

Petrografía y geoquímica de los diques básicos aflorantes al oeste de Pamplona, Norte de
Santander

Javier Nicolás Aguilar Morales

Juan Ricardo Bustos Garavito

Trabajo de Grado para Optar el título de geólogos

Director

Carlos Alberto García Ramírez

Geólogo PhD

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela de geología
Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A mi familia, principalmente a mis padres Lucia y Javier y mi madrina Ana; por ser mi motor y quienes me ayudan a ser mejor cada día con su apoyo. Esto es por y para ustedes.

A mis amigos del colegio, con quienes aún mantengo una linda amistad.

A todas y cada una de las personas, compañeros y amigos que conocí durante este proceso de formación, con quienes tuve momentos increíbles y enriquecedores.

Javier Nicolás Aguilar Morales

A mis padres Ana y Juan, por siempre creer en mi, a mi tía Laura, a María Laura y a Victoria, por su incondicional apoyo.

Juan Ricardo Bustos Garavito

Agradecimientos

Agradecemos profundamente a nuestro director Carlos Alberto García Ramírez por su tiempo, dedicación y ayuda durante la realización de este proyecto.

Agradecemos al GIGBA por el préstamo de sus instalaciones; además al laboratorio de microscopia electrónica de barrido ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará.

A los estudiantes de la asignatura campo II en las campañas 2017-2 y 2018-1.

Finalmente, agradecemos a los profesores de la escuela de geología quienes nos brindaron su conocimiento ayudarnos en nuestro proceso de formación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Metodología	14
2.1 Fase de pre-campo.....	14
2.2 Fase de campo	15
2.3 Fase de laboratorio	15
2.4 Análisis petrográfico	16
2.5 Química mineral.....	16
2.6 Análisis químicos	16
2.6 Fase de oficina.....	17
3. Marco geológico.....	17
4. Antecedentes	21
5. Ocurrencia de los diques máficos	23

6. Petrografía	25
6.1 Diabasas con cuarzo.	26
6.2 Diabasas sin cuarzo.	26
6.3 Diabasas milonitizadas.....	28
7. Química mineral	28
7.1 Diabasa (muestra p-16)	28
7.2 Diabasa (muestra p-22)	30
7.3 Diabasa milonitizada (muestra g3-28-2).....	31
8. Geoquímica	32
8.1 Geoquímica de elementos mayores.....	32
8.2 Geoquímica de elementos traza.	34
8.3 Ambiente tectónico.	38
9. Discusión.....	40
10. Conclusiones	43
11. Recomendaciones.....	44
Referencias bibliográficas	45

Lista de Tablas

tabla 1: composición mineral de los diques básicos, números en porcentaje	23
tabla 2: geoquímica de elementos mayores.	33
tabla 3: contenido de elementos traza y tierras raras en ppm.	35

Lista de Figuras

figura 1: localización del macizo de santander	18
figura 2: relaciones de campo	24
figura 3: petrografía y texturas.....	27
figura 4: microfotografías sem y espectros eds.....	29
figura 5: microfotografías sem y espectros eds.....	30
figura 6: microfotografías sem y espectros eds.....	31
figura 7: a. diagrama fmw (otha y arai., 2007); b. diagrama álcalis vs. sílice (le bas et al., 1986).	33
figura 8: a. diagrama afm (irvine y baragar 1971); b. diagrama de jensen (1976).	34
figura 9: a. diagrama shervais., 1982; b. diagrama de cabanis y lecolle., 1989.....	36
figura 10: a. diagrama th/yb vs. nb/yb (pearce, 2008), b. diagrama tio ₂ /yb vs. nb/yb (pearce, 2008).	37
figura 11: a. diagrama spider multielemental sun y mcdonough, 1989 normalizado al n-morb; b. diagrama de elementos de tierras raras normalizado al condrito boyton, 1984.....	39
figura 12: diagrama spider multielemental sun y mcdonough, 1989 normalizado al n-morb, en rojo muestras al oeste de pamplona; en amarillo rocas máficas de la cordillera oriental; en azul rocas de la cuenca famatina (argentina).	42

RESUMEN

TÍTULO: PETROGRAFÍA Y GEOQUÍMICA DE LOS DIQUES BÁSICOS AFLORES AL OESTE DE PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER*

AUTORES: JAVIER NICOLAS AGUILAR MORALES; JUAN RICARDO BUSTOS GARAVITO**

PALABRAS CLAVES: DIQUES BÁSICOS, GEOQUÍMICA, PETROGRAFÍA, MACIZO DE SANTANDER

DESCRIPCIÓN:

Hacia el Oeste del municipio de Pamplona en el sector conocido como Cerro Oriente, se encuentran aflorando diques de composición basáltica, la roca caja de estos cuerpos corresponden a neises hornbléndicos y biotíticos pertenecientes a las unidades Esquistos del Silgará y Ortoneis del Macizo de Santander y se emplazan de forma concordante con la foliación de la roca caja. Petrográficamente se pueden clasificar como diabasas, principalmente por la presencia de texturas de intercrecimiento, como textura ofítica, subofítica e intergranular, las cuales evidencian diferentes velocidades de enfriamiento (posiblemente más rápido hacia los bordes y más lento hacia el centro de estos cuerpos). Químicamente las muestras estudiadas presentan afinidad subalcalina dentro de la serie toleítica, y los elementos traza y tierras raras, las muestras indican componentes tanto de N-MORB como de arco. Debido a esta dualidad, la posible fuente del magma corresponde a un manto empobrecido, que es contaminado por fluidos provenientes de una zona de subducción. Al comparar químicamente con otros cuerpos de composición básica tanto en la Cordillera Oriental como en la cuenca Famatina en Argentina, se aprecian grandes similitudes, en especial un enriquecimiento en elementos móviles (e.g. Rb, Ba) y patrones relativamente planos de los elementos de tierras raras, que sugieren un ambiente similar de formación para los diques básicos de Pamplona. Las características químicas sugieren que el magma que originó estos cuerpos se originó en un ambiente de cuenca “*back arc*”, donde ocurrió una extensión lo suficientemente extensa para que fluidos provenientes del manto, afectados por un proceso de subducción, ascendieran a través de las fallas normales que limitaban la paleocuenca.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Carlos Alberto García Ramírez, Geólogo PhD.

ABSTRACT

TITLE: PETROGRAPHY AND Y GEOCHEMISTRY OF THE BASIC DYKES OUTCROPPING TO THE WEST OF PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER*

AUTHORS: JAVIER NICOLAS AGUILAR MORALES; JUAN RICARDO BUSTOS GARAVITO**

KEYWORDS: BASIC DYKES, GEOCHEMISTRY, PETROGRAPHY, SANTANDER MASSIF

DESCRIPTION:

To the west of Pamplona in the sector known as Cerro Oriente, basaltic dikes outcrops, the host rock of these bodies, correspond to hornblendic and biotitic neises belonging to Esquistos del Silgará and Ortoneis Units of the Santander Massif and they are emplaced in concordant with the foliation of the host rock. Petrographically, they can be classified as diabases, mainly for textures of intergrowth, such as ophytic, subophytic and intergranular texture, which show different cooling rates (possibly faster towards the boundaries and slower towards the center of these bodies). Chemically the samples studied correspond to the tholeiitic series with sub-alkaline affinity, with respect to the trace elements and rare earths, the samples have both N-MORB and arc components, due to this duality, the possible source of magma corresponds to an depleted mantle, which is contaminated by fluids from a subduction zone. Comparing chemically with other bodies of basic composition both in the Eastern Cordillera and in the Famatina Basin in Argentina, great similarities were appreciated, in special an enrichment in mobile elements (e.g. Rb, Ba) and relatively flat patterns of rare earth elements, they suggest a similar formation environment for the basic dikes of Pamplona. The chemical characteristics suggests that the magma that originated these bodies originated in a *back arc* basin setting, where a sufficiently large extension occurred so fluids from the mantle, affected by a subduction process, ascended through the normal faults that limited the paleo-basin.

*Bachelor Thesis

**Faculty of Physico-Chemical Engineering. School of Geology. Director: Carlos Alberto García Ramírez, PhD geologist.

Introducción

El Macizo de Santander junto con los macizos de Floresta, Quetame y Garzón, conforman los cuatro macizos de la Cordillera Oriental de Colombia. El Macizo de Santander se localiza en el bloque triangular de Maracaibo, el cual se encuentra limitado por las fallas Bucaramanga-Santa Marta, Oca y Boconó (Tschanz *et al.*, 1974; Mantilla *et al.*, 2011) y está constituido principalmente por rocas metamórficas formadas durante las orogenias Grenvilliana y Famatiniana (localmente llamada Quetame-Caparonensis), agrupadas en las unidades Neis de Bucaramanga, Esquistos del Silgará, Ortoneis, rocas ígneas Paleozoicas (Granito de Durania), intrusivos Triásico-Jurásicos tal como el Grupo Plutónico de Santander compuesto por diferentes batolitos (e.g. Granito de Pescadero, Batolito de Río Negro, Batolito de Mogotes) y cuerpos porfiríticos del Mioceno de composición riodacítica asociados a la orogenia Andina (Ward *et al.*, 1973; Royero y Clavijo, 2001; Mantilla *et al.*, 2009; Botello 2014; Mantilla *et al.*, 2016a;). Reposando discordantemente sobre las unidades ígneas y metamórficas se encuentra una extensa secuencia de rocas sedimentarias de edades que van desde Triásico-Jurásico hasta el Neógeno (Ward *et al.*, 1973; Royero y Clavijo, 2001). Igualmente, se ha reportado la presencia de diques de composición tanto félsica como máfica que cortan diferentes unidades del macizo, a escala muy local y en varias localidades, (Ward *et al.*, 1973; Martínez *et al.*, 2016; Botello, 2014; Mantilla y García, 2018, Restrepo – Pace, 1995), debido a su escala y dimensiones estos cuerpos no son cartografiables.

En cercanías al municipio de Pamplona (Norte de Santander), afloran diques máficos que cortan rocas de las unidades Ortoneis, Esquistos del Silgará y Granito de Durania. Magmatismo de composición máfica ha sido reportado y estudiado en diferentes zonas de la Cordillera Oriental de Colombia (Canchón *et al.*, 2014; Moreno *et al.*, 2007; Vásquez, 2007; Vásquez *et al.*, 2010) tales

como los intrusivos de Cáceres, La Corona, Pajarito, Guaquimay y Rodrigoque, considerados como diques y silos de composición gabrónica; de edad Cretácico Inferior. El presente trabajo se enfoca en el estudio petrográfico y geoquímico de dichos cuerpos aflorantes en el Macizo de Santander y su posible ambiente de formación.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar petrográfica y geoquímicamente las rocas ígneas máficas aflorantes en los alrededores de Pamplona (Norte de Santander), para definir su posible ambiente de formación.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar la ocurrencia de los diques máficos y su relación con la roca caja.
- Estudiar la composición mineralógica y las características texturales de los diques máficos.
- Establecer las posibles condiciones de formación de los diques máficos a partir de estudios geoquímicos.

2. Metodología

El desarrollo de este trabajo de grado se realizó mediante cuatro fases de trabajo consecutivas.

2.1 Fase de pre-campo

Durante esta fase se planteó el problema, se establecieron los objetivos y se delimitó el área de interés basados en los reportes de la presencia de los diques básicos realizados por los estudiantes de la asignatura de CAMPO II durante las campañas correspondientes a los semestres 2017-II y

2018-I, en los alrededores de Pamplona, Norte de Santander. Basados en dichos reportes se programaron las transectas y puntos de interés para la recolección de muestras y datos geológicos. La información se compiló en el mapa correspondiente a la plancha 110-II-C Pamplona, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

A continuación, se procedió con la revisión bibliográfica con el propósito de analizar los estudios realizados en rocas ígneas máficas en el Macizo de Santander y en general para la Cordillera Oriental de Colombia. Se consultaron libros, artículos, mapas geológicos, memorias de mapas, catálogos y mapas de la asignatura campo II, etc.

2.2 Fase de Campo

Durante el trabajo de campo se visitaron los puntos de interés, definidos en la fase de pre-campo. Cada punto de muestreo y observación se identificó con las siglas “RN” seguida por el número consecutivo correspondiente a la estación. En cada una de las estaciones se recolectó información correspondiente a la composición de los diques, sus dimensiones, orientación, el tipo de roca caja y la relación de campo con los diques, y datos estructurales tanto de la roca caja como de los diques. En cada una de las estaciones se recolectaron muestras de roca, las cuales fueron marcadas así: “RN-Y-X”, donde Y corresponde al número de la estación y X al número de muestra consecutiva tomada en dicha estación, el datum utilizado fue MAGNA SIRGAS y el sistema de coordenadas proyección plana.

2.3 Fase de Laboratorio

En esta fase del proyecto, se realizó la descripción macroscópica de las muestras de mano recolectadas y posteriormente se seleccionaron 6 muestras para realizar sección delgada. También se analizaron 7 secciones delgadas de los diques básicos, recolectados por estudiantes de CAMPO II, semestres 2017-II y 2018-I. Se realizó la geoquímica de roca total a 5 muestras seleccionadas.

2.4 Análisis petrográfico

Los análisis petrográficos de un total de 12 secciones delgadas, se realizaron en el microscopio triocular de luz transmitida (petrográfico) modelo LEICA DM750, en el laboratorio de petrografía del Grupo de investigación en Geología Básica y Aplicada (GIGBA), ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará, sede de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander. Las microfotografías de las secciones delgadas fueron realizadas en el sistema de fotografía digital MC120HD, acoplado al microscopio Leica modelo DM750P. Para cada una de las muestras se realizó una descripción general de su composición mineralógica, textura y demás características petrográficas de interés. Para cada una de las secciones delgadas se realizó un conteo de 300 puntos por sección para tener un porcentaje modal de su mineralogía. La clasificación modal de las muestras se realizó siguiendo las recomendaciones de la Subcomisión para la Sistemática de las Rocas Ígneas de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) publicado por Le Maitre *et al.* (2002).

2.5 Química mineral

La composición química de forma semicuantitativa se determinó por medio del microscopio electrónico de barrido. Para la preparación de las muestras se colocaron sobre stubs metálicos con cinta adhesiva de cobre y recubiertas con carbón. Las imágenes del Microscopio Electrónico de Barrido FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 ubicado en la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará, fueron tomadas con alto vacío, voltaje de aceleración 30KV y Software EDX Genesis.

2.6 Análisis Químicos

Los análisis geoquímicos fueron realizados en los laboratorios de Bureau Veritas (Canadá). Los elementos mayores fueron determinados mediante fluorescencia de rayos X (XRF). Los elementos

traza y tierras raras se determinaron mediante ICP-MS. El límite de detección reportado para los elementos mayores es de 0,01% Wt y de 0,1 y 0,01 ppm para los elementos traza y tierras raras. El laboratorio reporta además los datos de STD OREAS45E, STD OREAS25A-4A, STD OREAS184, STD SY-4(D), STD OREAS45E, STD OREAS25A-4A, como muestras estándar y QUARTZ_MDE, QUARTZ_MDE, como blancos. Los datos obtenidos se procesaron usando el software Geochemical Data Toolkit (GCDkit) versión 6.0 Janoušek *et al* (2006), Software libre y disponible para la descarga en <http://www.gcdkit.org/download>.

2.6 Fase de Oficina

La etapa final comprendió el análisis de los resultados y la elaboración del informe final de este estudio

3. Marco geológico

La parte noroccidental de Suramérica se caracteriza por poseer una alta complejidad geológica debido a la interacción de tres placas tectónicas principales: la Placa de Nazca y del Caribe, caracterizadas por una marcada afinidad oceánica; y la Placa Suramericana netamente continental, región denominada como Andes del Norte (Cediel *et al.*, 2003). Esta zona comprende los cinturones orogénicos de Colombia, Venezuela y Ecuador (Mantilla *et al.*, 2011). Además, se encuentra el denominado Bloque de Maracaibo, el cual se limita por las fallas Bucaramanga - Santa Marta al oeste, Oca al norte y Boconó al este (Van der Hilst y Mann, 1994; Mantilla *et al.*, 2011) El Macizo de Santander está constituido por unidades metamórficas (Neis de Bucaramanga, Ortoneis, Esquistos del Silgará; e ígneas (Grupo Plutónico de Santander (magmatismo Jura-Triásico) y Granito de Durania), las cuales son suprayacidas por una secuencia sedimentaria del

Cretácico de la Cuenca del Catatumbo para la zona de estudio; Formación (Fm) Tibú-Mercedes, Fm. Aguardiente, Fm. Capacho, Fm. La Luna); Ward *et al.* (1973), Royero y Clavijo (2001), Mantilla *et al.* (2016a, b) y rocas ígneas del Mioceno (Mantilla *et al.*, 2011) (ver Fig 1).

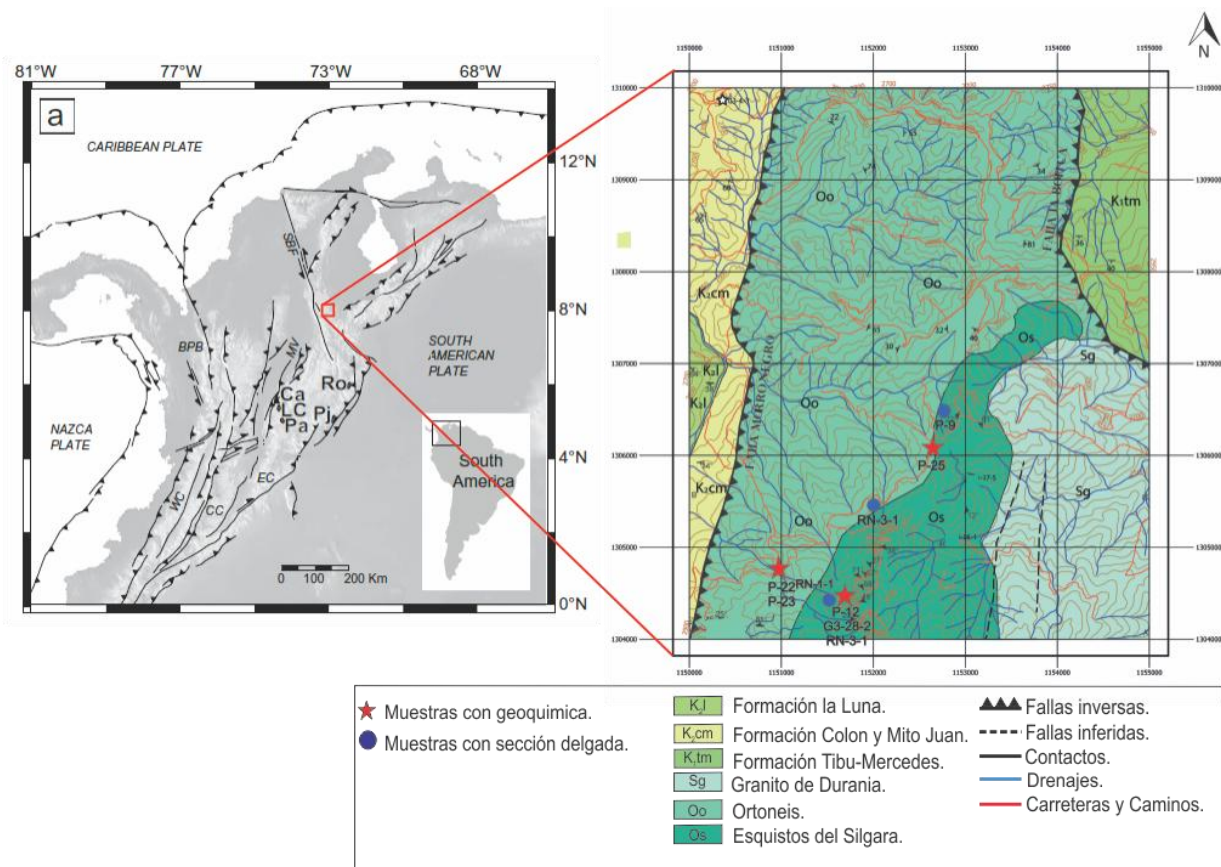


Figura 1: Localización del Macizo de Santander (Izquierda). Tomado de Vásquez *et al.* 2010. Abreviaciones: BPB, Bloque Baudó-Panamá; CC, Cordillera Central; EC, Cordillera Oriental; MV, Valle del Magdalena; SBF, Falla Santa Marta-Bucaramanga; WC, Cordillera Occidental. Intrusiones básicas de la Cordillera Oriental: Ca, Cáceres; LC, La Corona; Pa, Pacho; Pj, Pajarito; Ro, Rodrigoque. Derecha. Mapa geológico de la zona de estudio. Tomado y modificado de informes de asignatura Campo II semestre 2018-I.

La unidad más antigua del Macizo de Santander se denomina Neis de Bucaramanga, se compone de una secuencia de rocas metamórficas de alto grado, compuestas por neises pelíticos, neises horbléndicos, micáceos y granatíferos, anfibolitas, con menores ocurrencias de cuarcitas,

mármoles y migmatitas (Ward *et al.*, 1973; Royero y Clavijo, 2001; Urueña-Suarez y Zuluaga 2011; Amaya 2012; Estupiñan y Ulloque 2018) pertenecientes a las facies anfibolita zona de la sillimanita (Ward *et al.*, 1973). En los trabajos de Ward *et al.* (1973); Restrepo-Pace *et al.* (1997); y Cordani *et al.* (2005) se reportan edades para esta unidad en el rango 800 a 945 M.a, edades precámbricas asociadas principalmente a la Orogenia Grenvilliana (Cordani *et al.*, 2005; Mantilla *et al.*, 2016a, b).

La unidad Esquistos del Silgará (s.l) corresponde al nombre informal de la unidad Formación Silgará definida por Ward *et al.* (1973), constituida por metapelitas y metasemipelitas (Mantilla *et al.*, 2016a, b), mármol, anfibolitas, esquistos anfibólicos, rocas calcosilicatadas y en menor proporción filitas y pizarras (Ward *et al.*, 1973; Royero y Clavijo, 2001), y estratigráficamente se encuentra suprayaciendo al Neis de Bucaramanga. Recientemente, Mantilla *et al.*, (2016a, 2016b) proponen dividir la Formación Silgará (s.l), en tres unidades diferentes: Esquistos del Silgará s.s con pico metamórfico en facies esquistos verdes; Esquistos del Chicamocha, compuesta de metabasitas, semipelitas y metapsamitas que alcanzó las facies anfibolita (estas dos unidades fueron afectadas por el evento orogénico localmente conocido como Fammatiniano principal durante el Ordovícico temprano); y Las Filitas de San Pedro, compuesta de metapsamitas y semipelitas con facies sub-esquistos verdes, afectada por el evento menor Fammatiniano durante el Silúrico (?).

La unidad Ortoneis, está compuesta por ortonaises cuarzo-feldespáticos, pelíticos, hornblendicos y en menor proporción lentes de anfibolitas (García *et al.*, 2017). El protolito de esta unidad fue emplazado sintectónicamente en los Esquistos del Silgará durante el evento orogénico principal Fammatiniano, entre 480 – 472 M.a (Restrepo-Pace y Cediell, 2010; Mantilla *et al.*, 2012; Van der Lelij, 2013, García, *et al.* 2017). Estudios geoquímicos indican que estas

rocas fueron formadas a partir de fusión parcial de corteza en ambientes de arco continental activo y alcanzó facies anfibolita (García *et al.*, 2017).

El Granito de Durania es muscovítico, equigranular, de grano medio a grueso (Ward *et al.*, 1973). Dataciones U/Pb por LA-ICP-MS en circones realizadas por Botello (2014) evidencian una edad de 442.6 ± 5.6 M.a (Silúrico temprano); datos de geoquímica por este mismo autor determinan que este cuerpo se formó en la transición entre dos periodos (uno de extensión y otro de compresión) y concluye que este cuerpo se originó como producto de inyección de material mantélico en un ambiente de engrosamiento cortical.

En cercanías al área de estudio afloran unidades sedimentarias de edad Cretácica que hacen parte de la secuencia sedimentaria de la cuenca del Catatumbo y son agrupadas en las formaciones Tibú-Mercedes, Aguardiente, Capacho y La Luna. La formación Tibú-Mercedes litológicamente está compuesta por una intercalación de calizas biomicríticas con arcillolitas, lodolitas y areniscas micáceas y areniscas de grano medio algo conglomeráticas intercaladas con lodolitas hacia la base de la formación. La Formación Aguardiente se compone de areniscas cuarzosas de grano fino, medio y grueso, con presencia de glauconita intercaladas con lodolitas micáceas y carbonosas. La Formación Capacho se compone hacia la base por lodolitas negra laminadas intercaladas con areniscas y calizas fosilíferas, en la parte media por areniscas de grano fino glauconíticas y calizas lumaquéllicas con intercalaciones de lodolitas negras fosilíferas, y en la parte superior se encuentran lodolitas grises con delgadas intercalaciones de calizas fosilíferas y areniscas de grano fino. Para el Cretácico Superior se encuentra aflorando la Formación La Luna litológicamente compuesta por calizas y lodolitas calcáreas con grandes concreciones, capas delgadas de chert y capas de rocas fosfóricas en la parte superior de la secuencia (Royero y Clavijo, 2001).

Cuerpos porfiríticos andesíticos y riodacíticos aflorantes en el Distrito Minero de Vetas y California (Santander) han sido datados con el método U/Pb en circones por LA-MC-ICPMS, y donde se reportan edades entre 8.4 ± 0.2 M.a y 10.9 ± 0.2 M.a, siendo el magmatismo Miocénico asociado a la Orogenia Andina con una duración aproximada de 2.5M.a (Mantilla *et al.*, 2009; Mantilla *et al.*, 2011).

4. Antecedentes

En diferentes localidades y unidades del Macizo de Santander se encuentran aflorando cuerpos en forma de diques de composición básica, clasificados como diabasas, basaltos y microgabros.

Los diques básicos reportados por Ward *et al.* (1973), composicionalmente se clasifican como diques de composición dacítica y basáltica con textura porfirítica. Estos cuerpos poseen una ocurrencia restringida a ciertas zonas del Macizo de Santander y no se encuentran asociados a los grandes batolitos que conforman el denominado grupo plutónico de Santander.

Según Ward *et al.* (1973) algunos diques de diabasa y basalto de textura afanítica se encuentran aflorando en cercanías a Bucaramanga a ambos lados del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta. Estos cuerpos cortan paragneises de alto grado de metamorfismo al este de Bucaramanga y rocas del Batolito de Río Negro al norte de la ciudad. Al norte del cuadrángulo H-12 afloran diques y silos que cortan a la Formación Jordán, en cercanías a Ríonegro, y al sur hacia la mesa de los Santos. Diques de composición similar se encuentran en otras zonas del Macizo de Santander, cortando rocas de edad Jurásica a Cretácica, como el límite entre la Formación Girón y la Formación Tambor. Principalmente, los cuerpos que se encuentran hospedados en rocas sedimentarias, se encuentran tan alterados que no es posible identificar su composición. La edad

de estos diques de basalto y diabasa, basada principalmente en las relaciones de corte con las rocas sedimentarias, corresponde a una edad Jurásica o posiblemente más jóvenes.

En la parte más sur del Macizo de Santander, sobre el río Chicamocha en el límite entre los departamentos de Santander y Boyacá, en cercanías al municipio de San José de Miranda, Moreno *et al.* (2016) propone una nueva unidad litoestratigráfica a la que denomina como Formación Nogontova.

La sección tipo de esta unidad se encuentra localizada en la vía que conduce de San José de Miranda al sector de La Burrera (Santander) y se compone de una serie de coladas de lavas de espesor variable. En las zonas donde las coladas de lava basáltica entraron en contacto con sedimentos, se desarrollan peperitas (Moreno *et al.* 2016). En la parte media y basal de esta unidad se encuentran niveles discontinuos y subtabulares de lodolitas de color negro. Esta formación suprayace a la Formación Floresta metamorfoseada e infrayace a la Formación Río Negro. Las coladas de lava de la Formación Nogontova se formaron en un periodo de tiempo entre el metamorfismo de las unidades paleozoicas y la sedimentación de la Formación Río Negro (Royero y Clavijo, 2001), es decir, un intervalo Triásico tardío al Jurásico Tardío. Las coladas de lava fluyeron bajo el agua, tal como se evidencia por la presencia de una estructura almohadillada y amígdalar en los basaltos (Moreno *et al.* 2016).

Otros diques máficos son reportados para el Macizo de Santander en el catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia, Batolito de Mogotes, por Correa-Martínez *et al.* (2016). Uno de los cuerpos reportado en este trabajo se encuentra ubicado en la vía Aratoca-desvío Las Palmas en el sector de Tempranito, este cuerpo se aprecia altamente meteorizado y cizallado y corta al Batolito de Mogotes, composicionalmente se puede clasificar como una diorita (Correa-Martínez

et al. 2016). Diques de andesita son reportados en la sección sur del Batolito y cuerpos de andesita hornbléndica son reportados en la zona norte del Batolito al este de Cepitá.

5. Ocurrencia de los diques máficos

Al oeste del municipio de Pamplona, Norte de Santander, se encuentran aflorando diversos diques composición máfica y en su mayoría se encuentran aflorando sobre el carreteable que conduce de la carretera Pamplona-Bucaramanga al sector conocido como Cerro Oriente (Fig. 1).

Tabla 1: *Composición mineral de los diques básicos, números en porcentaje*

Muestra	Px	Pl	Anf	Qz	Op	Bt	Chl	Clasificación
RN 1-1	52	38	7	-	3	-	-	Diabasa
RN 2-1	52	30	10	6	1	1	-	Diabasa
RN 2-2	53	31	1	6	TR	9	-	Diabasa milonitizada
RN 3-1	56	42	1	-	1	-	TR	Diabasa
RN 3-2	64	23	4	7	1	1	-	Dacita
P-9	58	36	4	-	2	-	-	Diabasa
P-12	64	32	1	-	3	-	TR	Diabasa
P-16	53	44	1	-	2	TR	-	Diabasa
P-22	50	42	2	1	2	1	2	Diabasa
P-23	52	36	8	1	2	-	1	Diabasa
P-25	55	37	4	2	2	-	TR	Diabasa
G3-28-2	68	23	-	6	3	-	-	Diabasa milonitizada

Nota: Abreviaciones: Px: piroxeno; Pl: plagioclasa; Anf: anfíbol; Qz: cuarzo; Op: opaco; Bt: biotita; Chl: clorita; TR: traza.

Las rocas caja donde se encuentran estos diques corresponden a neises biotíticos y hornblendicos (unidad Ortoneis), así como esquistos muscovíticos y biotíticos (unidad Esquistos del Silgará) (Fig. 2). Los cuerpos ígneos se encuentran en algunas ocasiones cortando las rocas metamórficas

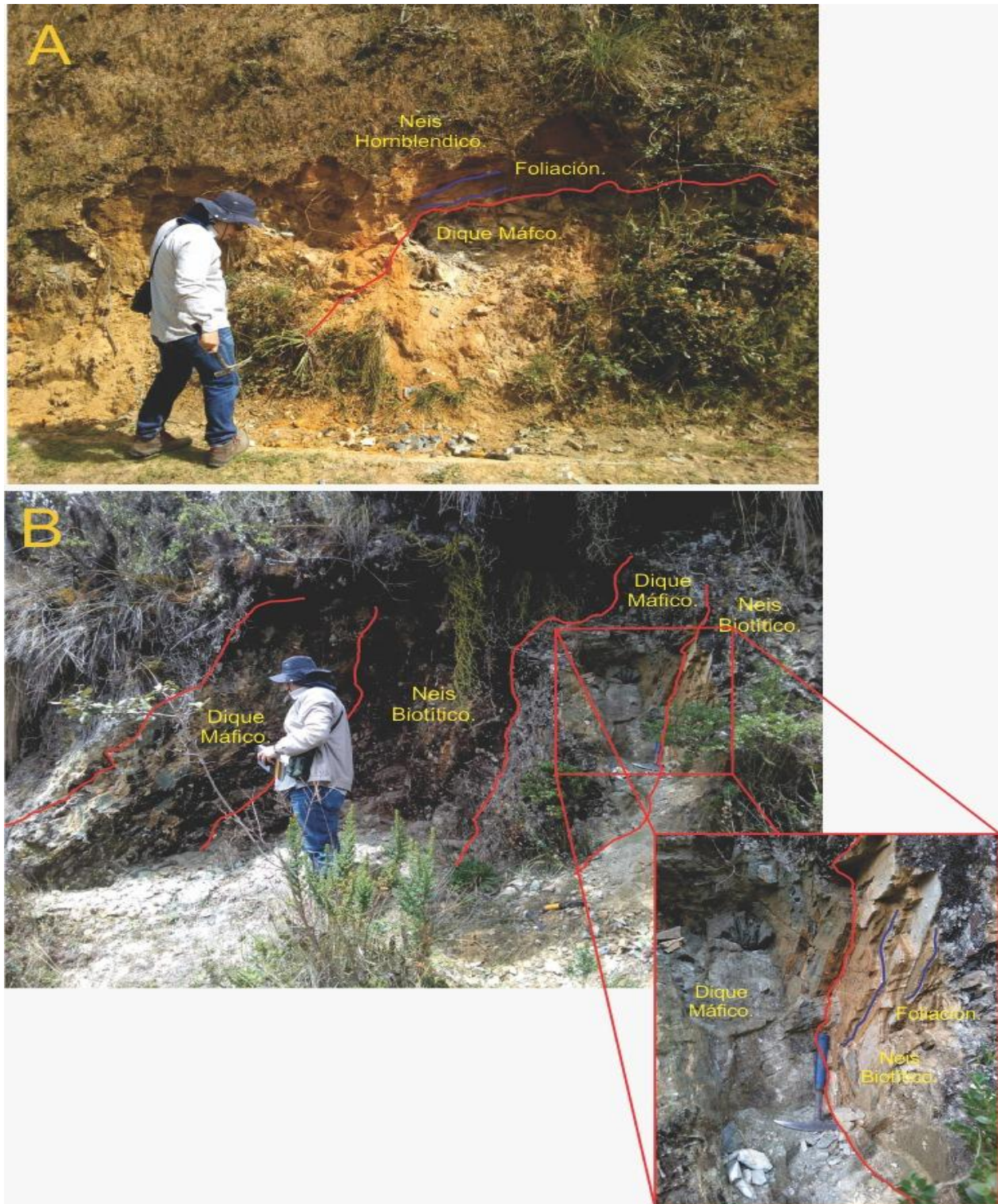


Figura 2: Relaciones de campo. A. Estación RN-2, roca caja neis horbléndico. B. Estación RN-3, roca caja neis biotítico. En ambas imágenes la dirección del dique es concordante con la foliación.

de forma concordante con su foliación (Fig. 2A). Dichos cuerpos presentan un espesor aproximado que varía de 70 cm hasta 7 m.

Mesoscópicamente estas rocas se caracterizan por presentar un color verde oscuro, holocristalinas, de textura fanerítica en ocasiones algo porfirítica (fenocristales de plagioclasa en una matriz máfica), mineralógicamente compuestas por plagioclasa, anfíboles y piroxenos. En algunos casos se puede apreciar el desarrollo de una foliación tectónica, evidenciando la presencia de deformación en estos cuerpos.

6. Petrografía

En total se analizaron 12 secciones delgadas, petrográficamente se pueden identificar tres variedades litológicas en secciones delgadas (Fig. 3 y Tabla 1): cinco muestras que contienen cuarzo como mineral accesorio (RN-2-1, RN-3-2, P-22, P-23 y P-25); cinco muestras que no presentan cuarzo (RN-1-1, RN-3-1, P-9, P-12 y P-16); y dos muestras que fueron afectadas por metamorfismo dinámico (RN 2-2 y G3-28-2); las muestras fueron clasificadas como diabasas y diabasas milonitizadas, respectivamente.

Se pueden distinguir en las secciones texturas de intercrecimiento (Fig. 3), donde los minerales cristalizan y crecen de manera simultánea o a expensas de otros cristales. La textura ofítica (cristales de plagioclasa en piroxenos) (Fig. 3A y 3D) y la textura subofítica (piroxenos en cristales de plagioclasa más grande) son comunes. De forma más general también se observa textura intergranular donde los cristales de piroxeno ocupan los espacios dejados por cristales más grandes de plagioclasa que forman una red (Fig. 3C), y la textura variolítica (Fig 3B), la cual se forma por la nucleación de cristales alrededor de un núcleo en forma radial (Winter, 2014, Mantilla., 2003).

6.1 Diabasas con cuarzo.

Estas muestras poseen una textura, holocristalina, hipidiomórfica, con cristales de tamaño medio y mineralógicamente se compone de piroxenos (ortopiroxenos y clinopiroxenos) y plagioclasa, los minerales accesorios de estas muestras corresponden a cuarzo, anfíboles, opacos y biotita. Estas muestras se clasifican como diabasas y dacita (Tabla 1) de acuerdo con Le Maitre *et al.* (2002). Los piroxenos representan entre el 52 al 64% de las muestras, los cristales poseen un tamaño de entre 0,5 mm y 2,5 mm y son subhedrales a anhedrales, los cristales se encuentran alterando a anfíbol (uralitizados), es difícil en ocasiones reconocer los piroxenos debido a que la alteración mencionada esconde o enmascara las propiedades ópticas de los minerales. La plagioclasa abarca entre el 23 y 37% de la roca, se presenta en cristales euhedrales a subhedrales de forma tabular, con un tamaño entre 0,5 mm y 2 mm y se encuentran alterando a sericita, en algunas partes se puede apreciar la macla característica de albita-Carlsbad; mediante el método de Michel levy (Kerr, 1965) se determinó que corresponde a plagioclasa de tipo andesina.

6.2 Diabasas sin cuarzo.

Estas rocas poseen una textura holocristalina, hipidiomórfica - alotriomórfica con un tamaño de cristales medio, se constituyen, en su mayoría, por plagioclasa (alterada a sericita), clinopiroxenos y ortopiroxenos (se encuentran uralitizados); como minerales accesorios se aprecian opacos y anfíboles (hornblenda), de acuerdo con Le Maitre *et al.* (2002) estas rocas se clasifican como basaltos (Tabla 1). Los piroxenos se presentan en cristales subhedrales a anhedrales, se representan entre el 52% y el 58 % de la muestra y poseen un tamaño de entre 0,75 mm y 2 mm, en su mayoría se encuentran uralitizados (alterando a anfíboles), hacia los bordes en algunos de estos cristales se pueden apreciar dicha alteración; el resultado de la uralitización presenta un hábito masivo. Los

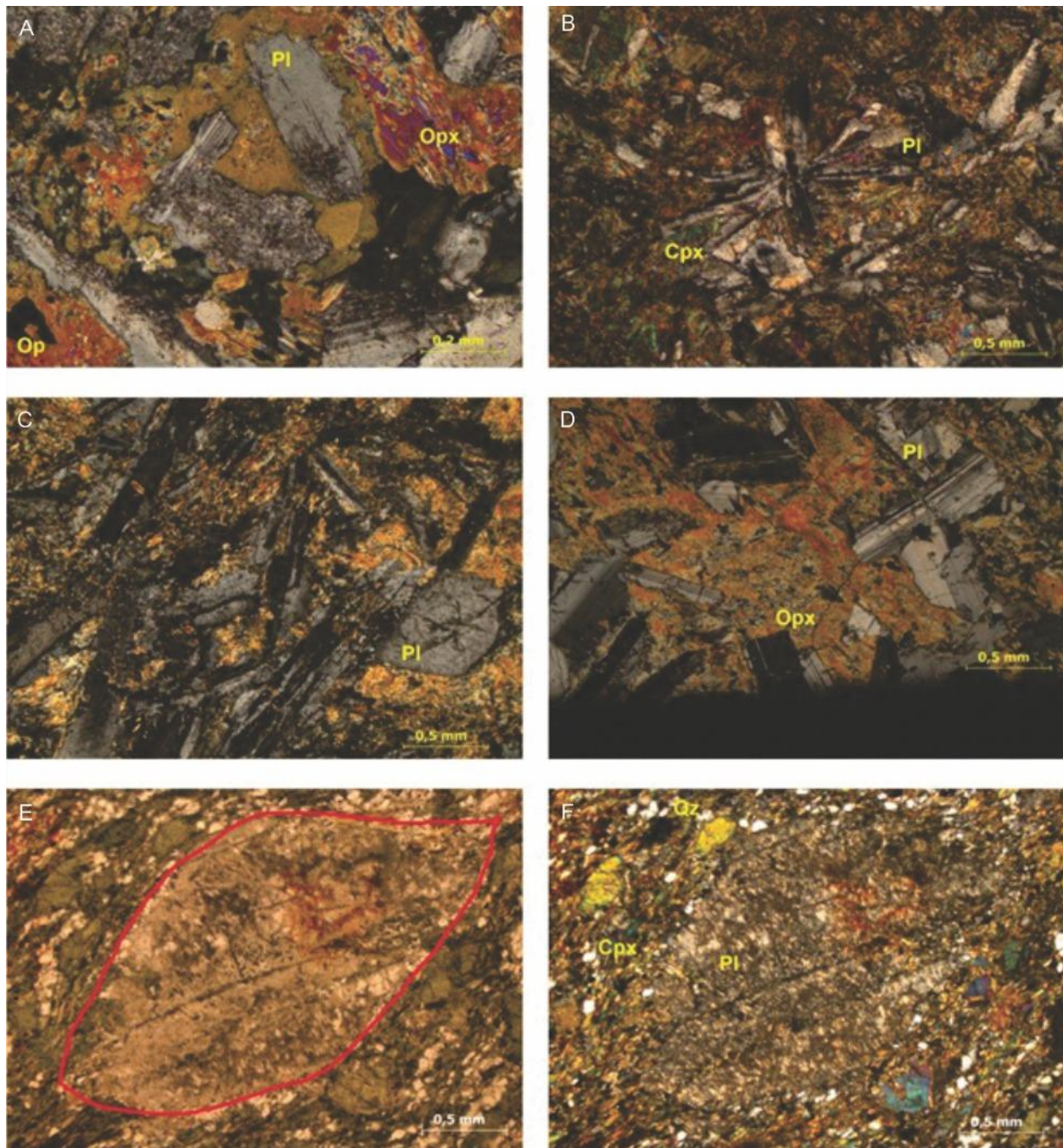


Figura 3: Petrografía y texturas. A y D. Textura ofítica, muestra P-22 y muestra P-16 (respectivamente); B. Textura variolítica, muestra RN 3-1; C. Textura intergranular; muestra RN 3-1; E y F. Porfiroclasto de Pl formando sombra de presión, muestra G3-28-2.

cristales de plagioclasa conforman entre el 38% y 44% de las muestras, son euhedrales algunas veces subhedrales, de forma tabular, de entre 0,5 mm hasta 2,75 mm de tamaño y con presencia de maclas tipo albita-Carlsbad, en algunos casos se encuentran altamente sericitizadas. Mediante el método de Michell-lévy (Kerr, 1965) se determinó que corresponden en composición a cristales de andesina.

6.3 Diabasas milonitizadas

Las muestras con deformación presentan desarrollo de foliación (marcada por anfíboles y piroxenos), sombras de presión y desarrollo de porfiroclastos (Fig. 3E y 3F), respecto a su porcentaje de matriz fueron clasificados como diabasas milonitizadas, también se encuentran estructuras como cuarzo con extinción ondulante y, recristalización dinámica tipo subgrain rotation (SGR), (Passchier y Trouw, 2005).

7. Química mineral

La composición química semicuantitativa de algunos minerales de interés se determinó en las muestras P-16, P-22 y G3-28-2, por medio de microanálisis de espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), realizado en el microscopio electrónico de barrido (SEM) FEG (Field Emission Gun) QUANTA FEG 650 ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, sede de la Universidad Industrial de Santander.

7.1 Basalto (Muestra P-16)

Esta muestra presenta piroxenos cálcicos como augita (Fig. 4A y B) con contenidos de Fe, Al, Mg, Ca y Si, otros minerales son: muscovita (K, Al y Si), epidota (Fig. 4C y D) con Na, alto

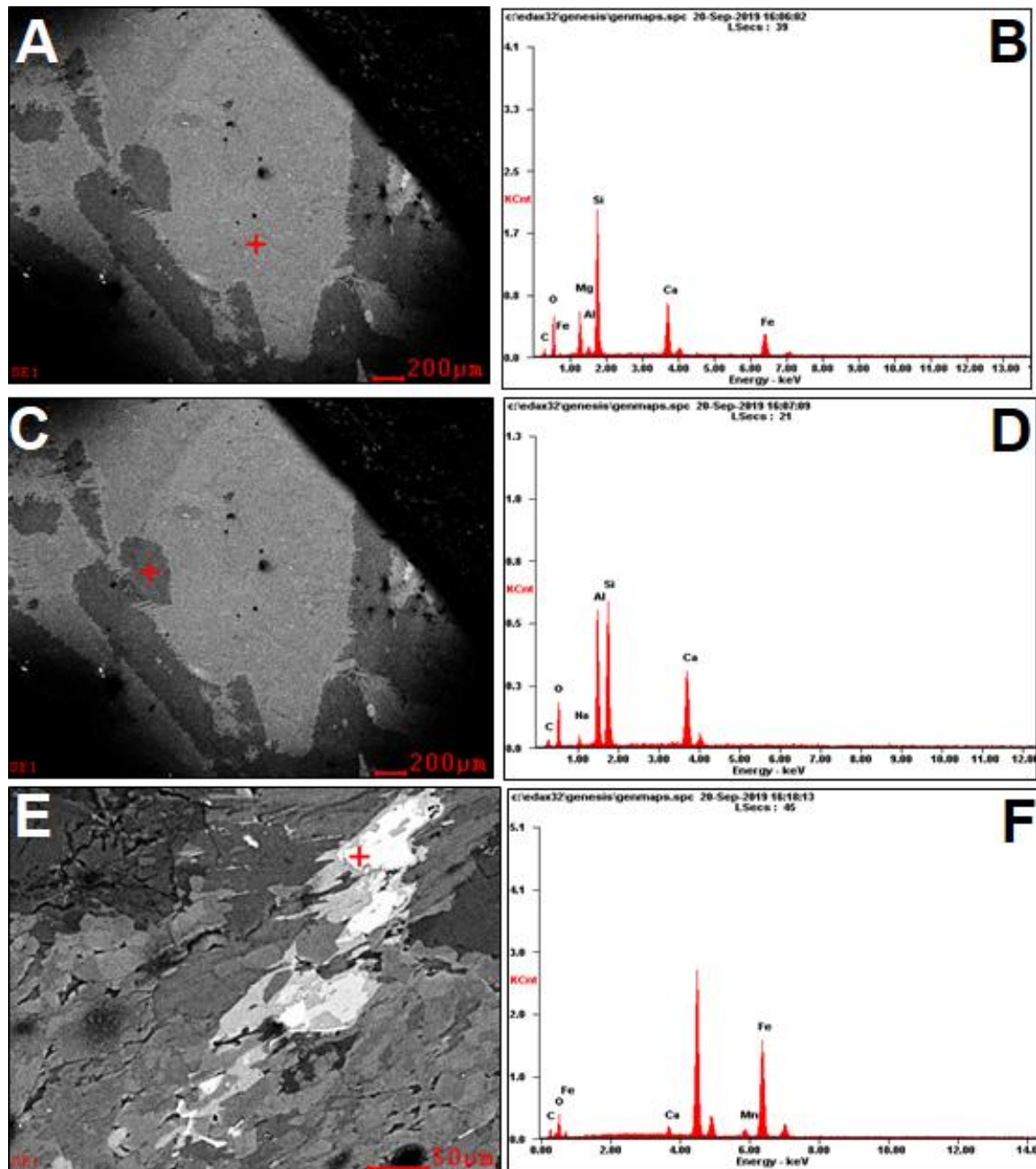


Figura 4: Microfotografías SEM y espectros EDS. A y B. Augita; C y D. Epidota; E y F. Ilmenita. La cruz roja es el punto de análisis.

contenido de Ca, Al y Si; y también algunos óxidos y sulfuros tales como ilmenita (Fig. 4E y F) con Ti, Ca, Fe y Mn, y pirrotita (S y Fe).

7.2 Diabasa (Muestra P-22)

Esta muestra también presenta piroxenos cálcicos (Al, Mg, Fe y Ca), muscovita (K, Al, Si) Fig. 5A y B; óxidos como la titanomagnetita (Ti y Fe) (Fig. 5C y D) horblenda (Fig. 5E y F) con K, Na, Mg, Al, Ca, Fe y Si; y plagioclasa de composición intermedia (más cálcicos que sódicos).

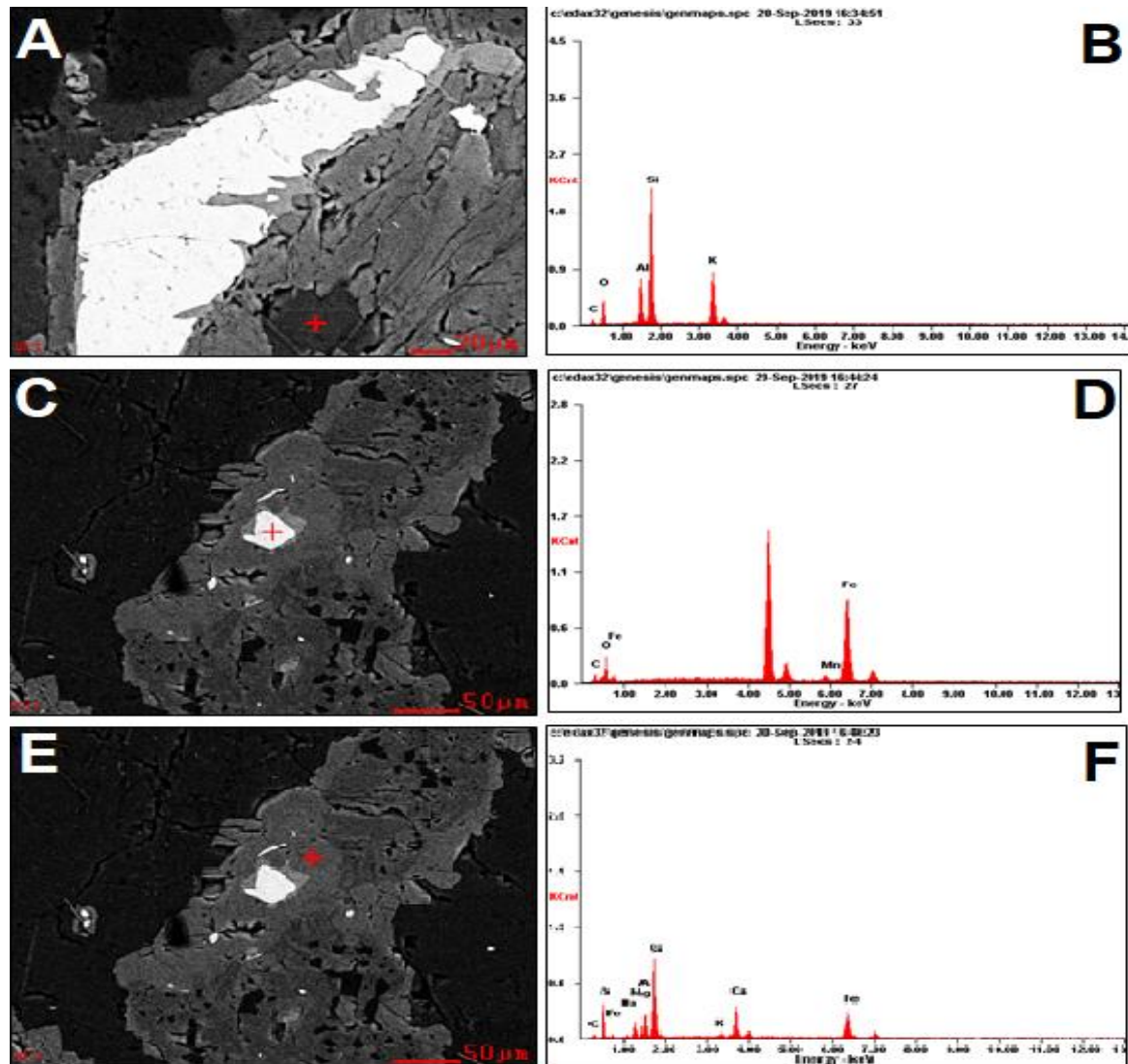


Figura 5: Microfotografías SEM y espectros EDS A y B. Sericita; C y D. Titanomagnetita; E y F. Horblenda. La cruz roja es el punto de análisis.

7.3 Diabasa milonitizada (Muestra G3-28-2)

Esta muestra presenta plagioclasa intermedia más cálcica que sódica (Fig. 6A y B), biotita (Fig. 6C y D) con K, Fe, Mg, Al y Si, horblenda, muscovita y titanita (Fig. 6E y F) con altos contenidos de Ca, Ti y Si.

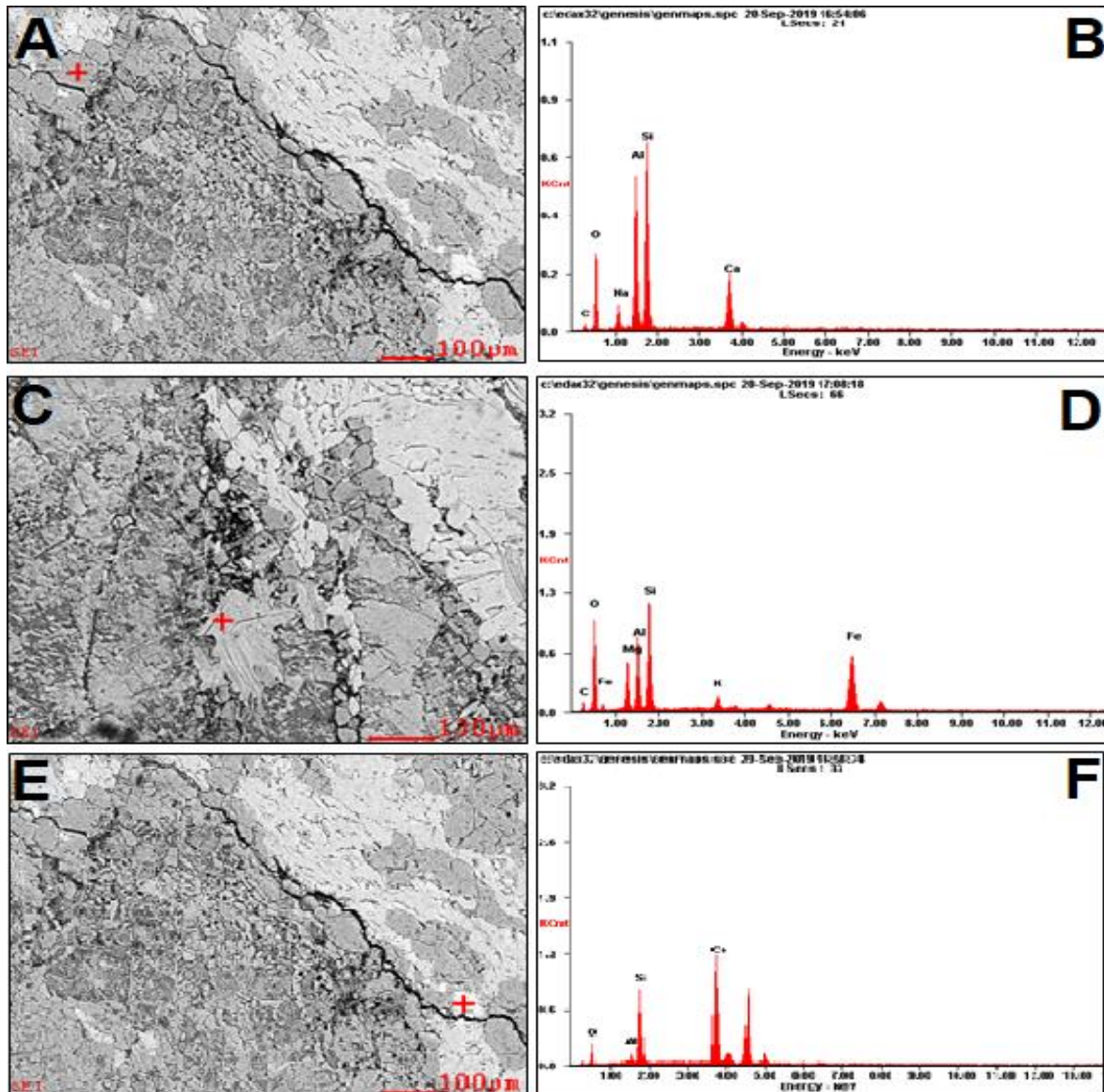


Figura 6: Microfotografías SEM y espectros EDS A y B. Plagioclasa; C y D. Biotita; E y F. Titanita. La cruz roja es el punto de análisis.

8. Geoquímica

Se realizaron análisis químicos de roca total a 5 muestras (P-12, P-22, P-23, P-25, G3-28-2) clasificadas como diabasas y diabasas milonitizadas. Petrográficamente se pudo comprobar que las muestras se encuentran frescas y no presentan procesos de alteración o meteorización fuertes (Fig. 7A).

8.1 Geoquímica de elementos mayores

Las rocas presentan un contenido de SiO_2 que va de entre 50,52 y 48,82 %, Al_2O_3 entre 16,43 y 14,26 %, Fe_2O_3 de entre 12,81 y 9,53 %, valores relativamente altos de MgO entre 7,71 y 6,67%, Na_2O varía entre 2,86 y 2,19%, una concentración de TiO_2 entre 1,9 y 1,23%, y porcentajes relativamente bajos de K_2O entre 1,33 y 0,37%. Las pérdidas por calcinación de las muestras analizada varían entre el 0,6 y el 1,6%, indicando baja alteración de las muestras. (Tabla 2).

En el diagrama para el índice de meteorización FMW (Otha y Arai., 2007), se aprecia que las muestras presentan una tendencia concordante con la tendencia PC2 correspondiente a las rocas ígneas frescas, las muestras grafican en la región de las rocas ígneas máficas (Fig. 7A). En el diagrama TAS para rocas volcánicas (Le Bas *et al.*, 1986) las muestras de los diques máficos se ubican en el campo que corresponde a los basaltos (Fig. 7B), dentro de la serie subalcalina toleítica (Fig. 8A). De acuerdo con el diagrama AFM (Irvine y Baragar 1971), cuatro de las muestras se dispersan dentro del campo correspondiente a la serie toleítica y una de ellas dentro del campo de la serie calcoalcalina aunque muy cerca del límite con el campo de la serie toleítica; en el diagrama de Jensen (1976) la mayoría de las muestras se ubican en el campo de los basaltos toleíticos con alto contenido de magnesio y una de ellas se ubica en el campo de basaltos toleíticos ricos en hierro (Fig. 8B).

Tabla 2: *Geoquímica de elementos mayores.*

Tipo roca	Diabasa	Diabasa2	Diabasa3	Basalto	Diabasa milonitizada
Wt (%)	P-22	P-23	P-25	P-12	G3-28-2
SiO ₂	50,52	48,93	48,82	49,30	49,79
TiO ₂	1,90	1,68	1,77	1,77	1,23
Al ₂ O ₃	14,26	14,86	14,93	15,04	16,43
Fe ₂ O ₃	12,81	12,22	11,89	12,06	9,53
MnO	0,26	0,21	0,20	0,20	0,17
MgO	6,67	7,56	7,57	7,61	7,71
CaO	9,24	9,62	10,70	10,41	10,57
Na ₂ O	2,19	2,53	2,86	2,33	2,30
K ₂ O	1,33	0,80	0,37	0,71	1,23
P ₂ O ₅	0,19	0,14	0,17	0,15	0,11
Lol	0,9	1,6	0,6	1,2	1,5
Cr ₂ O ₃	0,02	0,03	0,01	0,04	0,04
Total	100,3	100,2	99,9	100,8	100,6

Nota: Porcentaje de composición mineral.

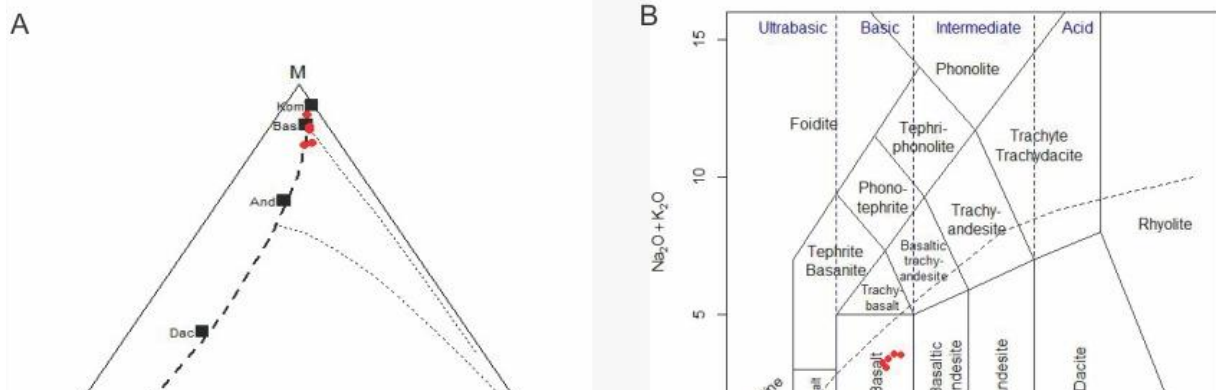


Figura 7: A. Diagrama FMW (Otha y Arai., 2007); B. Diagrama álcalis vs. Sílice (Le Bas et al., 1986).

8.2 Geoquímica de elementos traza.

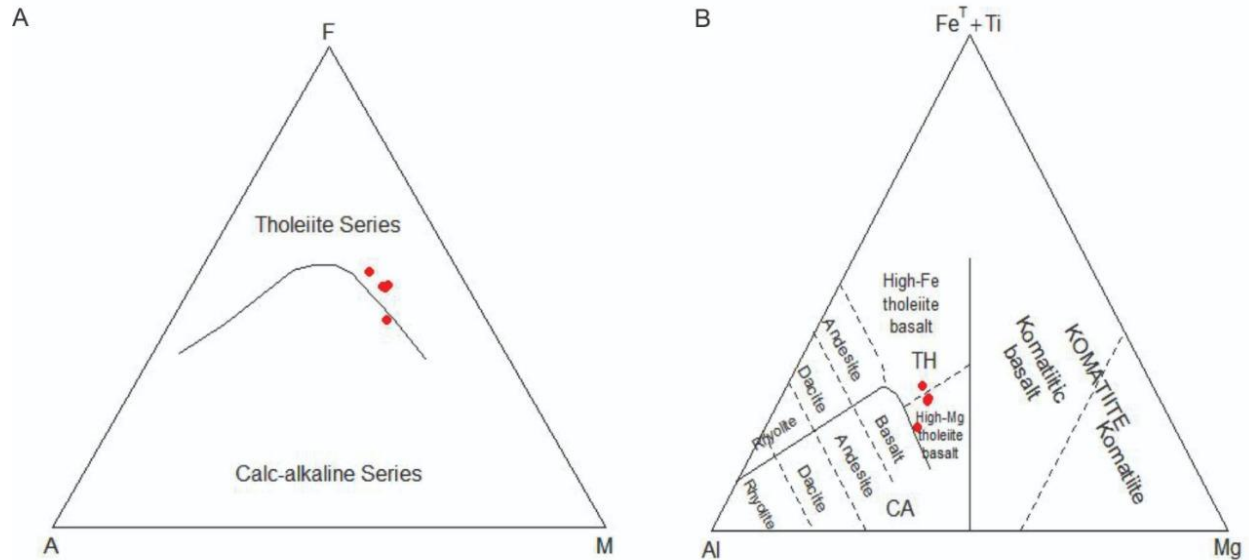


Figura 8: A. Diagrama AFM (Irvine y Baragar 1971); B. Diagrama de Jensen (1976).

Al estudiar y analizar los elementos traza (Tabla 3) en los diques máficos se aprecian que tienen una relación Ti/V mayor a 20 (varía entre 30.3 y 37.2), al graficar esta relación Ti (ppm)/1000 vs. V (ppm) (Shervais., 1982) las muestras caen dentro del campo *Ocean Flood Basalts* (OFB) (Fig. 9A), este diagrama es poco discriminatorio debido a que en dicho campo ocurre sobreimposición de cuatro subcampos correspondientes a los campos de *Mid Ocean Ridge Basalts* (MORB), *Continental Flood Basalts* (CFB), *Back Arc Basalts* (BAB) y *Arc Tholeiite*, por lo que es necesario el uso de otros diagramas que permitan diferenciar entre estos ambientes.

Tabla 3: *Contenido de elementos traza en ppm.*

Tipo roca	Diabasa	Diabasa2	Diabasa3	Basalto	Diabasa milonitizada
ppm	P-22	P-23	P-25	P-12	G3-28-2
Mo	0,30	0,13	0,27	0,14	0,11
Ni	66,3	88,4	63,5	71,9	87,8
Zn	405,9	89,6	88,4	88,4	65,7
Cu	59,8	63,5	80,2	66,6	94,3
As	10,4	2,5	4,1	1,4	3,4
Cd	1,17	0,18	0,23	0,18	0,12
Sb	0,16	0,20	0,12	0,07	0,13
Bi	<0.04	0,09	0,32	0,10	0,47
Ag	48	55	34	61	64
Tl	0,44	0,32	0,14	0,29	0,58
Se	<0.3	<0.3	<0.3	0,3	<0.3
Ga	20,59	18,65	17,63	19,09	16,61
Sc	44,3	41,4	41,9	45,7	36,4
V	356	312	288	307	227
W	0,7	0,3	0,3	0,3	1,0
Co	45,7	42,4	47,8	44,7	42,8
Cs	1,1	1,4	0,7	2,0	6,4
Ba	182	96	15	44	56
Be	<1	<1	<1	<1	<1
Rb	84,0	50,7	13,7	41,6	86,6
Sn	2,2	0,9	0,9	1,3	1,2
Th	3,9	1,0	0,2	0,7	0,5
Nb	6,46	2,84	1,61	2,15	1,09
Ta	0,4	0,2	0,1	0,2	<0.1
Sr	119	140	155	128	135
Zr	9,4	7,7	5,8	9,6	5,2
Hf	0,80	0,62	0,60	0,68	0,50
Y	49,7	36,4	31,4	38,9	25,4
Pb	142,43	3,62	2,37	2,28	3,94
U	0,4	0,1	<0.1	0,3	0,1
La	17,3	7,7	4,0	5,7	3,2
Ce	38,36	18,71	13,32	15,33	9,25
Pr	5,4	3,0	2,2	2,5	1,6
Nd	20,9	13,4	11,6	13,1	8,4

Sm	5,8	4,3	4,0	5,0	3,0
Eu	1,8	1,6	1,6	1,7	1,2
Gd	7,4	5,5	5,3	6,0	4,0
Tb	1,3	1,1	0,8	1,1	0,7
Dy	8,5	6,4	5,9	7,3	4,8
Ho	1,8	1,4	1,4	1,4	1,0
Er	5,3	4,1	3,7	4,3	3,0
Tm	0,8	0,6	0,4	0,6	0,4
Yb	5,1	3,8	3,2	3,7	2,5
Lu	0,7	0,6	0,4	0,6	0,3
TR	120,46	72,21	57,82	68,33	43,35
Ti	11690	9470	10720	11320	7670

En el diagrama ternario La/10, Y/15 y Nb/8 (Cabanis y Lecolle., 1989) las muestras se ubican en el campo de ambientes con dominios orogénicos compresivos (arcos de islas, márgenes activos), cuatro de las muestras caen dentro del subcampo toleítico y una de ellas dentro del subcampo que representa la transición entre la serie toleítica y calcoalcalina (Fig. 9B).

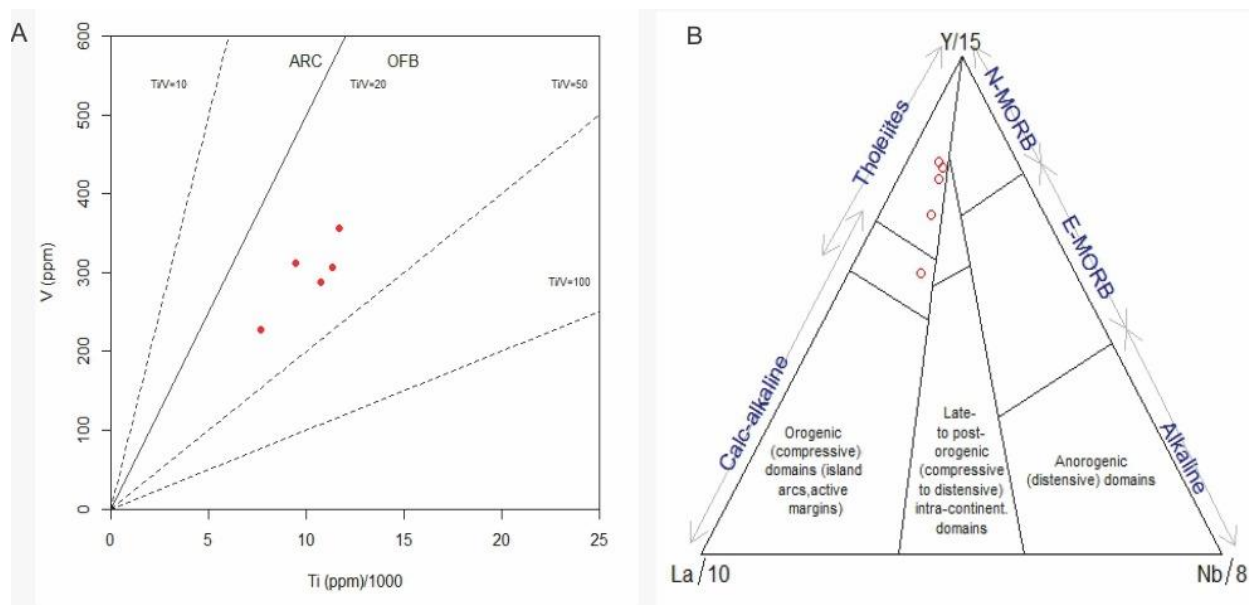


Figura 9: A. Diagrama Shervais., 1982; B. Diagrama de Cabanis y Lecolle., 1989.

La gráfica bivariada Th/Yb vs. Nb/Yb (Pearce, 2008) las muestras grafican en el campo de tendencia volcánica, por encima del campo correspondiente a los basaltos de tipo oceánico (MORB) (Fig. 10A) lo que evidencia sus características químicas como basaltos de arco, con una firma geoquímica que indica como posible fuente de manto empobrecido (N-MORB). En la gráfica que compara TiO₂/Yb vs. Nb/Yb (Pearce, 2008) las muestras se ubican en el campo MORB, indicando una fusión somera, y en la zona de MORB normal indicando una probable fuente mantélica empobrecida (Fig. 10B). En estos diagramas se observa que las muestras estudiadas presentan características químicas compuestas entre una fuente mantélica empobrecida (N-MORB) y basaltos de arco.

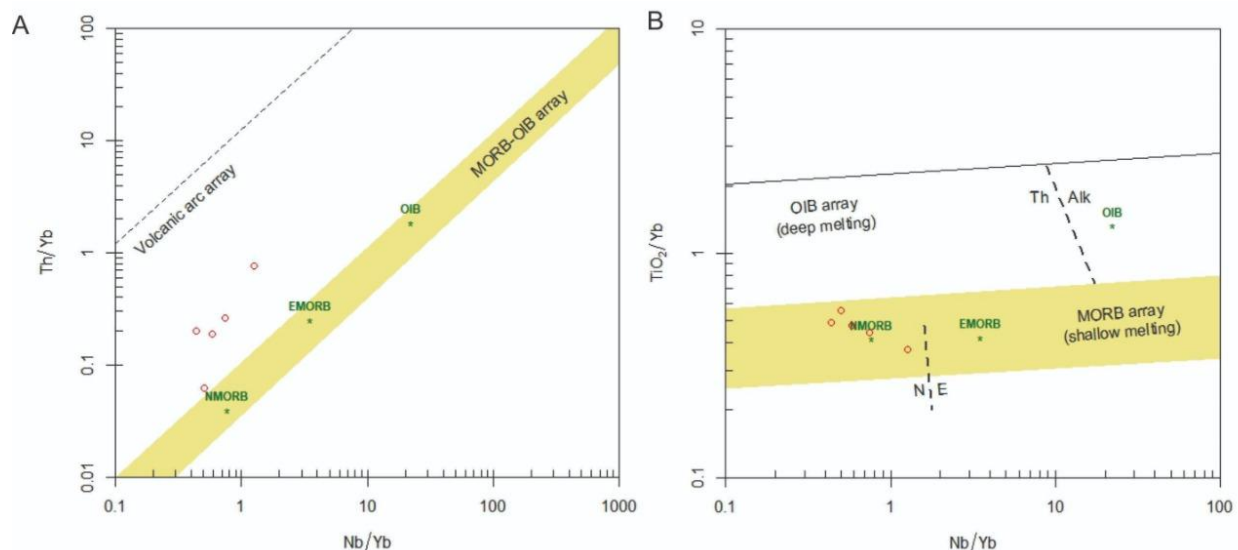


Figura 10: A. Diagrama Th/Yb vs. Nb/Yb (Pearce, 2008), B. Diagrama TiO₂/Yb vs. Nb/Yb (Pearce, 2008).

El diagrama multielemental normalizado a N-MORB de Sun y McDonough, (1989) se puede apreciar que las muestras se encuentran enriquecidas en Ba, Rb, K y Pb, además de un empobrecimiento en Nb (Fig. 11A). Este patrón de acuerdo con Wilson (1989) corresponde a un ambiente de subducción, donde los elementos móviles (Ba, Rb, K) son transportados hacia las fuentes del magma, que se enriquecen por los fluidos que se generan en la zona de subducción. En

este diagrama además se puede apreciar un patrón relativamente plano para los elementos menos móviles que se encuentran enriquecidos entre 1 y 3 veces con respecto al N-MORB, lo que puede sugerir su afinidad con una fuente mantélica empobrecida.

En el diagrama de elementos de tierras raras normalizado al condrito (Boyton., 1984) las muestras presentan valores que se encuentran entre 10 y 30 veces enriquecidos con respecto al condrito (Fig. 11B), algunas de las muestras presentan un ligero enriquecimiento hacia los elementos de tierras raras pesadas. De acuerdo con Wilson (1989) estos valores, enriquecidos entre 6 y 30 veces comparados con el condrito, pueden corresponder a los espectros de un MORB, arco toleítico o a basaltos de cuenca back-arc.

8.3 Ambiente Tectónico.

Los diferentes diagramas geoquímicos muestran una combinación en las características químicas de las muestras analizadas. Por un lado, se puede apreciar un componente relacionado a subducción, principalmente evidenciado en el enriquecimiento de elementos como Pb, Rb, Ba y K y por el otro, un componente de afinidad con un MORB empobrecido, evidenciado en los patrones de los elementos menos móviles y en varios de los diagramas, en especial los de Pearce. (2008). La dualidad en las características químicas sugiere una fuente mantélica empobrecida (tipo N-MORB) que se contamina con diferentes fluidos generados por subducción que aportan elementos móviles a la fuente en un principio empobrecida. Dicha dualidad es característica de ambientes de cuenca tras arco “*back arc*” donde, el manto empobrecido es modificado por los componentes de la subducción (Wilson., 1989).

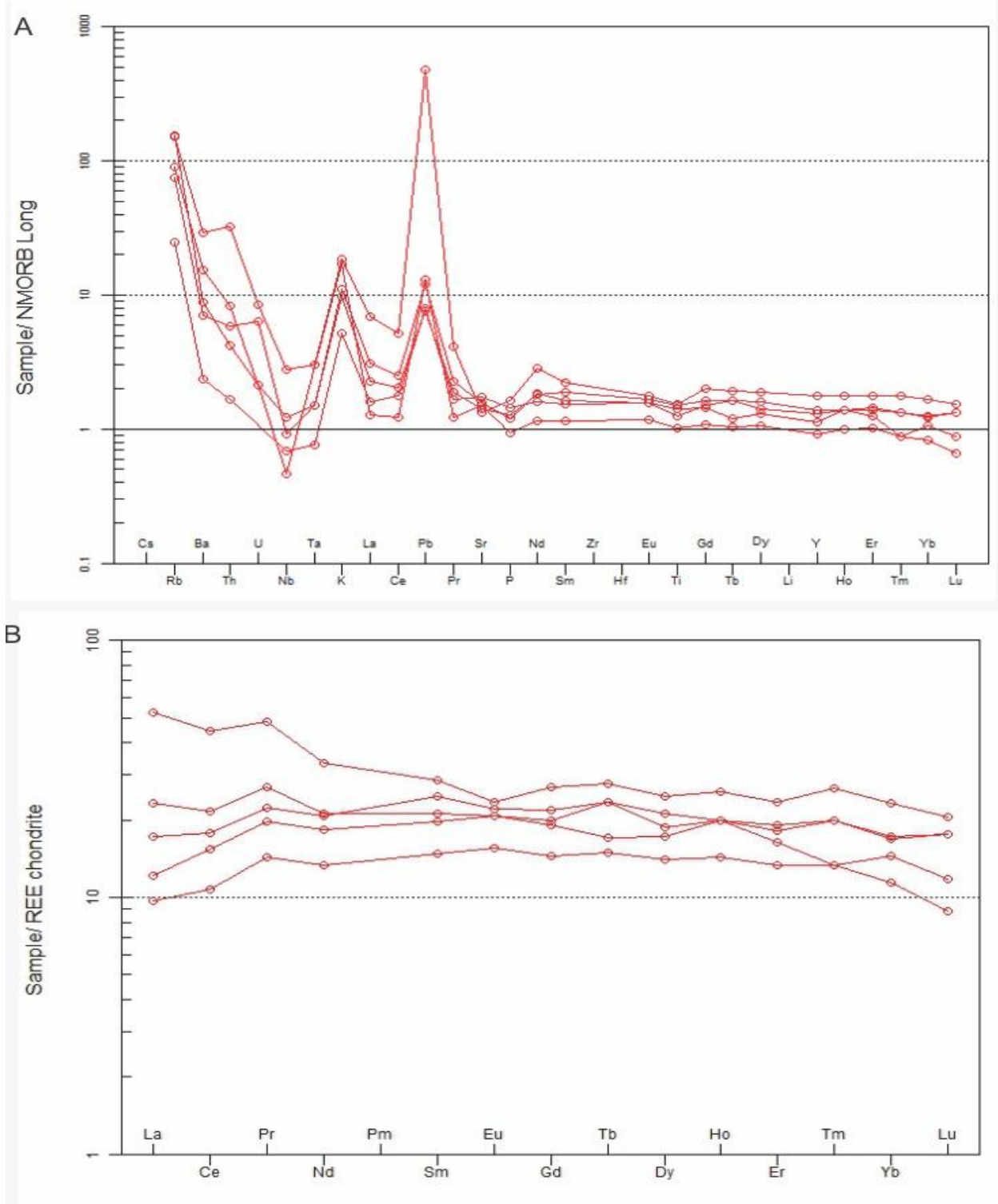


Figura 11: A. Diagrama multielemental normalizado a N-MORB de Sun y McDonough (1989); B. Diagrama de elementos de tierras raras normalizado al condrito de Boynton (1984).

9. Discusión

Los diques, de composición basáltica, reportados en este trabajo, se encuentran emplazados en neises horbléndicos y neises biotíticos que corresponden a las unidades metamórficas Esquistos del Silgará y Ortoneis del Macizo de Santander. Estas rocas alcanzan la facies anfibolita y su metamorfismo ocurrió entre 480 y 472 M.a, es decir, durante el Ordovícico (Restrepo-Pace y Cediel, 2010; Mantilla *et al.*, 2012; Van der Lelij, 2013, García, *et al.* 2017). Los cuerpos intrusivos se emplazan de forma concordante con la foliación de estas rocas metamórficas, por lo que se puede interpretar que ascienden y se emplazan siguiendo las fracturas y zonas de debilidad preexistentes en la roca caja, siendo este el mecanismo más sencillo para su ascenso y posterior emplazamiento. De acuerdo con las relaciones observadas en campo, y al no haber sido afectado por metamorfismo regional, se estima que estos cuerpos son posteriores al metamorfismo de las rocas en las que se hospedan (post-Ordovícico).

Petrográficamente, en las muestras estudiadas se distinguieron las texturas ofítica, subofítica e intergranular, todas ellas clasificadas como texturas de intercrecimiento. El equilibrio textural entre los piroxenos y la plagioclasa en la textura ofítica indica que los cristales de plagioclasa tuvieron una mayor tasa de nucleación mientras que el gran tamaño de los piroxenos indica que la tasa de crecimiento fue mayor (los dos tipos de cristales nuclean simultáneamente), la textura subofítica corresponde a un periodo de enfriamiento un poco más rápido y en donde los cristales de plagioclasa crecen de forma simultánea, alcanzando un tamaño comparable con los cristales de piroxeno, cuando el enfriamiento es más rápido que en las dos anteriores se forma la textura intergranular, donde los cristales de plagioclasa forman una red y sobrepasan en tamaño a los cristales de piroxeno (Winter, 2014; Mantilla, 2003). La presencia de estas texturas, puede indicar

que estos cuerpos tuvieron diferentes tasas de enfriamiento, probablemente por su contacto con la roca caja, donde los cuerpos ígneos tienden a enfriarse de forma más rápida y hacia el centro más lento.

Al contrastar las características químicas de los cuerpos máficos objetos de estudio con los cuerpos intrusivos estudiados en la parte central de la Cordillera Oriental, que corresponden al Cretácico Inferior- Medio (Vásquez *et al.*, 2010, Vasquez *et al.*, 2005, Vasquez., 2000, Vasquez., 2007) y con los basaltos reportados para la cuenca Famatina en Argentina (interpretada como una cuenca de tipo “*back-arc*”) del Ordovícico (Cisterna *et al.*, 2017), se aprecian varias similitudes.

Para los cuerpos intrusivos de la Cordillera Oriental se ha propuesto un origen mantélico, algunos de ellos de tipo MORB empobrecido y pertenecientes a la serie toleítica (Intrusivos Pacho y La Corona) y otros con una fuente más cercana a la composición de los OIB (*Oceanic Island Basalts*) (Intrusivos Pajarito, La Corona, Rodrigoque) clasificados como alcalinos, todos ellos emplazados en un evento extensional ocurrido en el Cenozoico para la paleocuenca de la Cordillera Oriental (Vasquez *et al.*, 2010; Vasquez *et al.*, 2005), con propósitos prácticos se tienen en cuenta sólo los cuerpos clasificados como pertenecientes a la serie toleítica para compararlos con los diques de Pamplona. Las lavas basálticas de la cuenca Famatina, han sido interpretadas como basaltos de cuenca tras arco “*back-arc*” y poseen características químicas tanto de un MORB como de un arco (Cisterna *et al.*, 2017). Estos cuerpos se eligieron para la comparación debido a sus semejanzas petrográficas, composicionales, químicas y de ambiente tectónico con los cuerpos estudiados en el presente trabajo.

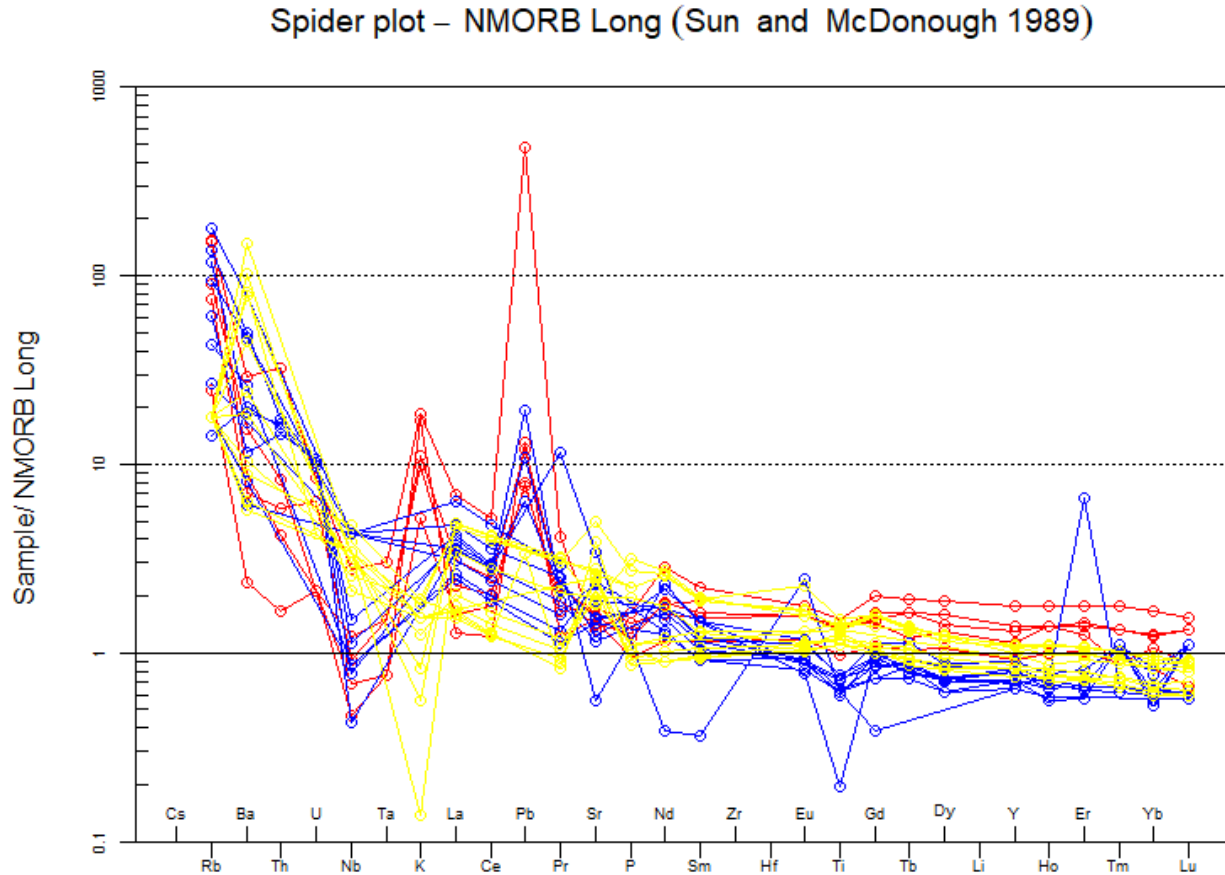


Figura 12: Diagrama multielemental de Sun y McDonough (1989) normalizado a N-MORB, en rojo muestras al oeste de Pamplona; en amarillo rocas máficas de la Cordillera Oriental; en azul rocas de la cuenca Famatina (Argentina).

Como se puede apreciar, en el diagrama multielemental normalizado a N-MORB de Sun y McDonough, (1989) (Fig. 12), las rocas de la Cordillera Oriental (amarillo), las de la cuenca Famatina (azul) y los diques máficos de Pamplona (rojo), presentan un enriquecimiento en Pb y Ba, las muestras de lavas de la cuenca Famatina y de los diques de Pamplona presentan enriquecimientos considerables en Pb y K, las muestras de los intrusivos de la Cordillera Oriental se encuentran altamente empobrecidas en K pero presentan cierta anomalía positiva de Sr. Los tres conjuntos de muestras comparadas presentan un empobrecimiento relativo en Nb. En cuanto a los

elementos menos móviles los tres conjuntos muestras patrones relativamente planos, los diques de Pamplona se encuentran entre 1 y 2 veces enriquecidos con respecto al N-MORB mientras que las muestras de la Cordillera Oriental y la cuenca Famatina se encuentran entre 1 y 2 veces empobrecidas hacia los elementos traza menos móvil. Lo anterior, permite inferir que las muestras comparadas poseen una fuente mantélica relativamente empobrecida de tipo N-MORB, la cual fue contaminada por fluidos generados por procesos de subducción, los cuales la enriquecieron en elementos incompatibles como Rb, Ba, K, Pb, Sr.

10. Conclusiones

Al oeste de Pamplona, afloran diques de composición máfica que cortan las unidades Ortoneis y Esquistos del Silgará de forma concordante con la foliación de estos cuerpos y su espesor no es mayor a 7 metros. En muestra de mano presentan texturas faneríticas a porfiríticas con cristales de plagioclasa en una matriz de composición máfica y en algunas ocasiones se observa una leve foliación tectónica. Petrográficamente las muestras fueron clasificadas como diabasas, compuestos de plagioclasa (de tipo andesina), piroxenos, anfíboles, opacos, biotita, clorita (y cuarzo), dos muestras fueron afectadas por esfuerzos dinámicos (milonitización). En el microscopio electrónico de barrido (SEM), se comprobó lo visto en la petrografía y además se identificaron minerales tales como epidota, ilmenita, pirrotita, muscovita, entre otros.

Geoquímicamente, las rocas pertenecen a la serie subalcalina toleítica en ambientes orogénicos compresivos (márgenes continentales activos), la geoquímica permite determinar que estas rocas posee características tanto de arco como de zonas mantélicas empobrecidas (N-MORB). Diagramas multielementales normalizados al N-MORB permiten ver una contaminación por subducción en elementos como Ba, Pb, Rb y K y un patrón relativamente plano en REE (Rare

Earth Elements), esta dualidad es característica de ambientes de cuenca “*back-arc*” donde, el manto empobrecido es modificado por los componentes de la subducción. El diagrama normalizado al condrito de REE exhibe un enriquecimiento de entre 6 y 30 veces, esto indica espectros típicos de MORB, arco toleítico o a basaltos de cuenca “*back-arc*”.

Al comparar los diques cerca a Pamplona con los estudiados para la Cordillera Oriental y para la cuenca Famatina en Argentina se puede determinar que estas rocas poseen varias similitudes geoquímicas por lo que podrían correlacionarse en ambiente de formación.

11. Recomendaciones

En primer lugar, se recomienda realizar campañas de campo en la cobertera sedimentaria cercana a la zona de estudio con el fin de identificar diques máficos que corten estas unidades con el único propósito de determinar una edad relativa más restringida para estos cuerpos. Se recomienda además realizar estudios geocronológicos en estos cuerpos, mediante métodos adecuados (ej. U-Pb en circones, dada la alteración de piroxenos), para aportar conocimientos sobre la edad de estos cuerpos poco estudiados y a su vez su implicación en la evolución geológica del Macizo de Santander; estudios geocronológicos podrían determinar si estos diques se pueden correlacionar en edad, con los estudiados en otras zonas de la Cordillera Oriental. Es necesario estudiar a mayor detalle los cuerpos en otras zonas del Macizo con el propósito de entender su origen y las implicaciones que puedan tener en la evolución de la Cordillera Oriental.

Referencias Bibliográficas

- Amaya, S. (2012). Caracterización Petrográfica y Petrológica de los Neises, Migmatitas y Granulitas del Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, Departamento de Santander. Tesis de maestría, Universidad nacional Bogotá, Colombia.
- BAS, M. L., Maitre, R. L., Streckeisen, A., Zanettin, B., & IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. (1986). A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of petrology*, 27(3), 745-750.
- Botello, F. (2014). Aportes al conocimiento geológico del Granito de Durania (Silúrico Temprano): Macizo de Santander (Colombia). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología, Bucaramanga, Colombia.
- Boyton, W. V. (1984). Rare Earth Element Geochemistry.
- Cabanis, B., & Lecolle, M. (1989). Le diagramme $La/10eY/15eNb/8$: un outil pour la discrimination des séries volcaniques et la mise en évidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 309.
- Canchón, D.M., Concha. P., A.E., Moreno. M., J.M. 2014. Caracterización Petrográfica y Geoquímica del Cuerpo Intrusivo de Guaquimay (Cundinamarca) Colombia.- GEOLOGIA COLOMBIANA.39.
- Cediel, F., Shaw, R.P., and Cáceres, C. 2003. Tectonic assembly of the northern Andean block. In: Bartolini, C., Buffler, T., Blickwede, J. (Eds.), *The Circum-Gulf of Mexico and Caribbean: Hydrocarbon Habitats, Basin Formation, and Plate Tectonics*. AAPG Memoir, 79: 815-848.

- Cisterna, C. E., Koukharsky, M., Coira, B., Günter, C., & Ulbrich, H. H. (2017). Arenigian tholeiitic basalts in the Famatina Ordovician basin, northwestern Argentina: emplacement conditions and their tectonic significance. *Andean Geology*, 44(2), 123-146.
- Cordani, U. G., Cardona, A., Jiménez, D. M., Liu, D., & Nutman, A. P. (2005). Geochronology of Proterozoic basement inliers in the Colombian Andes: Tectonic history of remnants of a fragmented Grenville belt. *Geological Society, London, Special Publications*, 246(1), 329-346.
- Estupiñán J. y Ulloque M. (2018). Petrografía del Neis de Bucaramanga, en el sector de Pamplona – Chitagá, Macizo de Santander. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología, Bucaramanga, Colombia.
- García-Ramírez, C. A., Rey-León, V., & Valencia, V. (2017). Ortoneises en la Franja Silos-Babega, Macizo de Santander, Colombia: evidencias de la orogenia famatiniana en los Andes del norte. *Andean geology*, 44(3), 307-327.
- García, C. A., Ríos, C. A., & Castellanos, O. M. (2005). Medium-pressure metamorphism in the central Santander massif, eastern Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 27(2), 43-68.
- Goldsmith, R., Marvin, R.F., and Mehnert, H.H. 1971. Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, 750-D: D44 D49'.
- Irvine, T. N. J., & Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian journal of earth sciences*, 8(5), 523-548.

- Janoušek, V. Farrow, C.M. and Erban. V., Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, 47(6), June, 2006. DOI:10.1093/petrology/egl013
- Jensen, L. S. (1976). A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks (Vol. 66). Ministry of Natural Resources.
- Kerr, Paul. *Mineralogía Óptica*. New York: McGraw Hill, 1965. 433p.
- Le Maitre, R. W. (2002). *Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the IUGS, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. University Press.
- Mantilla L.C (2003). *Guía de laboratorios de Petrología Ígnea*. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Bucaramanga. Colombia
- Mantilla, F.L.C.; Bissig, T.; Cottle, J.M.; Hart, C.J.R. 2012. Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). *Journal of South American Earth Sciences* 38: 1-12.
- Mantilla-Figueroa, L.C., García-Ramírez, C.A., y Valencia, V.A. (2016a). Propuesta de escisión de la denominada ‘Formación Silgará’ (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en circones detríticos. *Boletín de Geología*, 38(1), 33-50. doi: 10.18273/revbol.v38n1-2016002.
- Mantilla-Figueroa, L.C., García-Ramírez, C.A., Valencia, V.A. (2016b). Nuevas evidencias que soportan la escisión de la Formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental

- de Colombia). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 40(155), 320-336. doi: 10.18257/raccefyn.303.
- Mantilla-Figueroa, L.C., y García-Ramírez, C.A. (2018). Geología y geocronología de las litologías aflorantes en el tramo Mogotes-San Joaquín (sector SW del Macizo de Santander). Boletín de Geología, 40(1), 123-144. Doi: 10.18273/revbol.v40n1-2018008.
- Mantilla, L. C., Mendoza, H., Bissig, T., & Craig, H. (2011). Nuevas evidencias sobre el magmatismo Miocénico en el distrito minero de Vetas-California (Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia). Boletín de Geología, 33(1).
- Mantilla, L. C., Valencia, V. A., Barra, F., Pinto, J., & Colegial, J. (2009). GEOCRONOLOGÍA U-Pb DE LOS CUERPOS PORFIRITICOS DEL DISTRITO AURÍFERO DE VETAS-CALIFORNIA (DPTO DE SANTANDER, COLOMBIA). Boletín de Geología, 31(1), 31-43.
- Martínez, A., Rodríguez, G., Arango, M., Zapata, G. 2016. Batolito de Mogotes. Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia. Cordillera oriental. Departamento de Santander. SGC, Medellín, Colombia.
- Moreno, J.M. & Concha, A.E. 1993. Nuevas manifestaciones ígneas básicas en el flanco occidental de la Cordillera Oriental, Colombia.- Geología Colombiana, 18: 143 – 150.
- Moreno-Murillo, J.M., Concha-Perdomo, A.E., & Lozano, E.L. 2007. Petrogénesis y Geoquímica del cuerpo ígneo de Pajarito, Boyacá – Colombia. - GEOLOGÍA COLOMBIANA, 32, 111-126.
- Moreno-Sánchez, M., Toro-Toro, L.M., Gómez-Cruz, A., y Ruiz, E.C. 2016. Formación Nogontova, una nueva unidad litoestratigráfica en la Cordillera Oriental de Colombia. Boletín de Geología, 38(2): 55-62.

- Navarrete, R., A.T., Moreno-Murillo, J.N, Concha Perdomo, A.E. & Patarroyo Gama, P. 2002. Interpretación Petrogenética del Gabro de Tragarepas al norte de Pacho - Cundinamarca, Colombia. - GEOLOGIA COLOMBIANA, 27: 109-120.
- Ohta, T., & Arai, H. (2007). Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering. *Chemical Geology*, 240(3-4), 280-297.
- Passchier, C. W., & Trouw, R. A. (2005). *Microtectonics*. Springer Science & Business Media.
- Pearce, J. A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos*, 100(1-4), 14-48.
- Restrepo-Pace, P. (1995). Late Precambrian to Early Mesozoic tectonic evolution of the Colombian Andes, based on new geochronological, geochemical and isotopic data. Unpublished PhD Thesis, University of Arizona, 195p.
- Restrepo-Pace, P. A., & Cediel, F. (2010). Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(4), 764-771.
- Restrepo-Pace, P.A., Ruiz, J., Gehrels, G., Cosca, M., 1997. Geochronology and Nd isotopic data of Grenville-age rocks in the Colombian Andes; new constraints for late Proterozoic–early Paleozoic paleocontinental reconstructions of the Americas. *Earth and Planetary Science Letters* 150 (3–4), 427 – 441.
- Royero, J., y Clavijo, J. 2001. Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1: 400.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá, 92p.
- Shervais, J. W. (1982). Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and planetary science letters*, 59(1), 101-118.

- Sun, S. S., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1), 313-345.
- Tschanz C.; Marvin R.; Cruz B.; Mehnert H. and Cebulla C. 1974. Geologic Evolution of Sierra Nevada de Santa Martha, Northerastern Colombia, Geol. Soc. Am. Bull., 85: 273-284.
- Urueña-Suárez, C. L. & Zuluaga C. A. (2011): Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetás - Santander. Geología Colombiana, Edición Especial, 36 No. 1, pp 37-56.
- Van der Hilst, R. and Mann, P. 1994. Tectonic implication of tomographic images of subducted lithosphere beneath northwestern South America. Geology 22: 451–454.
- Van Der Lelij, R. 2013. Reconstructing northwestern Gondwana with implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans: a geochronological, thermochronological and geochemical study. Thèse de doctorat. Université Genève: 248 p. Ginebra, Suiza.
- Vásquez-Parra, M., Concha-Perdomo, A. E., Moreno-Murillo, J. M., & Patarroyo-Gama, P. (2000). Caracterización Geoquímica y Petrografía de los Cuerpos Intrusivos Básicos, aflorantes en la región de Cáceres y Puerto Romero, departamentos de Cundinamarca y Boyacá, Colombia. Geología Colombiana, 25, 185-198.
- Vásquez, M. 2007. Mafic Magmatism in the Eastern Cordillera and Putumayo Basin, Colombia: Causes and Consequences. Institut für Geowissenschaften. Potsdam, Universität Potsdam. 120p.
- 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. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2): 171-186.

Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., y Restrepo, H. 1973. Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, departamento de Santander. U.S. Geological Survey e INGEOMINAS. *Boletín Geológico XXI* (1-3): 1-132.

Wilson, B. M. (2007). *Igneous petrogenesis a global tectonic approach*. Springer Science & Business Media.

Winter, J. D. (2001). *An introduction to igneous and metamorphic petrology* (Vol. 697). New Jersey: Prentice hall.