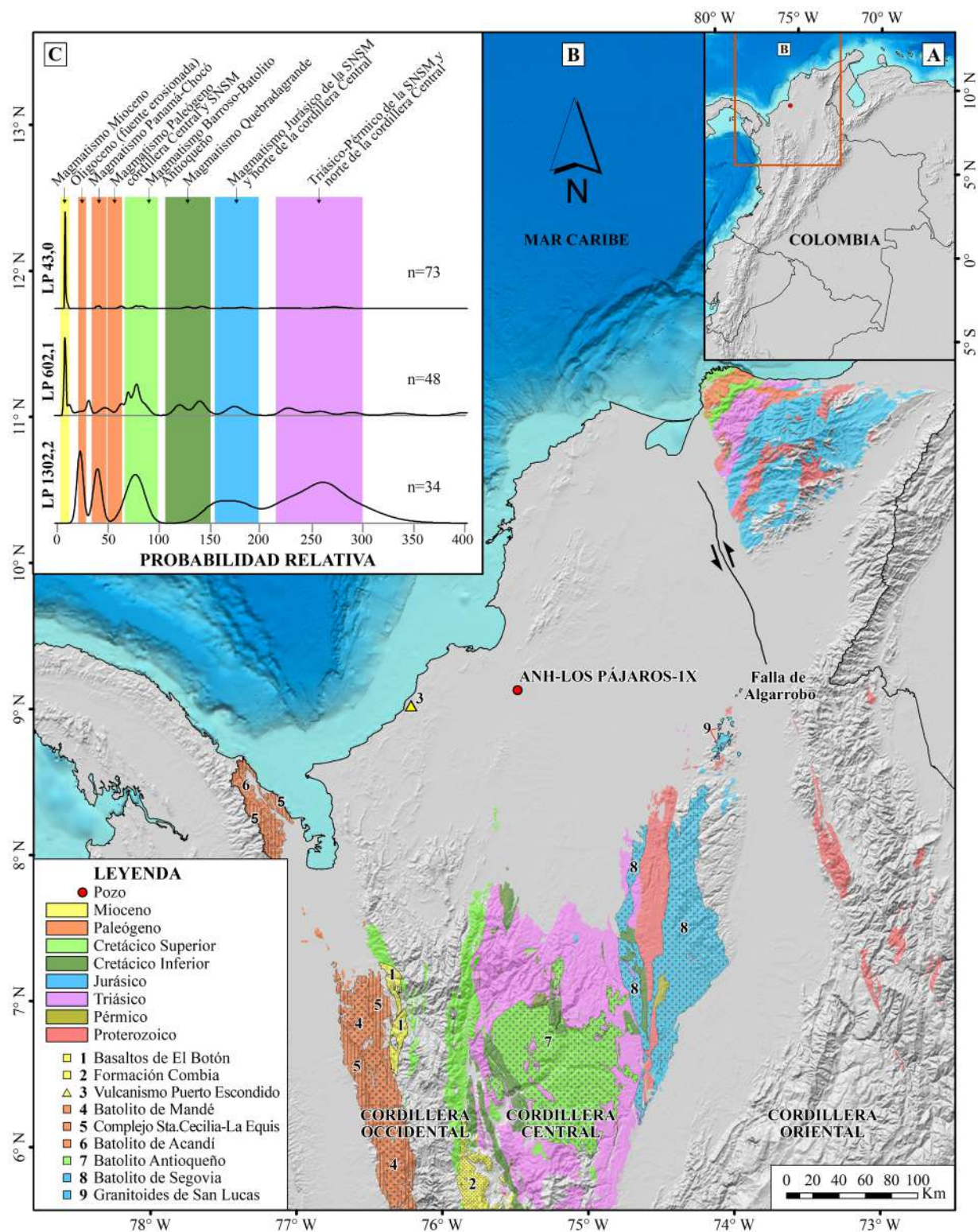


Figura 8. A. Localización del pozo ANH-Los Pájaros-IX. B. Mapa de unidades cronoestratigráficas y de algunas litoestratigráficas/litodémicas consideradas posibles fuentes de aporte al CPSJ. C. Señales poblaciones de circones de mayor probabilidad.

Por otra parte, la presencia de hornblenda, piroxeno y zeolitas se puede asociar a fuentes volcánicas (Pettijohn *et al.*, 1973) y/o a rocas plutónicas básicas. Circón, apatito, biotita, moscovita y turmalina son constituyentes comunes de rocas ígneas ácidas. Sin embargo, apatito, circón, biotita y turmalina podrían ser también derivados de rocas metamórficas (Mange y Maurer, 1992). La presencia de granate, estaurolita, epidota, titanita y clinozoicita sugiere un posible aporte de rocas metamórficas (Figura 6). De acuerdo con los diagramas ternarios de Dickinson (1985), las fuentes de detritos para el pozo ANH-Los Pájaros-1X se asocian a orógenos reciclados, arcos magmáticos y zonas de mezcla (Figura 4B).

Desde el punto de vista geocronológico, la señal más abundante de edades U/Pb de circones detríticos en las tres muestras estudiadas es de 9,9-10 Ma (Mioceno tardío), y se acentúa hacia el techo del pozo (Figura 7); esto, junto con la composición de las areniscas (fragmentos de basaltos, andesitas y accesorios de hornblenda, piroxeno y zeolita), sugiere que la principal fuente de aporte de los sedimentos a la cuenca en el Mioceno tardío fue el magmatismo Mioceno del noroccidente de Colombia p. ej., basaltos del Botón y Formación Combia (Ramírez *et al.*, 2006; Leal-Mejía, 2011; Zapata y Rodríguez, 2011; Restrepo-Moreno *et al.*, 2013; Rodríguez y Zapata, 2014; Borrero y Toro-Toro, 2016) (Figura 8). La segunda señal en orden de abundancia de edades U/Pb es del Cretácico tardío (89,6-70,8 Ma) (Figura 8), asociada a los cuerpos ígneos plutónicos de esta edad encontrados tanto en la cordillera Central (p. ej., Batolito Antioqueño; Restrepo-Moreno *et al.*, 2007, 2009; Villagómez *et al.*, 2011a; Weber *et al.*, 2011; Bayona *et al.*, 2012; Villagómez y Spikings, 2013; Horton *et al.*, 2015; Jaramillo *et al.*, 2017; Duque-Trujillo *et al.*, 2019; Cardona *et al.*, 2020) como en el basamento del VIM (Restrepo-Moreno *et al.*, 2013; Mora *et al.*, 2018; Montes *et al.*, 2021). Esta señal cretácica se asocia con la presencia de fragmentos de granitos en la petrografía convencional y con la presencia de circón, apatito, turmalina y micas en el estudio de los minerales densos. Otra posible fuente del Cretácico tardío corresponde a las rocas volcánicas básicas (basaltos) o plutónicas intermedias de la cordillera Occidental, p. ej., Formación Barroso; Plutón de Mistrató (Rodríguez *et al.*, 2013; Rodríguez y Arango, 2013; Zapata-Villada *et al.*, 2017; Pardo-Trujillo *et al.*, 2020); sin embargo, es importante anotar que los basaltos son generalmente pobres en circones. En el registro de edades U/Pb, otra señal importante es la del Pérmico/Triásico (298-215 Ma) (Figura 8), la cual, junto con los fragmentos de esquisto y cuarcitas

descritos en la petrografía convencional y la presencia de estaurolita, granate, clinozoicita, epidota y micas en el análisis de la fracción densa, sugiere una fuente metamórfica derivada del basamento típico de la actual Cordillera Central (González, 2001; Vinasco *et al.*, 2006).

Otras fuentes reconocidas en el registro de edades U/Pb de los circones detríticos son del Oligoceno, considerada fuente erosionada debido a que no se encuentran circones de esta edad en los productos magmáticos de los macizos cordilleranos circundantes a la cuenca (Gómez *et al.*, 2015), Eoceno (magmatismo hallado en unidades del BPC; Montes *et al.*, 2015), Paleoceno (magmatismo paleógeno de la cordillera Central o SNSM), Cretácico inferior (magmatismo del Complejo Quebradagrande), Jurásico (magmatismo de la SNSM y norte de la cordillera Central) (Figura 8).

La presencia de líticos sedimentarios en todas las areniscas estudiadas sugiere la erosión de algunas de las rocas sedimentarias del pre-Mioceno tardío p. ej. las formaciones San Cayetano del Paleoceno-Eoceno, Tolviejo del Eoceno, Ciénaga de Oro y Amagá del Oligoceno-Mioceno inferior. Los aportes de detritos provienen principalmente de ambientes de orógenos reciclados y de arcos magmáticos. Los orógenos, de acuerdo con la interpretación anterior de edades U/Pb y con la composición de las areniscas, podrían estar relacionados principalmente con la Cordillera Central, sin descartar aportes de la Cordillera Occidental y de la SNSM. Por su parte, las señales de arco magmático corresponderían a los basaltos del Botón y la Formación Combia situada en el cañón del Cauca (Figura 8).

Las interpretaciones anteriormente expuestas se corroboran con los datos de tres pozos localizados al sur del área de estudio en la subcuenca San Jorge del VIM y en el CPSJ, en los cuales se muestrearon los depósitos del Mioceno superior (pozos P19, P24 segmento superior y P28). Las areniscas de estos pozos fueron estudiadas composicionalmente (petrografía convencional) (Figura 10), y se analizaron las edades U/Pb en circones detríticos. Los resultados muestran señales idénticas en todos los pozos, con la señal más abundante de edades U/Pb en el Mioceno tardío (Figura 11), lo que corrobora que la principal fuente de aporte de sedimentos para el Caribe colombiano en esta temporalidad son los arcos magmáticos del Mioceno tardío del noroccidente de Colombia p. ej., basaltos del Botón, Formación Combia. Las demás fuentes discutidas (Oligoceno, Eoceno, Paleógeno, Cretácico Jurásico y Pérmico-triásico) están presentes en los cuatro pozos estudiados.

Composicionalmente, las sucesiones sedimentarias de los tres pozos del sur son más maduros que el pozo ANH-Los Pájaros-IX, y se ubican en los campos de orógeno reciclado y arcos magmáticos (Figura 9). Esto sugiere que la distribución espacial y temporal de los pozos probablemente influye en el tipo de material depositado y en los ambientes sedimentarios (Figura 11).

Se infiere así que en la subcuenca San Jorge, en el VIM, el aporte de fragmentos de rocas sedimentarias es mayor, lo que indica erosión de las unidades sedimentarias pre-Miocenas circundantes a la cuenca respecto al área central del CPSJ, donde el aporte de líticas volcánicas y plutónicas es el predominante. Para el momento de la depositación de la Formación El Cerrito ya se encontraban levantadas las cordilleras Central y Occidental, la SNSM, y la Serranía de Perijá (Duque-Caro, 1984; Restrepo-Moreno *et al.*, 2009, 2019; Villagómez *et al.*, 2011b; Villagómez y Spikings, 2013; Parra *et al.*, 2020), lo que propició la erosión de las rocas de estas provincias geológicas.

Las edades de los circones detríticos en todas las muestras del Mioceno tardío estudiadas en la cuenca

muestran señales idénticas, donde el magmatismo-vulcanismo coetáneo con la sedimentación representa la población mayoritaria. Los circones del Cretácico tardío y Triásico-Pérmico son la segunda población en abundancia y se asocian a la Cordillera Central. Las edades del Paleógeno, posiblemente representativas de litologías afines al BPC solo se distinguen en los pozos más occidentales, y una fuente de aporte del Oligoceno, que probablemente se erosionó por completo, se observa en las rocas del pozo ANH-Los Pájaros-IX. Otras señales menos frecuentes corresponden al Jurásico y Cretácico inferior. Lo anterior permite concluir que para el Mioceno superior los macizos cordilleranos adyacentes al CPSJ se encontraban levantados, y una de las principales fuentes de detritos era el basamento la Cordillera Central, así como el magmatismo-vulcanismo del Mioceno tardío. Se interpreta además aporte de las rocas de la Cordillera Occidental y de elementos lito-estructurales afines al BPC que, para este tiempo, ya se encontraba adosado al continente suramericano (Pindell y Kennan, 2001, 2009; Mantilla-Pimiento *et al.*, 2009; Farris *et al.*, 2011; Montes *et al.*, 2012, 2015) (Figura 10).

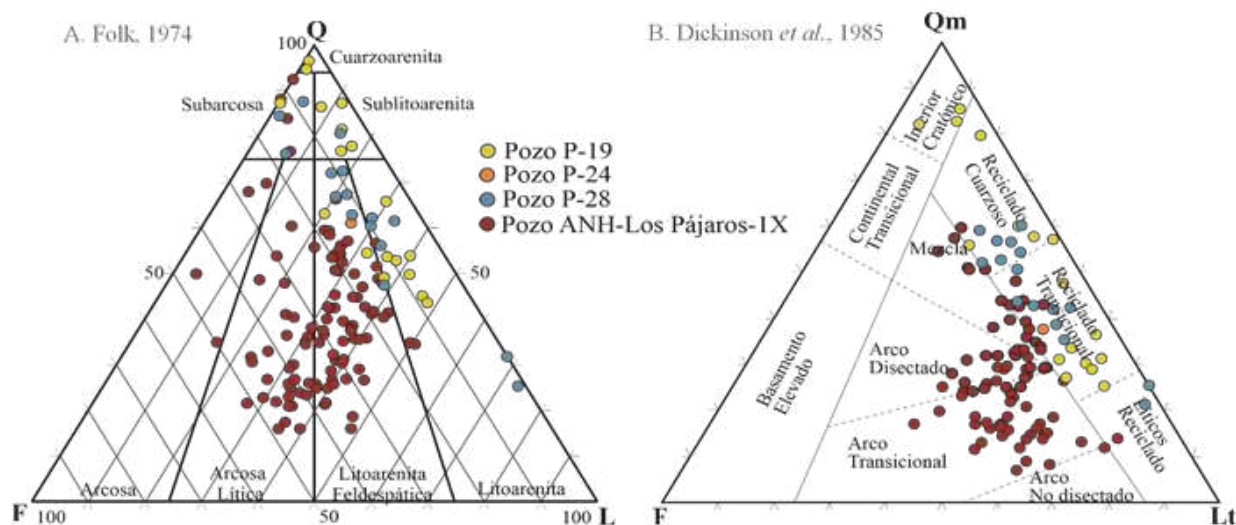


Figura 9. A. Folk, 1974. Triángulo de clasificación petrográfica y B. Dickinson, 1985. Procedencia tectónica de pozos que muestrearon el Mioceno superior en el Cinturón Plegado de San Jacinto.

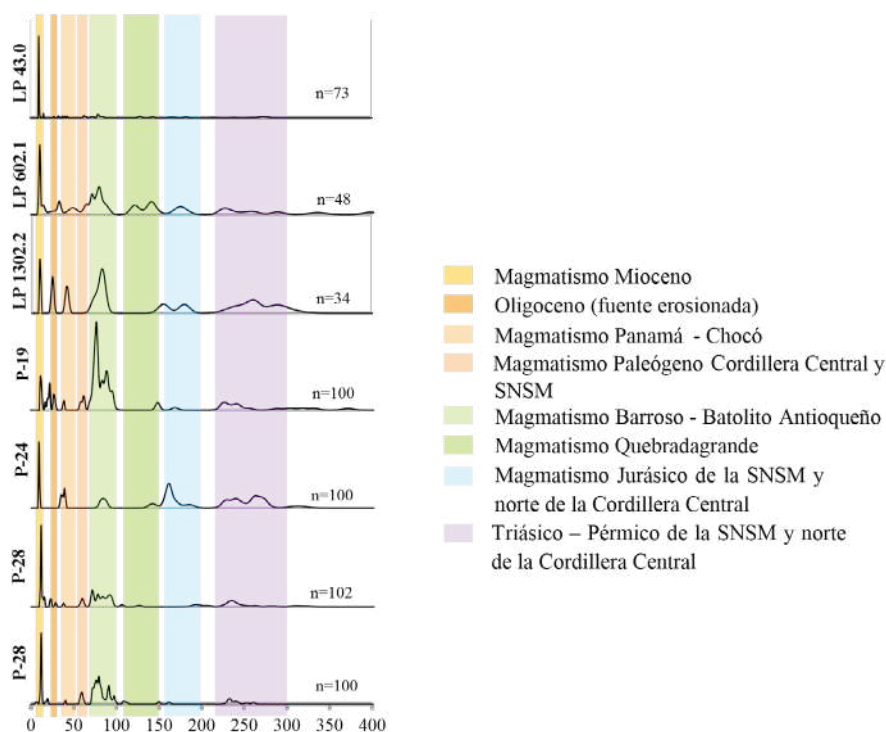


Figura 10. Señales de edades U/Pb de mayor probabilidad para las poblaciones de circones detríticos en la porción central del CPSJ y en la subcuenca San Jorge - Valle Inferior del Magdalena.

Implicaciones paleogeográficas

Con el fin de establecer cambios en las fuentes de aporte de los sedimentos durante el Mioceno superior en el Caribe colombiano, se correlacionaron los pozos del área central del Cinturón Plegado de San Jacinto y de la subcuenca San Jorge en el VIM analizados por la ANH-Universidad de Caldas (2011) en los cuales se muestrearon los depósitos del Mioceno superior (pozos P19, P24 segmento superior y P28).

Durante el Mioceno tardío en el sector donde fue perforado el pozo estudiado se estaban acumulando sedimentos en ambientes litorales, p. ej., deltaicos, llanuras mareales, *foreshore* y *shoreface*, entre otros. Los pozos ANH-Los Pájaros-1X y P28 (Figura 11) evidencian una intermitencia de incursiones marinas dentro de un ambiente de transición continental/litoral, donde se acumularon sedimentos ricos en materia orgánica vegetal, conglomerados, areniscas y lodolitas, en sistemas fluvio-deltaicos progradando en dirección NW, y en cercanía con las áreas de aporte, lo que explica la presencia de material grueso granular en las sucesiones sedimentarias estudiadas. Hacia el continente, en la subcuenca San Jorge, se encuentran los pozos P24 y P19; su registro sedimentológico indica acumulación en ambientes fluviales donde se

formaron depósitos de canal y llanuras de inundación con paleosuelos (ANH-Universidad de Caldas, 2011). Las variaciones de los ambientes de depósito encontrados en los pozos permiten sugerir un transporte de sedimentos en dirección sur a norte (Figura 11).

En la interpretación paleo-ambiental para el Mioceno superior, es importante tener en cuenta la discordancia regional del Mioceno medio, ya que se registra un cambio de ambiente de depósito de marino abierto a transicionales. Esto es particularmente claro entre los límites del CPSJ y la subcuenca Plato, donde se interpreta la línea de costa para este tiempo (GEOTEC, 2003; Guzmán, 2007; Mora *et al.*, 2018; ANH-Universidad de Caldas, 2020a, 2020b), debido al avance de secuencias progradantes de la Formación El Cerrito p. ej., Pozo ANH-Los Pájaros-1X, y sus equivalentes en el VIM, p. ej. Formación Tubará. Lo anterior puede ser evidencia de un incremento en la producción de sedimentos desde el suroriente, transportado principalmente por el proto-Cauca y proto-Magdalena, formando deltas en su desembocadura en el Caribe (Bernal-Olaya *et al.*, 2015; Mora *et al.*, 2018; ANH-Universidad de Caldas, 2020a, 2020b).

Algunos rasgos texturales permiten concluir que un número importante de material detrítico fue transportado a través de drenajes cortos que provienen de las cordilleras Central y Occidental, los cuales desembocaban en el Valle del Cauca, y continuaban su recorrido a través de drenajes largos como el proto-Cauca, en dirección sur-norte transportando sedimentos a partir del Mioceno medio (Lara *et al.*, 2018; Mora *et al.*, 2018; Osorio-Granada *et al.*, 2020).

Otra fuente puede estar relacionada con los pequeños altos de basamento expuestos en el VIM como el Alto de Magangué-Cicuco, Alto de Betulia y el Alto de Jobo (Mora *et al.*, 2018; ANH-Universidad de Caldas, 2020b), donde se han descrito rocas ígneas plutónicas y metamórficas de edades del Cretácico tardío y del Pérmico-Triásico, respectivamente (Mora *et al.*, 2018; Silva-Arias *et al.*, 2019). Adicionalmente, para el Mioceno medio se sugiere que algunos elementos lito estructurales afines al BPC ya se encontraban adosados a la margen Sur Americana. Este bloque se formó como un arco de islas que evolucionó a un arco de margen continental y colisionó a lo largo de la sutura de Uramita con la margen occidental de Colombia en varias fases entre 37 y 12 Ma, e incluso hasta el presente. Su evolución responde a más de un pulso magmático y dicha actividad finaliza con el origen del arco del Botón (Pindell y Kennan, 2009; Farris *et al.*, 2011; Montes *et al.*, 2012, 2015; O’Dea *et al.*, 2016; Zapata-García y Rodríguez-García, 2020). Este arco está formado por unidades volcánicas y plutónicas de edad Eoceno (p. ej., batolitos de Acandí y de Mandé) que como macizos cristalinos expuestos pudieron aportar detritos al CPSJ a través de sistemas fluviales o eventualmente a lo largo de corrientes marinas (Montes *et al.*, 2015). A pesar de que en el norte de Colombia no se encuentran cuerpos ígneos del Eoceno, en la literatura se reportan circones Eocenos en depósitos sedimentarios del Valle Medio del Magdalena y en la Cordillera Central (Horton *et al.*, 2010, 2015; Bayona *et al.*, 2012; O’Dea *et al.*, 2016). Elementos plutónicos del arco de Panamá se estaban erosionando desde finales del Eoceno (Montes *et al.*, 2015; Ramírez *et al.*, 2016), por lo que algunos circones de edad Eoceno (50,3-37,7 Ma), posiblemente asociadas con el BPC encontrados en este estudio, tengan justamente esa procedencia. Adicionalmente, los eventos de exhumación en Panamá central se relacionan probablemente con los eventos tectónicos del Mioceno medio y tardío, lo que permite el aporte de material a las corrientes costeras del Caribe y a los drenajes cortos que corren de sur a norte, similar al río Cauca actual, pero en una localización más hacia el occidente, probablemente un proto-Sinú.

Más al norte, en la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) se reportan eventos de exhumación importantes en el Eoceno tardío, Oligoceno tardío y Mioceno (Cardona *et al.*, 2011; Restrepo-Moreno *et al.*, 2019; Parra *et al.*, 2020), por lo que macizos de la SNSM ya se encontraban aportando material a través de corrientes fluviales secundarias en dirección nororiente-suroccidente hacia las cuencas circundantes. Sin embargo, los movimientos transcurrentes de la falla Santa Marta-Bucaramanga y Algarrobo generaron una cuenca de separación con el límite oriental del VIM actuando como una trampa de sedimentos desde el Oligoceno lo que impedía el paso de los sedimentos fluviales hacia la cuenca en cuestión (Parra *et al.*, 2020).

La conexión de los valles Medio e Inferior del Magdalena se da durante este mismo tiempo (Caballero *et al.*, 2013; Restrepo-Moreno *et al.*, 2013; Mora *et al.*, 2018; Montes *et al.*, 2021), lo que permite que el naciente río proto-Magdalena comience a aportar sedimentos procedentes del flanco oriental de la Cordillera Central, del flanco occidental de la Cordillera Oriental, del Macizo de Santander y de la Serranía de San Lucas; este río fluiría desde entonces en dirección N-NW y desembocaría en la costa del Caribe colombiano (Horton *et al.*, 2015). Sin embargo, de acuerdo con los modelos paleogeográficos propuestos para el Caribe, en el Mioceno tardío (Duque-Caro, 1979; Villamil, 1999; Mora *et al.*, 2018; ANH-Universidad de Caldas 2020b), es poco probable que dichos sedimentos del delta del proto-Magdalena lleguen hasta el área central o el sur del CPSJ, debido a que la Cordillera Central, la Serranía de San Lucas y los paleoaltos emergidos del VIM, p. ej., Alto Magangué-Cicuco, Alto de Betulia, Alto de Jobo, posiblemente actuaban como barrera al NE del CPSJ, lo que probablemente impedía el ingreso de los sedimentos transportados por la corriente del proto-Magdalena hacia esas áreas de la cuenca, continuando su curso hacia el Caribe. A partir de lo anterior es factible que se produjera una segmentación sentido SW-NE a lo largo de la margen mar-continente del NW de Suramérica (Figura 11).

De acuerdo con el esquema de desembocadura del proto-Magdalena propuesto por Mora *et al.* (2018), se considera que los sedimentos transportados por este río eran depositados en la subcuenca de Plato, cerca de la porción norte del CPSJ, generando un delta que incorpora este material al sistema sedimentario marino del Caribe. Por consiguiente, algunos de estos detritos podrían llegar hasta la posición del pozo ANH-Los Pájaros-1X por corrientes de tipo *longshore*. En contraste, se tienen otras corrientes paleofluviales como

la del proto-Cesar que corre en dirección nororientesuroccidente, entregando sus aguas al proto-Magdalena en el norte, por lo que, como se indicó anteriormente,

los detritos transportados de la SNSM probablemente no alcanzan a depositarse en la parte central y sur del CPSJ (Figura 11).

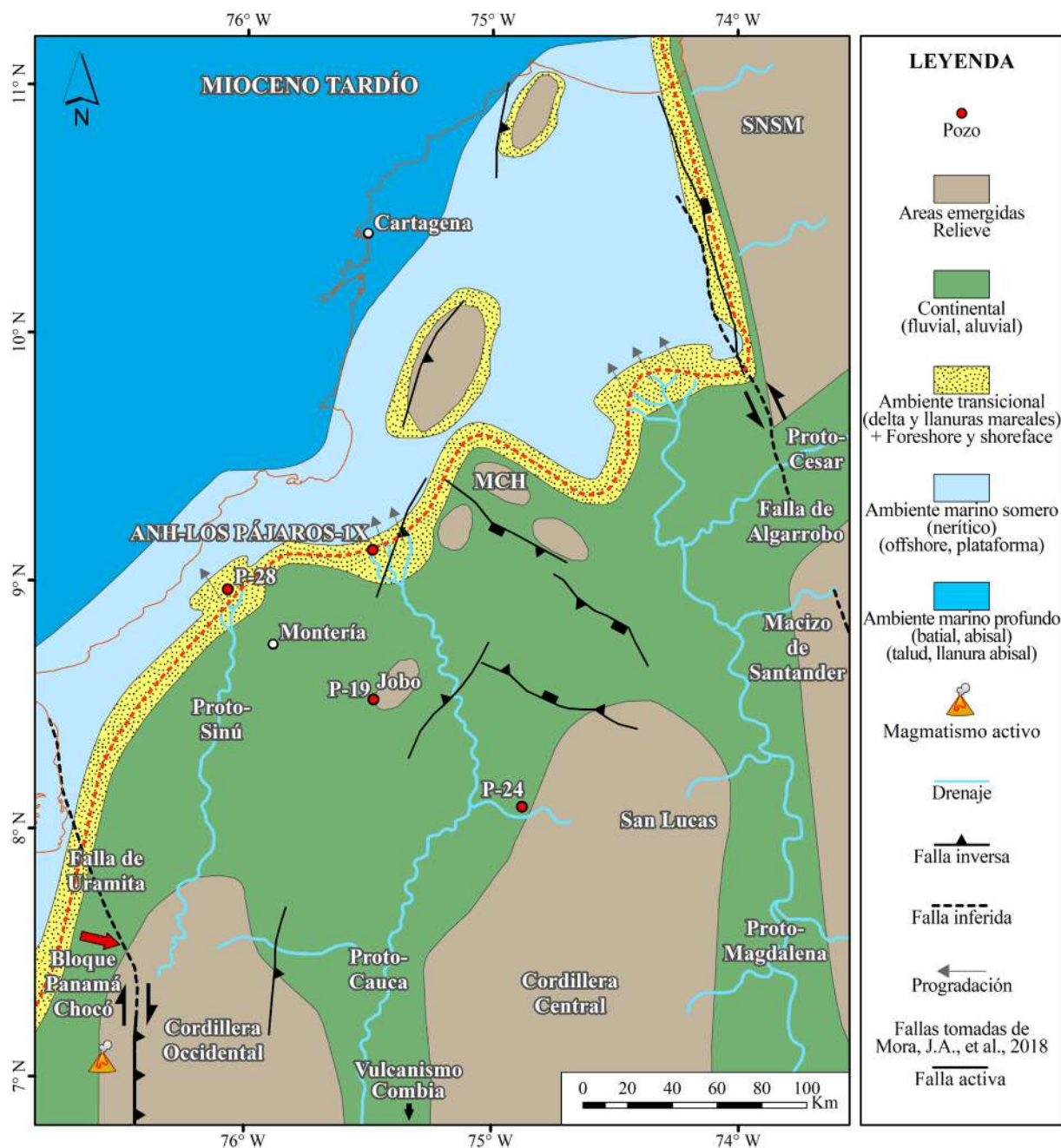


Figura 11. Modelo paleogeográfico propuesto para el Mioceno superior a partir de los resultados obtenidos en este trabajo. Generado a partir de Ayala-Calvo *et al.* (2009), Restrepo-Moreno *et al.* (2009), Montes *et al.* (2010, 2015), ANH-Universidad de Caldas (2011), Villagómez *et al.* (2011b), Bayona *et al.* (2012), Cardona *et al.* (2012), Caballero *et al.* (2013), Gómez *et al.* (2015), Horton *et al.* (2015), Mora *et al.* (2018), y Parra *et al.* (2020).

Conclusiones

El pozo ANH-Los Pajaros-IX posee un registro sedimentario acumulado en un ambiente deltaico, con mayor influencia fluvial hacia el techo. Los resultados de este trabajo muestran señales petrográficas, de minerales densos y geocronológicas relativamente constantes en el tiempo pero que cambian en proporción. Sus sedimentos provienen de diferentes fuentes, tanto ígneas, como sedimentarias y metamórficas. Las áreas de aporte más probables corresponden a los basamentos de las cordilleras Central y Occidental, así como algunos paleoaltos presentes en la subcuenca San Jorge (VIM). La presencia de circones del Eoceno podría estar relacionada con el aporte de unidades asociadas al BPC.

En cuanto a los circones detríticos se identifica una marcada señal del Mioceno tardío, posiblemente procedente de las rocas volcánicas de la Cordillera Occidental y del vulcanismo del cañón del Cauca (p. ej. Formación Combia). La edad U/Pb de máxima depositación indica que los estratos presentes en el pozo no alcanzan edades más antiguo del Mioceno tardío.

Agradecimientos

Los autores de este estudio agradecen a la Agencia Nacional de Hidrocarburos por permitir el uso del material del pozo ANH-Los Pájaros-IX y la divulgación de la información; al Instituto de Investigaciones en Estratigrafía (IIES) de la Universidad de Caldas, perteneciente a la red Nacional de Laboratorios en Geociencias (RNLG), por su apoyo durante la etapa analítica e interpretación de los resultados. Especial agradecimiento al Grupo de Investigación en Estratigrafía y Vulcanología -GIEV- “Cumanday” por todas las discusiones y aportes generados; a la doctora María Isabel Cerón (Universidad EAFIT) y al Grupo de Estudios Tectónicos GET (UNAL) por el apoyo en la preparación de muestras y por las observaciones al momento de revisar el trabajo preliminar, las cuales permitieron mejorar el texto en diferentes aspectos.

Referencias

ANH-Universidad de Caldas. (2009). Estudio integrado de los núcleos y registros obtenidos de los pozos someros tipo “*Slim holes*” en la Cuenca del Sinú. Informe Final. Tomos I y II.

ANH-Universidad de Caldas. (2011). Estudio integrado de los núcleos y registros obtenidos de los pozos

someros tipo “*Slim holes*” perforados por la ANH. Informe Final.

ANH-Universidad de Caldas. (2016). Estratigrafía del Cretácico Superior - Paleógeno del sector Sinú - San Jacinto, Caribe Colombiano: Aporte al conocimiento de su evolución geológica y sistemas petrolíferos. Informe Final.

ANH-Universidad de Caldas. (2020a). Integración geológica, evaluación de los sistemas petrolíferos y prospectividad de las cuencas frontera de Colombia: cuencas Urabá, Sinú-San Jacinto y subcuenca San Jorge (VIM). Informe de integración.

ANH-Universidad de Caldas. (2020b). Evolución geológica, sistemas petrolíferos y prospectividad del gas en la Subcuenca Plato (Valle Inferior del Magdalena-VIM). Informe de integración.

Ayala-Calvo, R.; Bayona-Chaparro, G.; Ojeda-Marulanda, C.; Cardona, A.; Valencia, V.; Padrón, C.; Yoris, F.; Mesa-Salamanca, J.; García, A. (2009). Estratigrafía y procedencia de las unidades comprendidas entre el Campaniano y el Paleógeno en la subcuenca de Cesar: aportes a la evolución tectónica del área. *Geología Colombiana*, 34, 3-34.

Barbosa-Espitia, A.; Foster, D.; Restrepo, S.; Botero, M.; Min, K.; Pardo, A. (en revisión). Erosional Exhumation of the NW South American Continental Margin Initiated by Caribbean Plate Subduction and Accretion of the Panama Arc. *Tectonics*.

Basu, A.; Young, S.W.; Suttner, L.J.; James, L.J.; Mack, G.H. (1975). Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation. *Journal of Sedimentary Research*, 45(4), 873-882. <https://doi.org/10.1306/212F6E6F-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Bayona, G.; Lamus-Ochoa, F.; Cardona, A.; Jaramillo, C.; Montes, C.; Tchegliakova, N. (2007). Procesos orogénicos del Paleoceno para la cuenca de Ranchería (Guajira, Colombia) y áreas adyacentes definidos por análisis de procedencia. *Geología Colombiana*, 32, 21-46.

- Bayona, G.; Cardona, A.; Jaramillo, C.; Mora, A.; Montes, C.; Valencia, V.; Ayala, C.; Montenegro, O.; Ibáñez-Mejía, M. (2012). Early Paleogene magmatism in the northern Andes: Insights on the effects of Oceanic Plateau-continent convergence. *Earth and Planetary Science Letters*, 331-332, 97-111. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.03.015>
- Bernal-Olaya, R.; Mann, P.; Escalona, A. (2015). Cenozoic Tectonostratigraphic Evolution of the Lower Magdalena Basin, Colombia: An Example of an Under- to Overfilled Forearc Basin. In: C. Bartolini, P. Mann (eds.). *Petroleum geology and potential of the Colombian Caribbean Margin* (pp. 345-398). AAPG Memoir, vol. 108. <https://doi.org/10.1306/13531943M1083645>
- Borrero, C.; Toro-Toro, L.M. (2016). Vulcanismo de afinidad adaquítica en el miembro inferior de la Formación Combia (Mioceno tardío) al sur de la subcuenca de Amagá, noroccidente de Colombia. *Boletín de Geología*, 38(1), 87-100. <https://doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016005>
- Caballero, V.; Mora, A.; Quintero, I.; Blanco, V.; Parra, M.; Rojas, L.E.; López, C.; Sánchez, N.; Horton, B.K.; Stockli, D.; Duddy, I. (2013). Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: The Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. *Geological Society, London, Special Publications*, 377, 315-342. <https://doi.org/10.1144/SP377.12>
- Cáceres, C.; de Porta, J. (1972). Contribution a la géologie de la Serranía de San Jacinto entre Toluviejo et Chalán, Colombie, S.A. C.R.S. Société Géologique de France.
- Cardona, A.; Valencia, V.; Weber, M.; Duque, J.; Montes, C.; Ojeda, G.; Reiners, P.; Domanik, K.; Nicolescu, S.; Villagómez, D. (2011). Transient Cenozoic tectonic stages in the southern margin of the Caribbean plate: U-Th/He thermochronological constraints from Eocene plutonic rocks in the Santa Marta massif and Serranía de Jarara, northern Colombia. *Geologica Acta*, 9(3-4), 445-466. <https://doi.org/10.1344/105.000001739>
- Cardona, A.; Montes, C.; Ayala, C.; Bustamante, C.; Hoyos, N.; Montenegro, O.; Ojeda, C.; Niño, H.; Ramírez, V.; Valencia, V.; Rincón, D.; Vervoort, J.; Zapata, S. (2012). From arc-continent collision to continuous convergence, clues from Paleogene conglomerates along the southern Caribbean-South America plate boundary. *Tectonophysics*, 580, 58-87. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.039>
- Cardona, A.; León, S.; Jaramillo, J.S.; Valencia, V.; Zapata, S.; Pardo-Trujillo, A.; Schmitt, A.K.; Mejía, D.; Arenas, J.C. (2020). Cretaceous record from a Mariana- to an Andean-type margin in the Central Cordillera of the Colombian Andes. In: J. Gómez, A.O. Pinilla-Pachón (eds.). *The Geology of Colombia* (pp. 353-395). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.10>
- Cediel, F.; Shaw, R.P.; Cáceres, C. (2003). Tectonic assembly of the Northern Andean Block. In: C. Bartolini, R.T. Buffler, J. Blickwede (eds.). *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation, and plate tectonics* (pp. 815-848). AAPG, vol.79. <https://doi.org/10.1306/M79877C37>
- Clavijo, J.; Barrera, R. (2001). Geología de la Plancha 44 Sincelejo y 52 Sahagún. Memoria explicativa. Escala 1:100.000,17-48. INGEOMINAS. Bogotá.
- Díaz-Jaramillo, A.D. (2017). Palinología del pozo ANH-Los Pájaros-1X (Cinturón de San Jacinto, Caribe colombiano): reconstrucción de la historia de la vegetación y de los cambios en el nivel relativo del mar durante el Mioceno Medio-Tardío. MSc. Tesis, Universidad de Caldas, Colombia.
- Dickinson, W.R. (1985). Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: G.G. Zuffa (ed.). *Provenance of arenites* (pp. 333-361). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_15
- Dickinson, W.R.; Gehrels, G.E. (2009). Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1-2), 115-125. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.013>
- Dueñas, H.; Duque, H. (1981). Geología del cuadrángulo F-8, Planeta Rica. *Boletín Geológico*, 24(1), 1-35.

- Duque-Caro, H. (1973). Los foraminíferos planctónicos y el terciario de Colombia. Informe 1651, INGEOMINAS, Bogotá.
- Duque-Caro, H. (1979). Major structural elements and evolution of northwestern Colombia. In: J.S. Watkins, L. Montadert; P.W. Dickerson (eds.). *Geological and Geophysical Investigations of Continental Margins* (pp. 329-351). AAPG. <https://doi.org/10.1306/M29405C22>
- Duque-Caro, H. (1984). Structural style, diapirism, and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto terrane, Southwestern Caribbean Borderland. In: W.E. Bonini, R.B. Hargraves, R. Shagam (eds.). *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics* (pp. 303-316). Geological Society of America Memoirs, vol. 162. <http://doi.org/10.1130/MEM162-p303>
- Duque-Palacio, S.; Seward, D.; Restrepo-Moreno, S.A.; García-Ramos, D. (2021). Timing and rates of morpho-tectonic events in a segment of the Central and Western cordilleras of Colombia revealed through low-temperature thermochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103085. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103085>
- Duque-Trujillo, J.; Bustamante, C.; Solari, L.; Gómez-Mafla, Á.; Toro-Villegas, G.; Hoyos, S. (2019). Reviewing the Antioquia batholith and satellite bodies: a record of Late Cretaceous to Eocene syn- to post-collisional arc magmatism in the Central Cordillera of Colombia. *Andean Geology*, 46(1), 82-101. <https://doi.org/10.5027/andgeov46n1-3120>
- Farris, D.W.; Jaramillo, C.; Bayona, G.; Restrepo-Moreno, S.A.; Montes, C.; Cardona, A.; Mora, A.; Speakman, R.J.; Glascock, M.D.; Valencia, V. (2011). Fracturing of the Panamanian Isthmus during initial collision with South America. *Geology*, 39(11), 1007-1010. <https://doi.org/10.1130/G32237.1>
- Folk, R.L. (1974). *Petrology of the sedimentary rocks*. Hemphill Publishing Company.
- GEOTEC. (2003). Geología de los cinturones Sinú - San Jacinto. Planchas 50, 51 59, 60, 61, 69, 70, 71, 79, 80. GEOTEC Ltda-INGEOMINAS, Bogotá.
- Gómez, J.; Montes, N.E.; Nivia, Á.; Diederix, H.; compiladores. (2015). Mapa Geológico de Colombia 2015. Escala 1:1 000 000. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- González, H. (2001). Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Secretaría del Medio Ambiente, Colombia.
- Guzmán, G.; Gómez, E.; Serrano, B.E. (2004). Geología de los cinturones del Sinú, San Jacinto y borde occidental del Valle Inferior del Magdalena. Caribe colombiano. Escala 1:300.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- Guzmán, G. (2007). Stratigraphy and sedimentary environment and implications in the Plato Basin and the San Jacinto Belt Northwestern Colombia. PhD. Thesis, University of Liège, Belgium.
- Herold, N.; Müller, R.D.; Seton, M. (2010). Comparing early to middle Miocene terrestrial climate simulations with geological data. *Geosphere*, 6(6), 952-961. <https://doi.org/10.1130/GES00544.1>
- Horton, B.K.; Saylor, J.E.; Nie, J.; Mora, A.; Parra, M.; Reyes-Harker, A.; Stockli, D.F. (2010). Linking sedimentation in the northern Andes to basement configuration, Mesozoic extension, and Cenozoic shortening: Evidence from detrital zircon U-Pb ages, Eastern Cordillera, Colombia. *GSA Bulletin*, 122(9-10), 1423-1442. <https://doi.org/10.1130/B30118.1>
- Horton, B.K.; Anderson, V.J.; Caballero, V.; Saylor, J.E.; Nie, J.; Parra, M.; Mora, A. (2015). Application of detrital zircon U-Pb geochronology to surface and subsurface correlations of provenance, paleodrainage, and tectonics of the Middle Magdalena Valley Basin of Colombia. *Geosphere*, 11(6), 1790-1811. <https://doi.org/10.1130/GES01251.1>
- Ingersoll, R.V.; Bullard, T.F.; Ford, R.L.; Grimm, J.P.; Pickle, J.D.; Sares, S.W. (1984). The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Research*, 54(1), 103-116. <https://doi.org/10.1306/212F83B9-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- Jaramillo, C.; Rueda, M.; Torres, V. (2011). A palynological zonation for the Cenozoic

- of the Llanos and Llanos Foothills of Colombia. *Palynology*, 35(1), 46-84. <http://doi.org/10.1080/01916122.2010.515069>
- Jaramillo, J.S.; Cardona, A.; León, S.; Valencia, V.; Vinasco, C. (2017). Geochemistry and geochronology from Cretaceous magmatic and sedimentary rocks at 6°35' N, western flank of the Central cordillera (Colombian Andes): Magmatic record of arc growth and collision. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 460-481. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.04.012>
- Kochelek, E.J.; Amato, J.M.; Pavlis, T.L.; Clift, P.D. (2011). Flysch depositional and preservation of coherent bedding in an accretionary complex. Detrital zircon ages from the Upper Cretaceous Valdez Group, Chugach terrane, Alaska. *Lithosphere*, 3(4), 265-274. <https://doi.org/10.1130/L131.1>
- Lara, M.; Salazar-Franco, A.M.; Silva-Tamayo, J.C. (2018). Provenance of the Cenozoic siliciclastic intramontane Amagá Formation: Implications for the early Miocene collision between Central and South America. *Sedimentary Geology*, 373, 147-162. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.06.003>
- Leal-Mejía, H. (2011). Phanerozoic gold metallogeny in the colombian Andes: A tectono/magmatic approach. Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, Barcelona, España.
- Leisen, M.; Barra, F.; Romero, R.; Morata, D.; Reich, M. (2015). Geocronología U-Pb de circones mediante ablación láser acoplado a un ICP-MS muticolector: metodología utilizada en el Laboratorio de Geoquímica Isotópica del Centro Fondap CEGA, Universidad de Chile. *XIV Congreso Geológico Chileno*, La Serena, Chile.
- Mange, M.A.; Maurer, H.F.W. (1992). *Heavy minerals in colour*. 1st ed. Chapman y Hall.
- Mantilla-Pimiento, A.M.; Jentzsch, G.; Kley, J.; Alfonso-Pava, C. (2009). Configuration of the Colombian Caribbean Margin: Constraints from 2D Seismic Reflection data and Potential Fields Interpretation. In: S. Lallemand, F. Funiciello (eds.). *Subduction Zone Geodynamics* (pp. 247-271). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87974-9_13
- Montes, C.; Guzman, G.; Bayona, G.; Cardona A.; Valencia, V.; Jaramillo, C. (2010). Clockwise rotation of the Santa Marta massif and simultaneous Paleogene to Neogene deformation of the Plato-San Jorge and Cesar-Ranchería basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(4), 832-848. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.010>
- Montes, C.; Bayona, G.; Cardona, A.; Buchs, D.M.; Silva, C.A.; Morón, S.; Hoyos, N.; Ramírez, D.A.; Jaramillo, C.A.; Valencia, V. (2012). Arc-continent collision and orocline formation: Closing of the Central American seaway. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B4). <https://doi.org/10.1029/2011JB008959>
- Montes, C.; Cardona, A.; Jaramillo, C.; Pardo, A.; Silva, J.C.; Valencia, V.; Ayala, C.; Pérez-Angel, L.C.; Rodríguez-Parra, L.A.; Ramírez, V.; Niño, H. (2015). Middle Miocene closure of the Central American Seaway. *Science*, 348(6231), 226-229. <https://doi.org/10.1126/science.aaa2815>
- Montes, C.; Silva, C.A.; Bayona, G.A.; Villamil, R.; Stiles, E.; Rodríguez-Corcho, A.F.; Beltrán-Triviño, A.; Lamus, F.; Muñoz-Granados, M.D.; Pérez-Angel, L.C.; Hoyos, N.; Gómez, S.; Galeano, J.J.; Romero, E.; Baquero, M.; Cardenas-Rozo, A.L.; von Quadt, A. (2021). A Middle to Late Miocene Trans-Andean Portal: Geologic Record in the Tatacoa Desert. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.587022>
- Mora, A.; Reyes-Harker, A.; Rodríguez, G.; Tesón, E.; Ramírez-Arias, J.C.; Parra, M.; Caballero V.; Mora, J.P.; Quintero, I.; Valencia, V.; Ibáñez, M.; Horton, B.K.; Stockli, D.F. (2013). Inversion tectonics under increasing rates of shortening and sedimentation: Cenozoic example from the Eastern Cordillera of Colombia. *Geological Society, London, Special Publication*, 377, 411-442. <https://doi.org/10.1144/SP377.6>
- Mora, J.A.; Oncken, O.; Le Breton, E.; Mora, A.; Veloza, G.; Vélez, V.; de Freitas, M. (2018). Controls on forearc basin formation and evolution: Insights from Oligocene to Recent tectono-stratigraphy of the Lower Magdalena Valley basin of northwest Colombia. *Marine and Petroleum Geology*, 97, 288-310. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.06.032>

- Noriega-Londoño, S.; Restrepo-Moreno, S.A.; Vinasco, C.; Bermúdez, M.A.; Min, K. (2020). Thermochronologic and geomorphometric constraints on the Cenozoic landscape evolution of the Northern Andes: Northwestern Central Cordillera, Colombia. *Geomorphology*, 351, 106890. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106890>
- O’Dea, A.; Lessios, H.A.; Coates, A.G.; Eytan, R.I.; Restrepo-Moreno, S.A.; Cione, A.L.; Collins, L.S.; De Queiroz, A.; Farris, D.W.; Norris, R.D.; Stallard, R.F.; Woodburne, M.O.; Aguilera, O.; Aubry, M.P.; Berggren, W.A.; Budd, A.F.; Cozzuol, M.A.; Coppard, S.E.; Duque-Caro, H.; Finnegan, S.; Gasparini, G.; Grossman, E.L.; Johnson, K.G.; Keigwin, L.D.; Knowlton, N.; Leigh, E.G.; Leonard-Pingel, J.S.; Marko, P.B.; Pyenson, N.D.; Rachello-Dolmen, P.G.; Soibelzon, E.; Soibelzon, L.; Todd, J.A.; Vermeij, G.J.; Jackson, J.B.C. (2016). Formation of the Isthmus of Panama. *Science Advances*, 2(8), 1-12. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600883>
- Osorio-Granada, E.; Pardo-Trujillo, A.; Restrepo-Moreno, S.A.; Gallego, F.; Muñoz, J.; Plata, A.; Trejos-Tamayo, R.; Vallejo, F.; Barbosa-Espitia, A.; Cardona-Sánchez, F.J.; Foster, D.A.; Kamenov, G. (2020). Provenance of Eocene-Oligocene sediments in the San Jacinto Fold Belt: Paleogeographic and geodynamic implications for the northern Andes and the southern Caribbean. *Geosphere*, 16(1), 210-228. <https://doi.org/10.1130/GES02059.1>
- Pardo-Trujillo, A.; Mora, C.; Gallego, N.F.; Rendón, L.; Arenas, A.; Echeverry, S.; Osorno, J.F. (2020). Potencial petrolífero en la sub-cuenca Plato (Valle Inferior del Magdalena, Caribe colombiano). ANH PLAN 2020. Aportes a la exploración de hidrocarburos en Colombia.
- Parra, M.; Echeverri, S.; Patiño, A.M.; Ramírez, J.C.; Mora, A.; Sobel, E.R.; Almendral, A.; Pardo-Trujillo, A. (2020). Cenozoic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. In: J. Gómez, D. Mateus-Zabala (eds.). *The Geology of Colombia* (pp. 185-213). Volume 3. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.07>
- Pettijohn, F.J.; Potter, P.E.; Siever, R. (1973). *Sand and Sandstones*. Springer.
- Pindell, J.; Kennan, L. (2001). Kinematic Evolution of the Gulf of Mexico and Caribbean. In: R.H. Fillon, N.C. Rosen, P. Weimer, A. Lowrie, H. Pettingill, R.L. Phair, H.H. Roberts, H.H. van Hoom (eds.). *Petroleum Systems of Deep-Water Basins: Global and Gulf of Mexico Experience* (pp. 193-220) GCS. <https://doi.org/10.5724/gcs.01.21.0193>
- Pindell, J.; Kennan, L.; Maresch, W.V.; Stanek, K.P.; Draper, G.; Higgs, R. (2005). Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins. In: H.G.A. Lallemand, V.B. Sisson (eds.). *Caribbean-South American plate interactions, Venezuela* (pp. 7-52). Geological Society of America, vol. 394. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2394-9.7>
- Pindell, J.; Kennan, L. (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. *Geological Society, London, Special Publication*, 328, 1-55. <https://doi.org/10.1144/SP328.1>
- Ramírez, D.A.; López, A.; Sierra, G.M.; Toro, G.E. (2006). Edad y proveniencia de las rocas volcánicas sedimentarias de la Formación Combia en el suroccidente antioqueño Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 19, 9-26.
- Ramírez, D.A.; Foster, D.A.; Min, K.; Montes, C.; Cardona, A.; Sadove, G. (2016). Exhumation of the Panama basement complex and basins: Implications for the closure of the Central American seaway. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(5), 1758-1777. <https://doi.org/10.1002/2016GC006289>
- Restrepo-Moreno, S.A.; Foster, D.A.; Kamenov, G. (2007). Formation age and magma sources for the Antioqueño Batholith derived from LA-ICP-MS uranium-lead dating and hafnium-isotope analysis of zircon grains. *GSA Meeting*, Denver.
- Restrepo-Moreno, S.A.; Foster, D.A.; Stockli, D.F.; Parra-Sánchez, L.N. (2009). Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes (Colombia) from apatite (U-Th)/He thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 278(1-2), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.037>

- Restrepo-Moreno, S.; Min, K.; Bernet, M.; Barbosa, A.; Marín-Cerón, M.; Juliana, J.; Hardwick, E.; Pardo, A. (2013). Thermotectonic history of the Farallones del Citará batholith (Colombia's Western Cordillera) through multi-system, vertical profile thermochronology/geochronology: tectonic, geomorphic and climatic implications. *XIV Congreso Colombiano de Geología*, Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.23860.86409>
- Restrepo-Moreno, S.A.; Foster, D.A.; Bernet, M.; Min, K.; Noriega, S. (2019). Morphotectonic and orogenic development of the northern Andes of Colombia: A low-temperature thermochronology perspective. In: F. Cediél, R.P. Shaw (eds.). *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 749-832). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_11
- Rodríguez, G.; Zapata, G. (2012). Características del plutonismo Mioceno superior en el segmento norte de la Cordillera Occidental e implicaciones tectónicas en el modelo geológico del Noroccidente colombiano. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 31, 5-22.
- Rodríguez, G.; Arango, M.I. (2013). Formación Barroso: Arco volcánico toleítico y Diabasas de San José de Urama: Un prisma acrecionario T-Morb en el segmento norte de la Cordillera Occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 33, 17-38.
- Rodríguez, G.; Bermúdez, J.G.; Zapata, G.; Arango, M.I.; Arenas, J.E. (2013). Cartografía geológica de la plancha 62 la Ye, departamentos de Córdoba y Sucre. Servicio Geológico Colombiano.
- Rodríguez, G.; Zapata, G. (2014). Descripción de una nueva unidad de lavas denominada Andesitas basálticas de El Morito - correlación regional con eventos magmáticos de arco. *Boletín de Geología*, 36(1), 85-102.
- Salazar-Ortiz, E.A.; Rincón-Martínez, D.; Páez, L.A.; Restrepo, S.M.; Barragán, S. (2020). Middle Eocene mixed carbonate-siliciclastic systems in the southern Caribbean (NW Colombian margin). *Journal of South American Earth Sciences*, 99, 102507. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102507>
- Scholz, S.R.; Petersen, S.V.; Escobar, J.; Jaramillo, C.; Hendy, A.J.W.; Allmon, W.D.; Curtis, J.H.; Anderson, B.M.; Hoyos, N.; Restrepo, J.C.; Perez, N. (2020). Isotope sclerochronology indicates enhanced seasonal precipitation in northern South America (Colombia) during the Mid-Miocene Climatic Optimum. *Geology*, 48(7), 668-672. <https://doi.org/10.1130/G47235.1>
- Silva-Arias, A.; Páez-Acuña, L.A.; Gómez-Gutiérrez, P.D.; Rincón-Martínez, D.A. (2019). Estudio petrográfico y posibles fuentes de los clastos basales de la Formación San Cayetano hacia el sur del Cinturón Plegado de San Jacinto, norte de Colombia. *Boletín de Geología*, 41(1), 15-28. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019001>
- Tortosa, A.; Palomares, M.; Arribas, J. (1988). Tipologías de cuarzo como indicadores de la procedencia en areniscas: excepciones al método de Basu *et al.* (1975). *Estudios Geológicos*, 44(5-6), 385-390. <https://doi.org/10.3989/egeol.88445-6554>
- Villagómez, D.; Spikings, R.; Magna, T.; Kammer, A.; Winkler, W.; Beltrán, A. (2011a). Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos*, 125(3-4), 875-896. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>
- Villagómez, D.; Spikings, R.; Mora, A.; Guzmán, G.; Ojeda, G.; Cortés, E.; Van Der Lelij, R. (2011b). Vertical tectonics at a continental crust-oceanic plateau plate boundary zone: Fission track thermochronology of the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Tectonics*, 30(4). <https://doi.org/10.1029/2010TC002835>
- Villagómez, D.; Spikings, R. (2013). Thermochronology and tectonics of the Central and Western Cordilleras of Colombia: Early Cretaceous-Tertiary evolution of the Northern Andes. *Lithos*, 160-161, 228-249. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.12.008>
- Villamil, T. (1999). Campanian-Miocene tectonostratigraphy, depocenter evolution and basin development of Colombia and western Venezuela. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 153(1-4), 239-275. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00075-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00075-9)
- Vinasco, C.J.; Cordani, U.G.; González, H.; Weber, M.; Pelaez, C. (2006). Geochronological,

- isotopic, and geochemical data from Permo-Triassic granitic gneisses and granitoids of the Colombian Central Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 355-371. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.007>
- Weber, M.; Gómez-Tapias, J.; Duarte, E.; Cardona, A.; Vinasco-Vallejo, C.J. (2011). Geochemistry of the Santa Fe Batholith in NW Colombia: Remnant of an accreted Cretaceous arc. *XIV Congreso Latinoamericano de Geología*, Medellín, Colombia. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32151.57769>
- Zapata, S.; Weber, M.; Cardona, A.; Valencia, V.; Guzmán, G.; Tobón, M. (2010). Provenance of oligocene conglomerates and associated sandstones from the Siamaná Formation, Serranía de Jarara, Guajira, Colombia: implications for Oligocene Caribbean-South American Tectonics. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 27, 7-24.
- Zapata, G.; Rodríguez, G. (2011). Basalto de El Botón, arco volcánico mioceno de afinidad shoshonítica al norte de la cordillera occidental de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 30, 77-92.
- Zapata-García, G.; Rodríguez-García, G. (2020). New contributions to the knowledge about the Chocó-Panamá Arc in Colombia, including a new segment south of Colombia. In: J. Gómez, D. Mateus-Zabala (eds.). *The Geology of Colombia* (pp. 417-450). Volume 3, Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.37.2019.14>
- Zapata-Villada, J.P.; Restrepo, J.J.; Cardona-Molina, A.; Martens, U. (2017). Geoquímica y geocronología de las rocas volcánicas básicas y el Gabro de Altamira, Cordillera Occidental (Colombia): Registro de ambientes de plateau y arco oceánico superpuestos durante el cretácico. *Boletín de Geología*, 39(2), 13-30. <https://doi.org/10.18273/revbol.v39n2-2017001>

Fecha de recibido: 20 de octubre de 2021

Fecha de aprobado: 21 de julio de 2022
