

Edad U-Pb LA-ICP-MS en circones de las areniscas de la Formación San José en Ciudad de Piedra y de neises Mesoproterozoicos en Guaviare, Colombia

Jose Alejandro Franco^{1*} ; Thomas Cramer¹ ; Amed Bonilla¹ ;
Milton Santos¹ ; Rosario López^{1,2} ; Judith Trujillo^{1,3} 

¹Grupo de Estudios en Geología Económica y Mineralogía Aplicada GEGEMA, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. (*) jafrancov@unal.edu.co; thcramer@unal.edu.co; abonillape@unal.edu.co; masantoss@unal.edu.co; mdllopezp@unal.edu.co; jutrujillot@unal.edu.co

²Grupo de Investigación Espacio y Territorio, Facultad de Artes, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

³Grupo de Investigación del Patrimonio Rupestre Indígena (GIPRI), Corporación GIPRI, Bogotá, Colombia.

Resumen

Los resultados aquí presentados describen parte de la geomorfología única al sur de la ciudad de San José del Guaviare, donde areniscas conforman mesetas de poca elevación que han sufrido procesos kársticos en Ciudad de Piedra siguiendo estructuras (NE-SW - NW-SE) preferencialmente. Las areniscas pertenecientes al Miembro Basal Ciudad de Piedra de la Formación San José contienen icnofósiles, y petrográficamente se observa predominancia de cuarzo de grano medio redondeado y cementado por sílice que otorga mayor resistencia, sobre un 5% restante que corresponde a líticos metamórficos y volcánicos, feldspatos, micas, opacos y circones. Análisis U-Pb LA-ICP-MS en estos circones mostraron edades proterozoicas con picos entre 1000 a 1800 Ma, mientras circones extraídos de un neis cerca de Cerritos, El Capricho, revelaron una edad concordante de 1317±4 Ma, interpretada como edad del protolito. Los datos obtenidos confirman que el basamento cristalino en el área de estudio pertenece al Cratón Amazónico y que los sedimentos que dieron origen a las areniscas de la Formación San José provienen de este basamento compuesto principalmente por neises y granitoides. Posteriormente, el basamento fue intruído por la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare (~602 Ma), la cual aflora en contacto tectónico fallado con la Formación San José en cercanías a Ciudad de Piedra.

Palabras clave: Paisaje geológico; Ciudad de Piedra; Proveniencia; Edad U-Pb; Circón.

U-Pb LA-ICP-MS zircons ages from sandstones of San José Formation in Ciudad de Piedra and Mesoproterozoic gneisses from Guaviare, Colombia

Abstract

Here we describe part of the single geomorphology at the south of the San José del Guaviare, where low elevation plateaus made of sandstones and undergone by karst processes forms Ciudad de Piedra following (NE-SW - NW-SE) trends. The sandstones belonging to the Ciudad de Piedra

Forma de citar: Franco, J.A.; Cramer, T.; Bonilla, A.; Santos, M.; López, R.; Trujillo, J. (2022). Edad U-Pb LA-ICP-MS en circones de las areniscas de la Formación San José en Ciudad de Piedra y de neises Mesoproterozoicos en Guaviare, Colombia. *Boletín de Geología*, 44(3), 15-37. <https://doi.org/10.18273/revbol.v44n3-2022001>

Basal Member of the San José Formation contain ichnofossils and petrographically, a predominance of quartz of rounded medium grain is observed and cemented by silica giving greater resistance, over the remaining 5% that corresponds to metamorphic and volcanic lithics, feldspars, micas, opaque and zircons. U-Pb LA-ICP-MS analysis in these zircons showed Proterozoic ages with peaks between 1000 to 1800 Ma, while zircons extracted from a gneiss near Cerritos-El Capricho revealed a concordant age of 1317 ± 4 Ma, interpreted as the age of the protolith. The data obtained confirm that the crystalline basement in the study area belongs to the Amazon Craton and that the sediments that forms the sandstones of the San José Formation, come from this basement composed mainly of gneiss and granitoids. Later, the basement would be intruded by the Nepheline Syenite of San José of Guaviare (~602 Ma), which outcrops in faulty tectonic contact with the San José Formation near Ciudad de Piedra.

Keywords: Geology landscape; Ciudad de Piedra; Provenance; U-Pb Age; Zircon.

Introducción

Al suroccidente de la capital del departamento del Guaviare, en rocas pertenecientes a la Serranía La Lindosa, se encuentra Ciudad de Piedra, un sitio nombrado así ya que morfológicamente conforma una planicie con geoformas entre las que sobresalen las llamadas “columnas de roca” (Arango *et al.*, 2011) y cuya distribución evoca a una urbe, con calles, carreras e incluso rotondas. La morfología observada fue labrada por la erosión física y química sufrida por las rocas de la Formación San José, y se puede entender como un paisaje kárstico (por disolución) en el sentido de Wray (2013). De acuerdo con Arango *et al.* (2011), la Formación San José está compuesta de rocas siliciclásticas de edad Cretácica que comprenden: conglomerados en sus niveles más basales, arenitas de grano medio en sus niveles intermedios y arenitas de grano grueso-muy grueso en sus niveles superiores.

Esta unidad sedimentaria se encuentra localizada en una de las áreas cratónicas más grandes del mundo, el Cratón Amazónico (CA). Este cratón, en su mayor parte pertenece a Brasil y se extiende por el norte a Colombia, Venezuela, Guyana, Surinam y Guyana Francesa (Figura 1), y fue conformado durante los últimos 2700 millones de años (2,7 Ga) alrededor de núcleos arqueanos en Venezuela (Cinturón de Imataca, 2,74-2,63 Ga; Tassinari *et al.* (2004)), y en Brasil (Cinturón de Amapá, 2,65-2,60 Ga; Rosa-Costa *et al.* (2003)). Actualmente, se limita al oriente por el Cinturón Móvil Araguaia de edad Neoproterozoico, y al occidente por la cadena montañosa de los Andes. En Colombia, aflora el extremo noroccidental del CA, representado por la Provincia Geocronológica Rio Negro-Juruena, con edades entre 1,81-1,55 Ga (Tassinari y Macambira, 1999), y un cinturón llamado

Orógeno Putumayo (Ibáñez-Mejía *et al.*, 2015), el cual es correlacionable con la Provincia Geocronológica Sunsás (1,25-1,0 Ga) y cuyos relictos afloran también a lo largo de los Andes como ventanas del basamento. Posiblemente, debido a una extensa cobertura sedimentaria Fanerozoica y vegetación selvática en territorio colombiano, no se ha identificado la existencia de otras provincias descritas en el suroccidente del Cratón Amazónico como la Provincia Rondonia-San Ignacio (1,5-1,3 Ga; Tassinari y Macambira, 1999).

El basamento aflorante en el área de estudio fue descrito recientemente como Complejo Guaviare (Amaya-López *et al.*, 2020; Maya-Sánchez *et al.*, 2018), subdividido en tres unidades: el Neis de Termales y la Anfibolita de Unilla, que presentan edades U-Pb en circones ~1,3 Ga interpretadas como formación de sus protolitos, provenientes de un magmatismo bimodal (félsico y máfico) y derivado de material mantélico con contaminación cortical (Amaya-López *et al.*, 2020), y la Cuarcita de La Rompida conformada por sedimentos provenientes de rocas graníticas del cratón con una edad máxima de 1,28 Ga. Estos pertenecen a la unidad litológica descrita como Batolito de Parguaza en Venezuela y del este del departamento de Vichada y granitos más juveniles encontrados en los ríos Inírida, Guaviare y Cuiari. Estas unidades sufrieron metamorfismo de bajo a medio grado entre 1,28 Ga y 0,6 Ga (Amaya-López *et al.*, 2020).

En el área de estudio correspondiente a Ciudad de Piedra aflora el Miembro Basal de la Formación San José (Arango *et al.*, 2011; Nivia *et al.*, 2008); también afloran en cercanías a la vereda Nuevo Tolima parte del basamento cristalino y un cuerpo denominado Sienita Nefelínica de San José de Guaviare.

Este artículo contiene resultados del proyecto “Ciudad de Piedra – un acercamiento artístico al paisaje geológico” e investigaciones realizadas continuamente desde el año 2014 en la zona y que solamente habían sido registradas en informes de proyectos de investigación desarrollados por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá y el Grupo de Investigación del Patrimonio Rupestre Indígena (GIPRI) (Cramer *et al.*, 2018a, 2018b; Trujillo-Téllez *et al.*, 2018), y amplía el conocimiento sobre el basamento Mesoproterozoico y su relación con los modelos de provincias geocronológicas del Cratón Amazónico y establecer la proveniencia de los sedimentos de unidades más recientes.

arqueométricos y de conservación junto con el Grupo de Investigación del Patrimonio Rupestre Indígena (GIPRI) (Trujillo-Téllez *et al.*, 2018), y, en 2019, se obtuvieron nuevas observaciones junto con profesores y estudiantes de la Facultad de Artes de la Universidad Nacional de Colombia, en el marco del proyecto Ciudad de Piedra. Una parte importante del trabajo consistió en socializaciones con las comunidades sobre el proyecto y las necesidades y expectativas de las personas, dándole continuidad a experiencias empezadas en visitas anteriores. Se tomó información de localización; se observaron y describieron rocas y sedimentos, afloramientos a escala macro y micro y se recolectaron muestras de las rocas sedimentarias; se midieron datos estructurales sobre todos los lineamientos que conforman las geometrías rectas del paisaje como un rasgo geomorfológico característico del área. Adicionalmente, se tomaron videos y fotografías aéreas mediante drones (Figura 2B). Se muestrearon también neises pertenecientes al basamento en la vereda Jordán Alto, entre las veredas Cerritos y El Capricho.

Metodología

Trabajo de campo

Desde 2009 se realizaron una serie de visitas de campo en la zona con fines de reconocimiento geológico. De igual forma, en 2017, se desarrollaron estudios

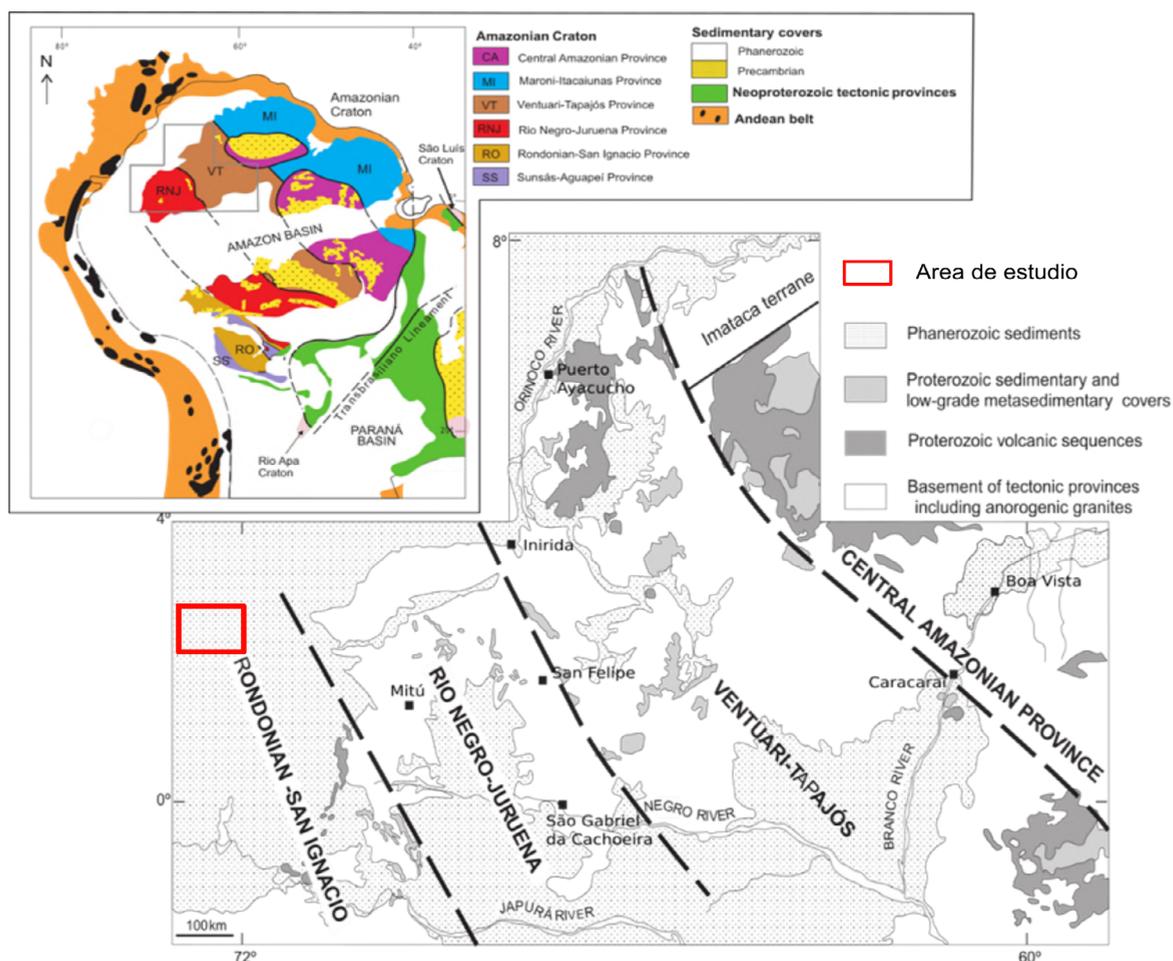


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio en la provincia Rondonia-San Ignacio, Colombia. Modificado de Cordani y Teixeira (2007).

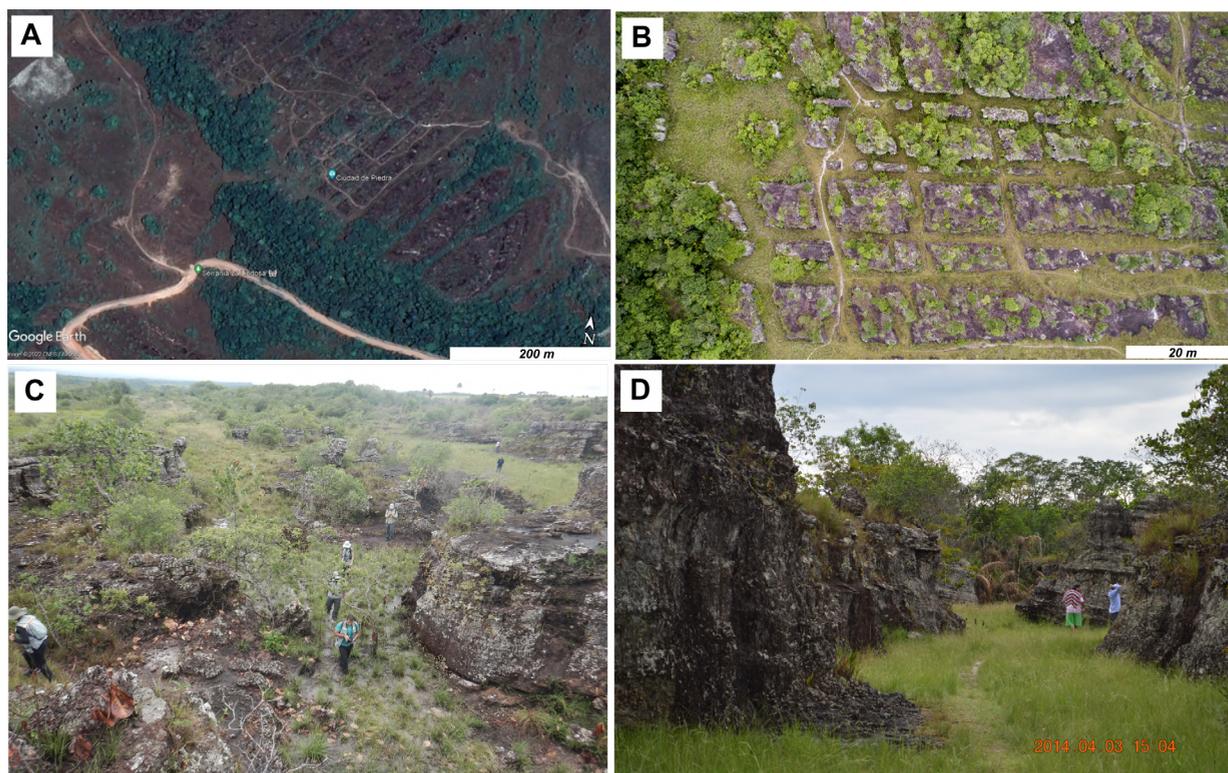


Figura 2. A. Imagen satelital de los alrededores de Ciudad de Piedra donde se pueden observar los lineamientos NE-SW y, en menor medida NW-SE, que predeterminan las formas kársticas ortogonales características del sitio. B. Fotografía aérea con dron del mismo sector. C. y D. Fotografías de afloramiento y geoformas en el Miembro Basal de la Formación San José en el sector Ciudad de Piedra.

Petrografía

De las areniscas de la Formación San José se obtuvieron seis muestras de aproximadamente 2 kg; de dos muestras tomadas en el sitio Ciudad de Piedra se prepararon secciones delgadas para análisis petrográficos en un microscopio Zeiss Axio Lab.A1. Con el fin de identificar mejor los espacios como poros, se utilizó tinción azul en la elaboración. Para determinar los porcentajes de las fases minerales, se hizo un conteo de mínimo 300 puntos por cada sección. Adicionalmente, por sus características mineralógicas, texturales y su relación estratigráfica, se analizaron cuatro secciones delgadas de areniscas topográficamente correlacionables en el sector de Nuevo Tolima y Cerro Azul, que también pertenecen a la Formación San José (Figura 3).

Datación U-Pb mediante LA-ICP-MS

Para datación radiométrica, fueron extraídos circones de una muestra de cuarzoarenita de la Formación San

José y de una muestra del neis del basamento, los cuales fueron triturados y tamizados, separando la fracción de 100-500 μm . De esta fracción, se concentraron mediante batea los minerales pesados y se retiraron con imán de mano los minerales ferromagnéticos magnetita e ilmenita. Aproximadamente 120 circones de la roca sedimentaria libres de fracturas y/o alteraciones fueron seleccionados mediante lupa binocular por *picking*, montados en resina epóxica y posteriormente pulidos con carburo de silicio y diamante. Del mismo modo, de la roca metamórfica que es correlacionable con el Neis de Termales (Maya-Sánchez *et al.*, 2018; Amaya-López *et al.*, 2020) fueron seleccionados aproximadamente 60 cristales. Los montajes de los circones extraídos de la roca sedimentaria fueron cubiertos con grafito para obtener así una buena conductividad, y posteriormente analizados por microscopía electrónica de barrido (MEB-SEM) en modo *backscattering* (BSE) para identificar zonaciones e inclusiones y el mejor posicionamiento de los puntos de ablación láser.

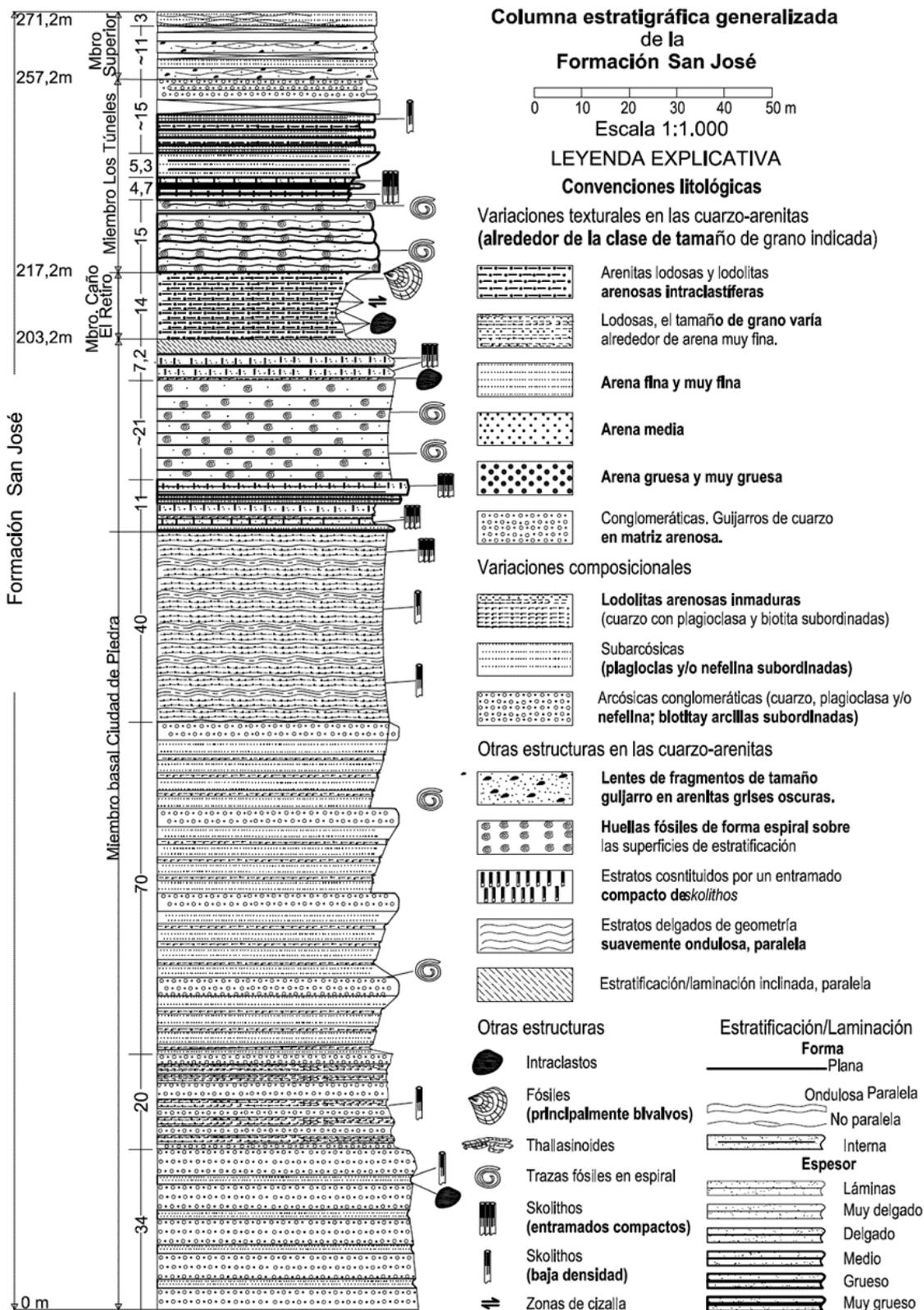


Figura 3. Columna estratigráfica de referencia para la Formación San José levantada en cercanías a Ciudad de Piedra, tomado de Arango *et al.* (2011). Las muestras analizadas en este estudio fueron tomadas en el intervalo superior del Miembro Basal Ciudad de Piedra.

Los análisis isotópicos usando ablación láser en un equipo de espectrometría de masas por plasma acoplado inductivamente (LA-ICP-MS) fueron realizados en los Laboratorios de la Universidad de Rennes 1, en Francia, utilizando un LA-ICP-MS Agilent 7700x equipado con un sistema de bombeo dual para aumentar la sensibilidad. El sistema Excimer 193 nm ESI (NWR193UC) produce un láser coherente con duración de impulsos ultracorta (<5 ns) y una célula de ablación con dos volúmenes *Truline* que tiene una duración de “wash-out” de menos de 0,2 segundos, completamente controlado por ordenador, según el procedimiento descrito por [Bühn et al. \(2009\)](#). Debido al tamaño de los cristales, la ablación de los granos con láser fue realizada en *spots* de 25 µm, utilizando una frecuencia de 4-5 Hz e intensidad de 9 J/cm². El material evaporado fue cargado por un flujo de He (~0,40 L/min) y Ar (~0,90 L/min). En todos los análisis se utilizaron los patrones del estándar, por cada ocho mediciones en circones, se realizó una en el material de referencia GJ-1 (GEMOC ARC National Key Center, [Jackson et al., 2004](#)) para la corrección de la deriva del equipo, así como para el fraccionamiento entre los isótopos de U y Pb ([Jackson et al., 2004](#)). Las incertidumbres asociadas a las razones presentadas en el [Anexo A](#) y [B](#) son de 2σ, en porcentaje. Las edades fueron calculadas utilizando ISOPLOT 3.0 ([Ludwig, 2003](#)) y los diagramas (95% de confianza) fueron confeccionados en el mismo programa. Para el estándar Plesovice, la edad concordia calculada fue de 334±6 Ma.

Marco geológico

El área de estudio se encuentra cubierta por sedimentos cuaternarios pertenecientes a la Cuenca de los Llanos Orientales. Sedimentos más antiguos como arcillas grises moteadas y abigarradas son asignados a la Formación Caja, probablemente del periodo Neógeno y correlacionable con la Formación Guayabo aflorante en el área del Catatumbo, que infrayacen los sedimentos cuaternarios ([Bayona et al., 2008](#)). En contacto con las rocas sedimentarias del Cenozoico sobresalen las areniscas, probablemente Cretácicas, de la Formación San José ([Arango et al., 2011](#)), en las cuales se ha modelado la Ciudad de Piedra. Al sur del área de estudio afloran las rocas plutónicas de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare (SNSJG), emplazadas a finales del Precámbrico durante el Ediacárico ([Arango-Mejía et al., 2012](#); [Muñoz-Rocha et al., 2019](#)) en el basamento metamórfico que aflora cerca del área de

estudio, lo que ha nombrado el Servicio Geológico Colombiano (SGC) como Complejo Guaviare ([Maya-Sánchez et al., 2018](#); [Amaya-López et al., 2020](#)).

Complejo Guaviare

Ya en salidas anteriores se habían encontrado rocas del basamento que llevaron al Servicio Geológico Colombiano (SGC) a definir el Complejo Guaviare como una unidad nueva ([Maya-Sánchez et al., 2018](#)), compuesto por neises, anfibolitas y cuarcitas y, en menor proporción, granofelsas y milonitas. La unidad Neis de Termales se describe como neises cuarzo-feldespáticos con edades de sus protolitos de ~1,3 Ga y un origen atribuido a magmatismo anorogénico, probablemente relacionado con la formación de *rifts* en la parte NW del Cratón Amazónico ([Maya-Sánchez et al., 2018](#); [Amaya-López et al., 2020](#)). Las cuarcitas contienen sedimentos derivados de las rocas graníticas del Cratón Amazónico y tienen una edad máxima de depositación de 1,28 Ga ([Amaya-López et al., 2020](#)). El metamorfismo que afectó estas unidades sucedió entre 1,28 Ga y 0,6 Ga c; esta última edad corresponde a la edad de la intrusión de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare ([Arango-Mejía et al., 2012](#); [Maya-Sánchez et al., 2018](#); [Muñoz-Rocha et al., 2019](#)).

La unidad Neis de Termales se extiende desde la vereda Colinas vía la vereda Termales, aproximadamente por 15 km en una orientación NW hasta la vereda La Cristalina. Esta unidad ha sido descrita como neises con biotita-cuarzo-feldespato ± hornblenda/hastingsita ± epidota ± muscovita ± clorita, y granofelsas de feldespato y cuarzo ([Amaya-López et al., 2020](#)).

Sienita Nefelínica de San José del Guaviare (SNSJG)

Las primeras descripciones de esta roca se reportan en [Trumpy \(1943\)](#), quien denota el predominio de las rocas ácidas de composición sienítica en los afloramientos del zócalo que conforma el Escudo de Guyana. [Vesga y Castillo \(1972\)](#) realizaron una descripción petrográfica y geoquímica más detallada de estas rocas en las veredas La Pizarra y Nuevo Tolima, y establecieron la unidad actualmente conocida como la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare; posteriormente, [Galvis et al. \(1979\)](#) reconocen tres sectores cercanos a San José del Guaviare donde afloran dichas rocas, y dan indicios de otro cuerpo en el Cerro Cumare (Caquetá) donde ya [Gansser \(1954\)](#) había reportado afloramientos del basamento.

En la zona de estudio localizada en plancha geológica 350-San José, la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare aflora al costado sur de la Serranía La Lindosa y se extiende en un área de aproximadamente 10 km², en forma cónica con una dirección norte-sur, en los alrededores de la vía que conduce de Ciudad de Piedra hacia la vereda Nuevo Tolima (Figura 4), y en menor proporción como un cuerpo satélite por la vía que conduce hacia el sitio Tranquilandia (Arango *et al.*, 2011).

Dentro del área de la plancha 372-El Retorno continúan aflorando rocas del basamento en las veredas Alto Cerritos y Triunfo 2, al igual que en El Capricho; dentro de estas aparece la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare en la vereda Alto Cerritos y Jordán.

En general, los cuerpos de sienita están conformados por una roca holocristalina fanerítica, predominantemente inequigranular, con tamaños de grano que varían de fino a grueso, generando una transición textural hasta pegmatítica. Es leucocrática, con un índice de color entre 30 y 35%; en roca fresca presenta colores variables desde blanco y gris hasta rosado. La mineralogía predominante

es feldespatos alcalinos, nefelina, biotita y arfvedsonita en proporciones variables. Es notoria la acumulación de los minerales máficos en algunas zonas, lo cual da una apariencia de parches oscuros dentro de la roca (Arango *et al.*, 2011). Estudios recientes subdividen esta unidad en diferentes cuerpos que presentan variaciones graníticas a sieníticas (Amaya-López *et al.*, 2020).

La Sienita Nefelínica de San José del Guaviare fue inicialmente datada por el método K/Ar en biotitas, donde arrojó una edad Cámbrica de 445-495 Ma (Pinson *et al.*, 1962). Posteriormente, se realizaron dos nuevas dataciones para el cuerpo que aflora en la vereda La Pizarra, y se obtuvo una edad de 494±5 Ma con el método Ar/Ar (Arango *et al.*, 2011), que fue interpretado como una edad de enfriamiento, mientras que con el método U-Pb en 29 circones resultó una edad de 577±6,3 Ma, interpretada como de cristalización (Arango-Mejía *et al.*, 2012). Los mismos autores deducen, a través de las características petrográficas y la geoquímica de elementos mayores y traza, que este cuerpo es de carácter peralcalino y pertenece al campo de los granitos intraplaca.

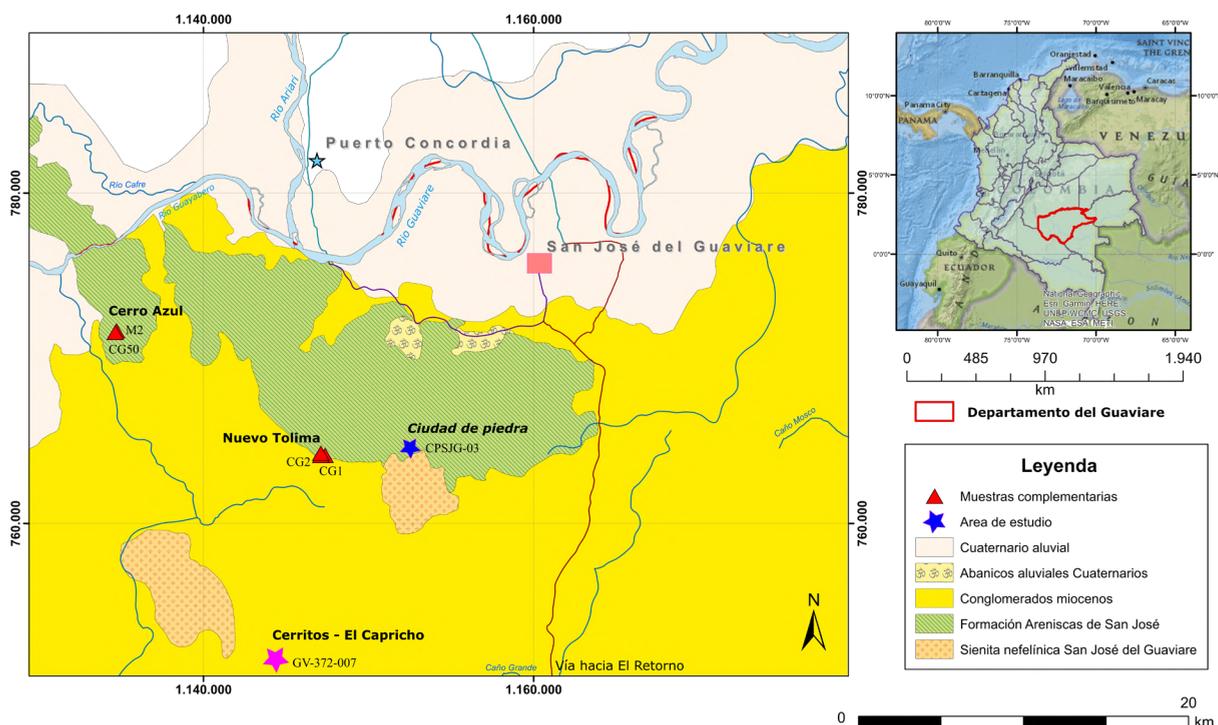


Figura 4. Mapa geológico generalizado del área de estudio y unidades litológicas cartografiadas en el área de la plancha 350-San José. Estrella azul, localización de Ciudad de Piedra; estrella rosada, localización de los neis del basamento en la vereda Jordán Alto, y triángulos rojos mostrando los sitios donde se recolectaron muestras complementarias. Modificado del mapa geológico colombiano (Gómez-Tapias *et al.*, 2015a).

Formación San José

Corresponde a una secuencia sedimentaria que aflora en la Serranía La Lindosa, dentro de la plancha 350-San José, al suroccidente del centro poblado de San José del Guaviare. Fue definida por [Trumpy \(1943\)](#) como una sucesión sedimentaria de areniscas, posiblemente de edad Cretácica Inferior, que están expuestas en cercanías de la ciudad de San José del Guaviare. [Arango et al. \(2011\)](#) establecen que la Formación San José podría ser de edad Cretácica por una asociación de fósiles encontrados en el sitio Las Brisas, de especímenes como *Tellina?* sp. inc., *Crasatella?* sp. inc., *Cardita?* sp. inc., *Toquesia?* sp. inc., *Nuculana?* sp. inc., *Crasatella?* sp. inc., *Lima?* sp. inc., y *Bivalvia?* gen et sp. inc. Los ejemplares fueron asociados a especies del Cretácico colombiano, pero por su mal estado de conservación no se concluye de manera tajante su edad. Por su parte, la Formación de San José se subdivide de base a tope ([Figura 3](#)) en cuatro miembros: el Miembro Basal Ciudad de Piedra (objeto de estudio); el Miembro Caño El Retiro compuesto de lodolitas abigarradas de tonos violetas a amarillos y lodolitas arenosas a arenitas lodosas; el Miembro Los Túneles que se compone principalmente de cuarzo arenitas con bioturbación por *Thalassinoides* y el Miembro Superior, compuesto por cuarzo-arenitas blancas a beige de grano fino a medio, y con estratificación laminada, masiva y/o bioturbadas por *Thalassinoides* ([Arango et al., 2011](#)) ([Figura 3](#)).

Miembro Basal Ciudad de Piedra. Reposando de manera discordante sobre la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, se encuentra el Miembro Basal Ciudad de Piedra (que es el objeto principal de estudio), con un espesor de 203,2 m con secciones de referencia en las vías que de las veredas Nuevo Tolima y La Pizarra llegan a Ciudad de Piedra. Compuesto principalmente de areniscas conglomeráticas abigarradas, los clastos que contiene en la base son angulosos; estas se encuentran interestratificadas con bancos delgados de areniscas de grano medio color amarillo. Hacia el tope, se encuentran los guijarros más redondeados y con mayor presencia de cuarzo, hay intercalaciones de lodolitas arenosas de mala selección, y en estos bancos se presentan skolithos verticales ([Arango et al., 2011](#)) ([Figura 3](#)). De acuerdo con [Arango et al. \(2011\)](#), en el área de Ciudad de Piedra se presentan bancos duros de cuarzoarenitas de estratificación suavemente ondulosa paralela, bioturbadas por skolithos.

Resultados

Geomorfología

La unidad sedimentaria del Miembro Basal Ciudad de Piedra se presenta como mesetas que forman un

escarpe vertical con dirección este-oeste, mostrando un alto topográfico que conforma una estructura monoclinal de baja inclinación. Ciudad de Piedra se encuentra modelada sobre la parte superior de una de estas mesetas, en el tope del flanco NE de la estructura ([Figura 4](#)), y tiene un área aproximada de 2,4 km² entre las coordenadas 2°27'54.45" N y 72°42'76.26" W, y una altura que alcanza hasta los 415 m s. n. m., donde se destacan características de paisajes kársticos silíceos como columnas de roca ([Arango et al., 2011](#)) y "ciudades de piedra", corredores y grietas kilométricas, como se describe en [Wray \(2013\)](#). Las ondulaciones en el relieve son producto de la alternancia de cerros redondeados de no más de 100 metros de altura interrumpidos por peniplanicies que desde la base exhiben pendientes abruptas mayores de 70° alcanzando más de 200 m de altura, formando mesetas disectadas ortogonalmente, configurando un patrón de drenaje recto. En general este paisaje está desarrollado en secuencias de capas gruesas a delgadas de cuarzoarenitas de grano fino a medio con esporádicos lentes de arena gruesa y guijos finos, con estratificación plano-paralela de forma regional y cuneiforme de manera local, lo que permite su distribución homogénea en sentido SEE-NWW en la Serranía La Lindosa ([Figura 5](#)).

Observaciones de campo

La parte superior tiene como referencia la sección tipo que aflora en la vía que une Ciudad de Piedra con San José del Guaviare, en el sitio turístico con el mismo nombre.

Las areniscas de Ciudad de Piedra en la zona de estudio son macroscópicamente homogéneas y están compuestas principalmente de cuarzo. Se observan estratificaciones cruzadas, grano decrecimiento desde areniscas conglomeráticas a limolitas, bioturbación y erosión preferencial conservando los icnofósiles o tubos de gusano ([Figura 5](#)).

El color predominante de la roca fresca es blanco, y ocasionalmente se ven manchas rojizas a amarillentas causadas por hidróxidos de hierro en la superficie, sobre todo a lo largo de fracturas. En las partes exteriores se encuentran fuertemente afectadas por la meteorización y disolución kárstica, muy común en rocas siliciclásticas en climas tropicales ([Piccini y Mecchia, 2009](#)), parcialmente agravado por fuertes vientos en las épocas invernales; las superficies toman un color grisáceo a negro por depositación de polvo, eventualmente relacionado con los abundantes incendios, pero también debido al crecimiento de microorganismos y

Líquenes que se alimentan del sustrato y de nutrientes aerotransportados. Macroscópicamente, no se observó reacción con ácido clórico, lo cual indica la ausencia de calcita; tampoco hay magnetismo reconocible con imanes fuertes, lo que indican una baja proporción de minerales como magnetita.

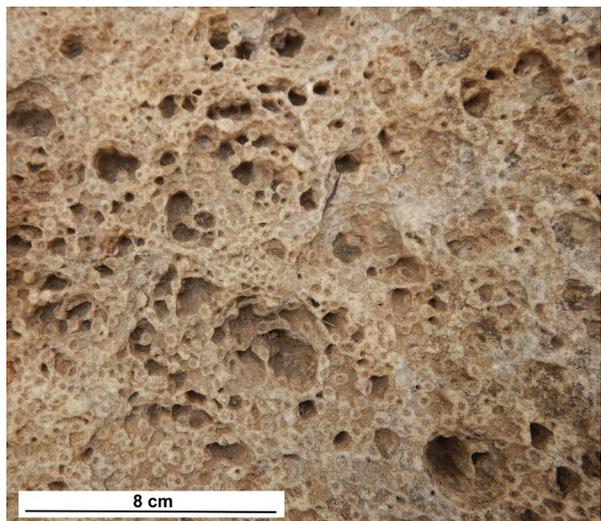


Figura 5. Areniscas con signos de meteorización kárstica y skolithos visibles en vista de planta.

Petrografía

Ciudad de Piedra: en la sección delgada de la muestra CPSJG-03 se determinó un tamaño de grano arena gruesa a media (Figura 6) con 93% de cuarzo monocristalino, en su mayoría, alrededor de un 6% de porosidad y menos del 1% de minerales accesorios como circón o/y apatito de formas euhedrales con prismas alargados (Figura 7). Exhibe mayoritariamente dos poblaciones de granos de cuarzo: la primera monocristalina con esfericidad buena

y alta redondez y la segunda con baja esfericidad, buena redondez y extinción ondulante; ambas de tamaño predominantemente arena media y gruesa, con cemento silíceo en sobrecrecimiento de granos de cuarzo, así como bahías de corrosión. La muestra corresponde a una cuarzoarenita de grano medio a grueso moderadamente bien seleccionada según Nichols (2009).

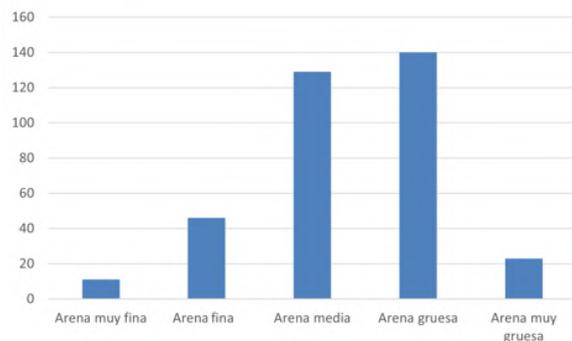


Figura 6. Histograma de conteo de la granulometría de cuarzoarenita de la muestra CPSJG-03 donde se observa el predominio de granos gruesos (2 mm) a medianos (1 mm). Eje Y, frecuencia (número de conteos); eje X, tamaño de grano.

Adicional al cuarzo monocristalino, se observó alrededor del 5% de cuarzo policristalino con contactos suturados, de los cuales se presume una procedencia metamórfica, de acuerdo con Ulmer-Scholle *et al.* (2014). El sedimento se encuentra en un estado de madurez textural III, según Ulmer-Scholle *et al.* (2014), dado que no fue observada una cantidad apreciable de arcilla, y se evidenció un 49% de granos muy bien redondeados con un porcentaje similar de granos con alta esfericidad.

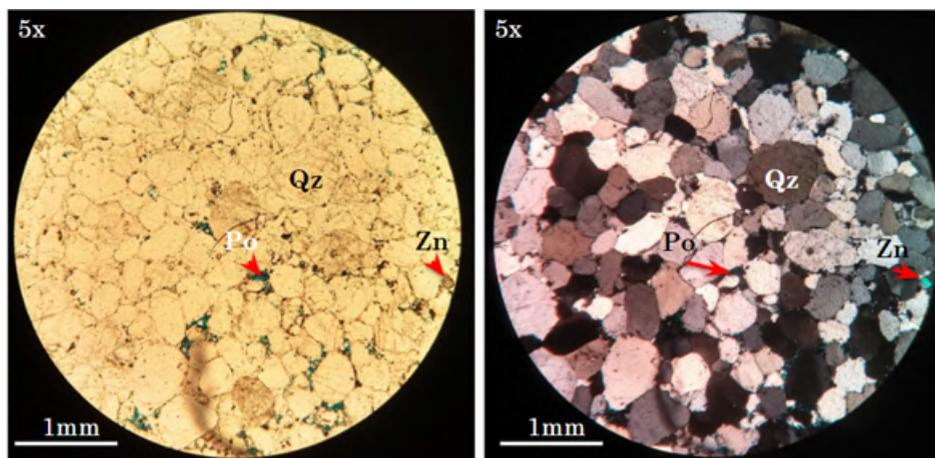


Figura 7. Microfotografía de cuarzoarenita (muestra CPSJG-03) en sección delgada donde predominan granos de cuarzo (Qz), algunos espacios intergranulares (Po=poros en azul) y circones (Zn). Objetivo de 5x = 50x magnificación. A. Luz polarizada con nicoles paralelos (PPL). B. Luz polarizada con nicoles cruzados (XPL).

Los contactos entre los granos son cóncavoconvexos, lo que sugiere la disolución como consecuencia de las presiones relativamente altas en estos puntos, pero no hay indicaciones de metamorfismo. La disolución parcial produce cemento silíceo, lo que da al conjunto de rocas una alta resistencia.

Los skolithos visibles macroscópicamente (ver [Figura 5](#)) no fueron diferenciados en sección delgada.

Nuevo Tolima y Cerro Azul: a continuación, se describen las muestras analizadas de las cuatro secciones delgadas de muestras, obtenidas en las localidades de Nuevo Tolima y Cerro Azul, sitios conocidos por sus pinturas rupestres. Son clasificadas como cuarzoarenitas a sublitoarenitas, lo cual confirma la predominancia de cuarzo (>90%) con variables contenidos de líticos de feldespatos y de cuarcitas, microcristalinos volcánicos, circón, moscovita y opacos; esto muestra un aumento en la cantidad de cemento silicio y una disminución en la porosidad interna en comparación con las analizadas en Ciudad de Piedra, y en general de contactos suturados y rectos.

Cuarzoarenita (muestra CG1) localidad Nuevo Tolima segmento basal: corresponde a una cuarzoarenita con pigmento y líquen superficial, algunos granos de cuarzo alcanzan hasta 3 mm de diámetro, en su mayoría, con inclusiones submicroscópicas. Contiene líticos de cuarcitas y microcristalinos volcánicos, circones y opacos. No presenta estructuras internas, pero los cristales elongados parecen estar orientados en un sentido preferencial. El contacto entre los granos es completo, recto a suturado, y el cemento silicio une los granos ([Figura 8](#)).

Cuarzoarenita (muestra CG2) localidad Nuevo Tolima Mural 1, segmento medio: La muestra corresponde a una cuarzoarenita de grano medio a grueso. El contacto entre los granos es completo, recto y suturado con cemento silicio. Presentan líticos de cuarcitas y microcristalinos volcánicos. Ocasionalmente, se observan inclusiones dentro del cuarzo y algunos cristales elongados en sentido preferencial ([Figura 9](#)). Sin estructuras internas definidas.

Cuarzoarenita (muestra M2) localidad de Cerro Azul piso 1: Corresponde a una cuarzoarenita de grano grueso, algunos granos alcanzan hasta los 2 mm de longitud con un sorteamiento moderado. En general, se evidencian bahías de corrosión en los cristales de cuarzo y líticos de cuarcitas y microcristalinos volcánicos. El contacto entre los cristales es completo, recto y suturado ([Figura 10](#)). En PPL se reconoce muy bien el borde de los cristales detríticos redondeados con cemento silicio de intercrecimiento. No presenta estructuras internas.

Cuarzoarenita (muestra CG50) localidad de Cerro Azul piso 2: Corresponde a una cuarzoarenita de grano grueso a muy grueso con cristales que alcanzan hasta los 2.5 mm de longitud. Presenta cuarzo, feldespato, circón, moscovita, opacos y líticos de cuarcitas. En general, no presenta estructuras internas. Contactos completos y rectos en ocasiones suturados, cemento silicio uniendo los cristales e intercrecimiento de granos de cuarzo por alta diagénesis ([Figura 11](#)).

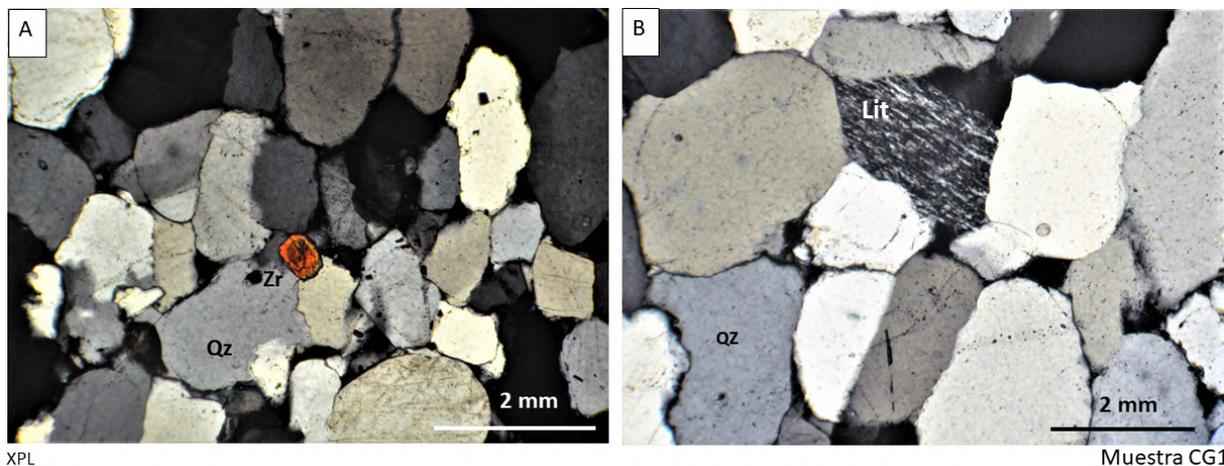


Figura 8. Microfotografías de areniscas de la Formación San José, muestra CG1 Nuevo Tolima. **A.** Contactos suturados entre los granos de cuarzo y circón como accesorio. **B.** Líticos volcánicos y contactos rectos y suturados.

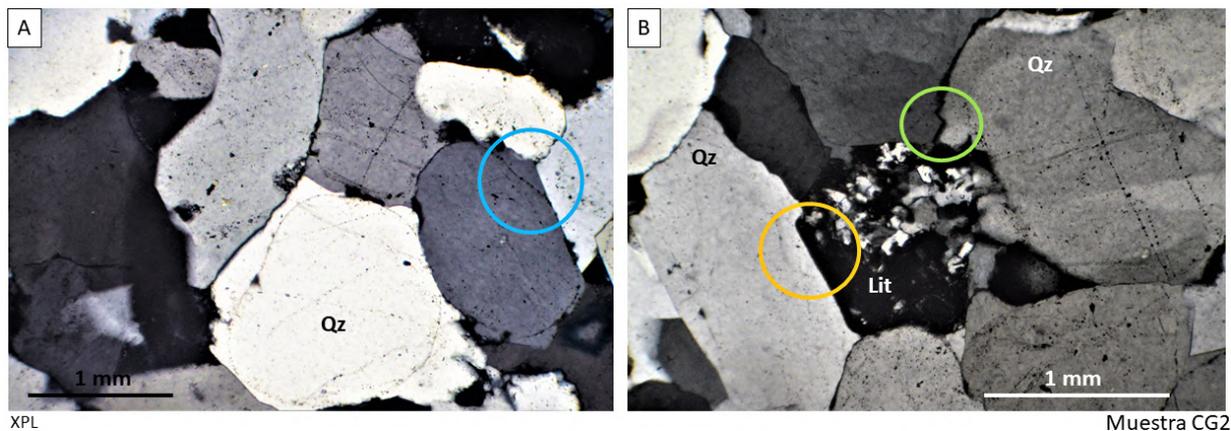


Figura 9. Microfotografías de areniscas de la Formación San José, muestra CG2 Mural 1, Nuevo Tolima, segmento medio con pinturas rupestres. **A.** Cemento silíceo con intercrecimiento por diagénesis de los cristales de cuarzo (círculo azul). **B.** Contactos suturados (círculo verde) y contactos rectos (círculo amarillo) entre los granos de cuarzo (Qz) y líticos (Lit).

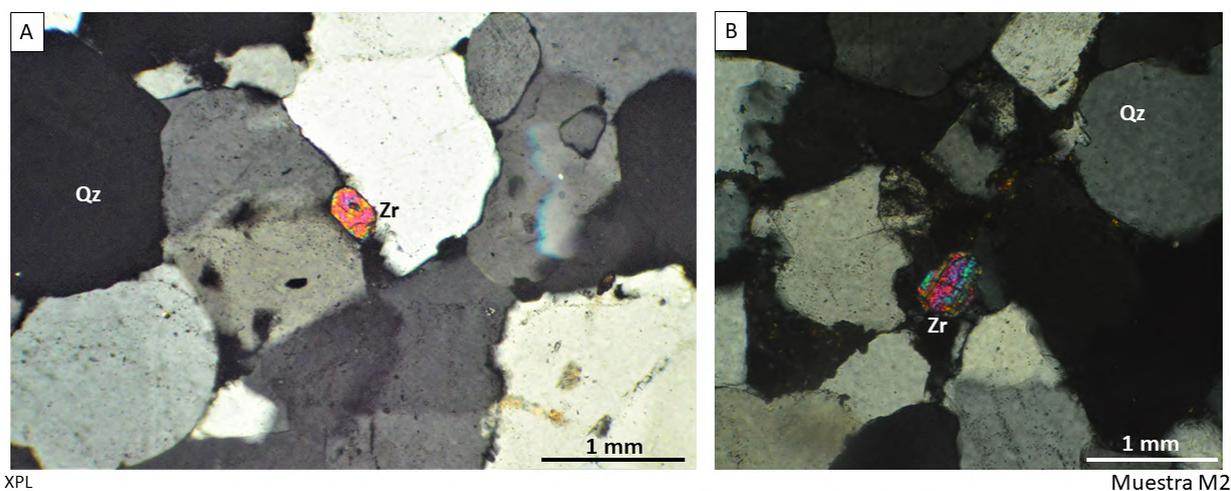


Figura 10. A. y B. Microfotografías de arenisca de la Formación San José, muestra M2 en el sector de Cerro Azul mostrando contactos suturados entre los granos de cuarzo (Qz) y circón (Zr).

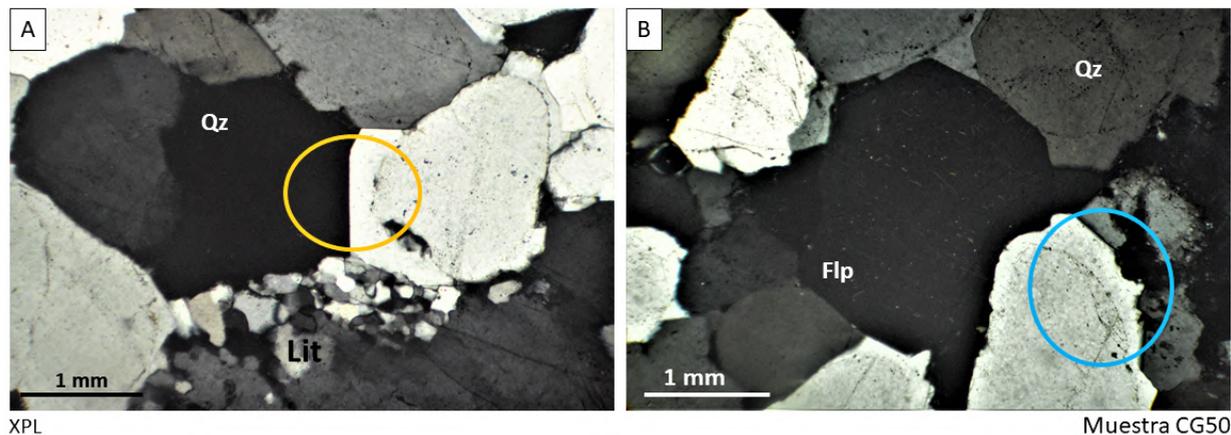


Figura 11. Microfotografías de arenisca de la Formación San José, muestra CG50 del Mural 1-Cerro Azul, segmento medio con pinturas rupestres. **A.** Contactos rectos (círculo amarillo) entre los granos de cuarzo (Qz), feldspatos (Flp) y líticos (Lit). **B.** Cemento silíceo e intercrecimiento por diagénesis (círculo azul).

Resumen de las características principales de las areniscas analizadas

La comparación entre las areniscas analizadas de Ciudad de Piedra, de Nuevo Tolima y Cerro Azul no deja ver diferencias remarcables, lo que confirma su pertenencia a la misma unidad estratigráfica. Los tamaños de grano de los cristales de cuarzo varían principalmente entre grueso (2 mm) a medio (1 mm) con extremos hacia muy grueso y fino (cf. Figura 6). Los contactos entre los granos son completos, rectos y a veces suturados; el alto contenido de cemento silicio e intercrecimiento de granos de cuarzo producido por alta diagénesis, y posiblemente un metamorfismo débil (no se observa extinción ondulosa), une los cristales y elimina prácticamente toda la porosidad abierta y cerrada, dándole una estabilidad aparente contra meteorización física y química relativamente alta. Este hecho está confirmado también por la falta de estructuras sedimentarias relicticas visibles en sección delgada, aunque macroscópicamente se las puede observar de vez en cuando, sobre todo en zonas con mayores contenidos de filosilicatos.

Geocronología de circones detríticos de areniscas de la Formación San José, Miembro Basal Ciudad de Piedra

Los circones tienen longitudes entre 60 y 1000 µm (Figura 12). En general los bordes están redondeados,

ya no reflejan la forma del cristal original magmático o metamórfico, lo que confirma su abrasión durante el transporte, junto con los granos de cuarzo, antes de formar parte de las cuarzoarenitas. Una gran parte de los circones es isométrica, sea por crecimiento o por abrasión, mientras otros muestran ejes alargados paralelos a c con relaciones 4:1 a 2:1 (Figura 13-2, 13-11, 13-22, 13-23). Algunos tienen forma bipiramidal, otros dejan ver diferentes zonas o fracturas. En imágenes de catodoluminiscencia (Figura 12C) se evidencian los diferentes pulsos de crecimiento de los circones, mejor representado cuanto más antiguo sea el núcleo y más joven el borde. La zonación fina oscilante es típica de crecimiento a partir de magmas (Corfu et al., 2003), áreas más homogéneas probablemente han recibido reorganización cristalina por metamorfismo, que en algunos casos también indujo crecimiento de nuevos bordes. Los contenidos de uranio (U) medidos por LA-ICP-MS varían entre 23 y 2170 ppm, con mayor frecuencia debajo de 500 ppm, de plomo (Pb) entre 11 y 1886 ppm y de torio (Th) entre 5 y 2000 ppm. La relación Th/U vs U tiene una cierta dispersión, pero se concentra en valores Th/U menores de 1 (Figura 14 y Anexo A). Las edades calculadas indican picos entre 1000 y 1800 Ma (Figura 15).

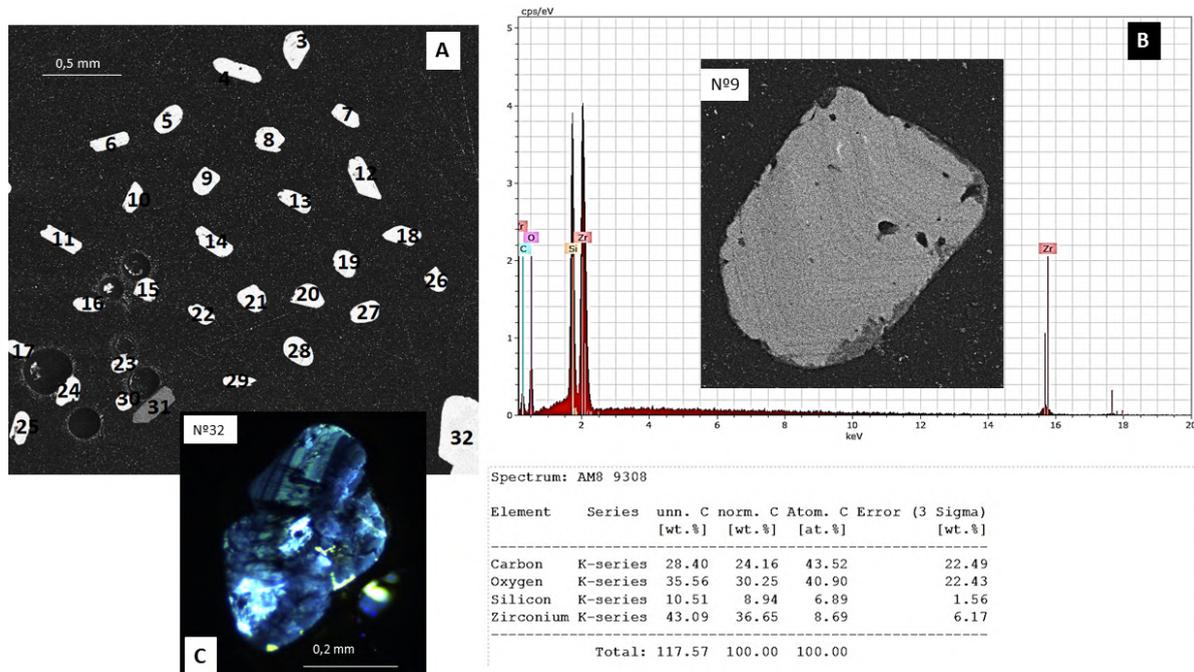


Figura 12. A. Imagen BSE del montaje pulido en resina epóxica para datación mediante LA-ICP-MS de los circones. B. Imagen MEB y espectro composicional EDS mostrando los elementos Zr, Si y O (representativo) del circón, el pico de carbono se debe al recubrimiento de grafito. C. Imagen de catodoluminiscencia de circón extraído de la muestra CPSJG-01.

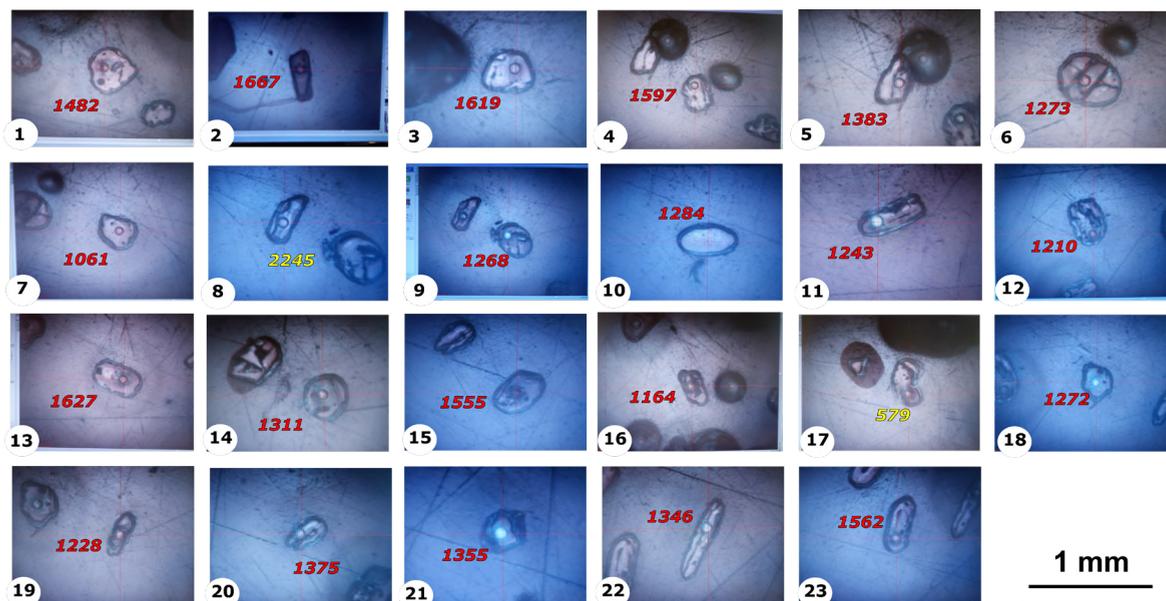


Figura 13. Imágenes de circones (Zrnc_1-23 de 83 cristales en total, ver Anexo A) en los montajes de grano analizados mediante LA-ICP-MS para la medición de isótopos de U-Th-Pb y las edades en millones de años calculadas (en rojo), los datos en amarillo fueron tratados como discordantes y no están incluidos en los cálculos. Los puntos redondos corresponden a las áreas donde el láser evaporó material para análisis de las relaciones isotópicas.

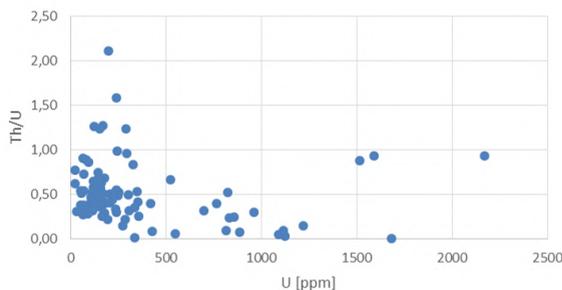


Figura 14. Relación Th/U vs U (ppm) de los circones analizados de las areniscas de la Formación San José.

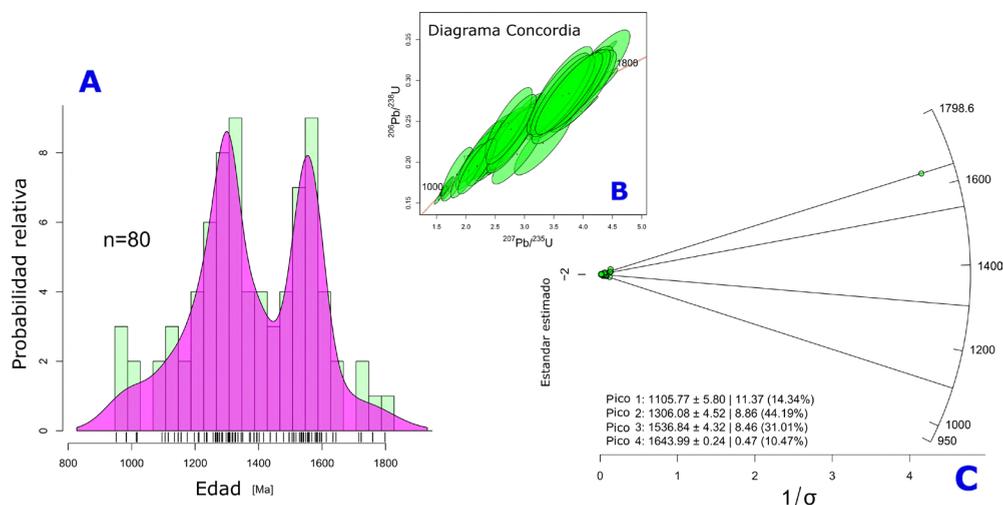


Figura 15. A. Probabilidad relativa de edades en los circones de las areniscas de la Formación San José. B. Diagrama concordia de los datos obtenidos a partir de la relación $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ en los circones. C. Gráfico de estandarización estimada para el rango de edades obtenidas que muestra 4 picos principales con una edad máxima aproximada de 1105 Ma y una mínima de 1643 Ma (ver Anexo A).

Para los circones analizados de las areniscas de la Formación San José fueron identificados dos picos principales con edades aproximadas de 1310 y 1540 Ma. Los resultados en el gráfico de estandarización estimada permitieron definir la probabilidad de mayor concentración de las edades diferenciadas en 4 picos: el principal de 1306 ± 4 Ma, donde se concentra el 44% de los datos, seguido de 1536 ± 4 Ma con el 31% y en menor proporción un pico 1105 ± 6 Ma con el 15% y otro de 1643 ± 22 Ma que acumula el 10% de los datos obtenidos (Figura 15).

Geocronología de neises del Complejo Guaviare, vereda Jordán Alto

Los circones obtenidos de neises del basamento Proterozoico de la vereda Jordán Alto-El Capricho, son prismáticos a subhedrales, con tamaños entre 300 y 100 μm ; la mayoría presentan algunas estructuras núcleo-manto con anillos concéntricos e inclusiones de otros minerales. Sus relaciones isotópicas bastante homogéneas permitieron calcular una edad concordante de 1317 ± 4 Ma (MSWD = 0,96) (Figura 16), interpretada como la edad pico del metamorfismo que afecta el protolito.

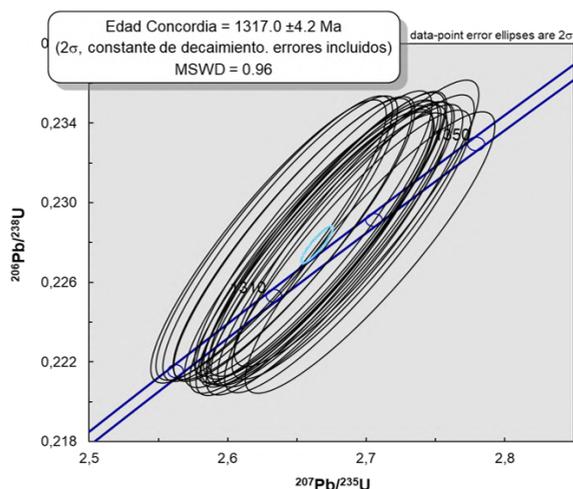


Figura 16. Diagrama concordia que muestra la edad calculada de 1317 ± 4 Ma (MSWD 0,96) en los circones de neises del Complejo Guaviare, aflorantes en cercanías a la vereda Jordán Alto. Los datos se representan con errores 2σ (ver Anexo B).

Discusión

Geocronología del basamento y del Miembro Ciudad de Piedra

La edad U/Pb de 1317 ± 4 Ma aquí obtenida en los circones del denominado Neis de Termales (Maya-

Sánchez *et al.*, 2018; Amaya-López *et al.*, 2020) concuerda con las edades reportadas por Amaya-López *et al.* (2020) para esta unidad y para la Anfibolita de Unilla, pertenecientes al Complejo Guaviare de 1312 ± 5 y 1313 ± 8 Ma, respectivamente; esto confirma la existencia de un basamento de características metamórficas con una ubicación espacial y temporal intermedia entre la región más oriental de Colombia, perteneciente a la Provincia Geocronológica Río Negro-Juruena (Tassinari y Macambira, 1999) con edades entre 1,8 y 1,5 Ga (Ibáñez-Mejía *et al.*, 2015; Cordani *et al.*, 2016; Bonilla, 2019; Bonilla *et al.*, 2019), y la región más occidental del Cratón Amazónico representada por la Provincia Geocronológica Sunsás (Tassinari y Macambira, 1999), con edades entre 1,2 y 0,95 Ga, que en Colombia ha sido denominada Orogéno Putumayo y cuya edad fue extendida entre 1,45 y 0,98 Ga (Ibáñez-Mejía *et al.*, 2015).

Amaya-López *et al.* (2020) interpretan estas edades del Complejo Guaviare de 1,3 Ga como la edad pico del metamorfismo que afecta el protolito con un origen de material mantélico con contaminación cortical, relacionado con magmatismo en arcos extensionales, y reconocen que el metamorfismo que afectó estas rocas es de grado bajo a medio, sucedido posiblemente entre 1,28 Ga y 0,6 Ga. Según esto, sería necesario involucrar al Complejo Guaviare como rocas intrusivas y deformadas dentro del Orogéno Putumayo (1,45-0,98), como es propuesto por Amaya-López *et al.* (2020), en donde este magmatismo asociado a *rift* solo fue deformado dentro del Orogéno Putumayo, a pesar de que también afectó la Provincia Río Negro-Juruena, como por ejemplo el granito rapakivi de Matraca sin deformación con una edad de 1,35 Ga, reportado 380 km más al oriente en el departamento de Guainía (Bonilla *et al.*, 2016). Esta idea concuerda con edades entre 1,3 y 1,2 Ga de protolitos ígneos documentadas en los macizos de Garzón y Las Minas (Ibáñez-Mejía *et al.*, 2015). Otra idea sería extender el basamento de la Provincia Río Negro-Juruena hacia el occidente, unos 200 km hasta lo que hoy en día es San José de Guaviare, e incorporar el Complejo Guaviare dentro de esta provincia, que en su borde occidental sufriría metamorfismo relacionado con la acreción del Orogéno Putumayo.

Nuestras observaciones y resultados nos hacen apoyar la idea de que en Colombia existe una tercera provincia, como lo plantean Cordani y Teixeira (2007) (Figura 1), en donde el Complejo Guaviare forma parte de un basamento ígneo-metamórfico perteneciente a una Provincia Geocronológica intermedia como

Rondonia-San Ignacio (1,55-1,3 Ga) descrita en el SW del Cratón Amazónico (Tassinari y Macambira, 1999). Las edades documentadas por Ibáñez-Mejía *et al.* (2015) en los macizos de Garzón y Las Minas son registro de un aporte de este basamento a las rocas que conformarían el Orogéno Putumayo y así mismo para todos los sedimentos con edades de ~1,3 Ga encontrados en estudios de proveniencia (p. ej.: en este estudio Miembro Basal Ciudad de Piedra) de varias cuencas colombianas. La extensa cobertera Fanerozoica aún no permite concluir el origen y relación de este basamento, y solo estudios posteriores podrán revelar su historia.

Los circones sedimentarios analizados del Miembro Basal Ciudad de Piedra, con picos entre 1000 y 1800 Ma (Figura 15), reflejan procesos magmáticos y eventualmente metamórficos durante el Proterozoico, pertenecientes al Cratón Amazónico. Incluso, se indican edades remanentes o heredadas arqueanas de 2,3 a 2,4 Ga, es decir, provenientes de los núcleos más antiguos del Cratón Amazónico (Tassinari y Macambira, 1999; Kroonenberg, 2019). El pico cercano a 1,8 Ga corresponde al basamento metamórfico de la Provincia Rio Negro-Juruena (Tassinari y Macambira, 1999), en Colombia, descrito como Complejo Mitú (López *et al.*, 2007), y cuyas rocas han sido diferenciadas como un basamento ígneo-metamórfico con edades entre 1,72 y 1,8 Ga (Bonilla, 2019; Bonilla *et al.*, 2019). Los picos que se encuentran hacia 1,6-1,5 Ga están relacionados con la intrusión de granitos tardi-orogénicos y anorogénicos aflorantes en todo el NW del Cratón Amazónico (Gaudette *et al.*, 1978; Gaudette y Olszewski, 1985; Ibáñez-Mejía *et al.*, 2015; Cordani *et al.*, 2016; Veras *et al.*, 2018; Bonilla, 2019), y el pico de 1,3 Ga coincide con granitos anorogénicos reportados en el departamento del Guainía (Bonilla *et al.*, 2016), rocas del Complejo Guaviare (Maya-Sánchez *et al.*, 2018; Amaya-López *et al.*, 2020) y las edades de 1317 ± 4 Ma aquí reportadas para rocas del basamento en la vereda Jordán Alto-Cerritos. Finalmente, el pico de 1,0 Ga resalta como fuente las rocas asociadas a la Provincia Sunsás (Tassinari y Macambira, 1999), o también llamada en Colombia Orogéno Putumayo (Ibáñez-Mejía *et al.*, 2015), en relación con la formación del supercontinente Rodinia (Hoffman, 1991), a partir de la colisión de Amazonia-Báltica-Laurentia, evidenciada por intrusiones de gabros relacionadas con *rifting* continental más al oriente (Bonilla *et al.*, 2020). Las nuevas edades obtenidas con el método U-Pb mediante LA-ICP-MS en circones de la Formación San José y del neis del basamento indican que el aporte de los sedimentos que

conformaron esta unidad fue restringido a rocas que conforman los Complejos Mitú, Guaviare y Garzón.

Areniscas de la Formación San José en contexto con las rocas sedimentarias del Oriente Colombiano

Las secuencias sedimentarias que afloran hacia el oriente colombiano a menudo parecen muy similares, y su identificación detallada requiere correlaciones estratigráficas y geocronológicas no triviales. Gansser (1954) describe secuencias sedimentarias que afloran en las mesetas de Mapiripán, Yambí, Inírida, Serranía de San José del Guaviare y la zona del Salto del Araracuara en el Río Caquetá, infiriendo que eran equivalentes al Miembro Superior de la Formación Roraima. Sin embargo, la Formación Roraima, una secuencia de areniscas de 3000 m de espesor que forma serranías y mesetas con alturas encima de 2000 m en Venezuela y Brasil, se depositó entre 1,9 y 1,8 Ga (Santos *et al.*, 2003).

Las serranías de Naquén, Caranacoa, La Pedrera y Machado (Taraira), con dirección ~N-S, corresponden a areniscas con signos variables de metamorfismo (algo que no exhibe la Formación Roraima, pese a su mayor edad), y pertenecen a una secuencia metasedimentaria que cubre partes del norte de Brasil hasta estas cadenas prominentes en los departamentos del Vaupés y Guainía, a la cual se ha dado el nombre Formación Tunuí (Renzoni, 1989a, 1989b; Kroonenberg, 2019). Nuestras propias observaciones (Bonilla *et al.*, 2019) coinciden con esta apreciación, diferente a autores como Galvis *et al.* (1979) y Huguet *et al.* (1979). El rango de depositación de las pelitas, arenas y conglomerados es entre 1580 y 1480 Ma, probablemente en una cuenca tipo molase que fue parcialmente metamorfoseada durante la Orogénesis Grenvilliana (Kroonenberg, 2019).

Otro grupo de sedimentos, que no exhiben signos de metamorfismo, representa la Formación Piraparaná, con afloramientos en el Raudal Yaca-Yaca en el Río Vaupés hasta el Río Piraparaná en el sur, en el Río Caquetá y el Río Apaporis. Consiste en conglomerados polimícticos y arenas arcósicas, mezcladas con material piroclástico, lo que condujo a Galvis *et al.* (1979) y Huguet *et al.* (1979) a considerarlos equivocadamente como una unidad volcanosedimentaria. Su relación y edad queda dudosa, pero parece del Neoproterozoico, en contexto espacial y temporal con la Orogénesis Grenvilliana (Ibáñez-Mejía, 2010; Kroonenberg, 2019).

Posteriormente, en el Fanerozoico, sobre todo areniscas del Ordovícico (la Formación Araracuara), posiblemente

del Cretácico como La Lindosa y sedimentos Neógenos, cubren grandes áreas del basamento, mientras que de otras épocas geológicas no hay registro.

Como revelaron edades U-Pb y (U-Th)/He en circones detríticos, hasta la transición del Oligoceno al Mioceno (23-26 Ma) la fuente principal del material que rellenaba la Cuenca Llanos era el Cratón Amazónico, y, después, en el transcurso del levantamiento de la Cordillera Oriental, la región andina (Horton *et al.*, 2010).

En la región de Araracuara, estudiada por Herrera y Velásquez (1978), Galvis *et al.* (1979), Bogotá (1982) y Thery *et al.* (1984) “*afloran unos 200 a 350 m de areniscas cuarzosas con esporádicas intercalaciones de limolitas grises, verdosas y rojizas. El contenido fosilífero (Bogotá, 1982; Thery et al., 1984) incluye restos mal conservados de trilobites, icnofósiles (Cruziana furcifera, Skolitos, Fucoides), braquiópodos (Lingulella sp.) y diversas especies de acritarcos, que en conjunto caracterizan el piso Arenigiano e indican un ambiente marinosomero*” (Mojica y Villarroel, 1990).

El Mapa Geológico de Colombia (Gómez-Tapias *et al.*, 2015a, 2015b) y varias planchas geológicas asignan áreas grandes del basamento a unidades sedimentarias ordovícicas, incluida la Serranía de Chiribiquete (ej. Figura 3.36 en Kroonenberg, 2019). En este mapa de la Figura 3.36, la Serranía La Lindosa aparece igualmente como parte de la Formación Araracuara formada hace ~488 Ma, un concepto que empezó a cambiarse a partir de la publicación del Mapa Geológico de Colombia (Gómez-Tapias *et al.*, 2007), cuyos autores la asignaron al Cretácico, al igual que lo hizo posteriormente Arango *et al.* (2011).

Sin embargo, por ejemplo, el Gabro de Caño Viejita en el departamento del Vichada, cuya edad de cristalización pudimos determinar entre 975 ± 9 y 1002 ± 21 Ma (Bonilla *et al.*, 2020), parece tener un contacto intrusivo con las areniscas en su borde norte, lo que significaría que estas areniscas no pueden tener una edad posterior, no obstante, en el Mapa Geológico (Gómez-Tapias *et al.*, 2015a, 2015b) son asignados al Ordovícico. También otro gabro ~10 km al occidente del Gabro Viejita (Cerro Siare) corta verticalmente una secuencia de areniscas, como fue reportado por Franco (2002), quien describe en detalle una columna de 372 m de subarcosa a areniscas cuarzosas y conglomeráticas y la asigna como parte de la Formación Mapiripiana de edad Mesoproterozoica.

Es importante recalcar que la datación y asignación cronoestratigráfica de areniscas y sedimentos en el oriente colombiano en general, tiene todavía muchos desafíos; al igual, se debe tener en cuenta que se están empezando a reconocer cada vez más diferenciaciones en rocas magmáticas y metamórficas que hace algunos años eran simplemente parte del Escudo Guayanés.

Sin embargo, este estudio no puede dar suficientes datos para determinar si la Formación San José, nombre dado por Trumpy (1943), tiene ciertamente una edad Cretácica u Ordovícica perteneciente más bien a la Formación Araracuara de Galvis *et al.* (1979). Para ser integrados en las arenas de las hoy areniscas de San José durante el Ordovícico se hubiera requerido un levantamiento y erosión relativamente rápido, pero no imposible y una depositación de arenas relativamente maduras y bien clasificadas. Lo cierto es, que todavía no hay suficiente registro y/o análisis de los eventos posteriores durante unos 350-400 Ma, hasta la edad de depositación más joven, postulada durante el Cretácico, lo cual impide dar un veredicto basado en datos y no en modelos generales.

Formación del paisaje de Ciudad de Piedra

Los procesos kársticos en rocas siliciclásticas (Depetris *et al.*, 2014) son fundamentales para entender las geoformas llamativas en el área. Reflejan la combinación de varios factores endógenos y exógenos: una tectónica no inactiva, pero relativamente tranquila durante los últimos millones de años, especialmente a partir del desacoplamiento con las orogénesis andinas y procesos intrusivos evidenciados por última vez en la zona por la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare, a finales del Precámbrico (Muñoz-Rocha *et al.*, 2019). Se dio una consolidación de sedimentos fluviales probablemente cretácicos que, sin evidencias visibles de una cobertura posterior, han sido levantados a las alturas actuales, o más altas todavía, evidenciados durante el Jurásico (~180 Ma) en apatitos del Gabro de Caño Viejita (Bonilla *et al.*, 2020). De allí en adelante, han sido expuestos a procesos de meteorización hasta hoy en día (y probablemente no interrumpido por las glaciaciones cuaternarias) en un clima tropical pluvioso durante los últimos millones de años. La meteorización kárstica de rocas carbonáticas es evidente en muchas partes del mundo, incluido Colombia, y ha sido estudiada desde los primeros días de la geología moderna. Pero el estudio de la disolución kárstica en rocas siliciclásticas es relativamente nuevo y se ha

desarrollado a partir del entendimiento de geoformas con poca vegetación como los *badlands* (Dill *et al.*, 2020), incluidas la formación de *gullies* y *wadis* en el marco de una red de procesos climáticos, neotectónicos e hidrológicos.

Conclusiones

Las geoformas que se presentan en Ciudad de Piedra son características de ambientes kársticos de rocas siliciclásticas. Las observaciones de campo, incluidas capas de fósiles tipo *Thalassinoides* y los análisis petrográficos y geocronológicos, sugieren para las areniscas analizadas un ambiente de formación marino en una plataforma somera con aporte próximo de lo que hoy constituye el Cratón Amazónico, de composición granítica como el Complejo Mitú, el Complejo Guaviare y el Macizo de Garzón.

Las rocas del basamento cristalino con edades de 1317 ± 4 Ma pertenecen al Complejo Guaviare (Maya-Sánchez *et al.*, 2018; Amaya-López *et al.*, 2020) y hacen parte posiblemente de una provincia intermedia entre Rio Negro-Juruena (Tassinari y Macambira, 1999) y Orógeno Putumayo (Ibáñez-Mejía *et al.*, 2015), por ejemplo, Rondonia-San Ignacio (Tassinari y Macambira, 2004).

Las edades de las poblaciones de circones entre 1310 Ma y 1540 Ma confirman que la fuente principal de aporte de sedimentos que conforman las areniscas del Miembro Basal Ciudad de Piedra de la Formación San José son las rocas del basamento Mesoproterozoico aflorante en el área.

La ausencia de circones con edades de aproximadamente 600 Ma indica que las rocas de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare (que por si no contienen cuarzo) no fueron la fuente de aporte y, por tanto, fueron exhumadas posteriormente a la depositación de las areniscas de la Formación San José de posible edad Cretácica, encontrándose actualmente en contacto discordante y fallado con esta unidad.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia por el financiamiento del proyecto ganador de la convocatoria 2018 para el apoyo a proyectos de investigación entre las facultades de Artes y Ciencias de la sede Bogotá, titulado “Ciudad de Piedra, un acercamiento artístico al paisaje geológico en el departamento del Guaviare”, con código de registro HERMES 44952, y a todos los miembros de los grupos de GEGEMA

y de Artes activos en el proyecto; agradecimiento especial al profesor Marc Poujol de la Universidad de Rennes 1 por soportar los análisis de los datos adquiridos mediante LA-ICP-MS, y a los habitantes de la zona por facilitar el ingreso a los diferentes predios y el acompañamiento en las labores de campo. Nuestro aprecio a las alcaldías y a la Gobernación del departamento del Guaviare por facilitar espacios para el desarrollo del proyecto, y a las personas encargadas del turismo de la región, como guías turísticos y policía ambiental, entre otros. Agradecimientos especiales a los evaluadores que aportaron de manera significativa al mejoramiento del manuscrito.

Referencias

- Amaya-López, C.; Restrepo-Álvarez, J.J.; Weber-Scharff, M.; Cuadros-Jiménez, F.A.; Francisquini-Botelho, N.; Ibáñez-Mejía, M.; Maya-Sánchez, M.; Pérez-Parra, O.M.; Ramírez-Cárdenas, C. (2020). The Guaviare Complex: new evidence of Mesoproterozoic (ca. 1.3 Ga) crust in the Colombian Amazonian Craton. *Boletín Geológico*, 47, 5-34. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.47.2020.502>
- Arango, M.I.; Nivia, Á.; Zapata, G.; Giraldo, M.I.; Bermúdez, J.G.; Albarracín, H. (2011). Geología y geoquímica de la plancha 350 San José del Guaviare. Informe Interno, Servicio Geológico Colombiano.
- Arango-Mejía, M.I.; Zapata-García, G.; Martens, U. (2012). Caracterización petrográfica, geoquímica y edad de la Sienita Nefelínica de San José del Guaviare. *Boletín de Geología*, 34(1), 15-26.
- Bayona, G.; Valencia, A.; Mora, A.; Rueda, M.; Ortiz, J.; Montenegro, O. (2008). Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepaís de los Llanos de Colombia. *Geología de Colombia*, 33, 23-46.
- Bogotá, J. (1982). Estratigrafía del Paleozoico inferior en el área amazónica de Colombia. *Geología Norandina*, 6, 29-38.
- Bonilla, A.; Frantz, J.C.; Charão-Marques, J.; Cramer, T.; Franco, J.A.; Amaya, Z. (2016). Magmatismo rapakivi en la cuenca media del río Inírida, departamento de Guainía, Colombia. *Boletín de Geología*, 38(1), 17-32. <https://doi.org/10.18273/revbol.v38n1-2016001>

- Bonilla, A. (2019). Origen y evolución de los granitoides Proterozoicos del Oriente Colombiano, noroeste del Cratón Amazónico. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Bonilla, A.; Cramer, T.; Poujol, M.; Cano, H.; Franco, J.A.; Amaya, Z. (2019). Petrografía, geoquímica y geocronología U/Pb en circones de rocas ígneas y metamórficas a lo largo del Río Cuiarí en el sur del Departamento de Guainía, Colombia. *Boletín de Geología*, 41(1), 55-84. <https://doi.org/10.18273/revbol.v41n1-2019003>
- Bonilla, A.; Franco, J.A.; Cramer, T.; Poujol, M.; Cogné, N.; Nachtergaele, S.; De Grave, J. (2020). Apatite LA-ICP-MS U–Pb and fission-track geochronology of the Caño Viejita gabbro in E-Colombia: Evidence for Grenvillian intraplate rifting and Jurassic exhumation in the NW Amazonian Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102438. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102438>
- Bühn, B.; Pimentel, M.M.; Matteini, M.; Dantas, E.L. (2009). High spatial resolution analysis of Pb and U isotopes for geochronology by laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 81(1), 99-114. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652009000100011>
- Cordani, U.G.; Teixeira, W. (2007). Proterozoic accretionary belts in the Amazonian Craton. In: R. Hatcher, M. Carlson, J. McBride, J. Martínez (eds.). *4-D Framework of Continental Crust* (pp. 297-320). The Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2007.1200\(14\)](https://doi.org/10.1130/2007.1200(14))
- Cordani, U.G.; Sato, K.; Sproessner, W.; Fernandes, F.S. (2016). U-Pb zircon ages of rocks from the Amazonas Territory of Colombia and their bearing on the tectonic history of the NW sector of the Amazonian Craton. *Brazilian Journal of Geology*, 46(Suppl 1), 5-35. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620150012>
- Corfu, F.; Hanchar, J.M.; Hoskin, P.W.O.; Kinny, P.D. (2003). Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1), 469-500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Cramer, T.; Bonilla-Pérez, A.; Franco-Victoria, J.A.; García-Romero, D.F. (2018a). Inventario Mineral - Departamento del Guaviare, en: Proyecto Investigación de Minerales Estratégicos, Industriales y Materiales de Construcción en la Región Llanos, Convenio 031 de 2013 - Departamento del Vaupés y Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Cramer, T.; Franco, J.A.; Díaz, J.; León, A.; Romero-Rodríguez, P.; Quiroga-Rivera, M.L. (2018b). Análisis de impactos socioambientales asociados a la actividad minera en el Departamento del Guaviare, Colombia, en: Proyecto Investigación de Minerales Estratégicos, Industriales y Materiales de Construcción en la Región Llanos. Convenio 031 de 2013 - Departamento del Vaupés y Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Depetris, P.J.; Pasquini, A.I.; Lecomte, K.L. (2014). *Weathering and the Riverine Denudation of Continents*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7717-0>
- Dill, H.G.; Buzatu, A.; Balaban, S.I.; Ufer, K.; Gómez-Tapias, J.; Birgăoanu, D.; Cramer, T. (2020). The “badland trilogy” of the Desierto de la Tatacoa, upper Magdalena Valley, Colombia, a result of geodynamics and climate: With a review of badland landscapes. *CATENA*, 194, 104696. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104696>
- Franco, G.D. (2002). Estratigrafía, petrografía y análisis de proveniencia de la secuencia sedimentaria aflorante en la serranía de Mapiripana departamentos de Guainía y Vichada). Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Galvis, J.; Huguett, A.; Ruge, P. (1979). Geología de la Amazonía colombiana. *Boletín Geológico*, 22(3), 4-86.
- Gansser, A. (1954). The Guiana Shield (S. America) Geological Observations. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 47, 77-112.
- Gaudette, H.E.E.; Mendoza, V.; Hurley, P.M.; Fairbairn, H.W. (1978). Geology and age of the Parguaza rapakivi granite, Venezuela. *GSA Bulletin*, 89(9), 1335-1340. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1978\)89<1335:GAAOTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1978)89<1335:GAAOTP>2.0.CO;2)

- Gaudette, H.; Olszewski, W. (1985). Geochronology of the basement rocks, Amazonas Territory, Venezuela and the tectonic evolution of the western Guiana Shield. *Geologie en Mijnbouw*, 64(2), 131-143.
- Gómez-Tapias, J.; Nivia, A.; Montes, N.; Jiménez, D.; Tejada, M.; Sepúlveda, M.; Mora, M. (2007). Mapa Geológico de Colombia 2007. Escala 1:1.000.000. INGEOMINAS, Bogotá.
- Gómez-Tapias, J.; Montes-Ramírez, N.E.; Nivia-Guevara, Á.; Diederix, H. (2015a). Mapa Geológico de Colombia, 1:1.000.000, en: Atlas Geológico de Colombia. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Gómez-Tapias, J.; Montes-Ramírez, N.E.; Alcárcel-Gutiérrez, F.A.; Almanza-Meléndez, M.F.; Madrid-Montoya, C.A.; Nivia-Guevara, Á.; (2015b). Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015. Servicio Geológico Colombiano.
- Herrera, A.; Velásquez, B.E. (1978). Estratigrafía de la sección de Araracuara (Amazonas). Tesis, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Hoffman, P.F. (1991). Did the Breakout of Laurentia Turn Gondwanaland Inside-Out? *Science*, 252(5011), 1409-1412. <https://doi.org/10.1126/science.252.5011.1409>
- Horton, B.K.; Parra, M.; Saylor, J.E.; Nie, J.; Mora, A.; Torres, V.; Stockli, D.F.; Strecker, M.R. (2010). Resolving uplift of the northern Andes using detrital zircon age signatures. *GSA Today*, 20(7), 4-9. <https://doi.org/10.1130/GSATG76A.1>
- Huguett, A.; Galvis, J.; Ruge, P. (1979). La amazonía colombiana y sus recursos. Proyecto Radargramétrico del Amazonas. Bogotá. Servicio Geológico Colombiano.
- Ibáñez-Mejía, M. (2010). New U-Pb geochronological insights into the Proterozoic tectonic evolution of Northwestern South America: The Mesoneoproterozoic Putumayo Orogen of Amazonia and implications for Rodinia Reconstructions. MSc Thesis, The University of Arizona, Arizona, Estados Unidos.
- Ibáñez-Mejía, M.; Pullen, A.; Arenstein, J.; Gehrels, G.E.; Valley, J.; Ducea, M.N.; Mora, A.R.; Pecha, M.; Ruiz, J. (2015). Unraveling crustal growth and reworking processes in complex zircons from orogenic lower-crust: The Proterozoic Putumayo Orogen of Amazonia. *Precambrian Research*, 267, 285-310. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.06.014>
- Jackson, S.E.; Pearson, N.J.; Griffin, W.L.; Belousova, E.A. (2004). The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2), 47-69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>
- Jaramillo, J.; Mora, L.; Cubides, F. (1986). *Colonización, coca y guerrilla*. 1ra ed. Universidad Nacional de Colombia.
- Kroonenberg, S. (2019). The Proterozoic Basement of the Western Guiana Shield and the Northern Andes. In: F. Cediél, R.P. Shaw (eds.). *Geology and Tectonics of Northwestern South America* (pp. 115-192). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_3
- López, J.A.; Khurama, S.; Bernal, L.E.; Cuéllar, M.A. (2007). El Complejo Mitú: una nueva perspectiva. *XI Congreso Colombiano de Geología*, Bucaramanga, Colombia.
- Ludwig, K.R. (2003). *User's Manual for Isoplot 3.00 - A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication.
- Maya-Sánchez, M.; Amaya-López, C.; Restrepo-Álvarez, J.J.; Duque-Pineda, J.; Palacio-García, Á.F.; Gutiérrez-Ramírez, P.A.; Parra-Pérez, O.; Velásquez, C.R.; Nabet-Arias, E.; Bedoya-Ospina, J.D. (2018). Memoria explicativa de la Plancha 372 – El Retorno. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Mojica, J.; Villarroel, C. (1990). Sobre la distribución y Facies del Paleozoico Inferior sedimentario en el extremo NW de Sudamérica. *Geología Colombiana*, 17, 219-226.
- Muñoz-Rocha, J.A.; Piraquive, A.; Franco, J.A.; Bonilla, A.; Peña-Urueña, M.L.; Cramer, T.; Rayo-Rocha, L.; Villamizar, N. (2019). Megacircones

- ediacáricos de la sienita nefelínica de San José del Guaviare y su potencial como material de referencia para datación U/Pb mediante LA-ICP-MS. *Boletín Geológico*, 45, 5-22. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.45.2019.484>
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy*. 2nd ed. John Wiley & Sons Ltd.
- Nivia, A.; Giraldo, M.I.; Arango, M.I.; Bermúdez, J.G. (2008). Geología de la Plancha 350 San José del Guaviare. Servicio Geológico Colombiano, Bogotá.
- Piccini, L.; Mecchia, M. (2009). Solution weathering rate and origin of karst landforms and caves in the quartzite of Auyan-tepui (Gran Sabana, Venezuela). *Geomorphology*, 106(1-2), 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.09.019>
- Pinson, W.H.; Hurley, P.M.; Mencher, E.; Fairbairn, H.W. (1962). K-Ar and Rb-Sr ages of biotites from Colombia, South America. *GSA Bulletin*, 73(7), 907-910. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1962\)73\[907:KARAOB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1962)73[907:KARAOB]2.0.CO;2)
- Renzoni, G. (1989a). Comparación entre las secuencias metasedimentarias de la Serranía de Naquén y de la Serra da Jacobina. *Boletín Geológico*, 30(2), 25-42. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol30.2.1989.250>
- Renzoni, G. (1989b). La secuencia aurífera de la Serranía de Naquén. *Boletín Geológico*, 30(2), 43-103. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol30.2.1989.252>
- Rosa-Costa, L.; Ricci, P.; Lafon, J.M.; Vasquez, M.; Carvalho, J.; Klein, E.; Macambira, E. (2003). Geology and geochronology of Archean and Paleoproterozoic domains of southwestern Amapá and northwestern Pará, Brazil, southeastern Guiana shield. *Géologie de la France*, 2, 101-120.
- Santos, J.O.S.; Potter, P.E.; Reis, N.J.; Hartmann, L.A.; Fletcher, I.R.; McNaughton, N.J. (2003). Age, source, and regional stratigraphy of the Roraima Supergroup and Roraima-like outliers in northern South America based on U-Pb geochronology. *GSA Bulletin*, 115(3), 331-348. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2003\)115<0331:ASARS O>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2003)115<0331:ASARS O>2.0.CO;2)
- Tassinari, C.C.G.; Macambira, M.J.B. (1999). Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22(3), 174-182. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1999/v22i3/004>
- Tassinari, C.G.; Macambira, J.B. (2004). A evolução tectônica do Craton Amazônico. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C. Carneiro, B. Brito-Neves (eds.). *Geologia Do Continente Sul-Americano: Evolução Da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (pp. 471-486). Editorial Beca.
- Tassinari, C.C.G.; Munhá, J.M.U.; Teixeira, W.; Palácios, T.; Nutman, A.P.; Sosa, C.; Santos, A.P.; Calado, B.O. (2004). The Imataca Complex, NW Amazonian Craton, Venezuela: Crustal evolution and integration of geochronological and petrological cooling histories. *Episodes*, 27(1), 3-12. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2004/v27i1/002>
- Thery, J.M.; Peniguel, G.; Haye, G. (1984). Descubrimiento de acritarcos del Arenigdiano cerca a Araracuara (Caquetá, Colombia). Ensayo de interpretación de esta región de la saliente del Vaupés. *Geología Norandina*, 9, 3-17.
- Trujillo-Téllez, J.; Muñoz, G.; Cramer, T.; Rodríguez, O.; Rodríguez, C.; Riveros, N.; Amaya, Z.; Castañeda, A.; Franco, J.A.; Barbero, J.C.; Figue, S. (2018). Estudios arqueométricos, documentación y registro del arte rupestre de la Serranía de la Lindosa y Raudal del Guayabero, Departamento del Guaviare. Informe Final y Concepto Proyecto Investigación para ICANH. Bogotá.
- Trumpy, D. (1943). Pre-Cretaceous of Colombia. *GSA Bulletin*, 54(9), 1281-1304. <https://doi.org/10.1130/GSAB-54-1281>
- Ulmer-Scholle, D.; Scholle, P.; Schieber, J.; Raine, R. (2014). *A Color Guide to the Petrography of sandstones, siltstones, shales and associated rocks*. AAPG Memoir.
- Veras, R.; Nascimento, R.; Almeida, M.; Paquette, J.L.; Carneiro, M. (2018). Paleoproterozoic basement of Içana Domain, Rio Negro Province, northwestern Amazonian Craton: Geology, geochemistry and geochronology (U-Pb and Sm-Nd). *Journal of South American Earth*

Sciences, 86, 384-409. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.07.003>

Vesga, C.; Castillo, L. (1972). Reconocimiento geológico y geoquímica preliminar del río Guaviare, entre la confluencia con los ríos Ariari e Iteviare. Bogotá. Informe interno, INGEOMINAS.

Wray, R.A.L. (2013). Solutional weathering and karstic landscapes on quartz sandstones and quartzite. In: J. Shroder, A. Frumkin (eds.). *Treatise on Geomorphology* (pp. 463-483). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00140-8>

Fecha de recibido: 26 de marzo de 2021

Fecha de aprobado: 23 de agosto de 2022

Anexo A. Tabla de datos obtenidos en 83 puntos de ablación en circones extraídos de las areniscas de la Formación San José, Miembro Basal Ciudad de Piedra.

I.D.	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	rho	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U Edad	±2σ%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Edad	±2σ%	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶ Edad	±2σ%	Concordia	Aprox U PPM	Aprox Th PPM	Aprox Pb PPM	Th/U
Zrn_3	2,361	0,140	0,2124	0,0120	0,95	0,0818	0,0020	1223	43	1241	64	1201	48	102	54	29	97	0,54
Zrn_4	2,380	0,140	0,2123	0,0120	0,96	0,0824	0,0016	1231	42	1240	62	1226	38	100	70	26	86	0,38
Zrn_5	2,710	0,160	0,2321	0,0130	0,95	0,0854	0,0016	1329	43	1345	67	1307	36	102	120	44	163	0,36
Zrn_6	2,087	0,120	0,1941	0,0110	0,99	0,0790	0,0016	1140	40	1143	58	1134	41	100	69	37	114	0,54
Zrn_8	2,628	0,150	0,2231	0,0120	0,94	0,0858	0,0014	1308	41	1298	65	1324	31	99	287	62	215	0,22
Zrn_9	3,399	0,190	0,2541	0,0140	0,99	0,0955	0,0014	1503	44	1459	72	1532	28	98	336	117	436	0,35
Zrn_10	3,379	0,190	0,2544	0,0140	0,98	0,0949	0,0015	1498	45	1461	72	1517	30	99	240	71	265	0,30
Zrn_11	2,651	0,150	0,2222	0,0120	0,95	0,0857	0,0017	1312	43	1293	66	1319	38	99	160	63	211	0,39
Zrn_12	2,322	0,130	0,1951	0,0110	0,60	0,0856	0,0015	1217	41	1148	59	1323	33	92	526	352	959	0,67
Zrn_13	2,428	0,140	0,1989	0,0110	0,96	0,0875	0,0015	1247	41	1169	59	1358	34	92	143	107	255	0,75
Zrn_14	1,456	0,084	0,1449	0,0080	0,96	0,0721	0,0013	910	35	872	45	981	37	93	338	5	11	0,01
Zrn_15	3,317	0,190	0,2516	0,0140	0,97	0,0953	0,0016	1482	45	1446	72	1523	33	97	209	85	335	0,41
Zrn_16	2,396	0,140	0,2024	0,0110	0,93	0,0856	0,0016	1240	41	1187	60	1318	36	94	152	188	600	1,24
Zrn_17	2,094	0,130	0,1978	0,0120	0,98	0,0787	0,0022	1139	43	1161	63	1134	54	100	80	71	164	0,89
Zrn_18	4,090	0,240	0,3139	0,0170	0,92	0,0952	0,0016	1648	47	1759	85	1520	32	108	160	72	323	0,45
Zrn_19	4,048	0,230	0,3127	0,0170	0,96	0,0946	0,0015	1641	46	1753	85	1514	29	108	176	72	336	0,41
Zrn_20	3,077	0,180	0,2650	0,0150	0,97	0,0850	0,0014	1424	44	1515	75	1305	32	109	195	78	311	0,40
Zrn_21	4,281	0,240	0,3267	0,0180	0,98	0,0960	0,0015	1688	47	1822	87	1543	28	109	306	97	479	0,32
Zrn_22	3,040	0,180	0,2602	0,0140	0,91	0,0849	0,0015	1414	44	1490	74	1298	34	109	108	50	207	0,47
Zrn_23	3,088	0,180	0,2631	0,0150	0,98	0,0858	0,0014	1427	44	1505	74	1318	32	108	164	42	172	0,25
Zrn_24	3,657	0,210	0,2750	0,0150	0,95	0,0961	0,0015	1560	46	1566	78	1545	28	101	352	146	656	0,42
Zrn_25	2,577	0,150	0,2210	0,0120	0,93	0,0839	0,0014	1292	42	1287	64	1276	33	101	168	70	219	0,41
Zrn_26	4,284	0,250	0,2956	0,0160	0,93	0,1048	0,0018	1688	47	1669	82	1700	32	99	162	102	449	0,63
Zrn_27	3,975	0,230	0,2622	0,0150	0,99	0,1101	0,0022	1628	48	1500	75	1789	36	91	95	82	203	0,86
Zrn_28	3,273	0,190	0,2542	0,0140	0,95	0,0942	0,0016	1472	45	1459	72	1501	32	98	198	417	1478	2,11
Zrn_29	1,665	0,095	0,1710	0,0094	0,96	0,0716	0,0011	995	36	1017	52	964	33	103	358	91	226	0,25
Zrn_30	2,561	0,150	0,2238	0,0120	0,92	0,0846	0,0018	1281	43	1300	65	1275	42	100	52	20	63	0,38
Zrn_32	3,568	0,200	0,2796	0,0150	0,96	0,0946	0,0014	1542	45	1589	78	1515	28	102	418	167	677	0,40
Zrn_33	1,642	0,095	0,1648	0,0092	0,96	0,0701	0,0012	985	36	983	51	924	34	107	428	36	20	0,08
Zrn_34	3,783	0,220	0,2783	0,0160	0,99	0,0949	0,0019	1586	47	1582	79	1516	37	105	112	39	165	0,35
Zrn_36	3,438	0,200	0,2550	0,0140	0,94	0,0934	0,0018	1511	47	1464	73	1486	36	102	116	37	150	0,32
Zrn_37	2,804	0,170	0,2325	0,0130	0,92	0,0839	0,0019	1353	45	1347	68	1277	43	106	117	61	218	0,52

I.D.	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±2σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±2σ	rho	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	±2σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U Edad	±2σ%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Edad	±2σ%	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶ Edad	±2σ%	Concordia	Aprox U PPM	Aprox Th PPM	Aprox Pb PPM	Th/U
Zrn_38	2,927	0,170	0,2388	0,0130	0,94	0,0854	0,0016	1386	44	1380	69	1312	37	106	102	33	125	0,32
Zrn_39	1,455	0,084	0,1454	0,0081	0,96	0,0702	0,0011	911	35	875	46	927	33	98	886	65	100	0,07
Zrn_40	3,759	0,220	0,2794	0,0150	0,92	0,0947	0,0015	1581	46	1589	78	1513	29	105	173	51	216	0,29
Zrn_41	2,658	0,150	0,2276	0,0130	0,80	0,0850	0,0013	1316	42	1322	65	1306	30	101	304	149	487	0,49
Zrn_42	1,713	0,098	0,1646	0,0091	0,97	0,0753	0,0012	1012	37	982	50	1068	32	95	834	199	432	0,24
Zrn_43	1,571	0,091	0,1591	0,0088	0,95	0,0690	0,0012	958	36	951	49	884	37	108	168	213	553	1,27
Zrn_44	2,374	0,140	0,2066	0,0120	0,98	0,0798	0,0017	1232	42	1209	62	1169	42	105	90	25	84	0,28
Zrn_45	2,977	0,170	0,2412	0,0130	0,94	0,0852	0,0016	1396	45	1392	69	1298	37	108	64	17	70	0,27
Zrn_46	2,582	0,150	0,2190	0,0120	0,94	0,0809	0,0015	1291	42	1276	64	1197	37	108	78	24	86	0,31
Zrn_47	2,281	0,130	0,1999	0,0110	0,97	0,0783	0,0014	1204	41	1174	59	1139	36	106	151	55	184	0,36
Zrn_49	3,571	0,210	0,2706	0,0150	0,94	0,1014	0,0020	1539	47	1543	77	1636	36	94	329	275	696	0,84
Zrn_50	1,681	0,100	0,1705	0,0096	0,95	0,0770	0,0021	999	39	1014	53	1101	53	91	241	133	210	0,55
Zrn_51	2,294	0,130	0,2064	0,0110	0,94	0,0847	0,0014	1208	41	1209	61	1297	32	93	220	97	188	0,44
Zrn_52	2,431	0,140	0,2138	0,0120	0,97	0,0855	0,0013	1251	41	1249	63	1324	29	94	701	220	460	0,31
Zrn_53	2,902	0,170	0,2325	0,0130	0,95	0,0935	0,0016	1379	44	1347	68	1480	33	93	156	71	157	0,45
Zrn_54	3,743	0,210	0,2686	0,0150	1,00	0,1033	0,0017	1577	47	1533	76	1671	30	94	177	121	320	0,68
Zrn_55	3,218	0,180	0,2449	0,0140	0,70	0,0962	0,0015	1460	45	1411	70	1543	30	95	289	356	954	1,23
Zrn_56	4,005	0,230	0,2753	0,0150	0,95	0,1055	0,0017	1634	46	1567	77	1713	29	95	230	119	398	0,52
Zrnc_1	3,315	0,400	0,2234	0,0320	0,84	0,1056	0,0021	1482	95	1299	170	1725	37	86	294	284	946	0,96
Zrnc_2	4,176	0,510	0,3081	0,0440	0,86	0,0966	0,0024	1667	100	1730	220	1549	47	108	158	89	403	0,56
Zrnc_3	3,928	0,480	0,2908	0,0420	0,85	0,0966	0,0025	1619	100	1644	210	1541	50	105	67	61	270	0,91
Zrnc_4	3,830	0,470	0,2875	0,0410	0,86	0,0948	0,0024	1597	98	1628	210	1515	48	105	150	80	354	0,53
Zrnc_5	2,918	0,360	0,2415	0,0350	0,85	0,0861	0,0020	1383	93	1393	180	1324	44	104	140	61	216	0,44
Zrnc_6	2,514	0,310	0,2194	0,0320	0,85	0,0818	0,0017	1273	90	1278	170	1227	40	104	165	62	167	0,37
Zrnc_7	1,849	0,220	0,1852	0,0270	0,82	0,0712	0,0014	1061	80	1095	140	954	41	111	276	41	113	0,15
Zrnc_8	8,190	1,000	0,3999	0,0580	0,84	0,1459	0,0029	2245	110	2167	270	2290	34	98	194	42	235	0,22
Zrnc_9	2,508	0,310	0,2227	0,0320	0,86	0,0824	0,0021	1268	89	1296	170	1230	50	103	55	28	96	0,51
Zrnc_10	2,548	0,310	0,2210	0,0320	0,84	0,0851	0,0016	1284	88	1287	170	1301	36	99	142	67	220	0,47
Zrnc_11	2,433	0,300	0,2191	0,0320	0,84	0,0831	0,0026	1243	87	1275	170	1188	62	105	23	14	48	0,62
Zrnc_12	2,324	0,290	0,2130	0,0310	0,86	0,0818	0,0031	1210	91	1242	160	1159	80	104	25	19	63	0,77
Zrnc_13	3,979	0,480	0,2870	0,0410	0,84	0,1031	0,0020	1627	97	1627	210	1673	35	97	118	77	322	0,65
Zrnc_14	2,640	0,320	0,2267	0,0330	0,83	0,0862	0,0021	1311	89	1317	170	1329	47	99	176	88	295	0,50
Zrnc_15	3,636	0,450	0,2764	0,0400	0,86	0,0972	0,0024	1555	98	1572	200	1559	47	100	153	79	329	0,52

I.D.	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	rho	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ Edad	$\pm 2\sigma\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Edad	$\pm 2\sigma\%$	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ Edad	$\pm 2\sigma\%$	Concordia	Aprox U PPM	Aprox Th PPM	Aprox Pb PPM	Th/U
Zrnc_16	2,157	0,270	0,2018	0,0290	0,87	0,0790	0,0028	1164	87	1185	160	1154	70	101	142	64	199	0,45
Zrnc_17	0,772	0,094	0,0939	0,0130	0,88	0,0589	0,0013	579	54	578	80	532	47	109	239	377	518	1,58
Zrnc_18	2,520	0,310	0,2149	0,0310	0,85	0,0832	0,0022	1272	89	1254	160	1250	50	102	82	24	72	0,9
Zrnc_19	2,370	0,290	0,2075	0,0300	0,85	0,0806	0,0019	1228	87	1215	160	1183	47	104	71	51	157	0,72
Zrnc_20	2,876	0,350	0,2098	0,0300	0,85	0,0953	0,0016	1375	91	1227	160	1532	31	90	858	210	519	0,24
Zrnc_21	2,806	0,340	0,2309	0,0330	0,85	0,0849	0,0015	1355	90	1339	170	1303	35	104	254	133	411	0,52
Zrnc_22	2,773	0,340	0,2270	0,0330	0,84	0,0848	0,0015	1346	90	1318	170	1301	35	103	207	105	340	0,51
Zrnc_23	3,673	0,450	0,2700	0,0390	0,85	0,0954	0,0017	1562	96	1540	200	1523	35	103	119	69	264	0,58
Zrnc_24	3,892	0,470	0,2882	0,0410	0,85	0,0948	0,0020	1610	98	1632	210	1522	41	106	237	78	329	0,33
Zrnc_26	2,240	0,300	0,2127	0,0310	0,92	0,0815	0,0049	1182	95	1242	170	1160	120	102	31	10	32	0,31
Zrnc_27	3,623	0,440	0,2903	0,0420	0,84	0,0958	0,0019	1554	94	1642	210	1536	38	101	177	51	213	0,29
Zrnc_28	3,576	0,440	0,2836	0,0410	0,85	0,0966	0,0025	1542	100	1609	210	1554	49	99	247	120	504	0,49
Zrnc_29	2,730	0,330	0,2474	0,0360	0,83	0,0843	0,0022	1334	92	1424	180	1286	49	104	105	43	152	0,41
Zrnc_30	2,046	0,250	0,1894	0,0270	0,86	0,0830	0,0017	1124	86	1116	150	1262	40	89	244	240	519	0,98
Zrnc_31	2,194	0,270	0,1951	0,0280	0,86	0,0846	0,0015	1177	85	1149	150	1297	35	91	350	185	472	0,53
Zrnc_32	3,651	0,450	0,2812	0,0410	0,85	0,0965	0,0031	1557	100	1597	200	1554	57	100	138	80	323	0,58
Zrnc_42	2,773	0,350	0,2402	0,0350	0,87	0,0851	0,0037	1352	110	1387	180	1297	89	104	125	158	402	1,27
Zrnc_43	3,760	0,470	0,2839	0,0410	0,87	0,0958	0,0031	1582	98	1610	210	1541	65	103	147	99	296	0,68

Anexo B. Tabla de los datos isotópicos obtenidos en 28 puntos de ablación en circones extraídos de neises del basamento aflorante en cercanías a las veredas Cerritos y El Capricho y Triunfo II.

I.D.	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	ρ	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$	$\pm 2\sigma$	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ Edad	$\pm 2\sigma\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Edad	$\pm 2\sigma\%$	$\text{Pb}^{207}/\text{U}^{235}$ Edad	$\pm 2\sigma\%$	Concordia	Aprox Pb PPM	Aprox U PPM	Aprox Th PPM	Th/U
52	2,63801	0,03464	0,22821	0,00293	0,90	0,08385	0,00088	1288,9	20,34	1325,1	15,39	1311,3	9,67	101,7	55,1	231,7	91,9	0,40
62	2,67236	0,03513	0,22844	0,00293	0,90	0,08485	0,00089	1312,1	20,33	1326,3	15,4	1320,8	9,71	100,7	57,6	239,5	101,3	0,42
72	2,65131	0,03467	0,21965	0,00282	0,90	0,08755	0,00091	1372,7	19,95	1280	14,9	1315	9,64	95,8	73,0	305,2	176,2	0,58
82	2,66983	0,03563	0,22835	0,00294	0,90	0,0848	0,00092	1311	20,86	1325,9	15,4	1320,1	9,86	100,7	31,3	133,0	46,0	0,35
92	2,66174	0,03506	0,22845	0,00293	0,90	0,08451	0,00089	1304,2	20,43	1326,4	15,38	1317,9	9,72	101,1	53,4	221,6	96,6	0,44
102	2,57856	0,03413	0,22144	0,00284	0,90	0,08446	0,0009	1303,1	20,6	1289,5	15	1294,6	9,68	99,3	35,8	155,8	57,4	0,37
112	2,69322	0,03607	0,22896	0,00294	0,90	0,08532	0,00093	1322,7	20,98	1329,1	15,42	1326,6	9,92	100,3	30,8	129,9	46,2	0,36
132	2,51598	0,03365	0,21665	0,00278	0,90	0,08424	0,00091	1297,9	20,97	1264,1	14,73	1276,7	9,72	98,4	27,6	122,9	43,0	0,35
142	2,66327	0,03513	0,22745	0,00291	0,90	0,08493	0,0009	1313,9	20,5	1321,1	15,3	1318,3	9,74	100,3	56,2	232,8	103,1	0,44
182	2,63351	0,03493	0,22823	0,00292	0,90	0,08369	0,0009	1285,3	20,81	1325,2	15,32	1310	9,76	101,9	45,9	193,2	72,2	0,37
192	2,69071	0,03574	0,22829	0,00292	0,90	0,08549	0,00092	1326,6	20,77	1325,5	15,33	1325,9	9,83	99,9	44,7	185,0	79,0	0,43
202	2,62944	0,0347	0,22806	0,00291	0,90	0,08363	0,00089	1283,7	20,67	1324,3	15,29	1308,9	9,71	102,0	76,4	308,5	163,3	0,53
212	2,66068	0,03603	0,22756	0,00291	0,90	0,08481	0,00094	1311	21,45	1321,7	15,3	1317,6	9,99	100,5	27,5	115,3	45,1	0,39
222	2,66755	0,03544	0,228	0,00291	0,90	0,08486	0,00091	1312,3	20,81	1324	15,29	1319,5	9,81	100,5	45,0	189,4	69,5	0,37
232	2,68072	0,03572	0,22304	0,00285	0,90	0,08718	0,00094	1364,4	20,72	1297,9	15,02	1323,2	9,85	97,0	45,9	192,7	82,0	0,43
242	2,64693	0,03515	0,22814	0,00291	0,90	0,08415	0,00091	1296	20,82	1324,7	15,28	1313,8	9,79	101,4	60,2	247,7	112,1	0,45
252	2,6718	0,03563	0,22743	0,0029	0,90	0,08521	0,00093	1320,2	20,95	1321	15,25	1320,7	9,85	100,0	60,6	247,4	121,3	0,49
262	2,67585	0,0359	0,22794	0,00291	0,90	0,08515	0,00093	1318,8	21,16	1323,7	15,28	1321,8	9,92	100,2	44,7	185,8	78,3	0,42
312	2,67322	0,03629	0,22796	0,00291	0,90	0,08506	0,00095	1316,8	21,6	1323,8	15,27	1321,1	10,03	100,3	34,6	142,1	67,0	0,47
322	2,68144	0,03617	0,22785	0,0029	0,90	0,08536	0,00095	1323,6	21,38	1323,2	15,24	1323,4	9,98	100,0	50,5	208,6	92,0	0,44
332	2,64776	0,03568	0,22823	0,00291	0,90	0,08415	0,00093	1295,9	21,38	1325,2	15,25	1314	9,93	101,4	56,9	233,8	105,0	0,45
342	2,68653	0,03633	0,22755	0,0029	0,90	0,08564	0,00095	1329,9	21,46	1321,6	15,22	1324,8	10,01	99,6	52,2	215,2	94,8	0,44
352	2,51946	0,03405	0,21281	0,00271	0,90	0,08587	0,00096	1335,3	21,42	1243,8	14,4	1277,7	9,82	95,7	51,3	220,3	133,2	0,60
362	2,66428	0,03585	0,22806	0,0029	0,90	0,08474	0,00094	1309,4	21,35	1324,3	15,22	1318,6	9,93	100,7	84,3	348,2	148,2	0,43
372	2,35832	0,0318	0,20003	0,00254	0,90	0,08552	0,00095	1327,2	21,4	1175,5	13,66	1230,1	9,61	92,7	78,1	358,3	176,9	0,49
382	2,66912	0,03638	0,22783	0,0029	0,90	0,08498	0,00096	1315	21,79	1323,1	15,22	1319,9	10,07	100,4	48,2	197,1	91,8	0,47
392	2,70279	0,03689	0,22751	0,00289	0,90	0,08617	0,00098	1342	21,75	1321,5	15,2	1329,2	10,12	99,0	40,6	170,0	63,0	0,37
402	2,65829	0,03658	0,2278	0,0029	0,90	0,08465	0,00097	1307,3	22,14	1323	15,22	1316,9	10,15	100,7	38,3	160,0	60,7	0,38