

Nombre del semillero de investigación

SEMILLERO DE INVESTIGACION EN MINEROLOGIA Y PETROLOGIA

Nombre del proyecto

ESTUDIO DEL BASAMENTO PALEOZOICO DE LA CORDILLERA CENTRAL

Año

2023

Marco del Proceso de ASC: Fortalecimiento o solución de asuntos de interés social.

Este semillero de investigación forma parte de la estrategia de Investigación Formativa de la Universidad EAFIT que ratifica su compromiso con el desarrollo de la Ciencia, la Tecnología, la Innovación y la Creación y lo establece como uno de sus ejes misionales. Con el desarrollo de iniciativas como estas, aportamos a los procesos científico-tecnológicos y creativos que se desarrollan en el seno de su comunidad universitaria y cómo estos permean las experiencias de aprendizaje de los estudiantes.

En el propósito de cultivar talentos y vocaciones científicas y creativas el rol del profesor es vital, ya que es quien desde su pasión, experiencia y conocimiento acerca a los estudiantes a las técnicas propias del saber científico y diseña experiencias de aprendizaje que aporten a la construcción de procesos investigativos.

En consonancia con los [Lineamientos de Investigación Formativa de la Universidad](#), se describe a continuación los principios que rigieron la ejecución del componente con sus resultados, en términos del fortalecimiento de asuntos de interés social, del presente proyecto:

Objetivos del semillero en clave de fortalecimiento de la práctica educativa

1) Profundizar en el uso de datos petrológicos; 2) Reconocer las principales incógnitas tectónicas de los Andes del Norte; 3) Generar espacios de discusión científica; 4) Mostrar el valor de la ciencia básica en el desarrollo de la humanidad.

Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos se utilizarán los siguientes métodos, además de la compilación de datos ya publicados. **Petrografía** La petrografía será hecha por microscopía de luz transmitida, y de ser necesario, reflejada, donde serán descritas las asociaciones minerales, texturales, estructuras y paragénesis de los litotipos, buscando la identificación de los minerales y clasificación de las muestras. Luego serán seleccionadas muestras representativas para análisis de U-Pb en circón. **Geocronología U-Pb** La geocronología U-Pb en monocristales de circón será utilizada con el fin de establecer la edad de cristalización magmática. Este método se basa en la capacidad del Uranio (U) de sustituir el circonio (Zr) en la estructura cristalina del circón (Dickin, 1995). La transformación de los isótopos de U en Pb combinado con la determinación de las razones isotópicas del sistema padre-hijo en el espectrómetro de masas, permite la definición de la edad del mineral portador de estos elementos. El método LA-ICP-MS (Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) permiten analizar monocristales de circón in-situ en segmentos de entre 20-30 μm . El principio del método consiste en el ataque al monocristal por un laser de gas que genera partículas por abrasión y las transporta a un espectrómetro de masas acoplado a un plasma, donde es posible realizar la cuantificación isotópica. En rocas plutónicas normalmente son analizados alrededor de 20 cristales, de los cuales se espera obtener edades concordantes que representan la edad de cristalización de la roca. En este caso se analizarán 1 o 2 muestras, dependiendo de los resultados de petrografía.

Descripción del fortalecimiento, la solución o el mejoramiento de la práctica educativa

El enfoque en estos objetivos específicos no solo fortaleció el conocimiento técnico de los semilleristas en geología y petrología metamórfica, sino que también desarrolló una serie de competencias transversales esenciales para su formación académica y profesional. Entre las competencias más destacadas se encuentran: **Análisis Crítico y Resolución de Problemas:** Los semilleristas aprendieron a abordar problemas complejos mediante la aplicación de métodos científicos y el análisis crítico de datos. Esto les permitió desarrollar una mentalidad analítica y una capacidad para resolver problemas de manera efectiva. **Trabajo en Equipo y Colaboración:** Las actividades del semillero fomentaron un entorno colaborativo, donde los participantes trabajaron en equipo para alcanzar los objetivos comunes. Esta experiencia mejoró sus habilidades de comunicación y colaboración, fundamentales para el trabajo científico y profesional. **Investigación y Comunicación**

Científica: A lo largo del proceso, los semilleristas tuvieron la oportunidad de involucrarse en todas las etapas de la investigación científica, desde la recopilación de datos hasta la presentación de resultados. Esto fortaleció sus competencias en investigación y en la comunicación efectiva de sus hallazgos a audiencias académicas. Adaptabilidad y Aprendizaje Continuo: El enfoque en problemas geológicos complejos y en la aplicación de técnicas avanzadas motivó a los semilleristas a adaptarse continuamente y a buscar nuevos conocimientos. Esta actitud de aprendizaje continuo es crucial para su desarrollo profesional en el campo de la geología.

A partir de estas consideraciones, a continuación, se encuentra la sistematización del proceso.

Medellín

NIT 890901389
Carrera 49 # 7 sur-50
(57) 604 261 95 00

Pereira

Carrera 19 # 12-70
Megacentro Pinares
(57) 606 321 41 15

Bogotá

Carrera 15 # 88-64
oficina 401
(57) 601 611 46 18

Llanogrande

Km 3.5 vía Don Diego –
Rionegro
(57) 322 529 4323

Informe final:
**Heterogeneidades en el basamento de los Andes colombianos con base en
isótopos de Pb**

Daniela Zapata Colorado
Camilo Bustamante Londoño

Universidad EAFIT
Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería

Resumen

Las relaciones de isótopos de plomo $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ representan un insumo de gran utilidad para la caracterización de las unidades del basamento, ya que el resultado de dichas relaciones en rocas ígneas y depósitos minerales reflejan las variaciones composicionales del basamento subyacente. El presente proyecto integra más de 150 datos isotópicos Pb/Pb de rocas ígneas y depósitos minerales que permiten establecer correlaciones con unidades del basamento por medio de la creación de mapas de contornos radiogénicos de plomo. De esta manera se proponen cuatro dominios radiogénicos para los Andes colombianos: Dominio del sur de los Andes, caracterizado por presentar relaciones isotópicas altamente radiogénicas; dominio de la Serranía de San Lucas y Santander, donde se encuentran las composiciones de plomo más evolucionadas del territorio colombiano; dominio de la Sierra Nevada de Santa Marta, representado por abarcar las relaciones isotópicas menos radiogénicas de los Andes colombianos; finalmente, dominio altamente heterogéneo ubicado en la parte central de Colombia, caracterizado por la ausencia de patrones de agrupamiento composicional definidos. Con base en los dominios propuestos, es posible identificar las heterogeneidades del basamento, y, a su vez, establecer relaciones regionales sobre los procesos tectónicos que dieron origen a las distintas unidades geológicas.

Introducción

Los isótopos de plomo son una herramienta ampliamente utilizada para el estudio y análisis de las variaciones composicionales del basamento, ya que el carácter variable de las firmas isotópicas en minerales mena o rocas intrusivas, reflejan las diferentes composiciones del basamento intruido y las características composicionales de las principales fuentes de plomo (Aitcheson et al., 1995; Chiaradia et al., 2004; Halla, 2018; LeHuray et al., 1988; Macfarlane et al., 1990; Zartman & Doe, 1981). Zartman (1974) demostró cómo las relaciones isotópicas de plomo de galenas y rocas ígneas feldespáticas en el oeste de Estados Unidos reflejan la extensión del basamento subyacente; a partir de este estudio, se empezó a desarrollar un modelo de evolución de isótopos de plomo empleando curvas de crecimiento para varios entornos geológicos. Posteriormente, varios autores adaptaron dicha metodología para comprender las variaciones composicionales en porciones del basamento de diferentes regiones (Doe & Rohrbough, 1977; Doe & Zartman, 1979; Jones et al., 1977; Stacey et al., 1976; Zartman et al., 1979). Simultáneamente surgieron modelos adicionales en los cuáles se emplearon las mismas relaciones isotópicas de plomo para identificar patrones composicionales que permitieron reconocer diferencias químicas entre distintos ambientes geológicos (Armstrong & Hein, 1973; Cumming & Richards, 1975; Russell, 1972; Stacey and Kramers, 1975; Zartman, 1974). El modelo plumbotectónico de Zartman & Doe (1981), permite entender el comportamiento geoquímico de U, Th y Pb entre los principales reservorios terrestres y cómo la interacción entre los ambientes de orógeno, corteza superior, corteza inferior y manto pueden producir los patrones requeridos para la evolución de isótopos de plomo.

A lo largo del tiempo, múltiples autores han empleado el modelo de evolución plumbotectónico de Zartman & Doe (1981) para definir dominios radiogénicos Pb del basamento; por ejemplo, en Estados Unidos los isótopos de plomo han sido una herramienta de gran utilidad, empleada para diferenciar las distintas fuentes basales de cuerpos graníticos en el norte de los Apalaches, cordillera ubicada al este del país (Ayuso, 1986; Hon, 1980; Kesler et al., 1994; Wones, 1974). Así mismo, este modelo ha sido utilizado en otros países para delimitar tendencias isotópicas, definir dominios o provincias radiogénicas e identificar fuentes de depósitos minerales con mayor exactitud (Liew and Hofmann, 1994; Mirnejad et al., 2011; Misi et al., 2005; Potra et al., 2018; Potra and Moyers, 2017; Shen et al., 2014) permitiendo entender la estructura y variaciones composicionales del basamento que alberga dichas litologías.

En Sur América el modelo de evolución plumbotectónico (Zartman and Doe, 1981) ha sido empleado en múltiples estudios con el fin de comprender los diferentes procesos magmáticos y corticales que dieron origen al basamento de la cordillera de los Andes (Aitcheson et al., 1995; Chiaradia, 2002; Chiaradia et al., 2004; Chiaradia & Fontboté, 1999; Macfarlane et al., 1990; Wörner et al., 1992). En Ecuador se han realizado numerosos análisis con datos isotópicos Pb/Pb (Chiaradia et al., 2004; Chiaradia and Fontboté, 2001, 1999); tanto en depósitos minerales, como en rocas metamórficas, volcánicas, intrusivas y volcanosedimentarias, en los cuales se ha evidenciado correlaciones entre las características isotópicas de las rocas analizadas y el basamento subyacente. Es por esto que los estudios isotópicos en los Andes ecuatorianos representan un insumo útil para el entendimiento del basamento polimetamórfico de la Cordillera Central de los Andes del Norte, pues se infiere algún tipo de continuidad representativa de los datos isotópicos. Además, en los Andes colombianos trabajos recientes han realizado correlaciones isotópicas entre las unidades intrusivas Triásicas y Jurásicas de la Cordillera Central de Colombia (Bustamante et al., 2017a, 2016; Leal-Mejía et al., 2019) y rocas del mismo intervalo de tiempo en la Cordillera Real de Ecuador (Chiaradia et al., 2004), demostrando a partir de las curvas de evolución del modelo la afinidad composicional entre las unidades geológicas de los Andes del Norte.

Por su parte, la Cordillera Central está compuesta por un basamento polimetamórfico pre-Mesozoico (McCourt, 1984) que incluye a su vez remanentes de rocas Precámbricas y es intruido por numerosos batolitos y stocks del Mesozoico (Aspden et al., 1987; McCourt, 1984). Según lo mencionado anteriormente, es posible inferir que el basamento de la Cordillera Central presenta variaciones en su composición, y que, el magmatismo Meso-Cenozoico debe registrar dichas variaciones debido a que está intruyendo basamentos de diferente naturaleza. Para el entendimiento del magmatismo granítico de los Andes Colombianos, es necesario realizar un análisis integral de su distribución, edad, litogeoquímica y composición isotópica, con el fin de obtener las características de la naturaleza, temporalidad, variación en la fuente y su relación con la tectónica Meso-Cenozoica de los Andes del Norte (Leal-Mejía et al., 2019), en este caso, enfocado en la Cordillera Central, donde los isótopos de plomo representarían gran utilidad como sensores remotos de relaciones de basamento en áreas donde el basamento yuxtapuesto presenta características isotópicas Pb/Pb muy diferentes (Macfarlane et al., 1990).

A pesar del creciente número de datos isotópicos (Sr, Nd y Pb) en rocas cristalinas de la Cordillera Central de Colombia (Bissig et al., 2014; Bustamante et al., 2017b, 2016; Cochrane et al., 2014b, 2014a; Gil-Rodríguez, 2014; Leal-Mejía et al., 2019; Marín-Cerón et al., 2010; Quandt et al., 2018; Tassinari et al., 2008; van der Lelij et al., 2016; Vásquez et al., 2010; Weber et al., 2002), aún no se ha realizado una comparación que permita determinar un modelo de variación de la naturaleza del basamento de la Cordillera Central, y cómo estas variaciones influenciaron la diversidad química de las rocas magmáticas. El presente proyecto tiene como objetivo evaluar las diferencias en el basamento de los Andes colombianos, para de esta manera determinar la posible variación en el basamento del magmatismo Meso-cenozoico de la Cordillera Central e inferir las causas tectónicas que generaron su posible variación, todo esto por medio de la distribución del territorio en diferentes dominios radiogénicos a partir de datos de isotopos plomo de 167 rocas ígneas y depósitos minerales. Adicionalmente, se presentan datos no publicados de los neises y anfibolitas de Tierradentro y el batolito de Santa Marta y se generan gráficas de evolución del modelo plumbotectónico (Zartman & Doe, 1981). Como resultado, se presenta una amplia base de datos, con un total de 218 datos de relaciones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ para rocas ígneas, depósitos minerales y unidades del basamento (**Figura 1**), que permiten obtener conclusiones regionales sobre las variaciones composicionales del basamento de los Andes colombianos.

Localización

El presente estudio comprende el análisis a gran escala de 218 datos isotópicos de plomo de las cordilleras Occidental, Central y Oriental de los Andes Colombianos, además de algunos datos pertenecientes a la Sierra Nevada de Santa Marta. A pesar de contener datos de diferentes zonas, el estudio detallado de variación composicional de plomo se enfoca principalmente al entendimiento de las características geoquímicas de la Cordillera Central.

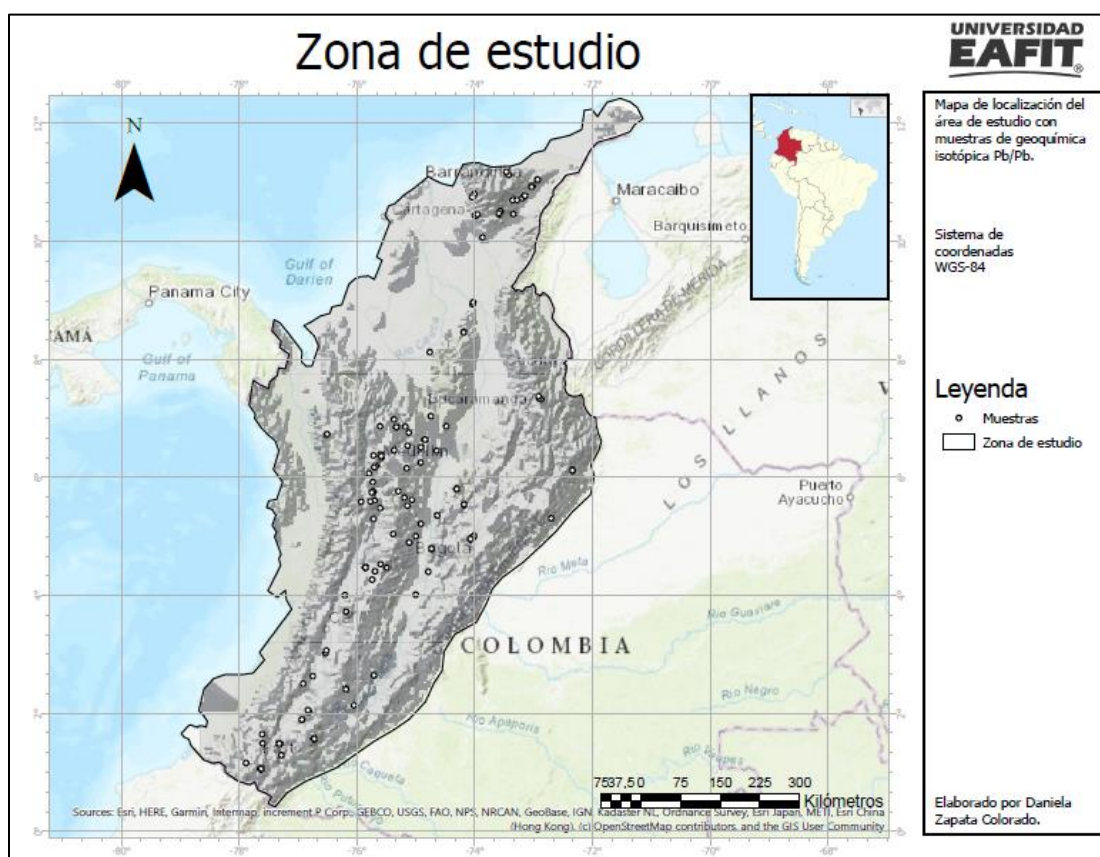


Figura 1. Localización datos de geoquímica isotópica Pb/Pb utilizados en el presente proyecto.

Geología regional

Las Cordilleras Occidental, Central y Oriental de Colombia, representan tres cadenas montañosas independientes que constituyen los Andes del Norte junto con los Andes de Ecuador, y están separadas entre sí por el amplio valle fluvial del Magdalena y la depresión topográfica Cauca-Patía (**Figura 2**) (Aspden et al., 1987; Bustamante et al., 2017a, 2016; Toussaint, 1996; Vinasco et al., 2006). La Cordillera Occidental comprende secuencias oceánicas alóctonas compuestas por rocas volcánicas básicas y sedimentos marinos acrecionadas a la margen continental desde el Cretácico Tardío a lo largo de una sutura que incluye rocas volcano-sedimentarias e ígneas altamente cizalladas yuxtapuestas contra la Cordillera Central (Bustamante et al. 2017; Kerr et al. 1997; Villagómez et al. 2011; Restrepo y Toussaint 1988; Aspden et al. 1987), estas unidades son intruidas y cubiertas por rocas ígneas y secuencias volcánicas Cenozoicas (Aspden et al., 1987; González et al., 1988). La Cordillera Oriental corresponde a un sistema montañoso delimitado por numerosas fallas inversas que involucran localmente rocas cristalinas y metamórficas del basamento Precámbrico a Paleozoico inferior (Cortés et al., 2006) superpuestas por secuencias sedimentarias y volcánicas Paleozoicas a Mesozoicas (González et al., 1988), las cuales son intruidas por una serie de plutones de composición grabrítica del Cretácico Temprano a Tardío (Vásquez et al., 2010; Vásquez & Altenberger, 2005).

Por su parte, la Cordillera Central está constituida por un basamento polimetamórfico (McCourt, 1984) que abarca rocas magmáticas tipo I, migmatitas y anfibolitas del Permo-Triásico (Cochrane et al., 2014b; Spikings et al., 2015; Villagómez et al., 2011; Vinasco et al., 2006) agrupadas en el Complejo Cajamarca (Maya and González, 1995). A su vez, hacen parte del basamento de la Cordillera Central el Grupo El Retiro integrado por migmatitas, granulitas básicas y félsicas locales, anfibolitas, neises, esquistos y granitoides deformados y el neis de Las Palmas (Ardila, 1986; González, 2001; Ordoñez, 1997). Adicionalmente, se considera que las rocas metamórficas de grado alto a medio del Complejo Cajamarca se encuentran intruidas por una serie de granitoides Triásicos tipo S, que forman parte de la secuencia del basamento de la Cordillera Central con una edad de metamorfismo entre Triásico Medio a Tardío (**Figura 2**) (Cochrane et al., 2014b; Restrepo et al., 2011; Vinasco et al., 2006).

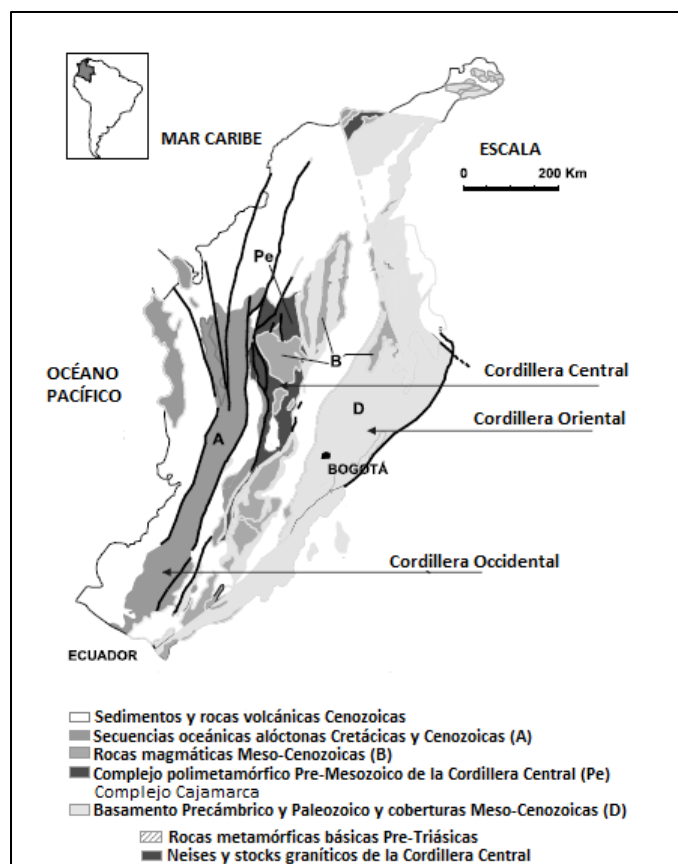


Figura 2. Mapa geológico simplificado de los Andes colombianos. Tomado y modificado de Vinasco et al., (2006).

Esta Cordillera cuenta con un extenso registro magmático Meso-Cenozoico caracterizado por un grupo de cuerpos plutónicos del Jurásico Tardío a Cretácico Temprano (Aspden et al., 1987; Bustamante et al., 2016; Villagómez et al., 2011); los cuales se encuentran intruyendo el basamento polimetamórfico anteriormente mencionado (**Figura 3**) (Restrepo et al., 2011; Villagómez et al., 2011; Vinasco et al., 2006). A su vez, las rocas plutónicas que componen el magmatismo Meso-Cenozoico (Bustamante et al., 2016; Leal-Mejía et al., 2019) está en contacto fallado al occidente con rocas metamórficas del Complejo Cajamarca. Según Blanco-Quintero et al. (2014) el metamorfismo de este Complejo tuvo lugar en una posición alóctona y fue posteriormente yuxtapuesto a su posición actual, ya que, aparentemente se registran edades del Jurásico entre 158 Ma y 147 Ma para el metamorfismo, y estas presentan una correlación con el momento en el que el magmatismo estaba activo hacia el este. Estas edades del Jurásico Tardío contrastan con el previo metamorfismo del Complejo Cajamarca en el Triásico, por lo cual,

Blanco- Quintero et al. (2014) proponen de esta manera un evento distinto de colisión-acreción del Jurásico Tardío en la Cordillera Central.

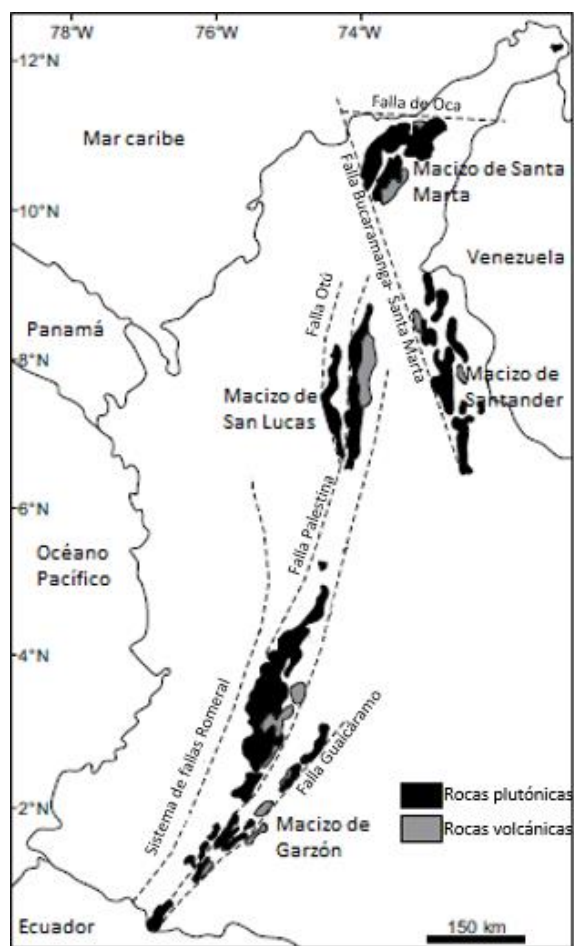


Figura 3. Mapa de distribución de rocas plutónicas y volcánicas Jurásicas a Cretácicas en la Cordillera Central y en macizos aislados con rocas volcánicas asociadas. Tomado y modificado de Bustamante et al.,(2016).

La geología de Colombia desde la visión de terrenos tectonoestratigráficos

Restrepo y Toussaint (2020) plantean que el territorio colombiano puede ser dividido en una serie de terrenos tectonoestratigráficos algunos de ellos alóctonos (**Figura 4**), los cuales constituirían porciones del basamento con diferentes edades e historias geológicas. El terreno Andaquí ubicado al este de la Cordillera Oriental estaría conformado por un basamento metamórfico de alto grado que abarca las rocas Precámbricas del Macizo de Garzón y la serranía de La Macarena; este terreno alóctono colisionó contra el margen occidental del Cratón Amazónico a finales del Precámbrico a lo largo de un sistema de fallas cubiertas poco descritas, limita al occidente con el terreno Chibcha a lo largo de una falla inversa compleja, en la porción sur el límite abarca parte de la falla dextral Algeciras. Yuxtapuesto a éste se encuentra el terreno Chibcha, su basamento estaría constituido por rocas metamórficas Precámbricas de alto grado, incluyendo al Neis de Bucaramanga en el macizo de Santander, la Granulita de Los Mangos en la Sierra Nevada de Santa Marta y a los neises de San Lucas, El Vapor y Guacamó en el flanco oriental de la cordillera Central; este terreno tectonoestratigráfico limita con el cratón Amazónico hacia el norte de Villavicencio a lo largo del sistema de fallas Guaicáramo actualmente, y al oeste con los terrenos Tahamí y Yalcón mediante la falla Palestina y Suaza en la zona sur. Se considera que este terreno se acrecionó a la margen occidental del Cratón Amazónico y el terreno Andaquí durante el Paleozoico tardío. Por su parte, el terreno Yalcón se encuentra ubicado al sur de la cordillera Central, su litología consiste en rocas metamórficas Jurásicas que incluyen una porción del Complejo Cajamarca, además de esquistos gráfíticos, cloríticos y muscovíticos, anfibolitas, cuarcitas y mármoles; la acreción al terreno Chibcha ocurrió al final del Jurásico a lo largo de las fallas Avirama e Inzá, las cuales constituyen los límites orientales de este terreno; el límite occidental se encuentra representado por la falla Silvia-Pijao, la cual se encuentra separando este terreno del Complejo Quebradagrande y algunas porciones del terreno Tahamí. Por otro lado, el terreno Tahamí está conformado por rocas metamórficas como esquistos verdes, esquistos cuarzosos, cuarcitas y mármoles, mientras las rocas de mayor grado metamórfico abarcan principalmente migmatitas, anfibolitas y en algunas porciones granulitas, todas estas pertenecientes al Complejo Cajamarca, el cual es intruido por plutones Triásicos a Paleógenos, este terreno alóctono colisionó contra el norte de Sur América a lo largo de la falla Otú-Pericos durante el Paleozoico, la cual constituye el límite con el terreno Chibcha; hacia el oeste limita con los terrenos indiferenciados Cauca-Romeral separados por la falla San Jerónimo. Tanto el terreno Tahamí como el terreno Yalcón se caracterizan por la ausencia

de rocas metamórficas Precámbricas en su basamento, lo cual supone una característica diferenciadora principal respecto al terreno Chibcha. Adicionalmente, hacia la zona de falla Cauca-Romeral se ubican una serie de terrenos tectonoestratigráficos con basamentos continentales y oceánicos, debido a la alta complejidad tectónica de la zona, se considera que consiste en un agregado de pequeños terrenos de diferentes edades. Según los autores, los basamentos tanto continentales como oceánicos han sido sometidos a una constante transpresión y distensión desde el Cretácico, motivo por el cual, sus límites no son claros y el resultado se observan pequeños fragmentos de terrenos separados de su lugar de origen. Esta zona abarca los terrenos continentales de Anacona, Amagá-Sinifaná y Guaca, y los terrenos oceánicos de Ebéjico y Pozo (Restrepo and Toussaint, 2020). Finalmente, al occidente de la cordillera Central se encuentran los terrenos Calima y Tumaco, separados de los terrenos adyacentes por una zona de sutura compuesta por secuencias ofiolíticas obducidas, estos terrenos están definidos hacia el norte por las rocas Cretácicas del Grupo Cañasgordas, hacia el margen oriental por los complejos ofiolíticos Cretácicos Los Azules, Cauca y Bolívar y finalmente hacia la margen occidental de la cordillera Central se encuentran rocas metamórficas de media a alta presión abarcando anfibolitas, esquistos verdes, esquistos micáceos, eclogitas y esquistos azules, estos últimos con edades de ca. 120 y 64 Ma (Bustamante y Bustamante, 2019). La distribución geológica y configuración tectónica de estos terrenos tectonoestratigráficos será discutida en el presente proyecto.

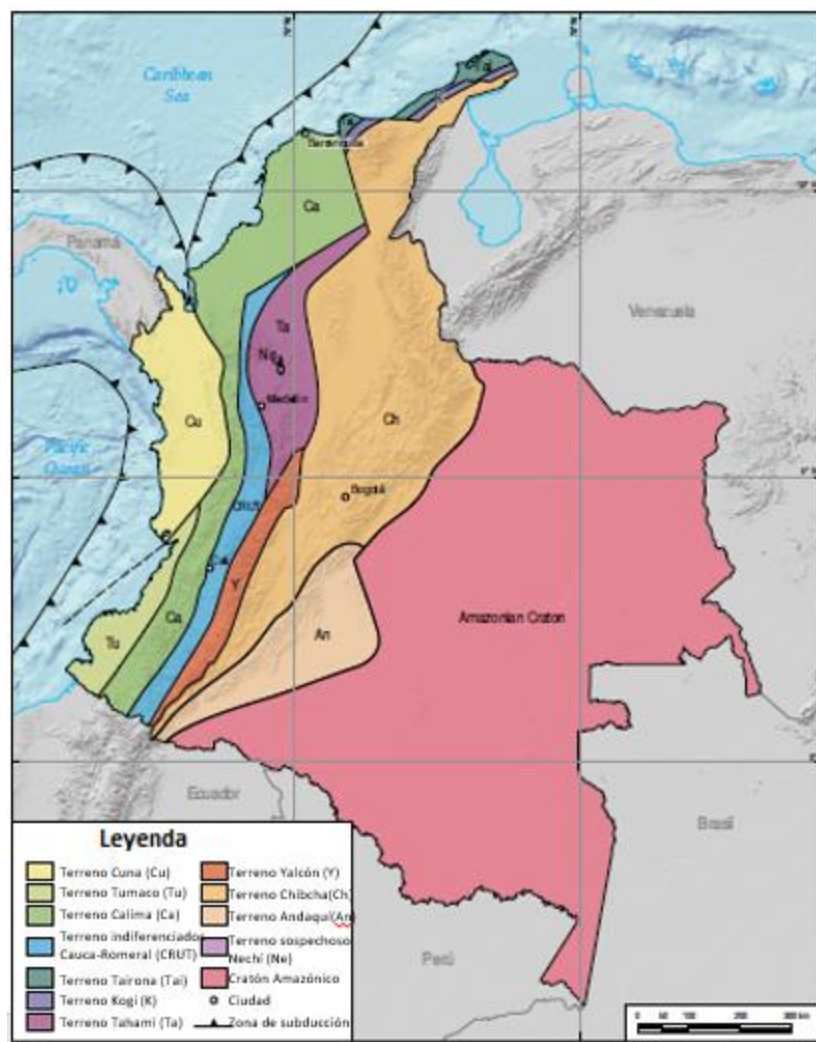


Figura 4. Mapa de distribución de terrenos tectonoestratigráficos. Tomado y modificado de Restrepo & Toussaint (2020).

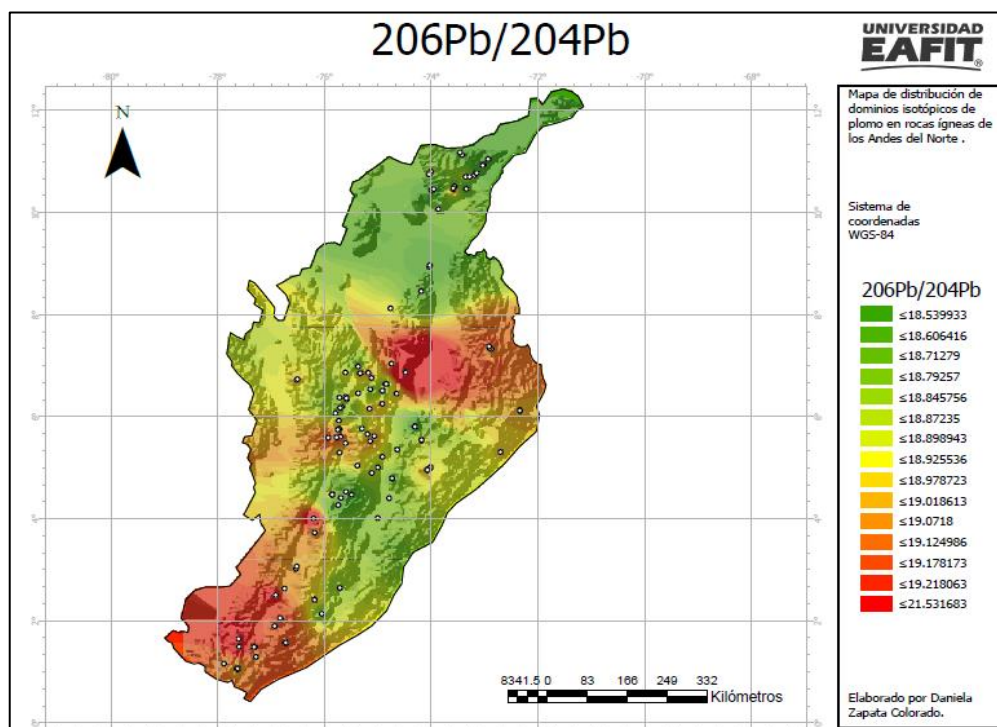
Metodología

Este proyecto determinará la variación de la composición del basamento del magmatismo Meso-Cenozoico de la Cordillera Central y analizará cómo esta variación ha influenciado la composición de los magmas de la zona mediante la compilación de datos de geoquímica isotópica $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ pertenecientes a los Andes del Norte tomados de diferentes trabajos (Bissig et al., 2014; Bustamante et al., 2017b, 2016; Cochrane et al., 2014b, 2014a; Gil-Rodríguez, 2014; Leal-Mejía et al., 2019; Marín-Cerón et al., 2010; Quandt et al., 2018; Tassinari et al., 2008; van der Lelij et al., 2016; Vásquez et al., 2010; Weber et al., 2002) cuya localización puede observarse en la **Figura 1**. Estos datos isotópicos son utilizados para la identificación de la fuente a partir de la cual se formaron las rocas del basamento de la Cordillera Central empleando los métodos de isótopos de plomo descritos por Halla (2018) y Zartman & Doe (1981), por medio de ellos es posible generar curvas de variación isotópicas para de esta manera reconocer los posibles procesos de reciclamiento de la corteza en ambientes orogénicos, o si por el contrario, las rocas son formadas a partir del manto, corteza inferior o superior directamente. El procesamiento de datos se hizo empleando un sistema de información geográfica (GIS) con el fin de organizar y discretizar los datos isotópicos de entrada (^{206}Pb , ^{207}Pb y ^{208}Pb); posteriormente, se generan mapas de contornos utilizando herramientas de interpolación, mediante distribución en intervalos cuantiles de quince categorías, para de esta manera interpretar dónde se encuentran las concentraciones más altas y/o radiogénicas de los diferentes datos isotópicos. Los mapas se realizan con 167 datos de rocas ígneas con edad de cristalización menor a 200 Ma para demostrar la afinidad composicional entre estas unidades litológicas y las rocas del basamento adyacente, los demás datos (51 muestras) pertenecen a rocas metamórficas, depósitos minerales y rocas ígneas mayores a 200 Ma son empleados para demostrar las similitudes composicionales Pb respecto a las unidades más jóvenes. A partir de los resultados obtenidos, es posible diferenciar los distintos tipos de basamentos de las rocas Meso-Cenozoicas de la Cordillera Central separados por dominios radiogénicos, para la posterior generación de un modelo de variación de la naturaleza del basamento, tomando como referencia anteriores estudios publicados (Aspden et al., 1987; Bustamante et al., 2017b, 2016; McCourt, 1984; Villagómez et al., 2011).

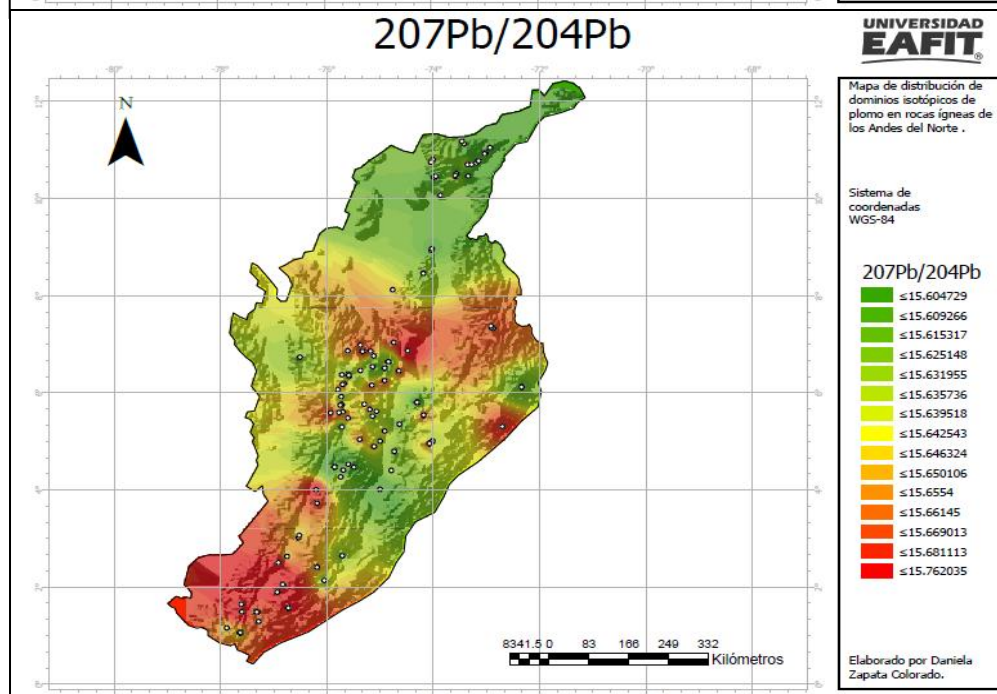
Resultados

La distribución de los datos de isótopos de plomo $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ muestran que los Andes colombianos pueden ser divididos según su composición isotópica en distintos dominios radiogénicos, cada uno de estos con patrones de agrupación evidenciados en la **figura 5** (a, b y c).

(a)



(b)



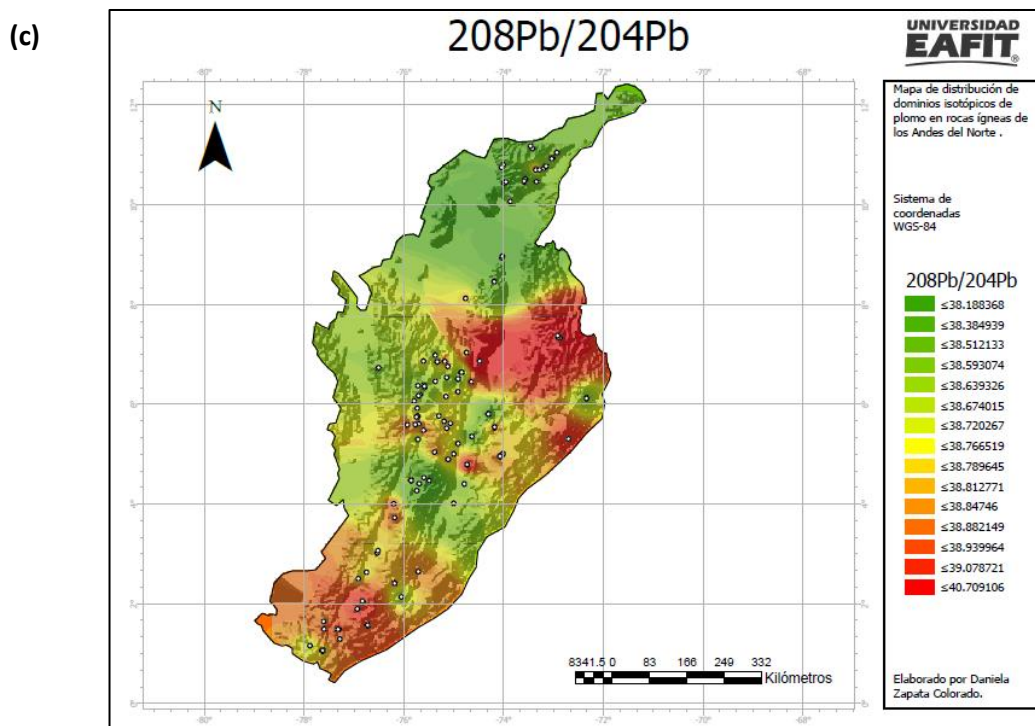


Figura 5. Mapas de distribución de dominios isotópicos Pb/Pb en los Andes del Norte. (a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (c) $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

Los mapas representan la distribución de los distintos dominios isotópicos Pb/Pb con alto detalle al emplear una distribución cuantil de quince categorías, gracias a ello, es posible identificar con mayor facilidad la variación de los rangos a lo largo del territorio. Con base en esto, se puede observar un comportamiento de agrupación similar en todos los mapas (**Figura 5. a, b y c**), definido por:

1. Un dominio altamente radiogénico al sur de los Andes colombianos, representado por valores $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 21,53$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15,76$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 39,07$.
2. Un segundo dominio altamente radiogénico similar al descrito en el numeral 1, ubicado al norte de la Cordillera Central, específicamente en la Serranía de San Lucas, el cual se extiende hasta el Macizo de Santander. En este dominio se encuentran los valores máximos de cada uno de los intervalos propuestos, se observa también una similitud isotópica entre esta zona y la porción sur del mapa.
3. Al Norte de Colombia, incluyendo la Sierra Nevada de Santa Marta, se encuentra un dominio isotópico que agrupa los valores menos radiogénicos en una extensión considerable. Cabe destacar que, dentro de esta área predominantemente homogénea en

composición, se perciben pequeñas áreas con valores levemente más radiogénicos; sin embargo, al representar una corta extensión, no se considera que afecten la separación o clasificación de este dominio.

4. En la parte central del mapa se presenta un amplio rango de variaciones composicionales, tanto $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ como $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, por lo cual se considera de cierta manera una zona transicional, en donde no es posible definir un patrón de homogeneidad composicional en una amplia extensión y, por lo tanto, no es posible determinar similitud composicional Pb/Pb entre las muestras de esta zona.

La Cordillera Central presenta mayor variación composicional Pb/Pb en toda su extensión, en comparación a las cordilleras Occidental y Oriental.

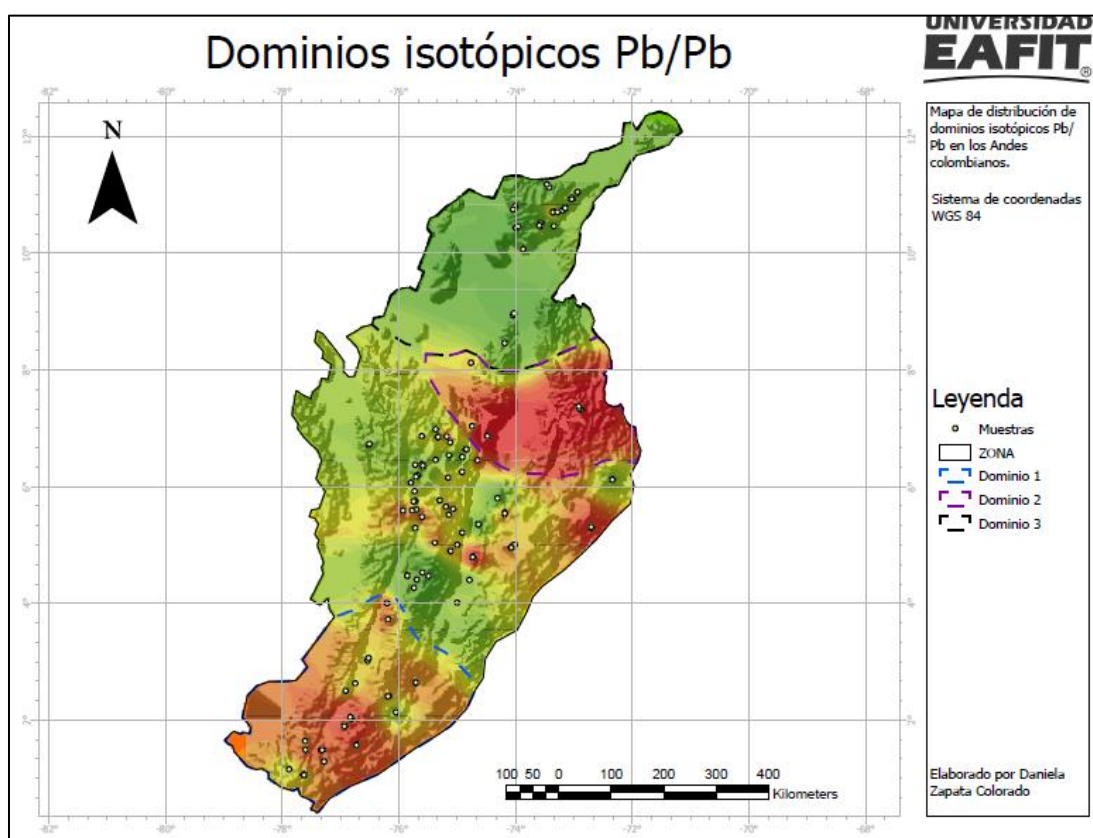


Figura 6. Mapa de distribución de dominios radiogénicos Pb/Pb.

El presente trabajo propone una distribución geográfica para los distintos dominios isotópicos Pb/Pb obtenidos con base en las muestras analizadas (**Figura 6**), los límites representan zonas radiogénicas similares composicionalmente.

Dominio 1: Sur de los Andes colombianos

Dominio geográfico altamente radiogénico, se extiende desde el límite sur de Colombia y Ecuador hasta 4° de latitud aproximadamente, comprende datos pertenecientes al complejo volcánico Galeras, Azufral, Puracé y Doña Juana, complejo ígneo Betulia, toba granítica de Mercaderes y cuerpos intrusivos de composición intermedia a ácida. El Batolito de Buga presenta los valores más altos de todo el dominio ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 19,44; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,70; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 38,91), mientras los valores menos radiogénicos se encuentran en el segmento sur del Batolito de Ibagué ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,74; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,62; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 38,60). En este dominio se observan valores altamente radiogénicos en contraste con datos menos evolucionados en términos isotópicos. De igual manera, es posible identificar un amplio rango de edades para estos cuerpos intrusivos, iniciando por el segmento sur del Batolito de Ibagué con edades Jurásicas (ca. 189-180 Ma), hasta los datos más jóvenes del dominio representados por las rocas volcánicas Cuaternarias de los complejos volcánicos mencionados anteriormente.

Dominio 2: Serranía de San Lucas y Santander

Caracterizado por presentar valores altamente radiogénicos y similitud composicional al Dominio 1, se extiende a lo largo de la Serranía de San Lucas, Santander hasta la frontera con Venezuela. Los valores más radiogénicos corresponden al Batolito Norosí ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 21,54; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,76; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 40,72), por su parte, los valores menos radiogénicos pertenecen al Batolito de Segovia ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,91; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,64; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 38,79); la litología del dominio está compuesta en su totalidad por granodioritas del Stock La Culebra, Suite Porfídica Vetas California y Batolito Norosí y dioritas del Batolito de Segovia. Al comparar los datos del presente dominio con los del Sur del país se observa un leve incremento tanto para $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ como para $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$.

Dominio 3: Sierra Nevada de Santa Marta

Dominio isotópico caracterizado por presentar los valores menos radiogénicos y mayor homogeneidad de datos en una extensa área, abarcando así la porción norte de la Cordillera Central hasta la Guajira; este dominio comprende una amplia fracción de territorio con variaciones composicionales Pb/Pb muy leves, en promedio las muestras presentan valores $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,57; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,59; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 38,39. Hacia el suroriente de las Sierra Nevada de Santa Marta se ubica una muestra con valores notablemente más radiogénicos que las litologías a su alrededor,

corresponde a un dique de cuarzomonzonita con valores $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 19,95; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,67; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 39,04. Los datos pertenecen en su totalidad a rocas ígneas plutónicas y volcánicas Jurásicas de composición intermedia a ácida, con composición isotópica Pb/Pb muy similar. Dentro de este grupo también se incluyen tres muestras correspondientes a las Intrusiones de San Lucas (Batolito de Norosí y batolito de San Martín) debido a su afinidad composicional Pb levemente radiogénica con las muestras de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Dominio 4:

Ubicado preferentemente en la parte central de los Andes del Norte, abarca las tres cordilleras y representa así una alta heterogeneidad composicional Pb/Pb, donde se encuentran valores máximos y mínimos sin un patrón de agrupamiento notable, es por ello, que se propone como un dominio “transicional” entre zonas altamente radiogénicas como lo son el Dominio 1 y 2. Los valores más radiogénicos corresponden predominantemente al Batolito Antioqueño ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 19,208; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,682; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 39,049) y demás cuerpos intrusivos de composición intermedia a ácida. A lo largo de esta zona se observa variación de edades en los cuerpos plutónicos, las edades más antiguas corresponden al Stock de Payandé (165 Ma) Jurásico y las más jóvenes representadas por la Suite Porfídica Río Dulce (ca. 2.0-0.4 Ma) del Plioceno.

Adicionalmente, al graficar 172 datos isotópicos $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ de los Andes del Norte correspondientes a rocas ígneas <200Ma y >200Ma, depósitos minerales y rocas metamórficas, se logra identificar distintas asociaciones composicionales Pb/Pb que permiten entender más a detalle la variación isotópica de la región (**Figura 7 y 8**).

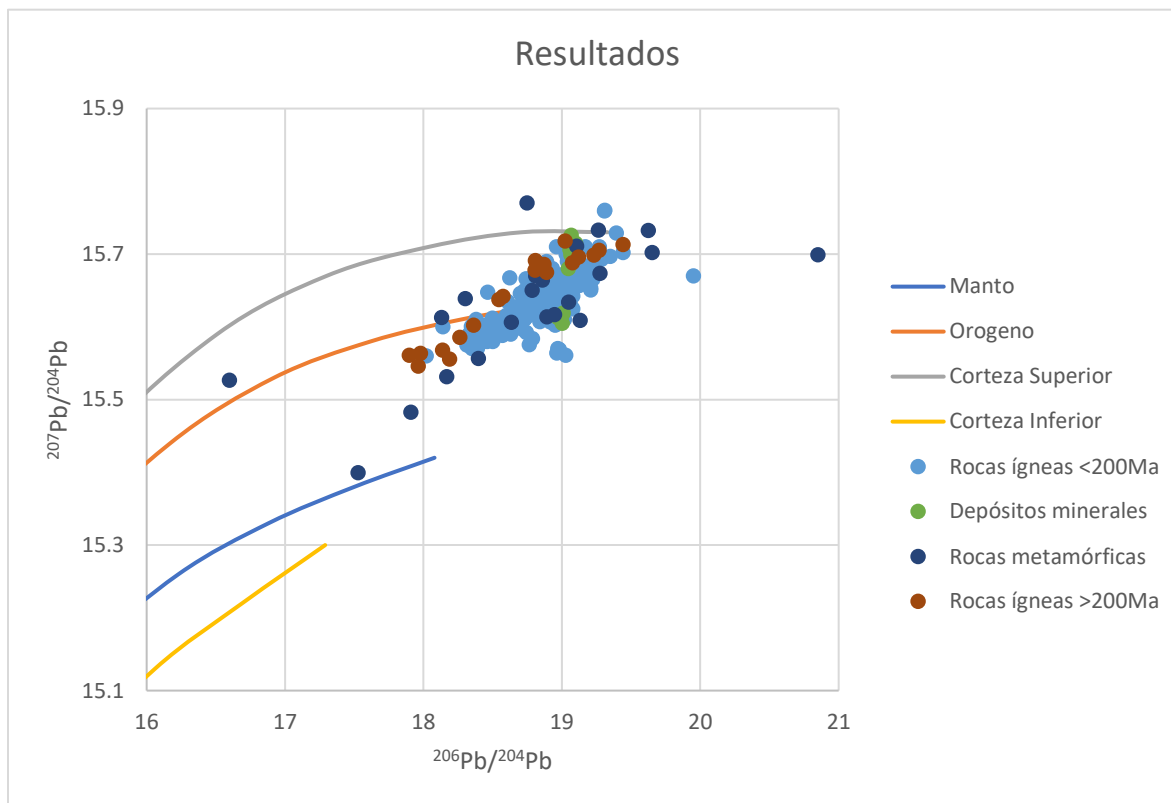
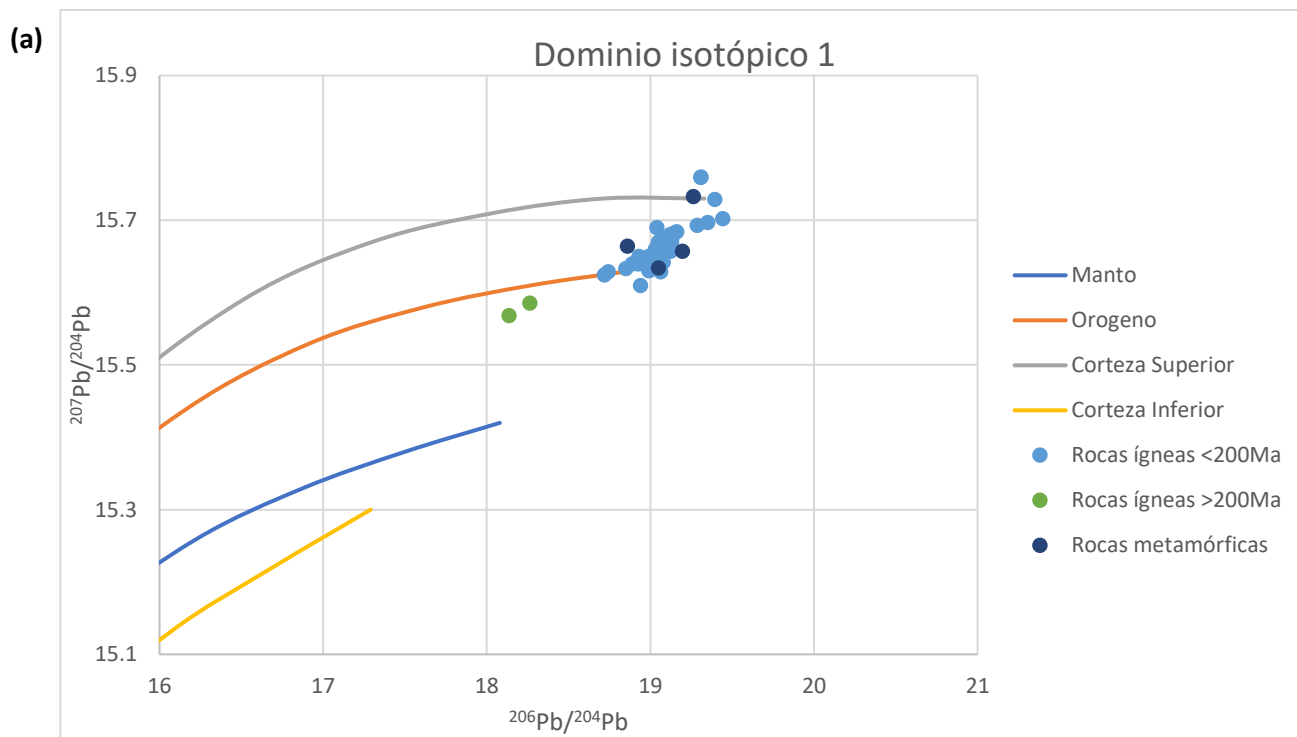


Figura 7. Datos isotópicos Pb/Pb agrupados en cuatro categorías litológicas generales: Rocas ígneas <200Ma, depósitos minerales, rocas metamórficas y rocas ígneas >200Ma. Gráfico incluye curvas de evolución isotópicas del modelo plumbotectónico (Zartman & Doe, 1981).

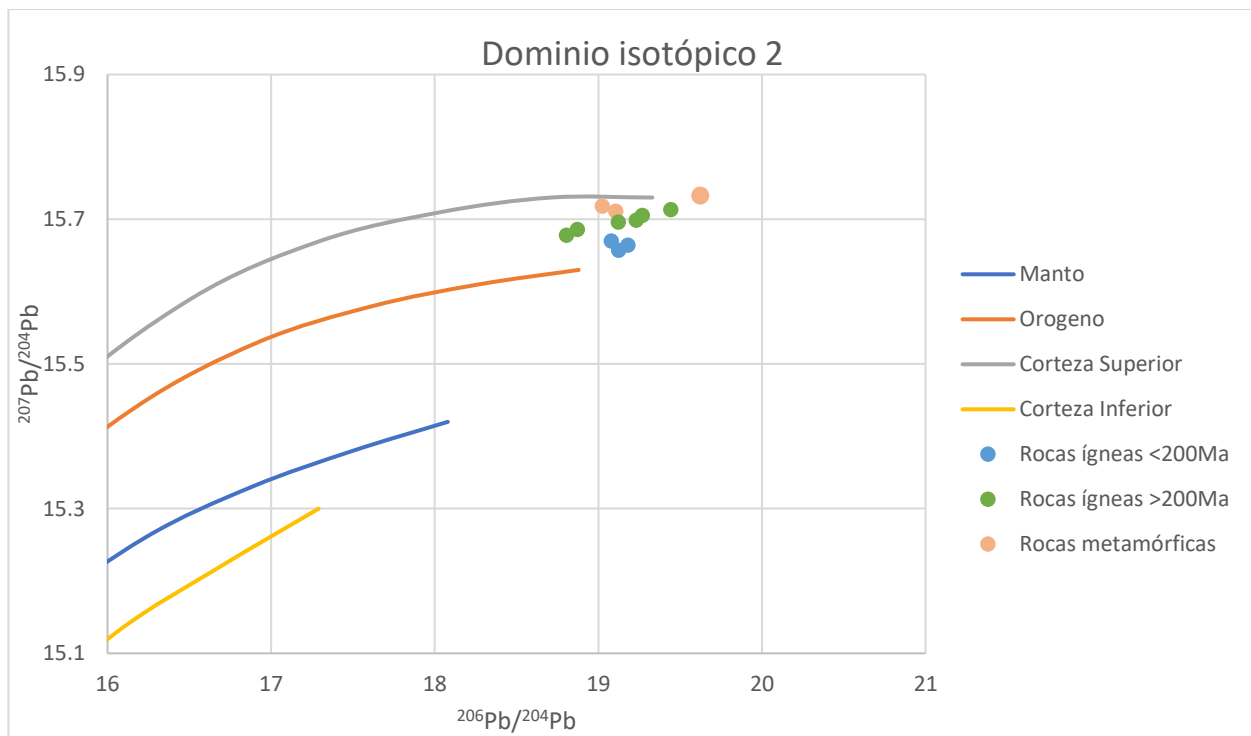
En la **Figura 7** se observa un patrón de agrupamiento similar entre las muestras de rocas ígneas <200 Ma y depósitos minerales, mientras las rocas ígneas >200Ma presentan valores $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ levemente más radiogénicos. En general, las muestras se ubican en los campos de orógeno y manto entre en las curvas de evolución isotópicas de plomo generadas por el modelo plumbotectónico (Zartman and Doe, 1981). Por su parte, la distribución composicional más homogénea de este grupo ocurre en la categoría de depósitos minerales, los cuales presentan valores $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 19,047 – 19,058 y $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 15,68 – 15,706, correspondientes a mineralizaciones de oro en el Stock de Marmato del Mioceno. Es posible observar un comportamiento composicional casi homogéneo entre los tres grupos litológicos mencionados anteriormente, mostrando así, variaciones isotópicas Pb/Pb poco significativas entre éstos y ocupando a su vez un mismo rango

composicional dentro del gráfico; en consecuencia, la posible edad de la fuente no puede estimarse de manera confiable.

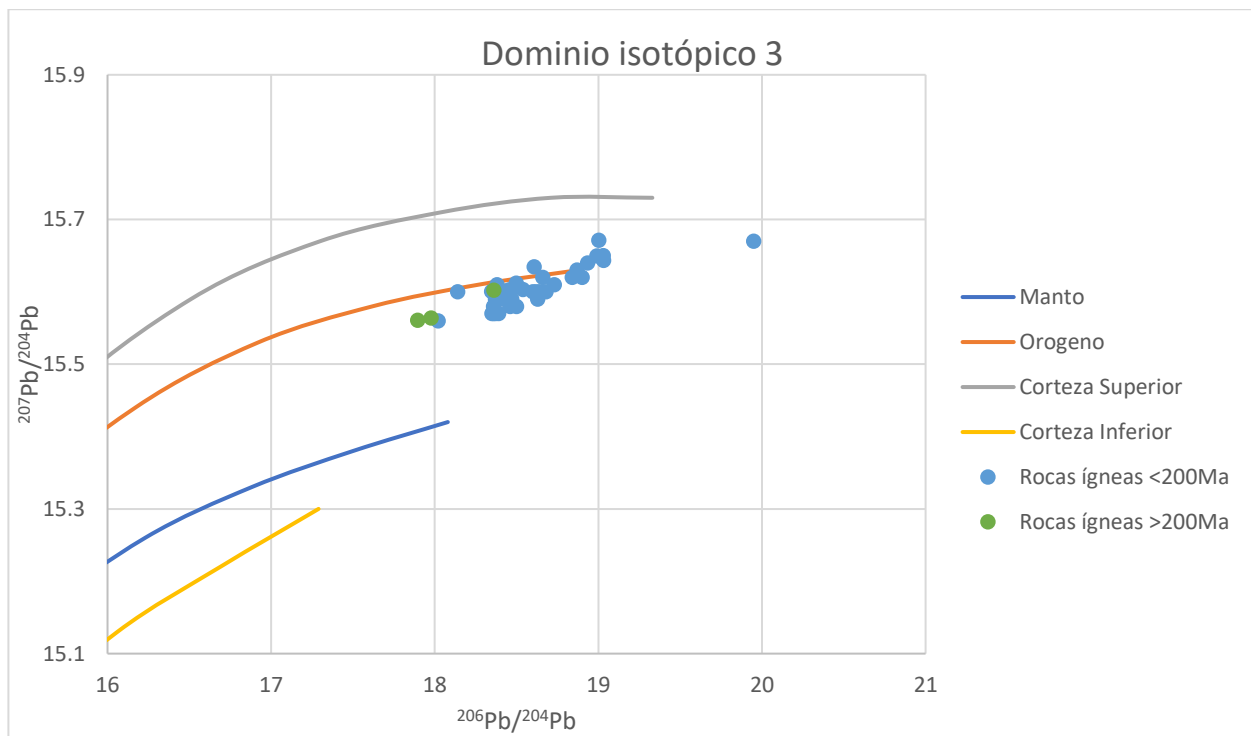
Por otra parte, las rocas metamórficas presentan composiciones isotópicas $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ más heterogéneas, donde los valores más bajos corresponden a anfibolitas Permo-Triásicas del basamento ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 16,59 - 17,52; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,52 - 15,39), y, al ser graficadas se aproximan a las curvas de evolución isotópica de orógeno y manto; mientras los valores más radiogénicos de esta categoría litológica representan serpentinitas y neises del Complejo Arquía y neiss de Bucaramanga respectivamente ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,74 - 19,62; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,77 - 15,73), éstas últimas trazan cerca a curva de corteza superior. Entre los valores máximos y mínimos se presenta una zona de “transición” o serie de datos con valores intermedios similares a los presentados por las rocas ígneas y depósitos minerales; dentro de ellos se encuentran algunas rocas del Complejo Arquía, Ortogneiss de Berlín y del basamento como los Neises y Anfibolitas de Tierradentro.



(b)



(c)



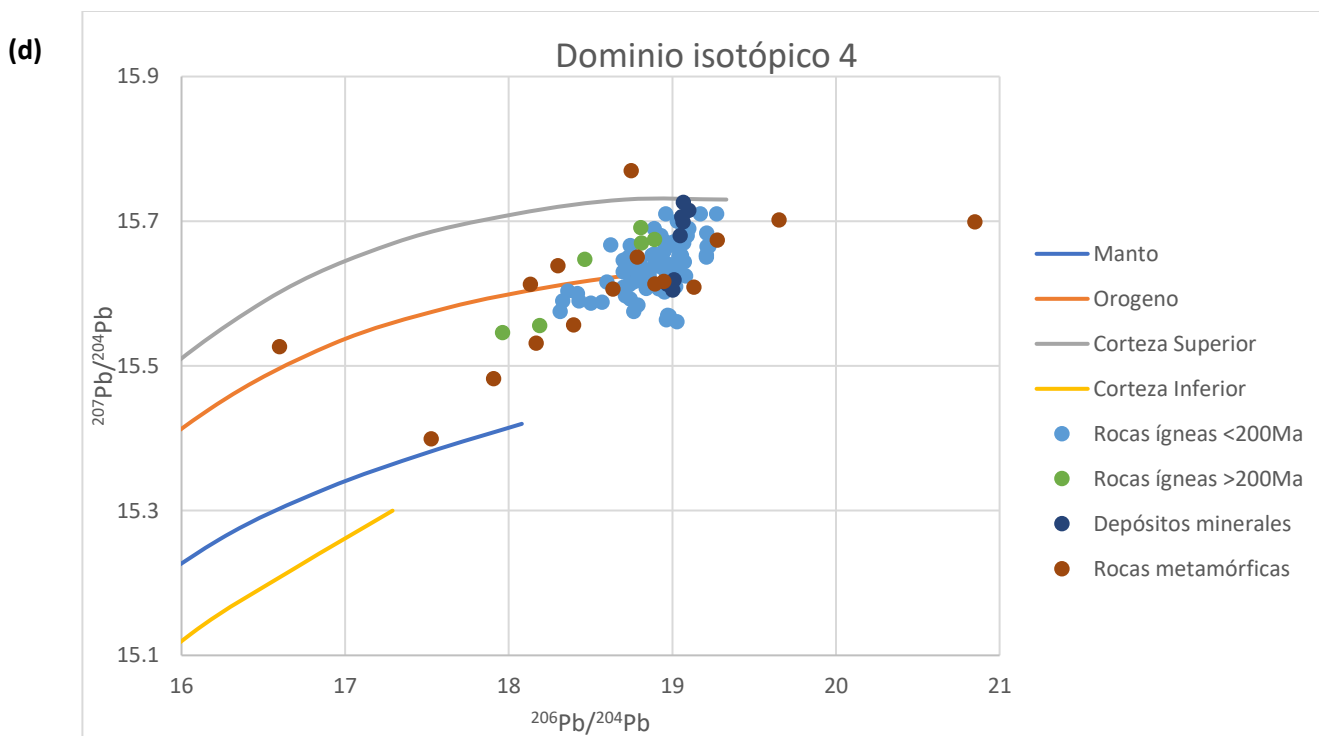


Figura 8. Distribución de datos isotópicos Pb para los distintos dominios radiogénicos definidos. El gráfico incluye curvas de evolución isotópicas del modelo de evolución plumbotectónico (Zartman & Doe, 1974). **a)** Dominio 1 Serranía de San Lucas y Santander. **b)** Dominio 2 sur de los Andes colombianos. **c)** Dominio 3 Sierra Nevada de Santa Marta. **d)** Dominio 4 zona transicional.

Con el objetivo de presentar con mayor detalle los resultados obtenidos para los distintos dominios radiogénicos, en **Figura 8 (a, b, c y d)**, se grafican las relaciones composicionales $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ para cada uno de ellos. Las gráficas serán discutidas posteriormente.

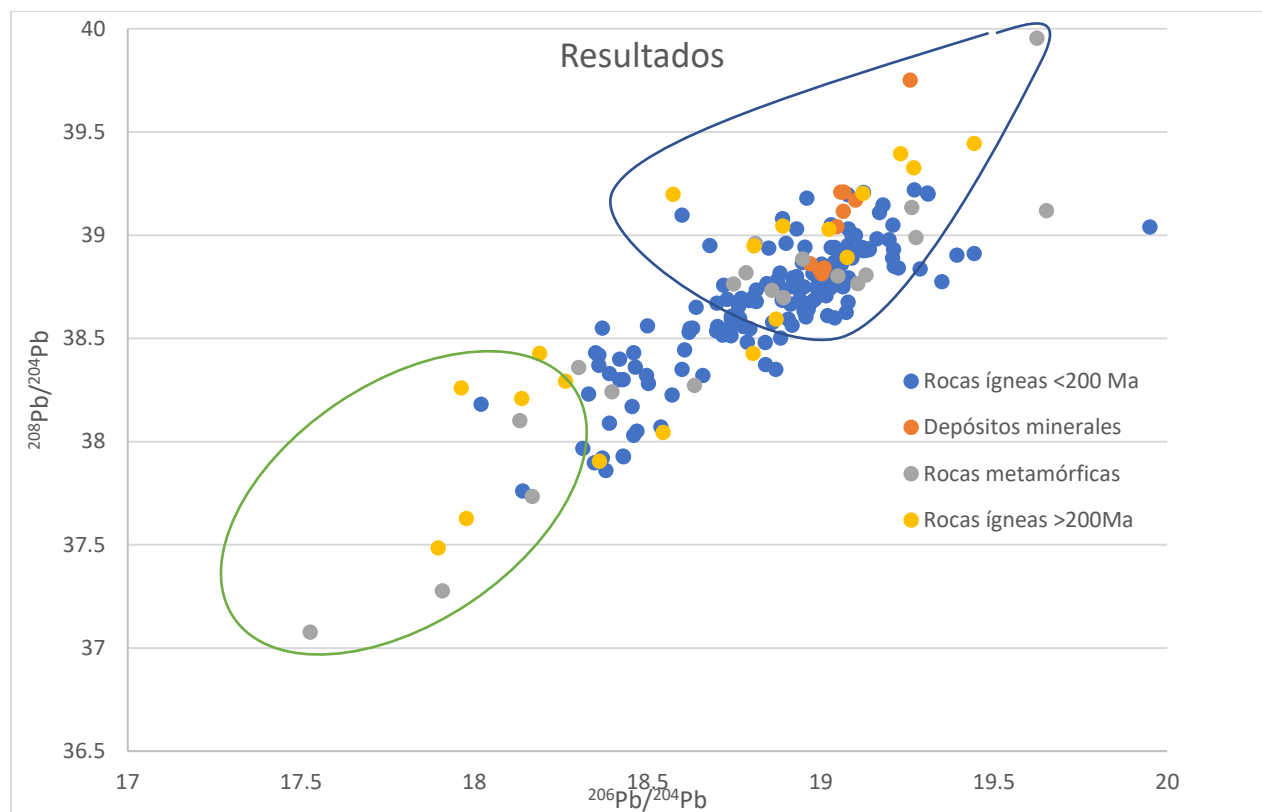


Figura 9. Datos isotópicos Pb/Pb agrupados en cuatro categorías generales: Rocas ígneas <200Ma, depósitos minerales, rocas metamórficas y rocas ígneas >200Ma.

En **Figura 9** se observan dos patrones de agrupamiento: Uno de ellos en la parte superior, que abarca los datos isotópicos Pb/Pb más radiogénicos, con valores $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 38,5$ y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18,5$, en este grupo no hay una predominancia significativa de alguna litología en específico, es decir, incluye las 4 clasificaciones litológicas de manera heterogénea. Por otra parte, el agrupamiento de la zona inferior está predominado por rocas ígneas >200Ma y <200Ma; en este grupo no se encuentran muestras correspondientes a depósitos minerales, puesto que éstos presentan valores más radiogénicos, ubicándose exclusivamente así dentro del grupo superior. Para el grupo menos radiogénico se presentan valores $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 37 - 38,5 y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 17,5 - 18,5.

En medio de los grupos mencionados anteriormente se observa una zona de transición con valores $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 38 - 38,55 y $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 18,5 - 19; esta zona está caracterizada principalmente por rocas ígneas <200 Ma y unos cuantos datos correspondientes a rocas ígneas >200Ma. A manera general, se puede identificar que los valores máximos y mínimos del gráfico $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ corresponden a rocas metamórficas del basamento (neis de

Bucaramanga y Stock de Chinchiná) con valores $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 39,95 y 37,07; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre 19,62 y 17,52, respectivamente. Además, en el diagrama se evidencia que los cuatro grupos de rocas se superponen de manera considerable hacia la parte superior, indicando así valores $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ altamente radiogénicos.

Discusión

Influencia del basamento en la composición isotópica

Las variaciones en la composición isotópica de Pb entre las rocas metamórficas y las rocas ígneas más jóvenes de 200 Ma, aquellas con edades de cristalización superior a 200 Ma que pueden considerarse parte del basamento de las anteriores, y de los depósitos minerales Miocenos-Pliocenos (**Figura 7.**), sugieren una heterogeneidad regional de las fuentes de estos tres conjuntos litológicos. Esto se evidencia en el amplio espectro de variaciones composicionales observado en el diagrama $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (**Figura 7.**). Un comportamiento similar se puede observar en el diagrama $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (**Figura 9.**) que muestra rocas del basamento de la cordillera Central dispersas a lo largo de todo el gráfico, representadas por rocas metamórficas, las cuales tienen una composición isotópica Pb/Pb diferente entre sí.

Posiblemente, los depósitos minerales y las rocas ígneas que intruyen ese basamento heterogéneo composicionalmente, podrían reflejar sus características composicionales. Esta situación ha sido descrita para los Andes bolivianos, en donde la composición isotópica de Pb de los depósitos minerales terciarios reflejan la composición del basamento (Aitchenson et al., 1995). En las **figuras 7, 8 y 9** se aprecia una considerable coincidencia entre la composición isotópica Pb/Pb del basamento y la de las rocas ígneas y depósitos minerales, lo cual permite inferir un origen cortical para la mayoría del plomo en las muestras. El factor que controla las composiciones isotópicas de plomo en las rocas ígneas y depósitos minerales es la composición del basamento, por lo cual se sugiere que los dominios o distribuciones isotópicas de plomo no fueron heredadas de una fuente del manto (Aitcheson et al., 1995). Adicionalmente, la mayoría de las muestras son significativamente más radiogénicas que el manto, por lo tanto, se infiere que las fuentes de material intrusivo no están dominadas por material de manto oceánico. En contraste al manto oceánico, la corteza superior continental presenta valores isotópicos más radiogénicos (Zartman & Doe, 1981), el hecho de que una gran porción de material de corteza superior esté involucrada, se debería a la asimilación de cantidades relativamente altas de corteza continental o la incorporación de sedimentos pelágicos radiogénicos en la fuente del magma. Además, un reservorio con mayor heterogeneidad asociado a los patrones observados en las muestras, se puede correlacionar al manto subcontinental, el cual, según Allégre et al. (1981) es isotópicamente variable, pues consiste en mezclas identificables y de larga duración entre el manto y reservorios

orogénicos. Como se observa en la **Figura 7** las muestras de los Andes colombianos se posicionan en el campo isotópico entre corteza superior, orógeno y en menor proporción manto, este último representado por anfibolitas del Complejo Arquía y del Stock de Chinchiná.

Implicaciones en la tectónica de terrenos

Los diferentes dominios radiogénicos propuestos en la **Figura 6** son inferidos con base en los mapas isotópicos de Pb (**Figuras 5 a, b y c**), y representan porciones de basamento distintas con diferente edad y composición; estas delimitaciones podrían reflejar límites geológicos reales entre los diferentes bloques de basamento.

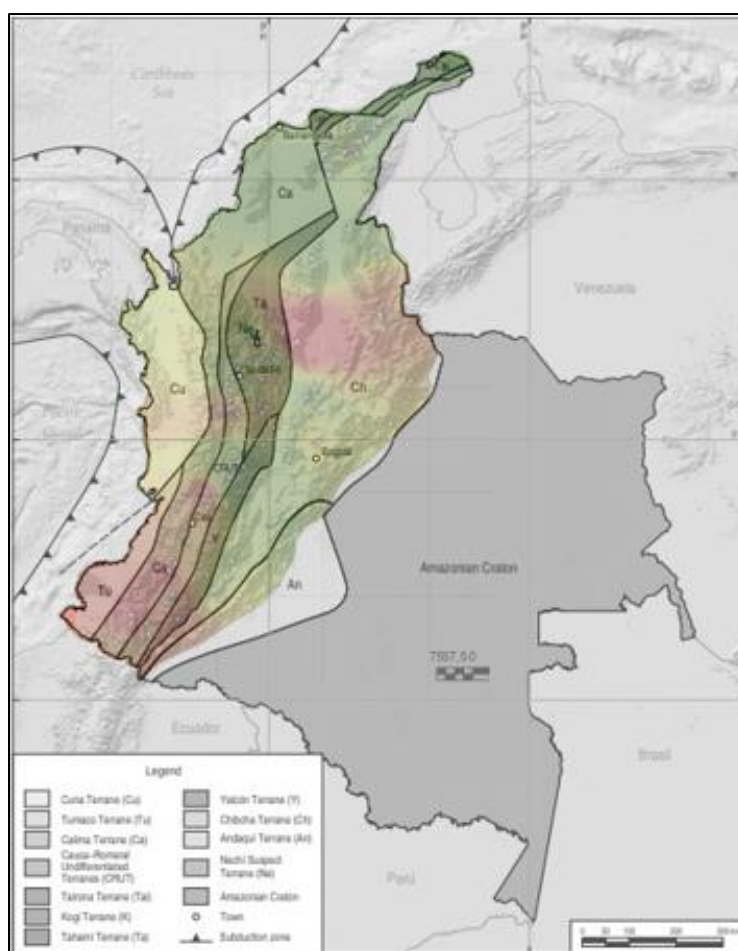


Figura 10. Modificado de Restrepo & Toussaint (2020), mapa de terrenos tectonoestratigráficos en comparación con dominios radiogénicos Pb/Pb propuestos en el presente trabajo.

Cuando se comparan los dominios isotópicos de Pb definidos en este trabajo con la distribución de terrenos tectonoestratigráficos continentales definidos por Restrepo y Toussaint (2020, 1988), se observa una sobreposición que no corresponde con dicha distribución (**Figura 10**), especialmente en los terrenos Chibcha, Yalcón y Tahamí. Un ejemplo claro de la incongruencia entre estos límites se observa en el dominio radiogénico 2, que incluye los macizos de Santander y San Lucas, el cual se sobrepone a los terrenos Chibcha y Tahamí. Sin embargo, es posible observar una afinidad composicional de Pb entre ambos terrenos, indicando valores altamente radiogénicos que grafican entre las curvas de corteza superior y orógeno del modelo de evolución plumbotectónico de Zartman & Doe (1981) (**Figura 8b**). Estos valores se encuentran representados hacia el oriente por las rocas granodioríticas de la Suite Vetas California ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 19,13-19,18; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,65-15,67; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 39,20-39,19; Bissig et al., 2014), y más próximos a la Serranía de San Lucas por el Batolito de Norosí y los Stock la Culebra y Segovia ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 21,55-18,36; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,76-15,60; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 40,72-37,90; Leal-Mejía et al., 2019), esto indicaría que los distintos cuerpos intrusivos se encuentran intruyendo un basamento con composición isotópica de Pb muy similar, y posiblemente con una historia tectónica parecida. Por su parte, el neis de Bucaramanga, el cual se encuentra intruido por cuerpos granodioríticos de la Suite Porfídica Vetas California presenta composiciones isotópicas de Pb muy similares a estos cuerpos ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 19,62; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,73; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 39,95) demostrando así la afinidad composicional entre las rocas ígneas y las unidades del basamento. Esto en concordancia con el modelo autoctonista planteado por Van der Lelij et al. (2016) y Spikings et al. (2015), en el cual se evidencia que los terrenos Chibcha y Tahamí de Restrepo y Toussaint (2020) en realidad son bloques autóctonos que se encuentran unidos desde el Paleozoico inferior.

Dentro del dominio isotópico 2 también se incluyen datos composicionales del Grupo Plutónico de Santander, los cuales presentan valores más radiogénicos que los cuerpos plutónicos adyacentes (Definidos en **Figura 8b** como “Rocas ígneas >200 Ma”), y se encuentran graficados de forma lineal y paralelos a la curva de corteza superior del modelo de evolución plumbotectónico de Zartman & Doe (1981). Este comportamiento sugiere que la composición isotópica Pb de estos granitoides Triásicos-Jurásicos fue heredada del basamento continental con poca o ninguna contribución de manto tipo MORB o de plomo proveniente de orógeno (Leal-Mejía et al., 2019),

por lo cual es posible afirmar que estas unidades plutónicas se encuentran intruyendo fracciones más antiguas del basamento.

El hecho de que las demás muestras del dominio 2 se encuentren tan próximas a la curva de orógeno del modelo de evolución plumbotectónico de Zartman & Doe (1981) (**Figura 8b**, “Rocas ígneas <200 Ma”), representa una contribución de plomo de la corteza muy dominante, la cual resulta en parte del magma originado en un manto enriquecido por sedimentos pelágicos subducidos. Posteriormente estos magmas enriquecidos derivados del manto interactuaron con rocas del basamento en niveles corticales poco profundos, asimilando así la composición de Pb radiogénico de los complejos del basamento (Chiaradia et al., 2004). Bustamante et al. (2017a) demostraron similitudes composicionales entre las rocas del basamento de la cordillera Central de Colombia y de Ecuador, donde dicha correlación se asocia a un ambiente tectónico de rift Permo-Triásico con una componente de magmatismo bimodal desarrollado por la ruptura continental y posterior subducción de la placa proto-Pacífico (Cardona et al., 2010; Cochrane et al., 2014a; Villagómez et al., 2011). Es por esto, que tomar como base argumentos planteados por Chiaradia et al., (2004) para explicar dicho comportamiento son válidos debido a la similitud composicional Pb observada entre estos cuerpos intrusivos Jurásicos de los Andes colombianos (exceptuando composiciones Pb altamente evolucionadas del Grupo Plutónico Santander) y los granitoides relacionados al arco Jurásico de los Andes ecuatorianos. El carácter levemente menos radiogénico observado para los batolitos coetáneos de Ibagué, Norosí, San Martín y Segovia en la Cordillera Central a pesar de su proximidad a los valores altamente radiogénicos del Grupo Plutónico Santander, indicarían las variaciones del basamento subyacente al presentar una composición de plomo en la fuente menos radiogénico, donde el resultado composicional refleja la mezcla de plomo de una fuente de manto tipo MORB evolucionada en el tiempo, incluyendo plomo derivado del orógeno con plomo heredado de los complejos del basamento (Leal-Mejía et al., 2019).

Por su parte, el dominio 1 delimitado al sur de los Andes colombianos también se sobrepone a los límites definidos para los terrenos tectonoestratigráficos Tumaco, Calima, Yalcón, Chibcha y terrenos indiferenciados Cauca-Romeral definidos por Restrepo & Toussaint (2020) (**Figura 10**). Las rocas de este dominio isotópico de Pb presentan valores altamente radiogénicos con leves variaciones composicionales menos radiogénicas; este dominio agrupa rocas plutónicas y volcánicas en un rango de edades entre Jurásico y Cuaternario, graficadas en su mayoría entre las

curvas de orógeno y corteza superior del modelo de evolución plumbotectónico de Zartman & Doe (1981) (**Figura 8a**). El comportamiento isotópico Pb de los cuerpos plutónicos de esta zona demuestra las variaciones composicionales del basamento polimetamórfico de la Cordillera Central; como se observa en los mapas de contornos (**Figura 6**), los valores más radiogénicos representados por el Batolito de Buga (Cretácico), el Stock de Jejenés (Cretácico) y Suite la Llanada (Oligoceno) corresponderían a intrusiones encajadas en porciones altamente evolucionadas del basamento subyacente, mientras los datos menos evolucionados composicionalmente del segmento sur del Batolito de Ibagué (Jurásico) estarían intruyendo basamentos con edades más jóvenes y composiciones radiogénicas menos evolucionadas. Con base en lo descrito, es posible resaltar la importancia de los isótopos de plomo para conocer las composiciones del basamento, ya que, como se observa, los cuerpos intrusivos más jóvenes presentan un comportamiento altamente radiogénico, mientras las unidades más antiguas evidencian composiciones Pb menos evolucionadas; esto indicaría sin duda alguna que las firmas isotópicas reflejadas por estas unidades ígneas corresponden a las composiciones del basamento subyacente, independiente de la edad del magmatismo que las originó.

A diferencia de los demás dominios isotópicos planteados, para el dominio radiogénico 4 se observa un carácter transicional, ocasionado por las heterogeneidades composicionales del basamento subyacente, en este caso, correspondiente al complejo polimetamórfico de la cordillera Central donde se encuentran en contacto distintas unidades geológicas con diferentes grados de metamorfismo y edad. En consecuencia, los cuerpos intrusivos reflejan dicho comportamiento a lo largo de una zona donde no se presenta un patrón de agrupamiento claro y se albergan en su mayoría unidades con firmas isotópicas levemente radiogénicas y unos cuantos datos con composiciones Pb más evolucionadas. A pesar de la notable heterogeneidad composicional de esta zona (**Figura 6**), es posible evidenciar una correlación entre los valores presentados para el segmento sur del Batolito de Ibagué ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,71-18,74 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,62 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 38,60-38,75; Leal-Mejía et al., 2019) ubicado hacia la porción sur del terreno y los reportados para la zona central del mismo ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 18,60-18,71 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 15,60-15,62 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$: 38,53-39,10; Bustamante et al., 2016) indicando así una misma firma isotópica Pb, y, por lo tanto, una historia de formación igual. Según Bustamante et al., (2017a) el Batolito de Ibagué se encuentra intruyendo ortoneises y anfibolitas Permo-Triásicas, lo cual es concordante con los datos isotópicos presentados en el presente trabajo, puesto que, el Batolito de Ibagué a diferencia de los

cuerpos adyacentes coetáneos, se encuentra intuyendo una porción de basamento menos evolucionada y más joven dando como resultado una firma isotópica Pb menos radiogénica.

Si bien, los distintos cuerpos intrusivos Jurásicos y Cretácicos se encuentran distribuidos a lo largo de los cuatro dominios propuestos en el presente trabajo, sus composiciones isotópicas Pb son muy similares, graficados en su mayoría muy cercanos a la curva de orógeno del modelo de evolución plumbotectónico de Zartman & Doe (1981) (**Figura 8 a, b, c y d**), estas firmas isotópicas implican una historia tectónica igual, donde se asume que el magmatismo Jurásico es producto de la subducción de la placa oceánica Farallón bajo el margen continental Norandino durante el Jurásico (Bustamante et al., 2016; Spikings et al., 2015). A lo largo del territorio de los Andes colombianos se pueden observar variaciones composicionales en el basamento, con patrones de agrupamiento bien definidos en algunos casos y transicionales en otros; sin embargo, no existe una congruencia evidente entre los resultados presentados en este proyecto y los terrenos tectonoestratigráficos definidos por Restrepo y Toussaint (2020, 1988), permitiendo proponer de esta forma una nueva distribución por medio de geoquímica isotópica de plomo (**Figura 6**). Si bien, el presente proyecto realiza una aproximación a la distribución composicional del basamento, aún se requieren más datos isotópicos Pb/Pb para definir los límites radiogénicos con mayor certeza.

Conclusiones

La integración de datos de geoquímica isotópica de los Andes colombianos permiten proponer una distribución del territorio en cuatro dominios radiogénicos de plomo con base en las características composicionales predominantes de cada uno de ellos. Para los dominios radiogénicos 1 y 2 las altas relaciones isotópicas Pb/Pb en rocas ígneas con edad de cristalización menores a 200 Ma se atribuyen a la asimilación de plomo altamente radiogénico, donde los cuerpos intrusivos se encuentran encajados en fracciones más evolucionadas del basamento Proterozoico a Paleozoico, y, en consecuencia, el carácter isotópico refleja una fuente con poco o ningún aporte de plomo continental. A diferencia de esto, las relaciones isotópicas de plomo menos radiogénicas, representan intrusiones emplazadas en fracciones del basamento menos evolucionado, donde la composición isotópica se deriva principalmente de la asimilación de corteza continental más joven, o a la adición de sedimentos pelágicos con carácter radiogénico en la fuente del magma; estas composiciones se encuentran predominantemente en el dominio 3 y dispersas a lo largo del dominio 4, donde las evidentes variaciones en el basamento de la cordillera Central han influenciado la composición de los magmas que dieron origen a los diversos cuerpos intrusivos.

Los datos de relaciones isotópicas Pb/Pb integrados y analizados en el presente proyecto proporcionan información relevante sobre las variaciones composicionales en la fuente de las distintas unidades ígneas menores a 200 millones de años y depósitos minerales, lo cual aporta a la caracterización de las unidades del basamento de la cordillera Central y supone una base para futuras investigaciones. Mediante el análisis de los resultados obtenidos, es posible afirmar que las heterogeneidades observadas para el basamento de los Andes colombianos no corresponden con la distribución de terrenos tectonoestratigráficos planteados por Restrepo y Toussaint (2020). Sin embargo, aún se requieren más datos de relaciones isotópicas Pb/Pb para generar modelos más precisos.

Bibliografía

- Aitcheson, S.J., Harmon, R., Moorbath, S., Schneider, A., Soler, P., Soria-Escalante, E., Steele, G., Swainbank, I., Worner, G., 1995. Pb isotopes define basement domains of the Altiplano, central Andes. *Geology* 23, 555–558. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0555:PIDBDO>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0555:PIDBDO>2.3.CO;2)
- Allégre, C., Dupré, B., Lambert, B., Richard, P., 1981. The subcontinental versus suboceanic debate, I. Lead-neodymium- strontium isotopes in primary alkali basalts from a shield area: The Ahaggar volcanic suite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 52, 85–92.
- Ardila, R., 1986. Petrografía de las rocas metamórficas de El Retiro, Antioquia.
- Armstrong, R., Hein, S., 1973. Computer simulation of Pb and Sr isotope evolution of the Earth's crust and upper mantle. *Geochim. Cosmochim. Acta* 37, 1–18.
- Aspden, J.A., McCourt, W.J., Brook, M., 1987. Geometrical control of subduction-related magmatism: the Mesozoic and Cenozoic plutonic history of western Colombia. *J. Geol. Soc. London.* 144, 893–905. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.6.0893>
- Ayuso, R.A., 1986. Lead-isotopic evidence for distinct source of granite and for distinct basement in the northern Appalachians, Maine. *Geology* 14, 322–325. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<322:LEFDSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<322:LEFDSO>2.0.CO;2)
- Bissig, T., Mantilla Figueroa, L.C., Hart, C.J.R., 2014. Petrochemistry of igneous rocks of the California-Vetas mining district, Santander, Colombia: Implications for northern Andean tectonics and porphyry Cu (-Mo, Au) metallogeny. *Lithos* 200–201, 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.003>
- Blanco-Quintero, I.F., García-Casco, A., Toro, L.M., Moreno, M., Ruiz, E.C., Vinasco, C.J., Cardona, A., Lázaro, C., Morata, D., 2014. Late Jurassic terrane collision in the northwestern margin of Gondwana (Cajamarca Complex, eastern flank of the Central Cordillera, Colombia). *Int. Geol. Rev.* 56, 1852–1872. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.963710>
- Bustamante, C., Archanjo, C.J., Cardona, A., Bustamante, A., Valencia, V.A., 2017a. U-pb ages and hf isotopes in zircons from parautochthonous mesozoic terranes in the Western margin of Pangea: Implications for the terrane configurations in the northern andes. *J. Geol.* 125, 487–500. <https://doi.org/10.1086/693014>
- Bustamante, C., Archanjo, C.J., Cardona, A., Vervoort, J.D., 2016. Late Jurassic to Early Cretaceous plutonism in the Colombian Andes: A record of long-term arc maturity. *Bull. Geol. Soc. Am.* 128, 1762–1779. <https://doi.org/10.1130/B31307.1>
- Bustamante, C., Cardona, A., Archanjo, C.J., Bayona, G., Lara, M., Valencia, V., 2017b. Geochemistry and isotopic signatures of Paleogene plutonic and detrital rocks of the Northern Andes of Colombia: A record of post-collisional arc magmatism. *Lithos* 277, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.11.025>
- Cardona, A., Valencia, V., Garzón, A., Montes, C., Ojeda, C., Ruiz, J., Weber, M., 2010. Permian to Triassic I to S-type magmatic switch in the northeast Sierra Nevada de Santa Marta and adjacent regions, Colombian Caribbean: tectonic setting and implications with Pangea paleogeography. *South Am. Earth Sci.* 772–783.
- Chiaradia, M., 2002. Lead isotope systematics of Late Cretaceous – Tertiary Andean arc magmas and

- associated ores between 8 ° N and 40 ° S : evidence for latitudinal mantle heterogeneity beneath the Andes 14, 337–342.
- Chiaradia, M., Fontboté, L., 2001. Radiogenic lead signatures in Au-rich VHMS ores and associated volcanic rocks of the early Tertiary Macuchi island arc (Western Cordillera of Ecuador). *Econ. Geol.* 96, 1361–1378.
- Chiaradia, M., Fontboté, L., 1999. Preliminary new lead isotope data on ores and rocks of Ecuador: Assessing metal sources in a complex subduction- related environment, in Stanley, C.J., et al., eds., *Mineral deposits: Processes to processing*.
- Chiaradia, M., Fontboté, L., Paladines, A., 2004. Metal sources in mineral deposits and crustal rocks of Ecuador (1° N-4° S): A lead isotope synthesis. *Econ. Geol.* 99, 1085–1106. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.6.1085>
- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Ulianov, A., Mora, A., Villagómez, D., Putlitz, B., Chiaradia, M., 2014a. Permo-Triassic anatexis, continental rifting and the disassembly of western Pangaea. *Lithos* 190–191, 383–402. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.020>
- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Winkler, W., Ulianov, A., Mora, A., Chiaradia, M., 2014b. Distinguishing between in-situ and accretionary growth of continents along active margins. *Lithos* 202–203, 382–394. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.031>
- Cortés, M., Colletta, B., Angelier, J., 2006. Structure and tectonics of the central segment of the Eastern Cordillera of Colombia. *J. South Am. Earth Sci.* 21, 437–465. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.004>
- Cumming, G., Richards, J., 1975. Ore lead isotope ratios in a continuously changing Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.* 28, 155–171.
- Doe, B., Rohrbough, R., 1977. Lead isotopes data bank: 3.459 samples and analyses cited.
- Doe, B., Zartman, R., 1979. Plumbotectonics I, The Phanerozoic. *Geochemistry Hydro-thermal Ore Depos.* 22–70.
- Gil-Rodríguez, J., 2014. Petrology of the Betulia Igneous Complex, Cauca, Colombia. *J. South Am. Earth Sci.* 56, 339–356. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.09.016>
- González, H., 2001. Mapa Geológico del departamento de Antioquia. Escala 1:400.000.
- González, H., Nuñez, A., París, G., 1988. Mapa Geológico de Colombia. Memoria explicativa.
- Halla, J., 2018. Pb isotopes – A multi-function tool for assessing tectonothermal events and crust-mantle recycling at late Archaean convergent margins. *Lithos* 320–321, 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.08.031>
- Hon, R., 1980. Geology and petrology of igneous bodies within the Katahdin pluton, in Roy, D.C., and Naylor, R.S., in: *New England Intercollegiate Geological Conference. The geology of northeastern Maine and neighboring New Brunswick*, pp. 65–78.
- Jones, M., Reed, B., Doe, B., Lanphere, M., 1977. Age of tin mineralization and plumbotectonics, Belitung, Indonesia. *Econ. Geol.* 72, 745–752.
- Kerr, A.C., Marriner, G.F., Tarney, J., Nivia, A., Saunders, A.D., Thirlwall, M.F., Sinton, C.W., 1997. Cretaceous basaltic terranes in Western Colombia: Elemental, chronological and Sr-Nd isotopic constraints on petrogenesis. *J. Petrol.* 38, 677–702. <https://doi.org/10.1093/etroj/38.6.677>

- Kesler, S., Appold, M., Cumming, G., Krstic, D., 1994. Lead isotope geochemistry of Mississippi Valley-type mineralization in the Central Appalachians. *Econ. Geol.* 89, 1492–1500.
- Leal-Mejía, H., Shaw, R.P., Melgarejo i Draper, J.C., 2019. Spatial-temporal migration of granitoid magmatism and the phanerozoic tectono-magmatic evolution of the Colombian Andes, *Frontiers in Earth Sciences*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76132-9_5
- LeHuray, A., Church, S., Koski, R., Bouse, R., 1988. Pb isotopes in sulfides from mid-ocean ridge hydrothermal sites. *Geology* 16, 362–365.
- Liew, T., Hofmann, A., 1994. Pb isotopic discrimination of crustal domains within the highgrade basement of Sri Lanka. *Precambrian Res.* 66, 11–121.
- Macfarlane, A.W., Marcet, P., LeHuray, A.P., Petersen, U., 1990. Lead isotope provinces of the central Andes inferred from ores and crustal rocks. *Econ. Geol.* 85, 1857–1880. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.85.8.1857>
- Marín-Cerón, M.I., Moriguti, T., Makishima, A., Nakamura, E., 2010. Slab decarbonation and CO₂ recycling in the Southwestern Colombian volcanic arc. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 1104–1121. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.10.031>
- Maya, M., González, H., 1995. Unidades litodemicas en la Cordillera Central de Colombia. Medellín.
- McCourt, W.J., 1984. A Palaeozoic paired metamorphic belt in the Central Cordillera of Colombia. *Br. Geol. Surv. Rep. Ser.* 16/1, 22–7.
- Mirnejad, H., Simonetti, A., Molasalehi, F., 2011. Pb isotopic compositions of some Zn-Pb deposits and occurrences from Urumieh-Dokhtar and Sanandaj-Sirjan zones in Iran. *Ore Geol. Rev.* 39, 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.02.002>
- Misi, A., Iyer, S.S.S., Coelho, C.E.S., Tassinari, C.C.G., Franca-Rocha, W.J.S., de Abreu Cunha, I., Rocha Gomes, A.S., de Oliveira, T.F., Teixeira, J.B.G., Filho, V.M.C., 2005. Sediment hosted lead-zinc deposits of the Neoproterozoic Bambuí Group and correlative sequences, São Francisco Craton, Brazil: A review and a possible metallogenic evolution model. *Ore Geol. Rev.* 26, 263–304. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2004.12.004>
- Ordoñez, O., 1997. O Precambriano na parte norte da Cordilheira Central dos Andes Colombianos. University of Brasília.
- Potra, A., Garmon, W.T., Samuelson, J.R., Wulff, A., Pollock, E.D., 2018. Lead isotope trends and metal sources in the Mississippi Valley-type districts from the mid-continent United States. *J. Geochemical Explor.* 192, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.07.002>
- Potra, A., Moyers, A., 2017. Constraints on the sources of ore metals in Mississippi Valley-type deposits in central and east Tennessee, USA, using Pb isotopes. *Ore Geol. Rev.* 81, 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.034>
- Quandt, D., Trumbull, R.B., Altenberger, U., Cardona, A., Romer, R.L., Bayona, G., Ducea, M., Valencia, V., Vásquez, M., Cortes, E., Guzman, G., 2018. The geochemistry and geochronology of Early Jurassic igneous rocks from the Sierra Nevada de Santa Marta, NW Colombia, and tectono-magmatic implications. *J. South Am. Earth Sci.* 86, 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.06.019>
- Restrepo, J.J., Ordóñez-Carmona, O., Armstrong, R., Pimentel, M.M., 2011. Triassic metamorphism in the northern part of the Tahamí Terrane of the central cordillera of Colombia. *J. South Am. Earth Sci.* 32, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.04.009>

- Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., 2020. Tectonostratigraphic Terranes in Colombia: An Update First Part: Continental Terranes, in: Gómez, J., Mateus-Zabala, D. (Eds.), *The Geology of Colombia, Volume 1 Proterozoic – Paleozoic*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales, Bogotá.
- Restrepo, J.J., Toussaint, J.F., 1988. Terranes and continental accretion in the Colombian Andes. *Episodes* 11, 189–193. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1988/v11i3/006>
- Russell, R., 1972. Evolutionary model for lead isotopes in conformable ores and in ocean volcanics. *Sp. Phys.* 10, 529–549.
- Shen, J., Wang, Y., Li, S.G., 2014. Common Pb isotope mapping of UHP metamorphic zones in Dabie orogen, Central China: Implication for Pb isotopic structure of subducted continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta* 143, 115–131. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.042>
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W., Beate, B., 2015. The geological history of northwestern South America: From Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). *Gondwana Res.* 27, 95–139. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.004>
- Stacey, J., Doe, B., Silver, L., Zartman, R., 1976. Plumbotectonics IIA, Precambrian massive sulfides. <https://doi.org/10.3133/ofr76476>
- Stacey, J., Kramers, J., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.* 26, 207–221.
- Tassinari, C.C.G., Pinzon, F.D., Buena Ventura, J., 2008. Age and sources of gold mineralization in the Marmato mining district, NW Colombia: A Miocene-Pliocene epizonal gold deposit. *Ore Geol. Rev.* 33, 505–518. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.03.002>
- Toussaint, J., 1996. Evolución Geológica de Colombia, Cretácico. *Univ. Nac. Colomb. Medellín* 142, 1–10. <https://doi.org/10.4067/S0718-22362008000200001>
- van der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M., Mora, A., 2016. Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans. *Gondwana Res.* 31, 271–294. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.01.011>
- Vásquez, M., Altenberger, U., 2005. Mid-Cretaceous extension-related magmatism in the eastern Colombian Andes. *J. South Am. Earth Sci.* 20, 193–210. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2005.05.010>
- Vásquez, M., Altenberger, U., Romer, R.L., Sudo, M., Moreno-Murillo, J.M., 2010. Magmatic evolution of the Andean Eastern Cordillera of Colombia during the Cretaceous: Influence of previous tectonic processes. *J. South Am. Earth Sci.* 29, 171–186. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.02.003>
- Villagómez, D., Spikings, R., Magna, T., Kammer, A., Winkler, W., Beltrán, A., 2011. Geochronology, geochemistry and tectonic evolution of the Western and Central cordilleras of Colombia. *Lithos* 125, 875–896. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.05.003>
- 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. *J. South Am. Earth Sci.* 21, 355–371. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.007>
- Weber, M.B.I., Tarney, J., Kempton, P.D., Kent, R.W., 2002. Crustal make-up of the Northern Andes: Evidence based on deep crustal xenolith suites, Mercaderes, SW Colombia. *Tectonophysics* 345, 49–82. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00206-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00206-2)

- Wones, D., 1974. Igneous petrology of some plutons in the northern part of the Penobscot Bay area, in Osberg, in: New England Intercollegiate Geological Conference. The geology of northeastern Maine and neighboring New Brunswick, pp. 99–125.
- Wörner, C., Moorbath, S., Harmon, R., 1992. Andean Cenozoic volcanic centres reflect basement isotopic domains. *Geology* 20, 1103–1106.
- Zartman, R., Pawlowska, J., Rubinowski, Z., 1979. Lead isotopic composition of ore deposits from the Silesia-Cracow mining district. *Inst. Geol* 95, 133–151.
- Zartman, R.E., 1974. Lead isotopic provinces in the cordillera of the western United States and their geologic significance. *Econ. Geol.* 69, 792–805.
- Zartman, R.E., Doe, B.R., 1981. Plumbotectonics - the model. *Tectonophysics* 75, 135–162.