



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Metamorfismo, Exhumación y Termocronología del Neis de Bucaramanga. (Macizo de Santander, Colombia).

Cindy Lizeth Urueña Suárez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias
Bogotá, Colombia

2014

Metamorfismo, Exhumación y Termocronología del Neis de Bucaramanga. (Macizo de Santander, Colombia).

Cindy Lizeth Urueña Suárez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ciencias Geología

Director (a):

Ph.D. Carlos Augusto Zuluaga Castrillón

Línea de Investigación:

Petrología y Geoquímica

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias.
Bogotá, Colombia

2014

A Karen y David.

*Nuestra recompensa se encuentra en el
esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo
total es una victoria completa.*

M. Gandhi

Agradecimientos

A Dios quien permitió que esto fuese posible. Por la comprensión, respaldo, entrega y paciencia a mis padres y mis hermanos; de manera muy especial a mi hermana, por ser una guía y brindarme su ayuda.

Quiero agradecer al profesor Carlos Zuluaga por su orientación, por brindarme apoyo, confianza y buena disposición. Al profesor Juan Carlos Molano, quien ha respaldado gran parte de mi proceso en la universidad.

Al geólogo, profesor y asesor Matthias Bernet por las enseñanzas en termocronología, por toda su colaboración en este proyecto, su apoyo y motivación.

A la Universidad Nacional de Colombia y a los profesores del Departamento de Geociencias; en especial a aquellos que se involucraron en este proceso de aprendizaje, permitiendo ambientes para la discusión y exposición de ideas: Gloria Rodríguez, Ana Elena Concha, Gustavo Sarmiento y John Jairo Sánchez.

Al grupo de trabajo del laboratorio de Termocronología de la Universidad Eafit por el interés y enseñanza en la preparación de muestras, a la profesora Gloria Toro, a María Isabel y Ana María. También quiero extender mis agradecimientos al laboratorio de Huellas de Fisión del Servicio Geológico Colombiano, por la cooperación y permitir la realización de análisis, especialmente a Mary Peña y Lorena Rayo.

Por la colaboración y acompañamiento de quienes por alguna casualidad y de manera inesperada se convirtieron en compañeros de campo. A mis compañeros de universidad por las enriquecedoras charlas que siempre me han motivado y animado, algunas veces desde la distancia.

Gran parte de este trabajo fue financiado por Colciencias y la Universidad Nacional de Colombia como parte del proyecto “Estructura y Evolución Geológica del Basamento Cristalino del Macizo de Santander, Cordillera Oriental (Colombia)”.

Resumen

El Neis de Bucaramanga comprende rocas originadas durante un evento de metamorfismo regional, que involucra procesos de migmatización; consiste en una secuencia formada principalmente por neises cuarzo feldespáticos biotíticos y silimaníticos, con niveles de neises hornbléndicos, cuarcitas y anfibolitas. Es considerada la unidad más antigua aflorante en el Macizo de Santander, el cual está localizado en el sector nororiental de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos.

Asociados a las rocas del Neis se evidencian eventos sobreimpuestos tanto de metamorfismo dinámico, como eventos térmicos relacionados a los numerosos cuerpos intrusivos en el Macizo. Para la reconstrucción de la historia térmica del metamorfismo se establecieron tres etapas que definen la evolución del metamorfismo para el Neis de Bucaramanga: (I) *fase prógrada*, identificada en rocas con la asociación paragenética estable: granate ± plagioclasa ± cuarzo ± silimanita ± biotita ± anfíbol ± muscovita que alcanzan condiciones de temperatura y presión alrededor de $675 \pm 68^\circ\text{C}$ y 6.5 a 7 Kbar, respectivamente. (II) *Fase de aumento de temperatura* en condiciones isobáricas; identificado con base en la homogenización de granates por procesos de difusión en anfibolitas, que pueden contener clinopiroxeno y alcanzan temperaturas hasta 810°C , indicando transición a fases granulitas, en esta fase hay desarrollo de migmatitas. (III) *Fase retrograda*; bordes de granates enriquecidos en Mn, desarrollo de simplectitas y mirmequitas generadas como respuesta a caídas parciales de temperatura; esta fase se relaciona a los procesos de exhumación, datos de termocronología indican que este evento se inicia en el Eoceno tardío (~35 - 30 M.a.) y se extiende hasta el Oligoceno - Mioceno (~25 - 20 M.a.) en el sector más norte del área, el evento se caracteriza por mostrar diferentes tiempos y tasas de exhumación en bloques fallados.

Datos de huellas de fisión también permiten identificar un evento térmico a 11.3 ± 2.7 M.a. en el área de Vetas, este es el evento mineralizante más reciente y está relacionado a actividad magmática-hidrotermal.

Palabras clave: Macizo de Santander, Neis de Bucaramanga, Evolución metamórfica, Termocronología, Exhumación.

Abstract

The Bucaramanga Gneiss includes rocks originated during a regional metamorphic event that involved migmatization. Lithologies are mainly biotite and sillimanite quartz-feldspar gneisses, with levels of hornblende gneisses, quartzites and amphibolites. It is considered the oldest outcropping unit in the Santander Massif, which is located in the northeastern sector of the Eastern Cordillera of the Colombia Andes.

Some features observed in the gneiss indicate dynamic and thermal metamorphism overprinting events; the thermal events are related to the numerous intrusive bodies in the massif. Three stages characterize the metamorphic evolution of the Bucaramanga Gneiss: (I) A *prograde stage* indicated by the stable mineral assemblage garnet \pm plagioclase \pm quartz \pm sillimanite \pm biotite \pm amphibol \pm muscovite, with temperature and pressure conditions of around $675 \pm 68^\circ\text{C}$ and 6.5 to 7 Kbar. (II) An *isobaric temperature increasing stage*, temperatures increased up to 810°C reaching the transition to granulite facies; this stage caused garnet homogenization by diffusion processes, appearance of clinopyroxene in amphibolites, and migmatite development. (III) A *retrograde stage* related to exhumation indicated by Mn enrichment in garnets rims and development of symplectites and myrmekites as response to temperature falls; thermochronological data indicates that the event began at Late Eocene ($\sim 35 - 30$ M.a.) and continued until Oligocene - Miocene ($\sim 25 - 20$ M.a.) in the northeast part of the area and that the stage is characterized by variable rate exhumation in faulted blocks.

Fission track data of samples from the Vetás area, also allow to identify a thermal event at 11.3 ± 2.7 M.a., this is the youngest reported mineralization event and is related to a magmatic-hydrothermal activity.

Keywords: Santander Massif, Bucaramanga Gneiss, Metamorphic evolution, Thermochronology, Exhumation.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1. Generalidades	3
1.1 Localización	3
1.2 Marco Geológico Regional	5
1.3 Antecedentes.....	7
1.4 Métodos Analíticos	10
2. Aspectos Petrográficos	17
2.1 Descripción de Secciones Geológicas	17
2.1.1 Transecta vía Bucaramanga - Pamplona	17
2.1.2 Transecta California – Vetas - Berlín	19
2.1.3 Área Umpalá - Cepitá.....	21
2.2 Litología Neis de Bucaramanga	23
2.2.1 Neises Migmatíticos Cuarzo Feldespáticos	27
2.2.2 Neises Migmatíticos Hornbléndicos.....	33
2.2.3 Anfibolitas	36
2.2.4 Cuarzitas.....	38
2.2.5 Cataclasitas (Rocas asociadas a zonas de falla).....	39
3. Petrología Metamórfica y Geoquímica	41
3.1 Química Mineral.....	42
3.2 Termobarometría	51
3.3 Geoquímica de Roca Total	54
4. Termocronología	59
4.1 Trazas de Fisión en Circón	60
5. Discusión de Resultados	67
6. Conclusiones	75

A. Anexo: Mapa Geológico.	79
B. Anexo: Petrografía.	81
C. Anexo: Resultados Termocronología.	157
D. Anexo: Tabla abreviaturas minerales.	183
Bibliografía.	187

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Localización Macizo de Santander. Mapa Geológico del área de estudio (sector occidental y central del bloque cristalino, base cartografía geológica Ingeominas) indicando el muestreo realizado.	4
Figura 2. Equipos del Laboratorio de Caracterización Litológica de la Universidad Nacional de Colombia empleados. (a) Equipo de Catodoluminiscencia CL8200 MK5. (b) Microsonda Electrónica JEOL JXA8230.	13
Figura 3. (a) Formación de trazas de fisión por decaimiento radioactivo en minerales que contienen ^{238}U . (b) Método de generación de trazas inducidas para su posterior conteo.	15
Figura 4. Microscopio adaptado para análisis de trazas de fisión. Laboratorio de Termocronología del Servicio Geológico Colombiano.	16
Figura 5. Localización de la transecta Bucaramanga – Pamplona, indicando las características litológicas más relevantes. En (a) se muestran neises cuarzo feldespáticos con biotita y silimanita que presentan bandeamiento composicional y estructuras migmatíticas, semejantes a las rocas encontradas al E de Berlín (b) después de la falla del Río Charta, las cuales contienen granate. La estrella en verde sobre el mapa indica la localización de las filitas pertenecientes a los Esquistos de Silgará. (Mapa geológico tomado y modificado de los cuadrángulos H12 Bucaramanga y H13 Pamplona, Ingeominas 1977).....	18
Figura 6. Localización de la transecta California – Vetas - Berlín, indicando las características litológicas más relevantes. En (a) se muestran neises cuarzo feldespáticos con biotita en los que se desarrollan leucosomas plegados. (b) Migmatitas típicas en la vía California – Vetas, los leucosomas y mesosomas son concordantes. (c) Vena de cuarzo hidrotermal inyectada por los planos de foliación del Neis. (d) Estructuras migmatíticas encontradas al sur de Vetas, en anfibolitas con leucosomas mozograníticos y tonalíticos. La estrella en verde sobre el mapa indica la localización de los neises cuarzo feldespáticos con anfíbol, biotita, silimanita y granate intercalados con anfibolitas granatíferas. (Mapa geológico tomado y modificado del cuadrángulo H13 Pamplona, Ingeominas 1977).....	20
Figura 7. Localización área Umpalá - Cepitá, indicando las características litológicas más relevantes. (a) Anfibolitas y neises hornbléndicos con leucosomas monzograníticos que cortan la foliación y amplios niveles graníticos dentro de los neises. (b) Cuerpo monzogranítico con porciones irregulares de neis hornbléndico, generando una apariencia de xenolito. (c) Roca masiva de grano muy fino y coloración verdosa, cataclasita. (d) Neis cuarzo feldespático con biotita y silimanita del sector de Cepita, en el que se desarrollan leucosomas discordantes a la foliación. (Mapa geológico tomado y	

modificado del cuadrángulo H12 Bucaramanga y plancha 136 Málaga, Ingeominas 1976-77)	22
Figura 8. Imágenes de catodoluminiscencia (CAT) para las rocas del Neis de Bucaramanga mostrando los rasgos texturales y composicionales relevantes. (a) zonación en plagioclasa (CAT - PPL). (b) Contenido de apatitos, ocasionalmente zonados en anfíbolita (CAT - PPL). (c) Presencia de esfena y apatitos en neis hornbléndico (CAT - PPL). (d) Intercrecimiento entre plagioclasa y feldespato potásico en neis cuarzo feldespático (CAT - XPL). (e) Porfiroblasto de plagioclasa zonada y bordes corroídos en cataclasita (CAT - XPL). (f) Plagioclasa en paragénesis con silimanita de hábito fibroso (CAT - PPL). (g) Exsolución de feldespato potásico e intercrecimiento con plagioclasa (CAT - XPL).	24
Figura 9. Neises cuarzo feldespáticos con muscovita, biotita, silimanita y granate. (a) textura lepidoblástica con crenulación. (b) Porfiroblastos de granate con inclusiones que indican rotación. (c) Silimanita fibrosa intercrecida con biotita y muscovita.	29
Figura 10. Neises cuarzo feldespáticos con biotita, anfíbol, silimanita y granate. (a) Orientación de minerales desarrollando la foliación. (b) Desarrollo de sombras de presión alrededor de porfiroblastos de granate. (c) Anfíbol con textura poiquiloblástica, descrita por pequeños cristales separados con continuidad óptica. (d) Lamías de biotita y anfíbol que generan texturas lepidoblásticas y nematoblásticas.	30
Figura 11. Neises cuarzo feldespáticos con biotita, silimanita y cordierita. (a) niveles cuarzo feldespáticos continuos, separados por niveles micáceos con estructura lepidoblástica. (b) Cordierita asociada a silimanita.	31
Figura 12. Neises cuarzo feldespáticos con biotita y silimanita. (a) Cristales > a 1cm de apatito. (b) Silimanita fibrosa orientada.	32
Figura 13. Neises cuarzo feldespáticos con biotita. (a) Recristalización de cuarzo en venas que cruzan la foliación. (b) Biotita de color verde con pleocroísmo a tonos cafés.	33
Figura 14. Neises migmatíticos hornbléndicos. (a) Neises con niveles formados por plagioclasa anfíbol y niveles con biotita y anfíbol (PPL - XPL). (b) Cristales de plagioclasa que denotan deformación por desarrollo de maclas mecánicas. (c) Láminas constituidas por cristales orientados de biotita. (d) Clinopiroxeno en paragénesis con hornblenda formando textura nematoblástica. (e) Cristales de plagioclasa con maclas tipo albita. (f) Clinopiroxeno con anfíbol en el núcleo. (g) Cristales de epidota alrededor de cristales de hornblenda.	35
Figura 15. Anfíbolitas. (a) Anfíbolita con textura granoblástica que puede contener biotita. (b) Anfíbolita con granate y apatito. (c) Poiquilocristales de hornblenda. (d) Minerales opacos asociados a las líneas de exfoliación de la biotita. (e) Porfiroblasto de granate con inclusiones no orientadas (PPL - XPL).	37
Figura 16. (a) Cuarzita con textura granoblástica. (b) Cuarzita con granate.	39
Figura 17. (a) Cataclasita con porfiroclastos de plagioclasa y anfíbol en una matriz recristalizada. (b) Fracturas de tensión y deformación mecánica de maclas en plagioclasa.	40
Figura 18. Mapas composicionales de rayos X para Mn – Ca – Mg – Fe respectivamente, en granate zonado con inclusiones (tipo Grt1).	43

Figura 19. Mapas composicionales de rayos X para Fe – Mg – Mn respectivamente, en granate débilmente zonado sin inclusiones (tipo Grt2).	43
Figura 20. Distribución de elementos a lo largo de perfiles composicionales para granates. (a) Perfil de borde a centro en granate zonado (tipo Grt1). (b) Perfil de borde a borde en granate débilmente zonado (tipo Grt2)	44
Figura 21. Mapas composicionales de rayos X para Mn – Ca – Mg – Fe respectivamente, en granate homogenizado (muestra 12-SACZ-31b).	45
Figura 22. Distribución de elementos a lo largo de perfiles composicionales para granates homogenizados. (a) Perfil de borde a borde en granate con inclusiones. (b) perfil de borde a borde en granate sin inclusiones.....	45
Figura 23. (a) Mapas composicionales de rayos X para Mn – Ca – Mg – Fe respectivamente, en granate con zonación inversa (b) Distribución de elementos y proporciones de miembros extremos a lo largo del perfil composicional de borde a borde.	46
Figura 24. (a) Mapas composicionales de rayos X para Ca y Na, respectivamente y perfil composicional de borde a borde para plagioclasa An ₁₇ no zonada. (b) Mapas composicionales de rayos X para Ca y Na, respectivamente y perfil composicional de borde a borde para plagioclasa An ₃₀₋₈₀ con zonación inversa.	49
Figura 25. Diagrama Presión – Temperatura con los resultados obtenidos con la rutina “average PT” de THERMOCALC para las muestras analizadas (12-SACZ-31a – 31b, 13-SACZ-17 y CLU-1061).	53
Figura 26. Diagrama Harker para elementos mayores. Variación de Al ₂ O ₃ , MgO, CaO, Na ₂ O, K ₂ O, TiO ₂ , P ₂ O ₅ y FeO _{total} con respecto al SiO ₂	54
Figura 27. Diagrama de Werner (1987) para discriminación general de protolito entre rocas ígneas y sedimentarias.	57
Figura 28. Diagrama de La Roche (1968) para discriminación del tipo de protolito. I. Grauvacas. II. Subgrauvacas. III. Grauvacas dolomíticas. IV Grauvacas dolomíticas metamorfoseadas. V. Basaltos-andesitas.....	57
Figura 29. Diagrama de Leake (1964) para discriminación del tipo de protolito. I Rocas pelíticas. II. Rocas ígneas. III. Rocas calcáreas. IV. Zona de mezcla de rocas calcáreas-pelíticas. V. Zona de mezcla de rocas pelíticas-dolomíticas. VI. Dolomitas.	58
Figura 30. Diagrama de Herrón (1988) para discriminación entre protolitos sedimentarios.	58
Figura 31. (a) Trazas espontáneas (Ns) en el cristal de circón (izq.) y trazas inducidas (Ni) sobre el detector de mica (der.); el recuadro rojo muestra el área de conteo. (b) Cristal con alto contenido de uranio hacia el núcleo y muchos defectos cristalinos que no permiten realizar un conteo adecuado (izq.) y cristal que presenta zonación y no tiene una distribución homogénea de trazas, así que no se toma en cuenta para el análisis (der.).	60
Figura 32. Cristales de circón separados para el análisis de trazas de fisión (izq). Cristal con inclusiones cristalinas (centro). Montaje de circones pulidos en teflón mostrando zonación (der.).	62
Figura 33. Histogramas de frecuencia para la determinación de edades obtenidas con el programa FTStage4 para las 5 muestras analizadas. De norte a sur (a) sector de Vetas,	

dos edades pico a 27 y 11 M.a. (b) y (c) Sector de Bucaramanga, edades alrededor de 22 M.a. (d) y (e) Sector de Cepitá, edades alrededor de 30 M.a., el último diagrama contiene dos picos completamente traslapados y el valor $P\chi^2 >$ a 5% indica que corresponde a una sola población.63

Figura 34. Resultados de análisis de microtermometría (Rojas, 2013) en inclusiones fluidas para rocas del sector de Vetas. Histograma de frecuencia para la temperatura de homogenización (Th en °C) de las inclusiones; se observa que las temperaturas del evento mineralizante 1 y 3 coinciden con la zona de borrado parcial de trazas en circón; sin embargo, el evento 2 de mayor temperatura posiblemente borro por completo las trazas del evento 1, de tal forma que la edad obtenida corresponde al evento mineralizante 3.....64

Figura 35. Relación entre la concentración de uranio (U en ppm) y la edad obtenida para la muestra del sector de Vetas (CLU-1052), con base en las trazas de fisión de los circones analizados. Se observa que a mayor contenido de uranio se registran edades más recientes, mientras que cristales con bajos contenidos de uranio no registran el evento hidrotermal.65

Figura 36. Mapa con la distribución de edades de exhumación obtenidas en este estudio para el Neis de Bucaramanga (recuadros blancos) en las localidades de Cepitá, Bucaramanga y Vetas; en rojo se resalta la edad obtenida para el evento hidrotermal. Adicionalmente el mapa contiene edades reportadas por diferentes autores en estudios previos. (ZFTA: análisis de trazas de fisión en circón y AFTA: análisis de trazas de fisión en apatitos). (Mapa geológico compilado de los cuadrángulos H12 Bucaramanga, H13 Pamplona y plancha 136 Málaga, Ingeominas 1976-77).....66

Figura 37. Esquema para la generación y preservación de trazas de fisión de acuerdo con la temperatura. La zona de borrado parcial puede ser alcanzada ya sea por procesos de levantamiento o erosión (a) o por procesos de adelgazamiento cortical debido a esfuerzos distensivos (b).(Modificado de Bernet, 2013).71

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Resumen del análisis petrográfico, el cual permitió diferenciar las variaciones composicionales dentro del Neis de Bucaramanga. La clasificación se realizó siguiendo las recomendaciones de la SCMR.....	26
Tabla 2. Resumen de los resultados de química mineral obtenidos para granate. Los cationes fueron calculados con base en 12 oxígenos.....	42
Tabla 3. Resumen de los resultados de química mineral obtenidos para plagioclasa, anfíbol y piroxeno. Los cationes fueron calculados con base en 8 oxígenos para plagioclasa, 23 oxígenos para anfíbol y 6 oxígenos para piroxeno.....	48
Tabla 4. Resumen de los resultados de química mineral obtenidos para biotita, muscovita y cordierita. Los cationes fueron calculados con base en 11 oxígenos para biotita y muscovita y 18 oxígenos para Cordierita.....	50
Tabla 5. Estimaciones de Presión y temperatura obtenidas en THERMOCALC a partir de las reacciones en equilibrio, para cada muestra. (Abreviaturas minerales ver anexo D). 52	52
Tabla 6. Compilación de la composición química para las rocas del Neis de Bucaramanga con respecto a elementos mayores.. (LOI: Pérdida por ignición en cada muestra). El código es el identificador en los diagramas de discriminación de protolito.. 55	55
Tabla 7. Edades obtenidas por análisis de trazas de fisión en circones para las rocas del Neis de Bucaramanga (Rhos: densidad de trazas espontáneas por cm ² , Ns: trazas espontáneas, Rhol: densidad de trazas inducidas por cm ² , Ni: trazas inducidas, U: concentración de uranio, P χ^2 : probabilidad del test <i>chi cuadrado</i> con un intervalo de confianza del 95%)......	62
Tabla 8. Recopilación de edades de trazas de fisión obtenidas y reportadas para el Macizo de Santander. (ZFTA: análisis de trazas de fisión en circón, AFTA: análisis de trazas de fisión en apatitos. Cod A: resultados obtenidos en este estudio; Cod B: edades reportadas por van der Lelij, 2013; Cod C: edades reportadas por Caballero <i>et al.</i> , 2013)	72

Introducción

La evolución geológica de los macizos rocosos asociados al sistema Andino en Colombia debe ser estudiada con base en la presencia de rocas de edad Precámbrica, que constituyen basamentos cristalinos; como en el Macizo de Santander, donde afloran rocas de medio a alto grado de metamorfismo correspondientes al Neis de Bucaramanga y que a lo largo del tiempo han sido afectadas por diferentes eventos tectono-termales, dentro de los que se incluyen procesos de migmatización, intrusiones ígneas y más recientemente eventos hidrotermales; todos acompañados de fases de deformación.

El Neis de Bucaramanga es definido formalmente por Ward *et al.* (1973), como una secuencia estratificada de rocas metasedimentarias de alto grado metamórfico, que consiste principalmente en paraneis pelítico, semi-pelítico y arenáceo, esquisto y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis hornbléndico y anfibolita; incluyendo zonas de migmatitas. Se encuentra afectado por varios intrusivos de edad Triásico – Jurásico (Ward *et al.*, 1973; Dörr *et al.*, 1995) cuyo emplazamiento borro parcialmente el registro del evento del pico de metamorfismo; adicionalmente, las relaciones estratigráficas entre el Neis de Bucaramanga y la unidad litodémica denominada como Formación Silgara (en este trabajo estará referida como Esquistos de Silgará, de acuerdo con la nomenclatura propuesta por el Código Estratigráfico Norteamericano) no son claras y se han interpretado de diversas formas (e.g., Arenas, 2004; Ward *et al.*, 1973).

La carente conexión entre la información petrológica y cronológica existente sobre el Neis de Bucaramanga, no permite proponer una historia coherente con la evolución del metamorfismo y tectónica dentro de la cordillera oriental. En esta investigación se propone una evolución de la historia térmica para la unidad base del Macizo de Santander (Neis de Bucaramanga); en este aspecto, las técnicas relacionadas con estimaciones cuantitativas de las condiciones de presión y temperatura bajo las cuales ocurre el metamorfismo y trazas de fisión en apatitos y circones, proporcionan la ventaja

de obtener un registro cronológico del enfriamiento y un modelo de la historia termal relacional a dichas condiciones P-T.

▪ OBJETIVO GENERAL

Determinar la historia termal asociada a la evolución tectonometamórfica para el Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar un reconocimiento en campo de la variación litológica partir de la descripción en detalle de secciones geológicas a lo largo de transectas.
- b) Determinar aspectos microestructurales y petrológicos por medio de análisis petrográficos y geoquímicos para muestras recolectadas en campo.
- c) Establecer de forma cuantitativa por medio de cálculos termobarométricos, las condiciones de presión y temperatura para el Neis de Bucaramanga.
- d) Definir una cronología relativa entre eventos termales asociados a las rocas durante el metamorfismo, proceso de exhumación y posiblemente durante el emplazamiento de cuerpos ígneos; mediante el estudio de huellas de fisión.
- e) Proponer una evolución metamórfica para el Neis de Bucaramanga.

1.Generalidades

1.1 Localización

El Macizo de Santander se encuentra ubicado en el sector noreste de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos; se extiende desde la parte nororiental del departamento de Boyacá hasta el sur del departamento de Cesar abarcando gran parte de los departamentos de Santander y Norte de Santander. El basamento se ha definido como un bloque levantado limitado al oeste por la falla Bucaramanga – Santa Marta (falla de rumbo sinistral, 100 a 110 km de desplazamiento; Campbell, 1965; Tschanz *et al.*, 1969, 1974. Falla con componente inverso; Julivert, 1961b) y al este por el sistema de fallas Pamplona – Cubogón - Mercedes (García *et al.*, 2005).

El basamento metamórfico comprende las unidades (de más antigua a más reciente): Neis de Bucaramanga, Esquistos de Silgará (Formación Silgará) y Ortoneis. De acuerdo con Ward *et al.*, 1973 el Neis de Bucaramanga se encuentra aflorando en tres fajas dentro del macizo: la más occidental ubicada al este de la Falla Bucaramanga – Santa Marta denominada faja Bucaramanga y se extiende hacia el norte hasta entrar en contacto con el Batolito de Rionegro, la central que comprende el área de Berlín y California – Cachiri y la oriental que aparece cerca de Chitagá al sur de Pamplona como bloques separados y fallados.

El área de estudio se concentra en la zona occidental y central del Macizo de Santander, debido a que en ésta área se tiene referencia de la mejor y más completa exposición de rocas del Neis de Bucaramanga y se incluyen, de norte a sur las localidades de Vetas, California, Berlín, Tona, Bucaramanga, Umpalá y Cepitá, dentro de los cuadrángulos H12 y H13 y la plancha 136 de Ingeominas (1977, 1976).

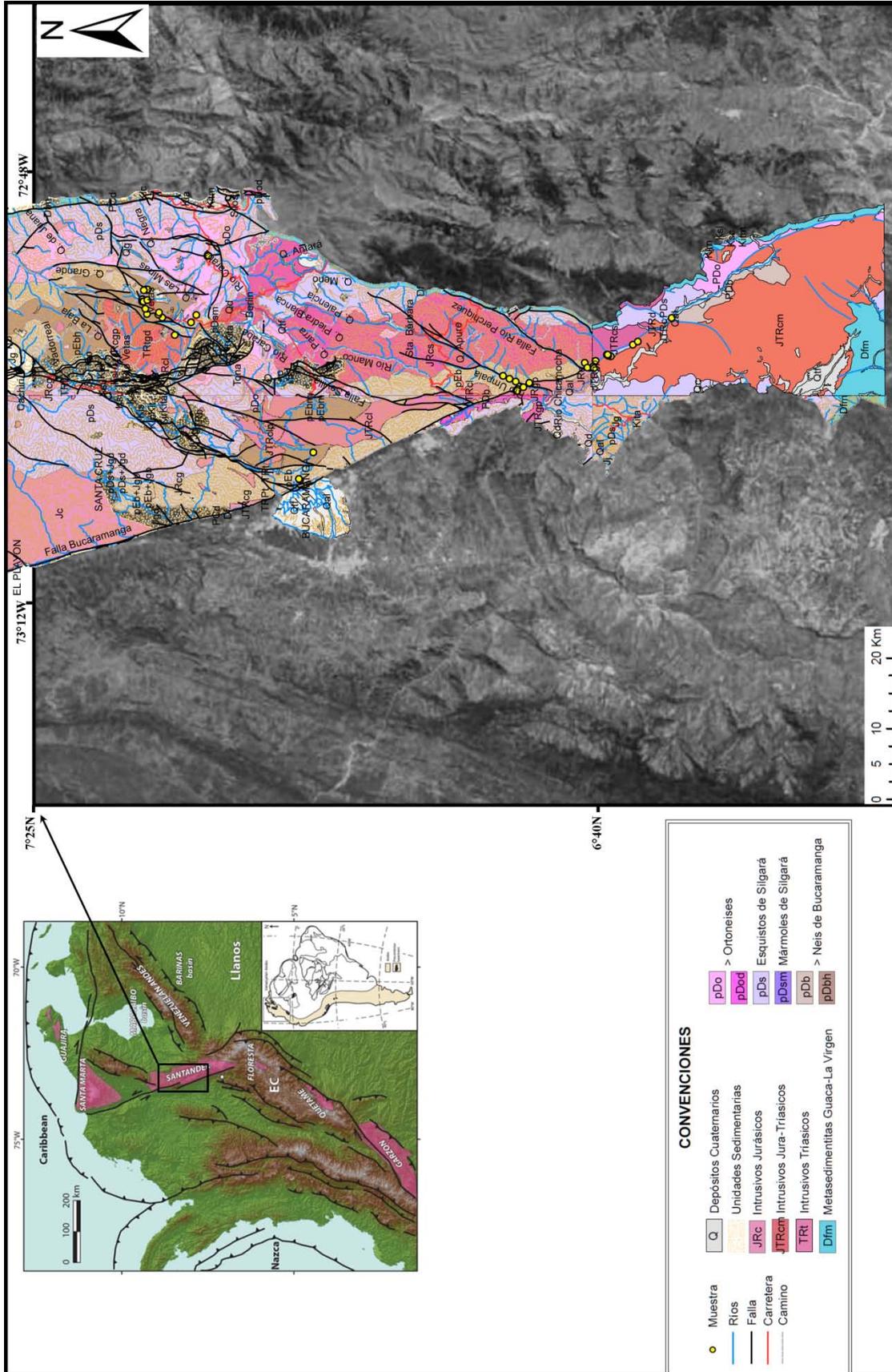


Figura 1. Localización Macizo de Santander. Mapa Geológico del área de estudio (sector occidental y central del bloque cristalino, base cartografía geológica Ingeominas) indicando el muestreo realizado.

1.2 Marco Geológico Regional

El Macizo de Santander contiene una secuencia de unidades casi completa desde el Precámbrico que registra los eventos geológicos que han afectado la esquina NW de Suramérica. Estructuralmente presenta relaciones complejas no completamente entendidas; por ejemplo, en superficie no se observan marcadores claros que indiquen el desplazamiento ocasionado por la Falla Bucaramanga; esta falla ha sido considerada como perteneciente a un sistema de fallas de rumbo con movimiento sinistral (en conjunto con la Falla de Santa Marta), cuyo desplazamiento es calculado de 100 a 110 km (Campbell, 1965; Tschanz *et al.*, 1969, 1974; Ward *et al.*, 1973); sin embargo, otras interpretaciones muestran un componente inverso importante, esta interpretación fue primero expuesta por Julivert (1961b) quien reporta observaciones en algunos sectores que indican que el sistema es inverso con buzamiento al este de ángulo bajo a alto y en su extremo meridional aún de cabalgamiento por flexión de la falla. Las interpretaciones recientes reconocen de dos a tres segmentos en el sistema de fallas (Polson & Henao, 1968; Cuellar *et al.*, 2012). Cuellar *et al.* (2012) diferencian hasta en tres segmentos: el primero al norte, correspondiente a la Falla de Santa Marta, comprende principalmente el costado occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta entre la costa y la población de Bosconia; el segundo entre los Municipios de Bosconia y de Curumaní correspondiente a la Falla de Algarrobo; y el tercero, correspondiente a la Falla de Bucaramanga, entre el Municipio de Curumaní y el extremo Noroccidental del Macizo de Santander.

Dentro de las unidades metamórficas que conforman el Macizo se encuentra que el sector con más alto grado de metamorfismo, corresponde a la parte central donde aflora el Neis de Bucaramanga con evidencias de migmatización. Allí la unidad consiste en una secuencia formada principalmente por neises cuarzo feldespáticos biotíticos y silimaníticos con niveles de neises hornbléndicos, cuarcitas y anfibolitas (Urueña-Suárez & Zuluaga, 2011). Ward *et al.* (1973) definieron el Neis de Bucaramanga como una secuencia estratificada de rocas meta-sedimentarias de alto grado metamórfico, que consiste principalmente en paragneis pelítico, semi-pelítico y arenáceo, esquisto y cantidades subordinadas de neis calcáreo, mármol, neis hornbléndico y anfibolita, localmente migmatizado.

Las litologías predominantes en el Neis de Bucaramanga según Navarro & Reyes (1983) son: neis cuarzo feldespático, de grano medio a grueso, compuesto por cuarzo (40%),

feldespato potásico (35%), plagioclasa de tipo oligoclasa (10%) y en algunas ocasiones anfíbol (8%), cuando se encuentra biotita > 20% se clasifica como neis cuarzo feldespático biotítico; neis anfibólico, el cual presenta bandas de color verde oscuro alternado con bandas blancas de cuarzo y feldespato potásico y/o plagioclasa y está compuesto por hornblenda (40%), cuarzo (10%), plagioclasa (12%) y feldespato potásico (30%); y anfíbolita, que se caracteriza por un alto contenido de hornblenda (70%) de color verde a amarillo, grandes cristales de granate (12%), plagioclasa (2%) y piroxeno en menor cantidad.

Generalmente al metamorfismo del Neis de Bucaramanga se le asigna un rango de edad entre el Precámbrico y el Cámbrico, este rango de edad está de acuerdo con las edades de: 680 ± 140 M.a. reportadas por Goldsmith *et al.* (1971) con base en Rb - Sr en hornblenda de un neis biotítico de la zona de Berlín - Vetas; de 945 ± 40 M.a. reportadas por Ward *et al.* (1973) con base en K - Ar en hornblenda de un neis hornbléndico proveniente de las cercanías a Ocaña y, de ~800 a ~850 M.a reportadas por Restrepo-Pace *et al.* (1997) con base en $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ en hornblenda de un neis hornbléndico de una muestra tomada en la misma localidad del neis hornbléndico reportado por Ward *et al.* (1973).

Con respecto al metamorfismo de las otras unidades pertenecientes al basamento, en los Esquistos de Silgará se ha reportado la presencia de las zonas metamórficas clorita – biotita – granate – estaurólita – andalucita/cianita – silimanita (primera isograda), esta secuencia es típica de un gradiente barroviense (Castellanos *et al.*, 2008; García *et al.*, 2005). Litológicamente se caracteriza por ser una unidad más cuarcítica que el Neis de Bucaramanga, las litologías dominantes son pizarras, filitas y esquistos de afinidad calcárea y pelítica con estratificación delgada. La relación cronológica entre las dos unidades ha sido establecida mediante relaciones de campo y algunas dataciones radiométricas; aunque este contacto no está bien definido, parece seguir la isograda de la silimanita (Restrepo-Pace *et al.* 1997). Para Arenas (2004) necesariamente el contacto entre las dos unidades debe estar definido claramente, ya que no pueden corresponder a un mismo evento metamórfico, debido a que las relaciones estratigráficas y evidencias geocronológicas e isotópicas permiten interpretar que el neis ya se encontraba “adosado” al borde noroccidental de Gondwana al final del Proterozoico.

La unidad Ortoneis está conformada por neises cuarzo-feldespáticos que composicionalmente varían entre tonalita y granodiorita, en los cuales se presentan lentes de anfibolita; corresponden a rocas de medio y alto grado de metamorfismo de edad Pre-Devónico (Ward *et al.*, 1973). Las diferencias microestructurales y composicionales que se presentan dentro del Ortoneis podrían reflejar distintas edades y/o estilos de emplazamiento, dados en función de la profundidad; las pequeñas masas de ortoneis migmatítico son consideradas por Ward *et al.* (1973) como emplazamientos menos profundos y tardíos. El contacto con los Esquistos de Silgará es concordante, ya que sigue la foliación de las rocas encajantes; esto sugiere que el evento de metamorfismo es contemporáneo a la intrusión, aunque no se descarta que haya intruido a los Esquistos de Silgará después del metamorfismo abarcando un periodo de tiempo que va del Devónico Inferior al Ordovícico (Ward *et al.*, 1973).

Adicionalmente se encuentra gran cantidad de intrusivos de edad Triásico – Jurásico (Ward *et al.*, 1973; Dörr *et al.*, 1995) dentro de los cuales se encuentran la Cuarzomonzonita de Mogotes, la Cuarzomonzonita de Santa Barbará, el Plutón de La Corcova y otros en la zona de Vetas definidos como intrusivos Jura-Triásicos. Estos cuerpos tienen composiciones similares, con feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo, con variación en los contenidos de muscovita, biotita y hornblenda (Royero & Vargas, 2001).

1.3 Antecedentes

Desde la definición formal de las unidades metamórficas hecha por Ward *et al.* (1973, 1977) base de la cartografía de los cuadrángulos H12 Bucaramanga y H13 Pamplona, han sido pocos los trabajos que se han desarrollado orientados a la comprensión general de los eventos metamórficos que hayan podido tener lugar en el Macizo de Santander e incluso las investigaciones sobre los eventos metamórficos en el basamento Andino en Colombia se han concentrado sola y desarticuladamente en dataciones isotópicas y estimaciones de las condiciones en el pico del metamorfismo. En el macizo de Santander en años recientes diferentes autores han tratado de hacer reconstrucciones y definir las características del metamorfismo en el área.

García *et al.* (2005), proponen que el metamorfismo en general para el Macizo de Santander ocurre bajo condiciones de alta temperatura y media presión, y definen una trayectoria de presión – temperatura para la parte central del macizo, la cual fue obtenida a partir de datos de química mineral (microsonda) agrupando muestras de las tres unidades metamórficas; inicialmente los autores definen tres zonas: una zona de Estaurolita – Cianita, zona Silimanita baja y zona de Silimanita alta, a la que pertenecen las rocas del Neis de Bucaramanga; asemejando a un modelo de metamorfismo tipo Barroviano. Sin embargo, dado que las rocas de las tres unidades presentan diferentes características petrográficas y edades, la trayectoria propuesta podría representar un gradiente de campo (Urueña-Suárez & Zuluaga, 2011).

Cabe destacar el trabajo realizado por Ríos *et al.* (2003), quienes usando los mismos datos de química mineral de García *et al.* (2005), modelan con una mayor precisión las condiciones del metamorfismo, pero únicamente para la Formación Silgará, allí las muestras presentan una paragénesis mineral en equilibrio adecuada para realizar las estimaciones de presión y temperatura obteniendo valores de 400-600 °C y 4.0-6.5 kbar, respectivamente; similares a los resultados obtenidos por García *et al.* (2005).

Posteriormente, Urueña-Suárez & Zuluaga (2011) presentan una descripción detallada de las variaciones litológicas encontradas en el Neis de Bucaramanga, que es considerado como una unidad migmatítica (de acuerdo con la definición de migmatita de la subcomisión para la sistemática de rocas metamórficas del IUGS Fettes & Desmonds, 2007); porque en gran parte de la unidad se observa desarrollo de leucosomas (lentes cuarzo feldespáticos, y diques-silos de composición variada, incluyendo pegmatitas), generando rocas heterogéneas con partes oscuras usualmente de apariencia metamórfica y claras de apariencia plutónica. Las estimaciones cualitativas de presión y temperatura para rocas con variaciones en la paragénesis mineral y aquellas con procesos de migmatización se llevaron a cabo en rocas con la asociación cuarzo, plagioclasa (andesina), biotita, silimanita, feldespato potásico (ortoclasa) y muscovita, estableciendo un rango de presión y temperatura para el metamorfismo de 5.5 a 7.2 kbar y de 660 a 750°C.

Amaya (2012) define la relación entre las condiciones del metamorfismo y los procesos de migmatización en el Neis de Bucaramanga, a partir de las características geoquímicas de los fundidos de inyección.

En cuanto a otros datos disponibles en el basamento metamórfico de los Andes de Colombia, se encuentran: estimaciones de presión y temperatura en el pico del metamorfismo (e.g., Ríos *et al.*, 2003), trazos de trayectorias de temperatura – tiempo durante levantamiento y enfriamiento que son basadas en edades geocronológicas usando diferentes métodos isotópicos para varios minerales (Keppie & Ortega-Gutiérrez, 1999); y algunas estimaciones de las trayectorias de P-T en la Sierra Nevada de Santa Marta (Zuluaga & Stowell, 2012). Por lo tanto, hasta el momento, las interpretaciones de la historia geológica de terrenos metamórficos en los Andes de Colombia se concentran en lo que queda registrado en las rocas durante las temperaturas pico de los eventos y a la posterior historia térmica de enfriamiento.

La edad y la historia evolutiva para el Neis de Bucaramanga y en general para el Macizo de Santander es aún tema de debate debido a que los datos geocronológicos existentes son en algunos casos, enlazados débilmente con la historia metamórfica y la dificultad de establecer en algunos sectores los contactos entre las diferentes unidades que están oscurecidos por procesos geológicos postmetamórficos.

Forero-Suárez (1990) plantea que el basamento metamórfico pre-Devónico temprano del flanco oriental de la Cordillera Central y de la Cordillera Oriental corresponden a un terreno alóctono que perteneció a Norte América y que se acrecionó al borde continental de Sur América durante el Silúrico – Devónico Temprano, pero éste modelo no explica el mecanismo y edad del emplazamiento de las rocas Precámbricas (generalmente de alto grado de metamorfismo) en Colombia.

Restrepo-Pace *et al.* (1997) lleva a cabo análisis geocronológicos en rocas de edad Grenvilliana y asocia los eventos metamórficos al evento orogénico Orinoquiense. (Colisión NE Norteamérica – W Suramérica). Cardona *et al.* (2010) se refieren a las rocas del basamento que afloran a lo largo de las cordilleras Central y Oriental como un terreno para-autóctono, que permanecía próximo al margen del cratón Amazónico. Sin embargo, muchos autores asocian este basamento al evento tectónico-metamórfico Nickeriense – Orinoquiense, el cual tuvo lugar a finales del Proterozoico (alrededor de 1.1 G.a.) y que está asociado con la colisión de la parte nororiental de Norteamérica y el occidente de Suramérica (Restrepo-Pace *et al.* 1997; Toussaint 1993). Para Ramos (2010), dicho evento de acreción y metamorfismo corresponde a una compleja transferencia de terrenos entre Laurentia y Gondwana.

En contraste, van der Lelij (2013) propone que el basamento del Macizo de Santander corresponde a un terreno autóctono comparable con los Andes de Mérida, de acuerdo con resultados recientes de isótopos de Pb y geoquímica de roca total, considerando que las rocas tienen una composición isotópica compatible con las rocas del Escudo de la Guyana y Cratón Amazónico, diferente a las del basamento Genvilliano de Laurentia; adicionalmente, plantea que el metamorfismo para el Macizo de Santander ocurre entre 505 y 472 Ma.

1.4 Métodos Analíticos

Para abordar el problema de la evolución del Macizo de Santander se hace necesario realizar una caracterización petrológica y geoquímica de rocas metamórficas identificando características microestructurales, paragénesis mineral y composición, esto permitirá realizar una mejor correlación de la historia térmica con las estimaciones de presión y temperatura del metamorfismo en la unidad litológica de interés.

A continuación se describen cada una de las fases de desarrollo para este trabajo:

- **Fase de campo**

Para esta fase fueron utilizadas planchas topográficas 109, 110 y 120 del Páramo de Berlín, municipios de Bucaramanga y Vetas y las planchas 121, 135 y 136 del Cañón del Chicamocha y Municipio de Mogotes del IGAC a escala 1:25000, bajo el sistema de coordenadas de origen Bogotá, proyección Transverse Mercator con Elipsoide Internacional 1909 y Datum Bogotá. Durante el desarrollo del trabajo también se utilizaron los mapas geológicos de la plancha 136 Málaga a escala 1:100000 de Ingeominas (1976) y los cuadrángulos H12 Bucaramanga y H13 Pamplona escala 1:100000 de Ingeominas (1977).

El trabajo de campo se desarrollo en tres campañas de diez días cada una, durante las cuales se realizaron descripciones de afloramientos (con toma de datos estructurales y muestreo para aplicar métodos de análisis y caracterización litológica) a lo largo de las transectas (en los sectores de Bucaramanga – Pamplona, Berlín, Cepitá y Umpalá); las transectas fueron seleccionadas teniendo en cuenta afloramientos con la mejor exposición de las diferentes litologías.

- **Petrografía y química mineral**

Petrografía y análisis de microestructuras.

Todos los cambios que una roca experimenta durante el metamorfismo generalmente quedan registrados en la mineralogía y en la microestructura de la roca; las estructuras macroscópicas y las microestructuras son los criterios más simples y en algunos casos los más confiables en la determinación de la asociación mineral estable. Por ejemplo, granos en contacto sin microestructuras producidas por reacciones minerales después del pico de metamorfismo demuestran que estos granos fueron estables a las máximas condiciones P-T. Estos minerales pueden ser usados entonces para determinar cuáles fueron esas condiciones durante el pico del metamorfismo.

Las microestructuras son usadas para interpretar las secuencias de reacciones minerales que ocurren durante el metamorfismo prógrado y el metamorfismo retrogrado. Aquí también se incluyen los análisis cinemáticos para la caracterización de la fase deformativa con base en el estudio de las microestructuras relacionadas a porfiroblastos.

Estos análisis de petrografía se realizaron para unas 50 secciones delgadas (microscopio petrográfico Olympus BX51), de muestras recolectadas en las localidades de trabajo durante la fase de campo, de las diferentes variaciones litológicas. Teniendo en cuenta características texturales y composicionales se seleccionaron 18 muestras para análisis de catodoluminiscencia y 6 muestras para análisis de microsonda electrónica. La descripción y clasificación petrográfica se realizaron siguiendo las recomendaciones de la subcomisión para la sistemática de rocas metamórficas (SCMR, Fettes & Desmons, 2007)

Catodoluminiscencia

La luminiscencia generada por un mineral ocurre en respuesta a sus características estructurales y/o composicionales; defectos en la red cristalina y contenidos traza de elementos de tierras raras o de cationes “activadores” en los minerales son las razones para que este efecto de luminiscencia ocurra en el momento en que un haz de electrones impacta una muestra provocando que se emita fotones.

Esta técnica fue empleada principalmente para observar texturas de minerales no detectables con petrografía convencional y para establecer correctamente fases

minerales, como por ejemplo diferenciar entre feldespato potásico y plagioclasa, presencia de pequeños cristales fibrosos de silimanita y estimación del contenido de apatito, lo cual es determinante en el momento de seleccionar las muestras adecuadas para realizar análisis de huellas de fisión.

Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio de Caracterización Litológica de la Universidad Nacional de Colombia de la Red Nacional de Laboratorios de Geociencias (Figura 2a), que cuenta con un equipo CITL CL8200 MK-5 adaptado a un microscopio petrográfico Leica DM 2500 P; bajo unas condiciones de corriente de 220 μ A y 15 kV.

Análisis químicos de roca total.

Permitió determinar el contenido de elementos mayores, menores, trazas y Tierras Raras; obtenidos mediante fluorescencia de rayos X y absorción atómica para 20 muestras, por ACME Labs. Los resultados analíticos son usados para determinar protolitos y ambientes tectónicos de formación de las rocas metamórficas. La técnica de preparación de la muestra consistió en: selección de fragmentos frescos de roca (~300 g), limpieza de superficies con pulidoras de diamante y posteriormente con acetona y HCl 2M, trituración de la roca primero en una trituradora de mandíbula y luego en un mortero de anillos hasta obtener un polvo fino, secado de la muestra en dos etapas (120°C y 1000°C), mezclado del polvo con un fundente (tetraborato de litio – 67% y metaborato de litio – 33 %) en una proporción 1:9, adición de un agente antiadherente (bromuro de litio), y finalmente fusión (~1000°C) usando un crisol de Pt-Au para posteriormente hacer un disco de vidrio con un molde de Pt-Au. Los discos de vidrio son analizados con espectrómetros de fluorescencia.

Análisis químicos de minerales.

Los minerales representativos de la paragénesis principal en litologías cuarzo feldespáticas se analizaron en la microsonda electrónica JEOL JXA 8300 de la Universidad Nacional de Colombia (Figura 2b); los análisis se llevaron a cabo bajo las siguientes condiciones: 1 a 10 μ m de diámetro del haz, tiempo en el pico de 20 msec, intensidad 20 nA y voltaje de aceleración de 15 kV. Los conteos del instrumento son convertidos a porcentajes de óxidos a través de comparaciones con conteos de estándares naturales y sintéticos. Los datos se han tratado mediante la corrección ZAF

(Z: número atómico; A: absorción de masas; F: fluorescencia) utilizando el programa de JEOL.

Para esta técnica se requirió una preparación adecuada de la muestra, que incluye la elaboración de una sección delgada sin cobertura, esmerilado y pulido de la superficie libre con discos y pasta de diamante y un recubrimiento con una película delgada de carbón.

Para la adquisición de los datos, la rutina consistió en (i) obtener imágenes de electrones retrodispersados de los cristales seleccionados para el análisis, (ii) generar de mapas composicionales para determinar patrones de zonación en los minerales, (iii) realizar análisis puntuales a lo largo de todo el cristal (áreas sin alteración y sin fracturas; para el caso de los granates se toman en cuenta los análisis de borde), definiendo los elementos químicos que se desean cuantificar y los patrones previamente calibrados que se usarían.

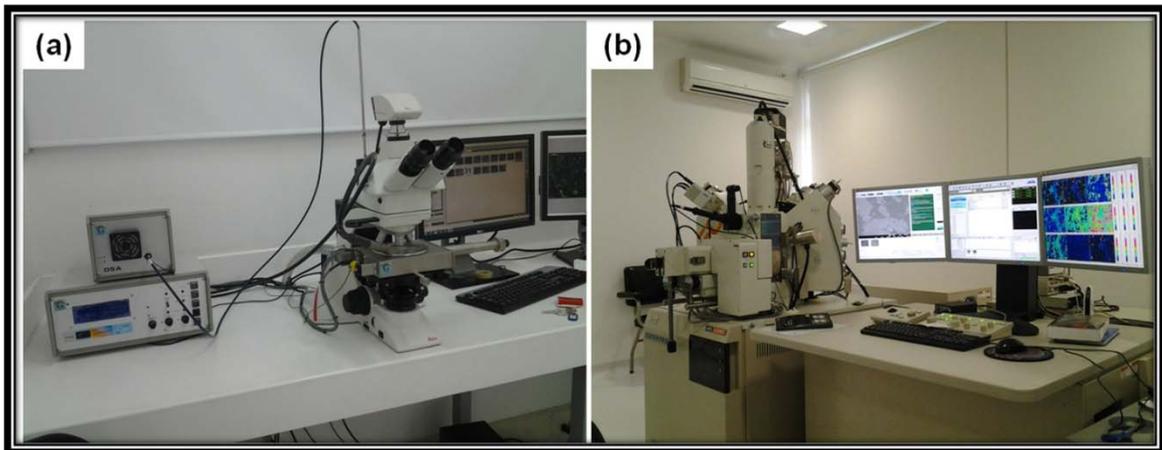


Figura 2. Equipos del Laboratorio de Caracterización Litológica de la Universidad Nacional de Colombia empleados. (a) Equipo de Catodoluminiscencia CL2000 MK5. (b) Microsonda Electrónica JEOL JXA8230.

▪ Termobarometría

Las condiciones de presión y temperatura del pico de metamorfismo se determinaron en rocas para las cuales el análisis de asociaciones estables y el análisis detallado microestructural indicaban condiciones apropiadas para los cálculos.

Los resultados obtenidos con la microsonda de la composición química de las distintas fases minerales fueron procesados (cálculo de las fórmulas estructurales mediante

estequiometría) para determinar las condiciones petrogenéticas (presión y temperatura) correspondientes, usando la rutina “average P-T” del programa THERMOCALC; el cual hace uso de la compilación de grandes bases de datos termodinámicos con consistencia interna junto con las actividades de los minerales, calculadas con los análisis químicos del borde del granate y de minerales en la matriz a condiciones de presión y temperatura cercanas a las estimadas del pico de metamorfismo.

Algunas estimaciones también estuvieron apoyadas en cálculos a partir de reacciones geotermómetros y geobarómetros; para ello se tienen en cuenta los diferentes tipos de reacciones que pueden ser calibrados con base en los datos obtenidos de los minerales seleccionados. De acuerdo con Bohlen & Lindsley (1987) los tipos de reacciones que se pueden usar son: (i) *reacciones invariantes*, donde se tienen fases de composición fija; (ii) *reacciones de equilibrio*, en las cuales se cuenta con una o más fases de composición variable; (iii) *termómetros de intercambio*, en el que la distribución de dos elementos entre dos fases depende de la temperatura; (iv) *equilibrio de solvus*, en el cual la solubilidad de un componente en una fase depende de la temperatura; y (v) *superficies de saturación*. En este trabajo se usaron: *reacciones de equilibrio*, que hacen referencia a barómetros de intercambio de masa, donde los reactantes son diferentes de los productos (e.g. barómetro “GBPQ”). Y *termómetros de intercambio*, que corresponden a reacciones que involucran intercambio iónico entre dos especies minerales; como Granate –Biotita, Anfíbol - Plagioclasa y Granate - Anfíbol.

▪ **Análisis de trazas de fisión**

La técnicas de trazas de fisión en apatitos y circones permiten hacer reconstrucciones de la historia termal de las rocas metamórficas a través del tiempo geológico (Tagami & O’Sullivan, 2005). El método se basa en la acumulación de defectos cristalinos desarrollados en minerales ricos en uranio, los defectos son generados como resultado de fisión nuclear espontánea de ^{238}U (Fleischer *et al.*, 1975). La fisión espontánea consiste en la desintegración del isótopo radiactivo a partir de la división o fisión de su núcleo en dos fragmentos de tamaños comparables; en el proceso se emiten 200 MeV aprox., los dos fragmentos producidos por la fisión se alejan a 180° uno de otro, con una gran cantidad de energía, creando una única zona de daño o traza en la red cristalina del mineral (Tagami & O’Sullivan, 2005) Figura 3a.

Éste método consiste entonces en la medida de la densidad de las trazas debidas a la fisión natural (fósiles o espontáneas) y de la densidad que corresponde a la concentración en uranio (padre). Para determinar la abundancia isotópica del padre, la muestra es irradiada con un flujo de neutrones en un reactor nuclear, con esto se induce fisión en una pequeña fracción de solamente átomos del isótopo menos abundante de uranio (^{235}U) provocando la aparición de las trazas latentes correspondientes en el cristal (trazas inducidas). Figura 3b

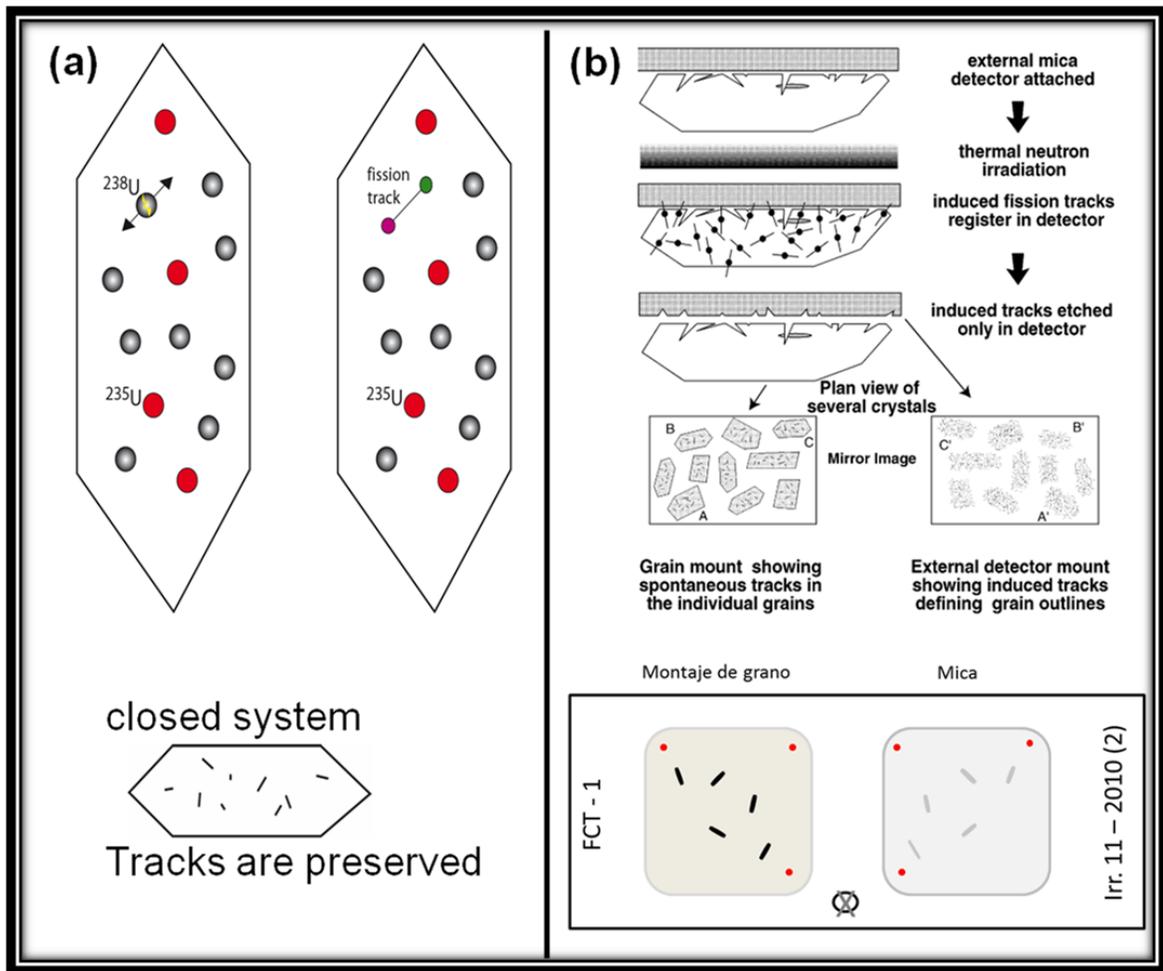


Figura 3. (a) Formación de trazas de fisión por decaimiento radioactivo en minerales que contienen ^{238}U . (b) Método de generación de trazas inducidas para su posterior conteo.

Para este estudio se tomaron 6 muestras de roca del Neis de Bucaramanga, de las cuales se extrajeron cristales de apatito y circón empleado la técnica de separación mineral de rutina de los laboratorios de la Universidad EAFIT y del Servicio Geológico Colombiano (Figura 4): trituración, molienda, tamizaje, separación magnética e

isomagnética por “Frantz” con voltajes de 0.3, 0.5 y 1.1, ángulo de inclinación de 10° en la horizontal y 30° en la vertical, concentración de minerales pesados de forma manual (bateo) y por líquidos densos. Una vez separadas las fases minerales, los circones fueron montados en porta-muestras de teflón a una temperatura de 320 °C, y los apatitos en una resina «Epoxi» a temperatura ambiente (25 °C); posteriormente, los cristales son pulidos con papel lija 600 y pasta de diamante de 6, 3, 1 y 0.25 μm . Finalmente, los circones fueron atacados químicamente mediante una solución eutéctica KOH-NaOH a 220 °C durante periodos de tiempo comprendidos entre 12 y 18 horas; los apatitos fueron tratados con una solución de HNO_3 5.5 M a 21 °C durante 20 segundos. Las muestras se irradiaron en el reactor nuclear de Múnich (Alemania).



Figura 4. Microscopio adaptado para análisis de trazas de fisión. Laboratorio de Termocronología del Servicio Geológico Colombiano.

▪ Integración de Resultados

Esta fase de trabajo corresponde al análisis de los resultados obtenidos mediante las diferentes técnicas y la interpretación que se le da a la información; ésta integración es la que permite definir con mayor precisión las condiciones de metamorfismo y su posterior evolución asociada a procesos de exhumación.

2.Aspectos Petrográficos

El Neis de Bucaramanga consiste en una secuencia en la que se encuentran intercalaciones de neises cuarzo feldespáticos biotíticos y silimaníticos, con niveles de neises hornbléndicos, cuarcitas y anfibolitas; la ocurrencia de neises con granate, no reportados hasta el momento en las áreas de estudio, no es tan común y se restringe a sectores cercanos a la localidad de Berlín; así como las cuarcitas granatíferas en el sector de Cepitá.

Las rocas pertenecientes a esta unidad presentan características texturales que dan una apariencia muy similar en las diferentes localidades, lo cual facilita su identificación en campo; aunque existen algunos niveles esquistosos de grano muy fino, son evidentes las texturas migmatíticas, bandeamiento composicional y el desarrollo de leucosomas cuarzo-feldespáticos concordantes a la foliación.

En éste capítulo, inicialmente se describen las principales características y relaciones de campo a lo largo de las transectas trabajadas; luego se presenta el análisis petrográfico y microestructural para cada una de las litologías y tipos de rocas identificadas. Su clasificación se realizó siguiendo las recomendaciones de la Subcomisión sobre Nomenclatura de Rocas Metamórficas - SCMR (Schmid *et al.*, 2007), de la Unión Internacional de Ciencias Geológicas - IUGS.

2.1 Descripción de Secciones Geológicas

2.1.1 Transecta vía Bucaramanga - Pamplona

A lo largo de esta vía con orientación casi W-E se encuentra una buena exposición de rocas del basamento, tanto de la parte occidental como del sector central del macizo desde la falla de Bucaramanga (Figura 5). Hacia el W afloran rocas del Neis de Bucaramanga pertenecientes a la denominada faja occidental descrita por Ward *et al.* (1973), en este sector se encuentran principalmente niveles de neises cuarzo-

Al E del municipio de Berlín se encuentran rocas metamórficas de bajo grado que corresponden a filitas y cuarcitas, en las que se reconoce cordierita; y están en contacto con neises cuarzo-feldespáticos con biotita y magnetita los cuales pertenecen al Ortoneis, de acuerdo con el mapa geológico de Ward *et al.* (1973), siguiendo hacia el E, éstas rocas están cortadas por la Falla del Río Charta y posteriormente se encuentran en contacto interdigitado con los Esquistos de Silgará; sin embargo, en este sector se reconocieron neises silimaníticos con granate intercalados con niveles de cuarcitas con muscovita y ocasionalmente con silimanita y granate, que aumentan de espesor hacia el E. Estas rocas, que evidentemente son de mayor grado que las rocas encontradas al E de Berlín cartografiadas como Formación Silgará, y que además presentan características texturales y composicionales similares a las encontradas al E de Bucaramanga (Figura 5b), en este estudio se han considerado como pertenecientes al Neis de Bucaramanga. En éste sector hay un fuerte fracturamiento y diaclasamiento de las rocas por influencia de la Falla del Río Charta.

2.1.2 Transecta California – Vetás - Berlín

Por la vía que conduce desde California al W del municipio de Vetás, el Neis de Bucaramanga se encuentra como neises cuarzo-feldespáticos con biotita y muscovita, ocasionalmente se observan leucosomas monzograníticos en venas concordantes a la foliación algunas veces plegadas (Figura 6a), generalmente están meteorizados. Hay intercalaciones de anfibolitas con y sin piroxeno y epidota en niveles que varían de tamaño de grano fino a medio. Después de estas intercalaciones aparecen nuevamente los neises biotíticos cuarzo-feldespáticos con leucosomas replegados con espesores hasta de 10 cm y se observan con mayor frecuencia las estructuras migmatíticas Figura 6b. Hacia el extremo NE de la población de Vetás, en un sector topográficamente más alto, aparecen niveles de cuarcitas con biotita.

En ésta área es muy común encontrar venillas de cuarzo y sulfuros de origen hidrotermal cortando la foliación, así como venas hidrotermales que se desarrollan a lo largo de los planos de foliación en los neises biotíticos (Figura 6c) produciendo alteraciones argílica avanzada y fílica localmente, hasta propílica hacia las zonas con menor influencia de los cuerpos intrusivos mineralizados.

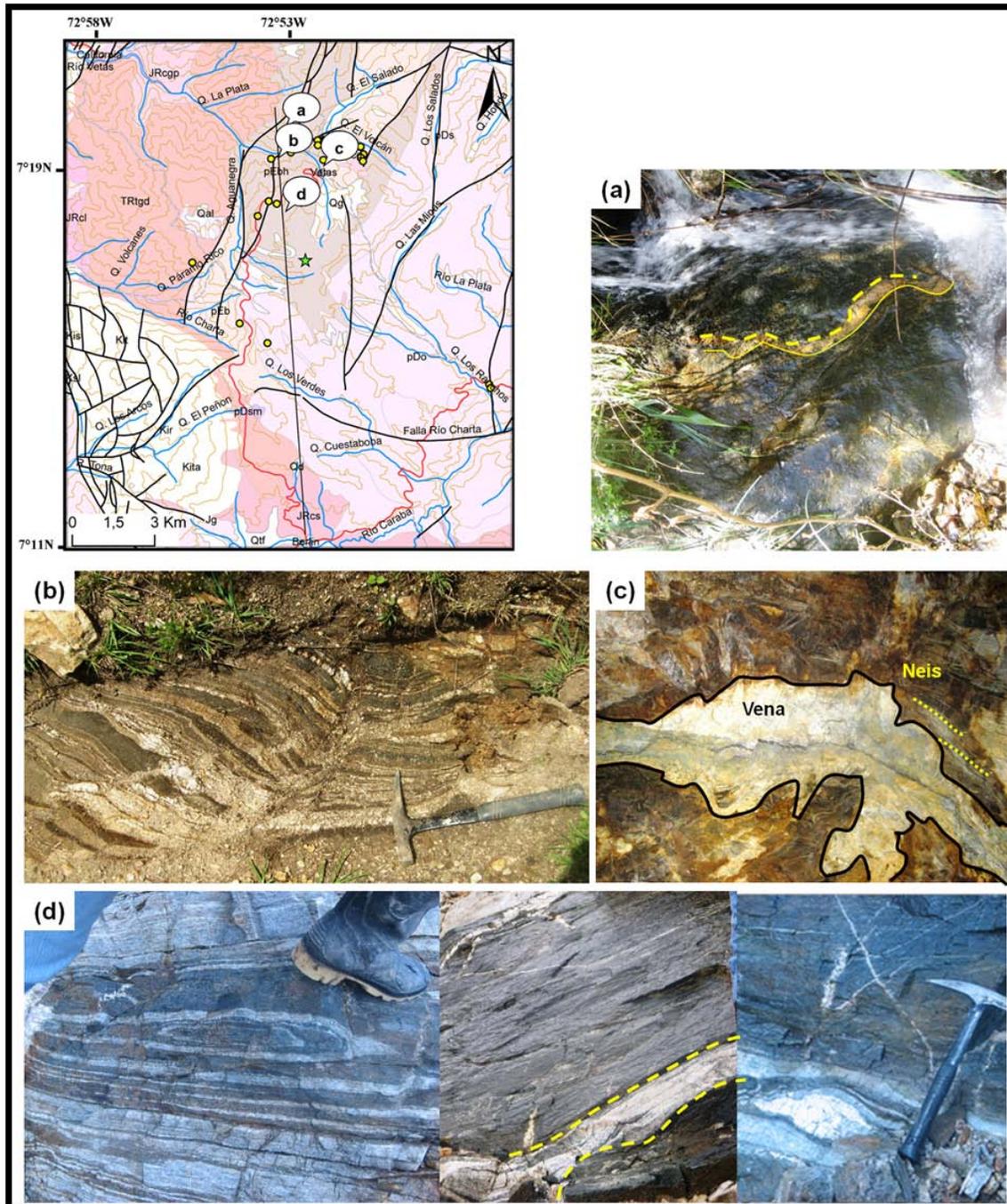


Figura 6. Localización de la transecta California – Vetas - Berlín, indicando las características litológicas más relevantes. En (a) se muestran neises cuarzo feldespáticos con biotita en los que se desarrollan leucosomas plegados. (b) Migmatitas típicas en la vía California – Vetas, los leucosomas y mesosomas son concordantes. (c) Vena de cuarzo hidrotermal inyectada por los planos de foliación del Neis. (d) Estructuras migmatíticas encontradas al sur de Vetas, en anfibolitas con leucosomas mozograníticos y tonalíticos. La estrella en verde sobre el mapa indica la localización de los neises cuarzo feldespáticos con anfíbol, biotita, silimanita y granate intercalados con anfibolitas granatíferas. (Mapa geológico tomado y modificado del cuadrángulo H13 Pamplona, Ingeominas 1977)

Hacia el S de Vetas, vía Berlín, se encuentran nuevamente neises biotíticos con niveles cuarzo-feldespáticos en los que se observan más desarrolladas las estructuras migmatíticas, representadas por bandeamiento composicional que tiende a ser discontinuo y con laminación fina a gruesa; además se encuentran diques félsicos pegmatíticos y rocas principalmente leucocráticas de apariencia ígnea (cristales bien desarrollados y sin orientación), que cortan los neises biotíticos con estructuras migmatíticas. También se encuentran rocas en las que los mesosomas corresponden a anfibolitas y los leucosomas son de composición tonalítica (Figura 6d), los cuales tienden a encontrarse en mayor proporción y desarrollan diferentes texturas (schlieren, agmática y estromática); siguiendo hacia Berlín, los mesosomas de las migmatitas tienden a aumentar su proporción con respecto a los leucosomas y varían composicionalmente a neises biotíticos con silimanita.

Siguiendo hacia Berlín los neises silimaníticos contienen granate y se encuentran intercalados con delgados niveles de anfibolitas granatíferas; sin embargo su localización en el mapa se confunde entre las unidades cartografiadas en ese sector. Posteriormente se encuentran los contactos con las unidades ígneas Triásico – Jurásico, Cuarzomonzonita de Santa Bárbara y Cuarzodiorita La Corcova; en este segmento se destaca la presencia de mármoles con diópsido atribuidos a la Formación Silgará.

2.1.3 Área Umpalá - Cepitá

Hacia el NE de la población de Umpalá, siguiendo el trazo de la Falla del Río Umpalá, se encuentran neises hornbléndicos migmatíticos que se caracterizan por presentar leucosomas de composición granítica que también contienen biotita y hornblenda como máficos orientados, ocupando amplias proporciones que se intercalan con amplios niveles de composición máfica (anfibolitas Figura 7a). Es posible que algunos de los niveles reconocidos como leucosomas correspondan a inyecciones del cuerpo intrusivo Granito de Pescadero, puesto que, se encuentran como espesos lentes y venas, algunas de fases pegmatíticas, que cortan las rocas metamórficas sin una clara relación con la foliación de la roca, algunas veces dan apariencia de xenolitos inmersos en las rocas monzograníticas (Figura 7b); tienen variaciones texturales y composicionales hasta dioritas. En este sector el fracturamiento es intenso, algunos bloques se encuentran rotados y los planos de cizalla tienen una orientación NE-SW paralelos a la falla. A lo

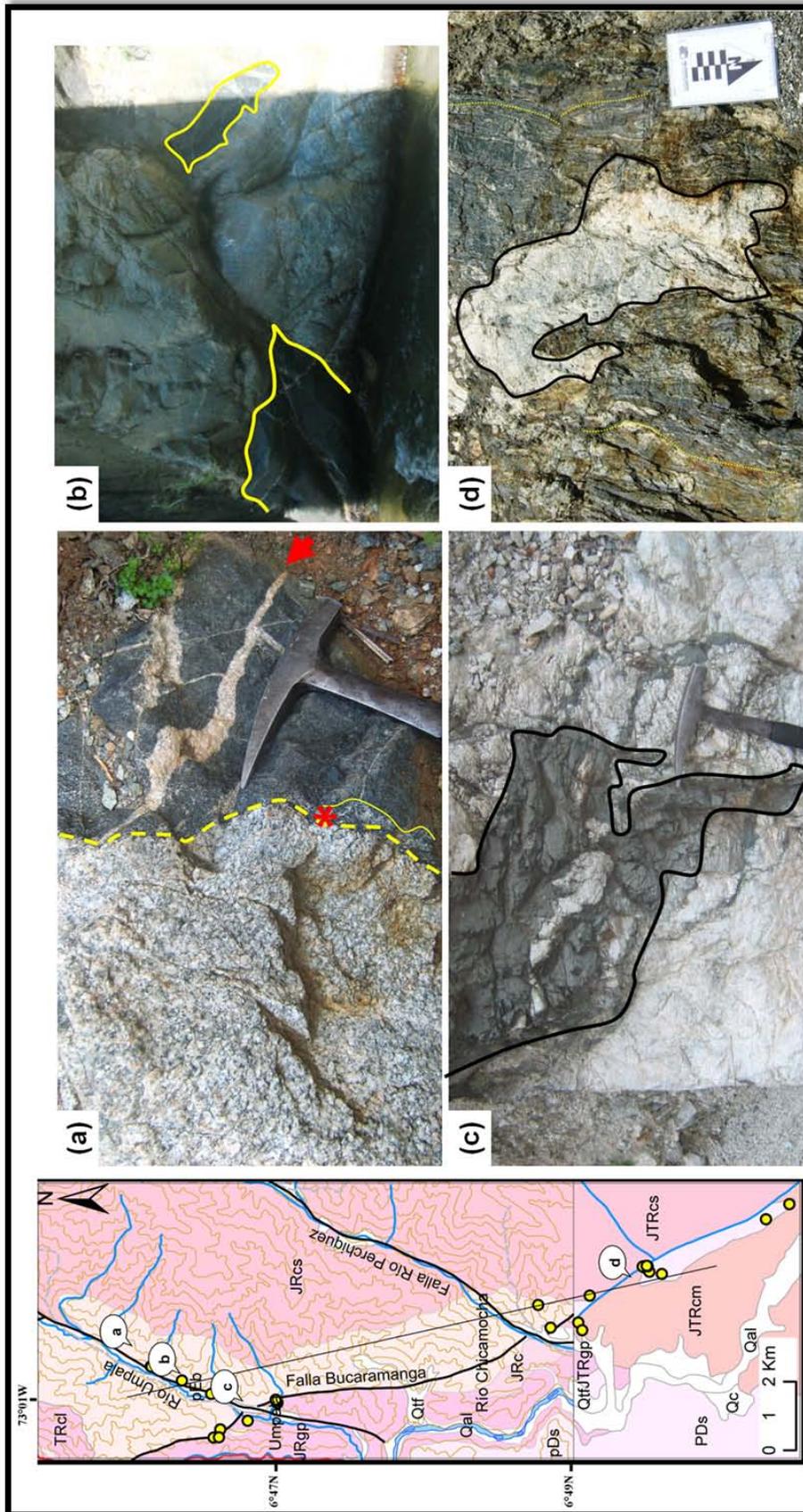


Figura 7. Localización área Umpalá - Cepitá, indicando las características litológicas más relevantes. (a) Anfibolitas y neises hornbléndicos con leucosomas monzograníticos más relevantes. (b) Anfibolitas y neises hornbléndicos con leucosomas monzograníticos con porciones irregulares de neis hornbléndico, generando una apariencia de xenolito. (c) Roca masiva de grano muy fino y coloración verdosa, cataclasita. (d) Neis cuarzo feldespático con biotita y sillimanita del sector de Cepitá, en el que se desarrollan leucosomas discordantes a la foliación. (Mapa geológico tomado y modificado del cuadrángulo H12 Bucaramanga y plancha 136 Málaga, Ingeominas 1976-77)

largo del segmento aparecen intercalaciones entre neises cuarzo-feldespáticos biotíticos y anfibolitas; estas últimas presentan numerosas estructuras agmáticas.

En la parte sur de la zona, los neises tienen una composición más biotítica, sin anfíbol y con bandeamiento composicional presentando estructuras migmatíticas, los neosomas son variables entre diques graníticos (de inyección) y niveles cuarzo-feldespáticos no concordantes con la foliación; allí los niveles de anfibolitas comienzan a ser menos abundantes y en paquetes de menor espesor. Es muy común encontrar rocas de color verde oscuro de grano muy fino asociadas a largos planos de fractura, las cuales han sido descritas como cataclasitas (Figura 7c).

En el sector de Cepitá, predominan neises biotíticos en los que se observa bandeamiento composicional, diferenciando niveles cuarzo-feldespáticos de los micáceos (Figura 7d). Ocasionalmente, algunos se encuentran afectados por una serie de venas o diques de color verde oscuro de grano muy fino. El sector más sur corresponde a la zona de flexura de la Falla de Bucaramanga, allí se hay un intenso diaclasamiento y desarrollo de fallas satélites, las cuales sacan bloques de anfibolitas en forma de cuña, intercalándolos con neises silimaníticos que presentan estructura migmatítica y las pone en contacto con rocas de la cuarzodiorita de Mogotes.

Hacia el SE de Cepitá, localmente aparecen niveles de cuarcitas algunas con granate y neises cuarzo-feldespáticos con estructura estromática plegadas, los mesosomas son más biotíticos y pueden tener niveles esquistosos. Hacia el N de Cepita se encuentran esquistos micáceos con niveles de anfibolita pertenecientes a la Formación Silgará y el contacto con el granito de Pescadero.

2.2 Litología Neis de Bucaramanga

La caracterización litológica de las rocas del Neis de Bucaramanga se realizó a partir del estudio petrográfico de muestras distribuidas dentro del área de interés (Tabla 1); en las que se definieron fases minerales y microestructuras, las cuales frecuentemente se apoyan en los análisis de catodoluminiscencia, en especial para determinación modal de porcentajes. La catodoluminiscencia es muy útil para la definición de patrones de zonación en plagioclasas, las reacciones o intercrecimientos entre fases minerales y la presencia o abundancia de un mineral (e.g. apatito) Figura 8.

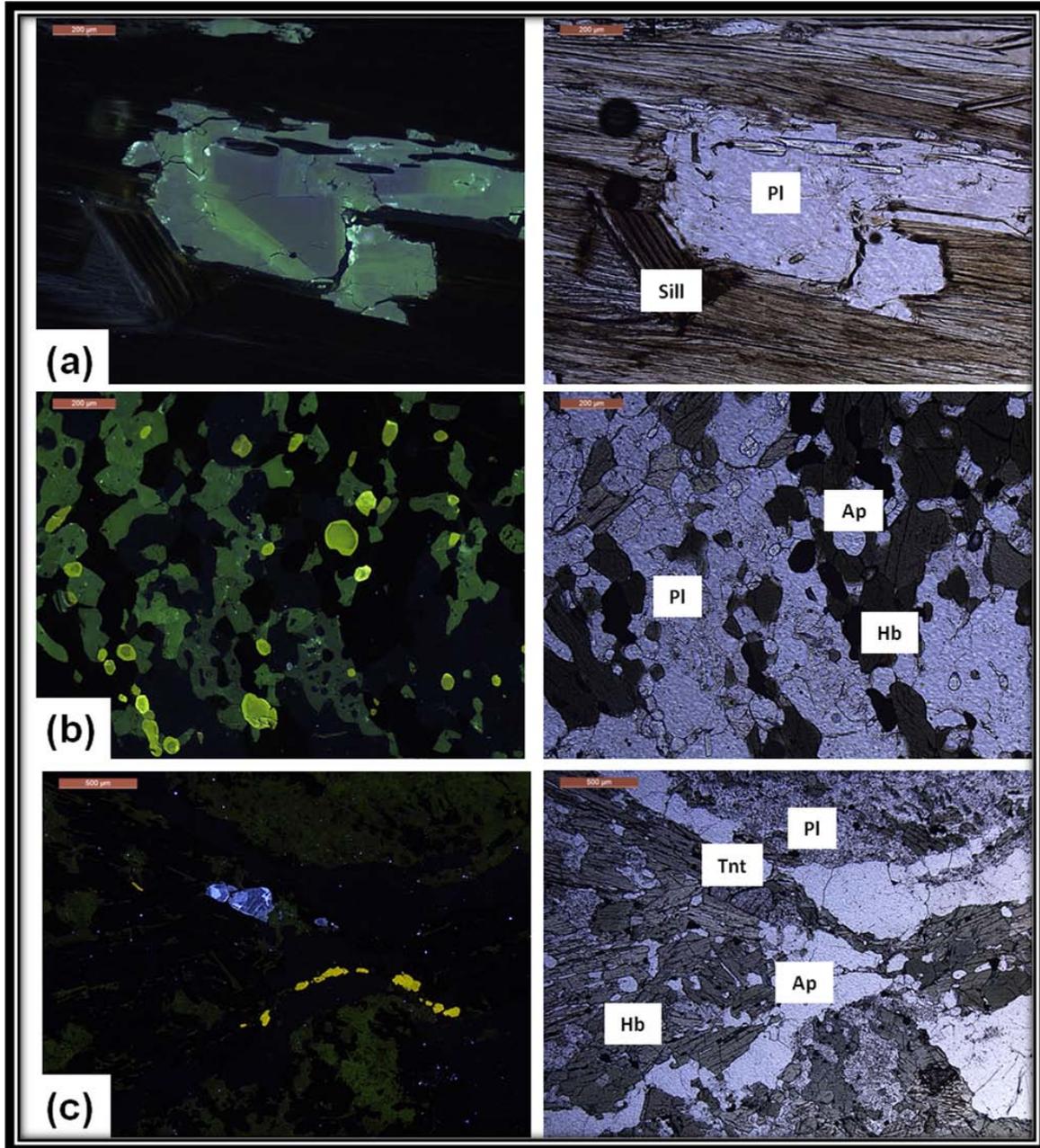


Figura 8. Imágenes de catodoluminiscencia (CAT) para las rocas del Neis de Bucaramanga mostrando los rasgos texturales y composicionales relevantes. (a) zonación en plagioclasa (CAT - PPL). (b) Contenido de apatitos, ocasionalmente zonados en anfibolita (CAT - PPL). (c) Presencia de esfena y apatitos en neis hornbléndico (CAT - PPL). (d) Intercrecimiento entre plagioclasa y feldespato potásico en neis cuarzo feldespático (CAT - XPL). (e) Porfiroblasto de plagioclasa zonada y bordes corroídos en cataclasita (CAT - XPL). (f) Plagioclasa en paragénesis con silimanita de hábito fibroso (CAT - PPL). (g) Exsolución de feldespato potásico e intercrecimiento con plagioclasa (CAT - XPL).

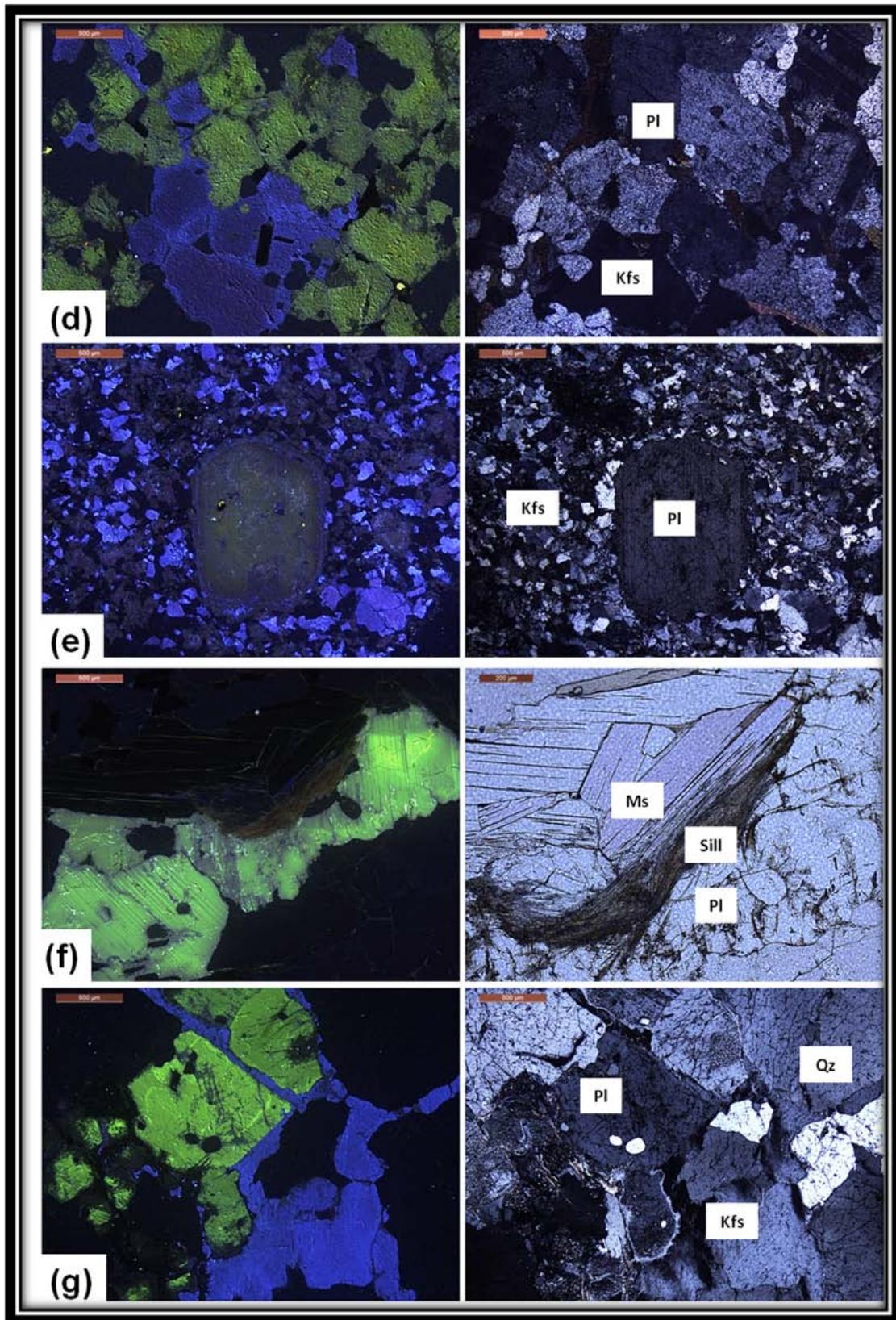


Figura 8. Continuación.

Tabla 1. Resumen del análisis petrográfico, el cual permitió diferenciar las variaciones composicionales dentro del Neis de Bucaramanga. La clasificación se realizó siguiendo las recomendaciones de la SCMR.

MUESTRA	E	N	LOCALIDAD	CLASIFICACIÓN
07-SACZ-15	1108441	1279843	4km vía Bucaramanga - Berlín	Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita
07-SACZ-17	1112234	1278033	El Ciruelo	Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita
10-SACZ-6c	1130662	1229159		Neis cuarzo feldespático con biotita
10-SACZ-10	1120912	1250173		Neis cuarzo feldespático con biotita
12-SACZ-31a	1131059	1293992	Vía Berlín - Vetas, Loma Volcán Amarillo	Neis cuarzo feldespático con biotita, anfíbol, silimanita y granate
12-SACZ-31b	1131059	1293992	Vía Berlín - Vetas, Loma Volcán Amarillo	Anfibolita con granate
13-SACZ-17	1139194	1292349	Vía Berlín - Ranchadero	Neis cuarzo feldespático con muscovita, biotita, silimanita y granate
NUCZ-1B				Neis cuarzo feldespático con biotita
NUCZ-1D (leucosoma)				Leucosoma monzogranítico
NUCZ-1D (mesosoma)				Neis hornbléndico
CIII-09-NB-01-CU	1125401	1237451	Cepitá - El Laurel	Neis hornbléndico
CIII-09-NB-03-CU	1108601	1279989	Cepitá - El Laurel	Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita
CIII-09-NB-04-CU	1125626	1237954	Cepitá - La Chorrera	Neis cuarzo feldespático con biotita
CIII-09-NB-05-CU	1125591	1237956	Cepitá - La Chorrera	Neis cuarzo feldespático con biotita
CIII-09-NB-06-CU	1125618	1238001	Cepitá - El Barro	Neis cuarzo feldespático con biotita
CIII-09-NB-07-CU	1127421	1233778	Cepitá - El Barro	Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita
CIII-09-NB-08-CU	1126986	1234450		Neis cuarzo feldespático con biotita
CIII-09-NB-09-CU	1124778	1239530	El Barro	Neis cuarzo feldespático con biotita
CIII-09-NB-10-CU	1127421	1233778		Neis cuarzo feldespático con biotita
CLU1052	1134535	1300636	Vetas - Reina de Oro	Neis cuarzo feldespático con biotita
CLU1055	1134455	1301141	Vetas - Reina de Oro	Neis cuarzo feldespático con biotita
CLU1056	1134452	1301153	Vetas - Reina de Oro	Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita
CLU1059	1133143	1301397	Vetas - Mina Salvación	Neis cuarzo feldespático con biotita
CLU1060	1133189	1301384	Vetas - Mina Salvación	Neis cuarzo feldespático con biotita
CLU1061	1131189	1300716	Vetas, V. Ortegón	Anfibolita con piroxeno
CLU1062	1131189	1300716	Vetas, V. Ortegón	Anfibolita
CLU1063	1131911	1300952	Vetas, V. Borrero	Neis cuarzo feldespático con biotita
CLU1065	1132899	1301206	Vetas, V. La Tosca	Anfibolita
CLU1066	1133095	1300675	Vetas, V. El Volcán	Anfibolita
CLU1069	1131400	1299071	Tona, V. Mortiño	Neis cuarzo feldespático con biotita

MUESTRA	E	N	LOCALIDAD	CLASIFICACIÓN
2012-01-CU	1130044	1294711	Vía Berlín - Vetas	Neis hornbléndico
2012-02-CU	1130044	1294711	Vía Berlín - Vetas	Neis cuarzo feldespático con biotita
2012-03-CU	1122730	1252176	Camino Umpalá - La Urgua	Anfibolita
2012-04-CU	1122720	1252156	Camino Umpalá - La Urgua	Cataclasita
2012-05-CU	1122321	1251280	Camino Umpalá - La Urgua	Cataclasita
2012-07-CU	1121937	1250439	Camino Umpalá - La Urgua	Neis hornbléndico
2012-09b-CU	1121743	1248566	Sendero Umpalá - V. La Garrapata	Neis hornbléndico
2012-10-CU	1121768	1248576	Sendero Umpalá - V. La Garrapata	Neis hornbléndico
2012-11-CU	1120675	1250369	Vía Quince Letras - Umpalá	Neis cuarzo feldespático con muscovita
2012-14-CU	1123851	1240657	Vía Cepitá - Pescadito	Neis cuarzo feldespático con biotita
2012-16-CU	1123778	1239750	Vía Cepitá - Pescadito	Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita
2012-17-CU	1125465	1237812	Vía El Barro - La Chorrera	Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita
2012-18-CU	1125623	1237861	Vía El Barro - La Chorrera	Neis cuarzo feldespático con cordierita, silimanita y biotita
2012-19a-CU	1125637	1237884	El Barro	Anfibolita
2012-19b-CU	1125637	1237884	El Barro	Anfibolita

Tabla 1. Continuación

2.2.1 Neises Migmatíticos Cuarzo Feldespáticos

Corresponden a la litología más común y característica del Neis de Bucaramanga, este grupo, reúne todas las variaciones mineralógicas que se encuentran asociadas a neises que desarrollan bandeamiento composicional con niveles netamente cuarzo-feldespáticos, los cuales presentan textura granoblástica con tamaño de grano medio a grueso y generalmente corresponden a leucosomas de composición tonalítica y monzogranítica.

El cuarzo generalmente se presenta como cristales xenomorfos en agregados, con tamaños entre 80 y 300 μm , orientados, con contactos suturados e irregulares, presentan extinción ondulante y ocasionalmente se desarrollan bandas de deformación y bordes de subgrano. Se puede presentar como inclusiones esféricas en otros minerales como plagioclasa, feldespato potásico, granate y anfíbol.

La plagioclasa corresponde a cristales subidiomorfos, con tamaños entre 150 y 500 μm , desarrollan maclas tipo albita y periclina ocasionalmente dobladas y maclas mecánicas; presentan texturas de exsolución con feldespatos, pueden contener inclusiones de cuarzo y generalmente los cristales de niveles leucocráticos presentan alteración a sericita.

El feldespato potásico ocurre como cristales con tamaños entre 50 y 250 μm , subidiomorfos y xenomorfos; en los que se observan lamelas de exsolución, intercrecimientos simplectíticos y algunos desarrollan maclas tipo microclina truncadas por maclas mecánicas de deformación, otros cristales no presentan macla.

Aunque es la litología más frecuente no todas las variaciones ocurren en todos los sectores; las variaciones en los neises migmatíticos cuarzo-feldespáticos están definidas por las siguientes asociaciones minerales:

Neises con muscovita, biotita, silimanita y granate

Identificados al NE de Berlín vía Pamplona, inmediatamente al norte de la Falla del Río Charta. Corresponden a rocas con tamaño de grano medio a grueso que desarrollan lineación mineral concordante con la foliación de la roca; a nivel microscópico se observa un incipiente microplegamiento dado por la disposición de micas en zigzag (Figura 9a).

El granate se encuentra entre el 10% y 15%, con tamaños entre 0.5 y 2 mm, son de color rojo claro y se encuentran desde cristales idiomorfos sin inclusiones a subidiomorfos con inclusiones de cuarzo plagioclasa e ilmenita que han sido elongados en la dirección de la lineación, es posible reconocer rotación de algunos porfiroblastos de granate ya que las inclusiones se encuentran alineadas pero dispuestas en forma oblicua o perpendicular con respecto a la orientación principal, aunque no hay un evidente desarrollo de sombras de presión (Figura 9b).

Aunque la silimanita se encuentra concentrada en nódulos en los niveles micáceos, petrográficamente solo se identifica como cristales muy finos ($< 20 \mu\text{m}$), incoloros, tonos de interferencia de primer orden, con hábito fibroso que se desarrollan hacia los bordes de cristales gruesos de biotita y muscovita, como intercrecimientos muy finos.

La biotita se presenta en cristales idiomorfos a subidiomorfos con tamaños entre 100 y 500 μm , son de color café rojizo fuertemente pleocróicos a tonalidades más claras;

algunos cristales contienen inclusiones de circón e ilmenita y hacia los bordes se presentan intercrecimientos con silimanita (Figura 9c).

En general, para el Neis de Bucaramanga la muscovita es un mineral poco abundante, sin embargo, las rocas con esta asociación mineral presentan cristales idiomórficos que van desde 300 μm hasta 3 mm, con hábito hojoso, asociados en láminas discontinuas con biotita y silimanita; representan más del 20% de la composición de la roca.

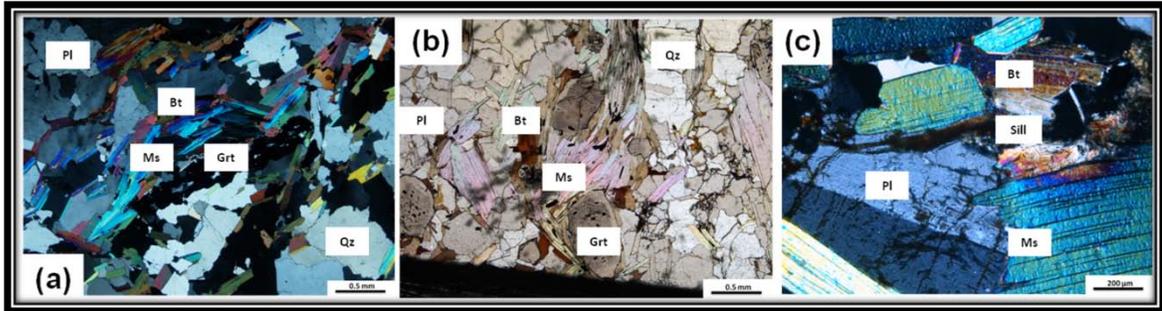


Figura 9. Neises cuarzo feldespáticos con muscovita, biotita, silimanita y granate. (a) textura lepidoblástica con crenulación. (b) Porfiroblastos de granate con inclusiones que indican rotación. (c) Silimanita fibrosa intercrecida con biotita y muscovita.

Neises con biotita, anfíbol, silimanita y granate

Estos neises afloran hacia el N de Berlín por la vía hacia Vetas y corresponden a los niveles con intercalaciones de anfibolitas; son rocas de tamaño de grano fino a medio, foliadas en las que se diferencian niveles cuarzo-feldespáticos y niveles micáceos con anfíbol, los cuales desarrollan lineación mineral formando láminas continuas (Figura 10a). Dentro de los minerales accesorios se encuentran circones y abundantes apatitos.

Los granates corresponden a porfiroblastos con tamaños entre 0.5 y 2 mm, de color rojo claro; generalmente contienen inclusiones semi-esféricas de cuarzo, apatito e ilmenita, algunos cristales fracturados se encuentran cloritizados. Las inclusiones se encuentran orientadas de forma paralela a la foliación de la roca, se observan sombras de presión formadas por cristales muy finos de cuarzo plagioclasa y muscovita (Figura 10b).

La silimanita se encuentra restringida a niveles completamente micáceos y se encuentra como cristales de hábito fibroso, con tamaños < 20 μm , que se encuentran intercrecidos con biotita hacia los bordes de los cristales.

El anfíbol corresponde a cristales de tamaños entre 30 y 100 μm , subidiomorfos a xenomorfos; presentan color amarillo claro y son ligeramente pleocróicos, birrefringencia con tonos de segundo orden; es posible que los cristales más finos correspondan a un solo cristal que contiene numerosas inclusiones desarrollando texturas de reemplazamiento, ya que se observa continuidad óptica (Figura 10c).

La biotita ocurre como cristales subidiomorfos, de tamaños entre 80 y 300 μm , con hábito hojoso, su coloración es marrón rojizo con fuerte pleocroísmo; se encuentra distribuida en láminas asociadas a muscovita y anfíbol desarrollando texturas lepidoblásticas y nematoblásticas (Figura 10d).

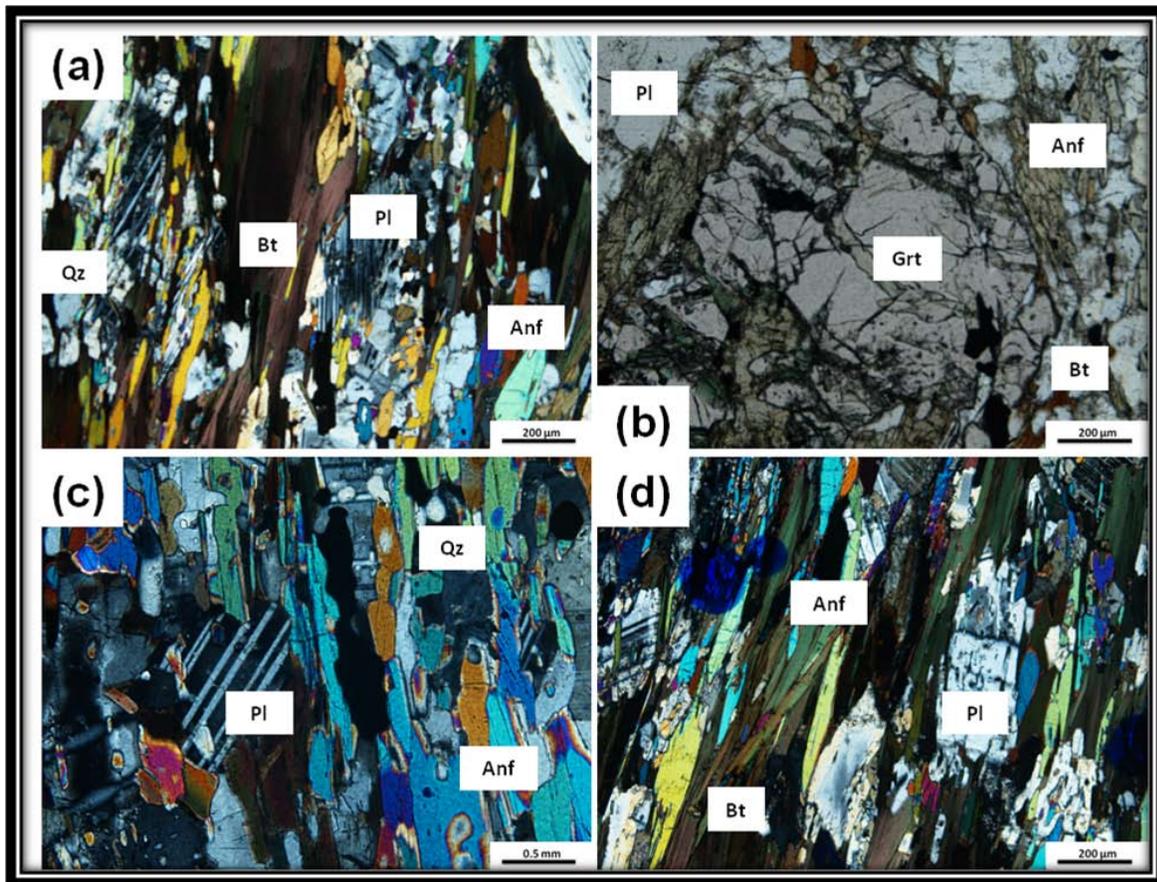


Figura 10. Neises cuarzo feldespáticos con biotita, anfíbol, silimanita y granate. (a) Orientación de minerales desarrollando la foliación. (b) Desarrollo de sombras de presión alrededor de porfiroblastos de granate. (c) Anfíbol con textura poiquiloblástica, descrita por pequeños cristales separados con continuidad óptica. (d) Lamías de biotita y anfíbol que generan texturas lepidoblásticas y nematoblásticas.

Neises con biotita, silimanita y cordierita

Esta asociación mineral solamente se encontró en rocas que afloran al SE de Cepitá, en cercanías a la vereda El Barro dentro de una secuencia de neises silimaníticos con estructuras migmatíticas, en un sector donde el mesosoma tiene niveles más amplios predominando sobre el leucosoma. Corresponden a rocas de grano fino a medio, foliadas con orientación mineral; en las que se diferencian los niveles cuarzo-feldespáticos y niveles de silimanita y biotita (Figura 11a); se observan sectores con alto grado de sericitización donde ocurre la cordierita junto con epidota, clorita, muscovita y circón.

La cordierita se encuentra como cristales xenomorfos de 80 a 200 μm , con bajo relieve, presentan coloración amarilla muy tenue, los tonos de interferencia son gris de primer orden, su figura de interferencia es biáxica negativa. Contiene múltiples inclusiones de cuarzo, minerales opacos, circones y fuerte sericitización hacia los bordes de los cristales; se encuentra en niveles orientados de forma paralela con la foliación y a veces asociada a silimanita variedad fibrolita (Figura 11b).

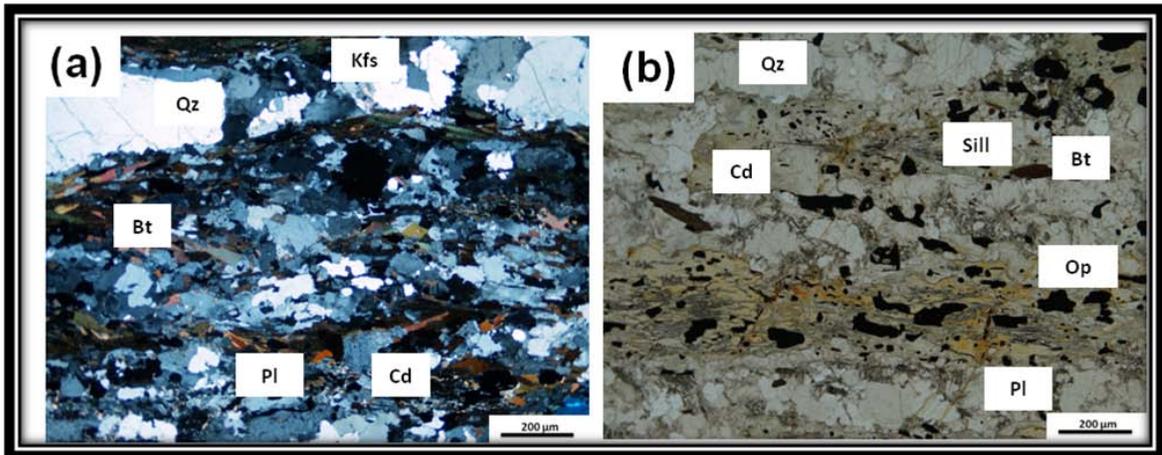


Figura 11. Neises cuarzo feldespáticos con biotita, silimanita y cordierita. (a) niveles cuarzo feldespáticos continuos, separados por niveles micáceos con estructura lepidoblástica. (b) Cordierita asociada a silimanita.

La silimanita corresponde a cristales de tamaño entre 30 y 80 μm , con hábito fibroso y prismático muy delgado, tiene tonos de interferencia amarillo y naranja de primer orden, se encuentra asociada a biotita y algunas veces en sectores con cordierita (Figura 11b).

La biotita generalmente son cristales idiomorfos, de 50 a 120 μm , color café- pardo, pleocróicos a tonos verde-amarillo; se orientan siguiendo la foliación en niveles

continuos; están asociados a silimanita y minerales opacos, predominando en los niveles cuarzo-feldespáticos.

Neises con biotita y silimanita

Afloran en diferentes localidades, sector de Cepitá, Vetas, predominando en la vía Bucaramanga – Berlín como rocas de grano medio en la que se distinguen bandas cuarzo-feldespáticas, separadas por niveles micáceos con biotita, silimanita, ocasionalmente muscovita y es muy característico el desarrollo de grandes cristales de apatito (Figura 12a).

Los cristales de silimanita son en su mayoría de hábito fibroso, algunos cristales prismáticos con tamaños entre 50 y 100 μm , son incoloros, de relieve moderado y tonos de interferencia de primer orden; están orientados definiendo la foliación de la roca (Figura 12b), asociados a biotita, plagioclasa y pequeños cristales de muscovita (alteración a sericita).

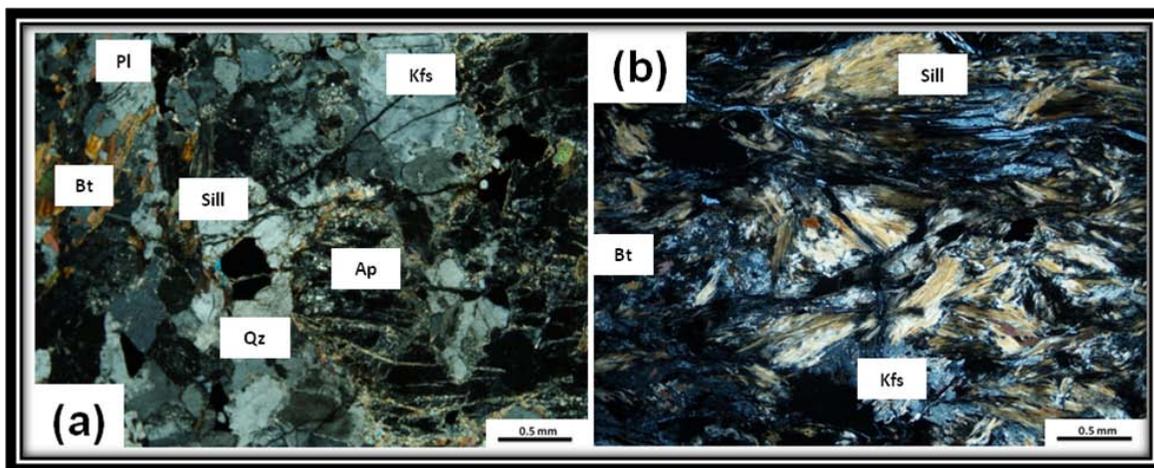


Figura 12. Neises cuarzo feldespáticos con biotita y silimanita. (a) Cristales > a 1cm de apatito. (b) Silimanita fibrosa orientada.

La biotita se encuentra en láminas continuas asociadas a la silimanita desarrollando textura lepidoblástica, los cristales tienen tamaños entre 100 y 300 μm , hábito hojoso y color café - pardo pleocróicos.

Neises con biotita

Se encuentran frecuentemente asociados a los mismos sectores donde están los neises con biotita y silimanita; se presenta como rocas de grano medio, foliadas con lineación

mineral; se observan que en niveles de grano grueso cuarzo-feldespáticos predomina el feldespato potásico y los niveles de grano medio y fino están compuestos por cuarzo, feldespatos y biotita; ocasionalmente se encuentra material recrystalizado de grano muy fino con texturas en mosaico y cristales con bordes suturados que cortan la foliación en forma oblicua (Figura 13a).

En estos neises la biotita presenta las mismas características descritas anteriormente en los neises con silimanita y cordierita y la diferencia principal con la biotita de rocas que contienen granate radica básicamente en el color, siendo en este caso tonos cafés a verdes (Figura 13b); la cloritización por procesos retrógrados es más frecuente en estas rocas.

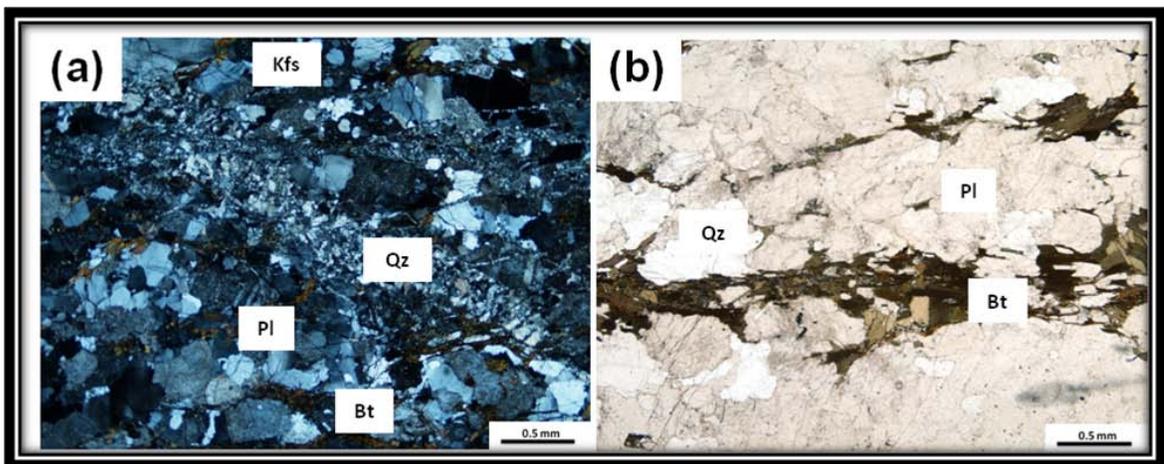


Figura 13. Neises cuarzo feldespáticos con biotita. (a) Recrystalización de cuarzo en venas que cruzan la foliación. (b) Biotita de color verde con pleocroísmo a tonos cafés.

2.2.2 Neises Migmatíticos Hornbléndicos

Se presentan en algunas intercalaciones dentro del área de Cepitá y hacia Vetas; sin embargo esta litología abarca una gran parte en el sector de Umpalá, donde se presentan estructuras migmatíticas generadas por leucosomas monzograníticos, con texturas granoblásticas de grano grueso e inclusive pegmatitas. Las rocas en general son de grano medio a grueso, presentan texturas granoblásticas y nematoblástica con orientación de anfíboles y biotitas. Exhiben una notoria variación composicional, con niveles más anfibólicos, formados principalmente por hornblenda y plagioclasa con minerales accesorios como circón, esfena, apatito y esporádicamente clinopiroxeno, los cuales se diferencian de niveles de composición cuarzo-feldespática que se alternan, en

los que disminuye el contenido de hornblenda y aparece la biotita café levemente cloritizada (Figura 14a), allí también se desarrollan cristales más grandes de esfena y por lo general las plagioclasas se encuentran sericitizadas y el contenido de cuarzo puede alcanzar hasta el 30%. Estos niveles más félsicos se podrían considerar como un leucosoma.

El anfíbol se ha identificado como hornblenda, tiene pleocroísmo de verde claro a verde oliva, los cortes basales son de color café, presenta inclusiones esféricas de cuarzo, plagioclasa y esfena, ocasionalmente se encuentra cloritizada y con oxidación en fracturas.

La plagioclasa se encuentra como cristales subidiomorfos a idiomorfos, con tamaños de hasta 500 μm , ligeramente más gruesas en los leucosomas; desarrollan maclas tipo Carlsbad y albita, combinadas y maclas de deformación (Figura 14b). Por lo general se encuentran bastante alteradas a sericita.

La biotita que está relacionada a los niveles cuarzo-feldespáticos corresponde a cristales idiomorfos, tabulares, generalmente orientados con la foliación (Figura 14c); tiene pleocroísmo verde-café, se observa migración de Fe en las fracturas, hay cloritización e inclusiones de minerales opacos. Algunos cristales tienen una ligera deformación (plegamientos tipo kink).

En el sector de Cepita se encuentra una variación cuya asociación mineral está representada por la presencia de piroxeno, estas corresponden a rocas de grano medio, con textura granoblástica que desarrolla foliación gruesa definida por la orientación de anfíboles que desarrollan textura nematoblástica (Figura 14d). Los contenidos de cuarzo son menores al 10%, se observa una alta proporción de esfena asociada a los niveles máficos. La foliación principal se encuentra afectada por niveles de alteración que contienen clinozoicita y cruzan de manera oblicua.

La plagioclasa corresponde a cristales idiomorfos, con bordes rectos; la mayoría de los cristales se encuentran maclados con macla tipo periclina y albita delgada (Figura 14e); ocasionalmente se observan texturas de exsolución e inclusiones de circón, clinozoicita y esfena. Algunos cristales están bastante sericitizados.

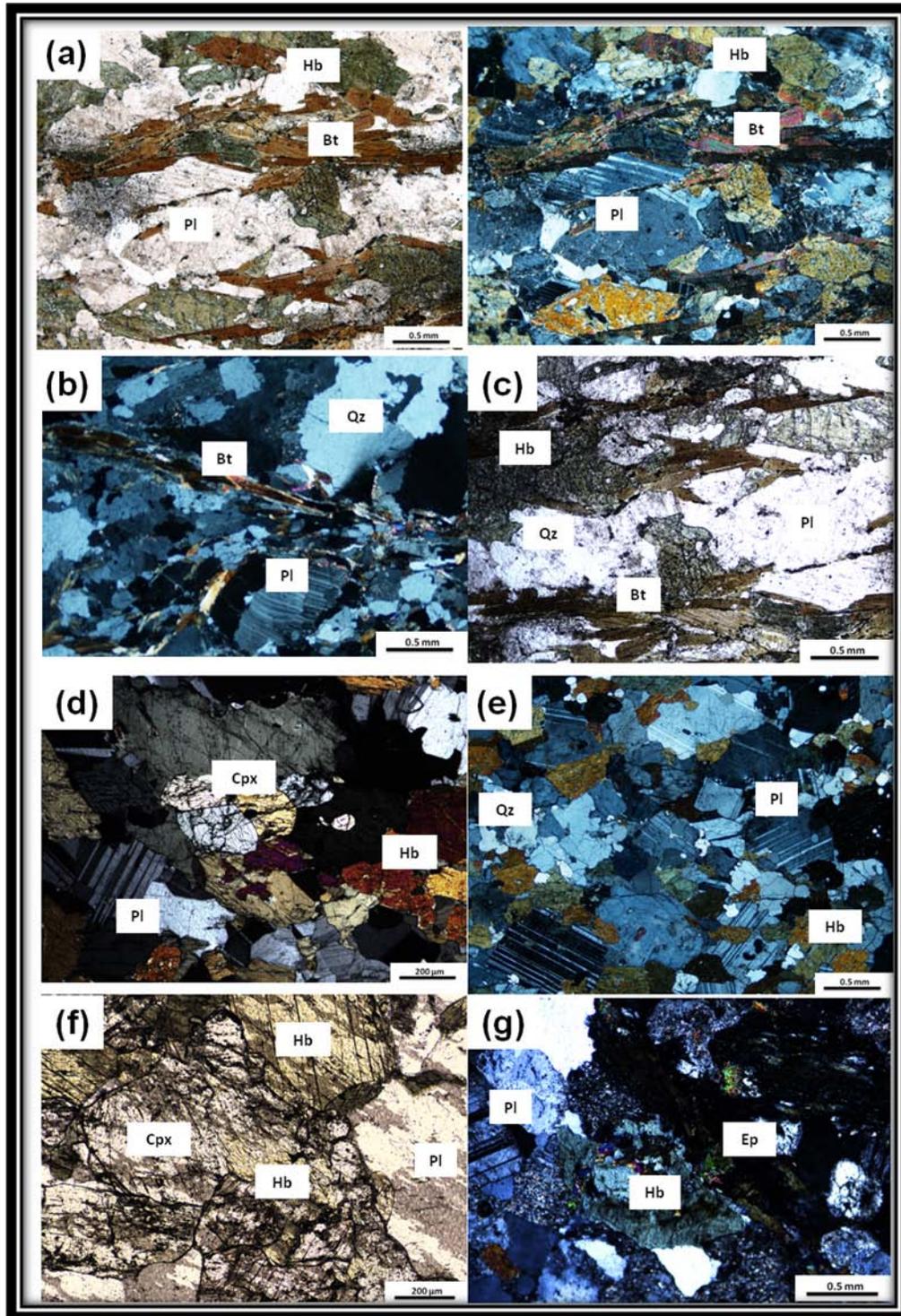


Figura 14. Neises migmatíticos hornbléndicos. (a) Neises con niveles formados por plagioclasa anfíbol y niveles con biotita y anfíbol (PPL - XPL). (b) Cristales de plagioclasa que denotan deformación por desarrollo de maclas mecánicas. (c) Láminas constituidas por cristales orientados de biotita. (d) Clinopiroxeno en paragénesis con hornblenda formando textura nematoblástica. (e) Cristales de plagioclasa con maclas tipo albita. (f) Clinopiroxeno con anfíbol en el núcleo. (g) Cristales de epidota alrededor de cristales de hornblenda.

La hornblenda tiene tamaños entre 50 y 300 μm , formas tabulares, son de color verde oliva a café claro y tonos de interferencia amarillo y naranja de segundo orden; se encuentra orientada definiendo la foliación, contiene numerosas inclusiones de esfena y plagioclasa.

Los piroxenos son de tipo clinopiroxeno, los cristales son subidiomorfos, incoloros o con ligero pleocroísmo verde claro, tienen extinción inclinada y altos tonos de interferencia; se encuentran asociados a niveles anfibólicos desarrollando intercrecimiento con hornblenda, ocasionalmente se observan núcleos de anfíbol con cristales de piroxeno alrededor formando una corona, indicando una reacción prógrada del metamorfismo (Figura 14f).

La epidota ocurre en cristales xenomorfos, con tamaños menores a 15 μm , anhedrales, se encuentra en agregados cristalinos asociada a plagioclasa y hornblenda. Algunos con formas cúbicas y tonos de interferencia amarillo-azul se han identificado como clinozoicita y se encuentran hacia los bordes de la hornblenda (Figura 14g).

2.2.3 Anfibolitas

Afloran en las distintas localidades como niveles que se intercalan con los neises migmatíticos cuarzo-feldespáticos y hornbléndicos. En general corresponden a rocas de grano grueso, con textura granoblástica y orientación de minerales. Se observan intercrecimientos entre cristales de hornblenda y plagioclasa la cual, por lo general tiene un alto grado de sericitización; ocasionalmente se encuentra biotita (Figura 15a). También se observan venillas delgadas de epidota paralelas y subparalelas a la exfoliación de los anfíboles; asociada a la hornblenda se encuentra esfena con formas rómbicas y apatitos como inclusiones muy abundantes. Las microestructuras presentes, como lo son el desarrollo de niveles de cuarzo que siguen la foliación y ocasionalmente forman bandas con estructuras "*annealing*" y de recristalización, donde se observan cristales más finos, evidencian procesos dinámicos sobreimpuestos.

Hacia el N de Berlín por la vía a Vetas se encuentran niveles delgados de anfibolitas granatíferas intercaladas en una secuencia de neises cuarzo-feldespáticos con biotita, anfíbol, silimanita y granate. Se caracterizan por ser rocas de grano medio, foliadas que desarrollan textura nematoblástica, presentan bandas alternantes de composición máfica

y otros leucocráticos con grandes cristales de plagioclasa y cuarzo, en los que se encuentran los granates y apatitos también de gran tamaño (Figura 15b).

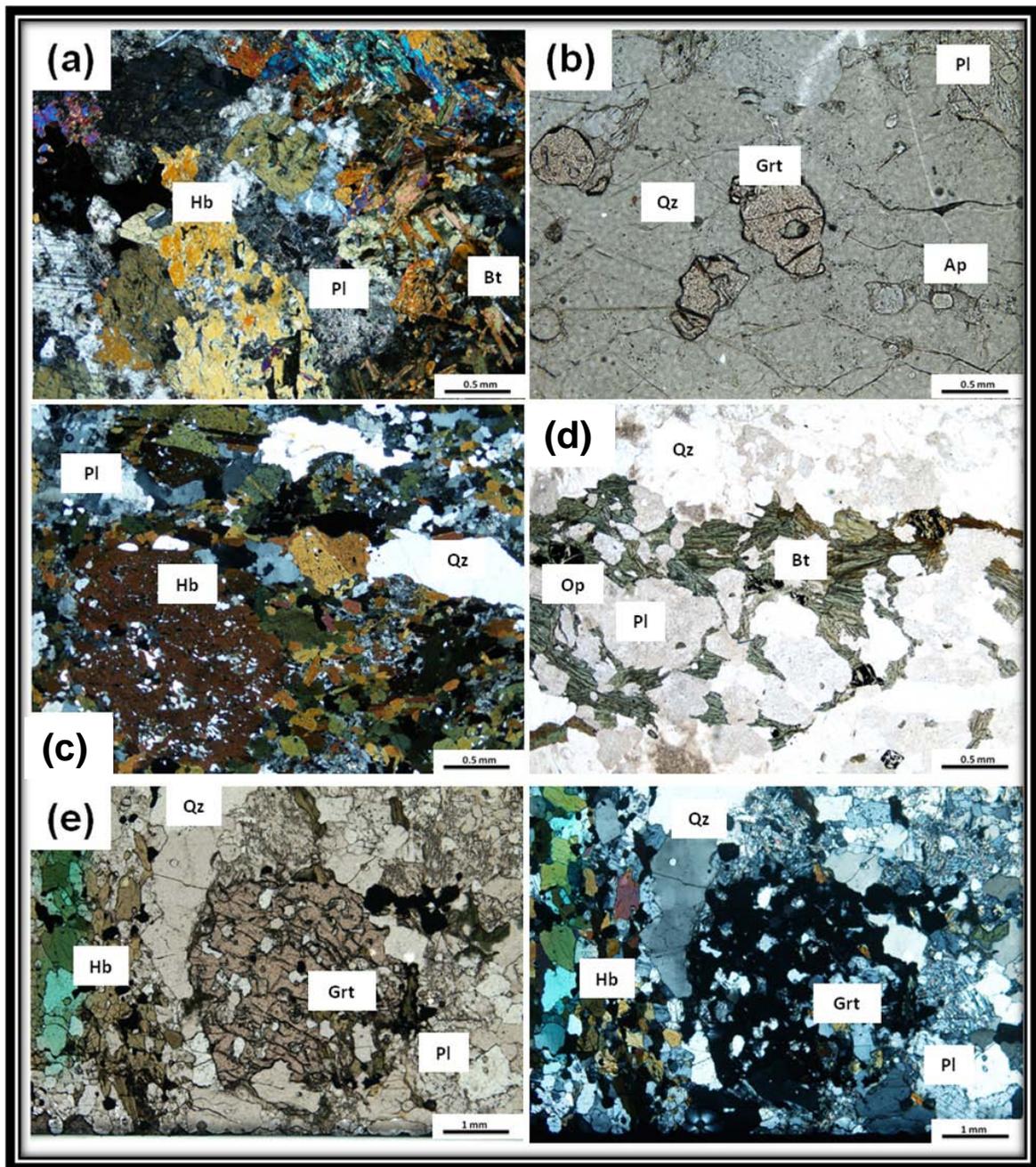


Figura 15. Anfibolitas. (a) Anfibolita con textura granoblástica que puede contener biotita. (b) Anfibolita con granate y apatito. (c) Poiquicristales de hornblenda. (d) Minerales opacos asociados a las líneas de exfoliación de la biotita. (e) Porfiroblasto de granate con inclusiones no orientadas (PPL - XPL)

La hornblenda se encuentra en cristales subidiomorfos de 80 a 300 μm , de color verde oliva con pleocroismo a verde-amarillo, presenta tonos de interferencia de segundo orden desde amarillo a azul y morado, los cortes basales muestran dos direcciones de clivaje y ocasionalmente desarrollan macla simple y doble. Muchos de los cristales tienen texturas poiquilíticas debido a que contienen inclusiones semi-esféricas de cuarzo, apatito y epidota (Figura 15c). También se caracteriza por desarrollar agregados cristalinos en mosaico, donde los cristales que lo forman tienen ángulos de extinción diferentes, algunos están levemente cloritizados.

La plagioclasa tiene tamaños desde 50 hasta 500 μm , los cristales son subidiomorfos y algunas veces xenomorfos, generalmente presentan macla tipo albita y Carlsbad, en algunos cristales es incipiente; se desarrollan texturas de exsolución. Algunos cristales están afectados fuertemente por alteración a sericita.

Para aquellas anfibolitas que contienen biotita, está se encuentra en cristales idiomorfos de 50 a 150 μm , con forma tabular, es de color café-pardo pleocroica a tonos amarillo claro; se asocia a hornblenda y ocasionalmente se desarrollan minerales opacos en los planos de exfoliación (Figura 15d).

El granate se presenta asociado a niveles leucocráticos, con tamaños de 1 a 5 mm, son cristales idiomorfos y subidiomorfos, son de color rojo claro; debido a su gran tamaño frecuentemente se encuentran fracturados y contienen numerosas inclusiones de cuarzo, plagioclasa y anfíbol, que en ocasiones al ser tan abundantes generan cristales de tipo esqueletal (Figura 15e).

2.2.4 Cuarcitas

Dentro de las zonas de estudio se encontraron cuarcitas granatíferas en el sector de Cepitá y cuarcitas biotíticas al NE de la población de Vetas en intercalaciones con neises cuarzo-feldespáticos con biotita.

Consisten en rocas de grano medio a grueso, con textura granoblástica (Figura 16), compuestas por cuarzo en cantidades mayores al 80%, el cual consiste en cristales xenomorfos de bordes suturados, a veces intercrecidos con feldespato potásico o como inclusiones esféricas en granate; la biotita corresponde a cristales de tamaños entre 80 y 200 μm y se encuentra levemente cloritizada; los cristales de granate tienen tamaños

entre 0.7 y 3 mm, son de color rojo claro y generalmente están fracturados y contienen inclusiones de biotita y cuarzo; ocasionalmente se observa cristales xenomorfos de feldespato potásico con lamelas de exsolución e inclusiones de cuarzo.

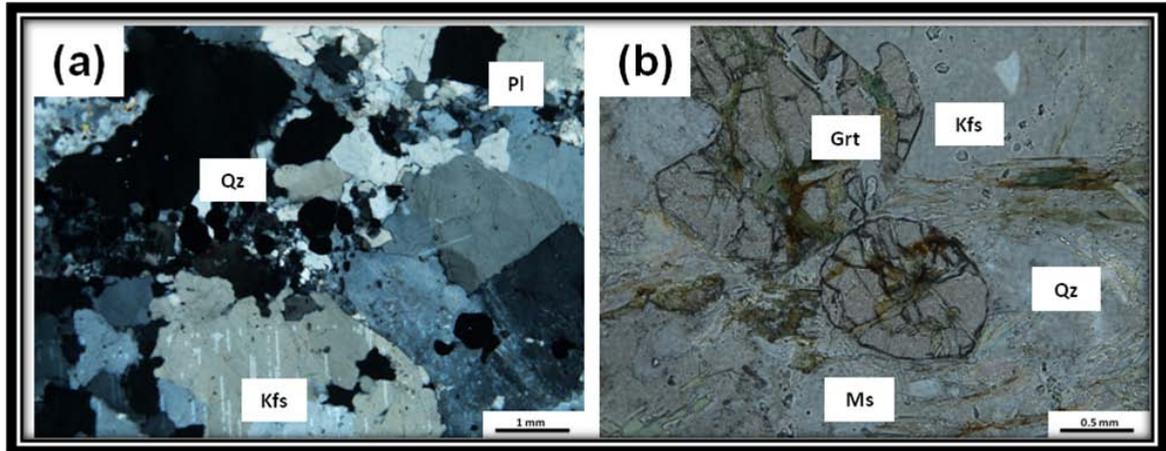


Figura 16. (a) Cuarzita con textura granoblástica. (b) Cuarzita con granate.

2.2.5 Cataclasitas (Rocas asociadas a zonas de falla)

Corresponden a rocas que se encuentran en el sector de Cepitá asociadas al trazo de la Falla de Bucaramanga y rocas relacionadas con los neises hornbléndicos del área de Umpalá donde hay afectación por la falla de río Umpalá.

En general, se describen como rocas de grano fino y muy fino, que pueden o no desarrollar orientación, presentan matriz recristalizada formada por cristales finos de anfíbol ocasionalmente cloritizados, agregados policristalinos de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, también se reconocen cristales de epidota y esfena; dentro de la matriz se observan cristales (porfiroclastos) de tamaño medio, subidiomorfos de plagioclasa maclada y zonada, cuarzo en agregados policristalinos con extinción ondulante, deformación, recristalización, feldespato con bordes redondeados (posiblemente por reabsorción) y agregados de anfíbol - plagioclasa fragmentados y recristalizados (Figura 17). Hay un alto grado de alteración, principalmente sericitización y presencia de lentes de carbonato; hay fracturas abiertas y venillas de epidota, clorita y carbonato. Como minerales accesorios hay apatitos y circones, que ocurren como inclusiones en plagioclasa.

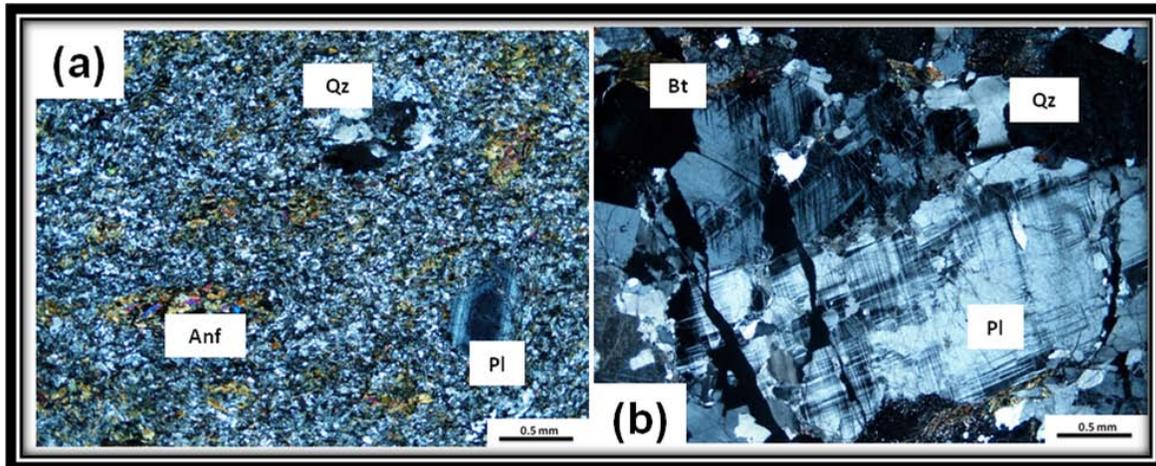


Figura 17. (a) Cataclasita con porfiroclastos de plagioclasa y anfíbol en una matriz recristalizada. (b) Fracturas de tensión y deformación mecánica de maclas en plagioclasa.

3. Petrología Metamórfica y Geoquímica

Los aspectos genéticos relacionados a las rocas metamórficas del Neis de Bucaramanga, tales como la definición de protolitos y las condiciones del pico de metamorfismo, se definieron con base en análisis geoquímicos en roca total y química mineral.

Las estimaciones de las condiciones de metamorfismo para el Neis de Bucaramanga fueron determinadas mediante la rutina “average P-T” del programa THERMOCALC; el cual, se basa en cálculos de termobarometría a partir de análisis químicos de las fases minerales que se encuentran en paragénesis, en las diferentes litologías.

Cada asociación mineral en una determinada roca es el resultado de diferentes reacciones ocurridas durante su proceso de formación, de tal forma, que las fases minerales presentes son aquellas que fueron estables a las condiciones de presión y temperatura del pico de metamorfismo. Los datos cuantitativos obtenidos en la microsonda electrónica son procesados a fin de establecer las condiciones de equilibrio termodinámico bajo las cuales ocurren dichas reacciones minerales, que son indicadoras de la presión y la temperatura.

Las muestras seleccionadas para la termobarometría fueron aquellas que contienen granate en la asociación mineral, evaluando la paragénesis granate \pm plagioclasa \pm cuarzo \pm silimanita \pm biotita \pm anfíbol \pm muscovita, en rocas principalmente del área de Vetas y Berlín que incluyen: neises cuarzo-feldespáticos con biotita, granate y silimanita; anfibolita con granate y anfibolita con piroxeno del sector de Vetas y neises cuarzo-feldespáticos con biotita, silimanita y cordierita del sector de Cepita.

Se realizaron análisis de granate, plagioclasa, anfíbol, piroxeno, cordierita, biotita y muscovita principalmente en mesosomas y algunos en leucosomas a fin de comparar sus composiciones químicas.

3.1 Química Mineral

Las tablas a continuación, listan los resultados de composición química de los minerales que conforman las diferentes asociaciones. A continuación se describen las características más sobresalientes de las fases minerales.

Granate: los mapas de rayos X y los análisis a lo largo de perfiles composicionales en porfiroblastos con y sin inclusiones dan evidencia de los patrones de zonación. Los granates son predominantemente ricos en almandino ($Alm_{64-75\%}$), con proporciones de piropro (Prp_{11-20%}) y grosularia (Grs_{3-17%}) bastante variables de acuerdo a la litología y normalmente pobres en esferartina (Sps_{2-10%}) Tabla 2. En una muestra del sector de Vetas - Berlín (12-SACZ-31a) se encontraron granates fuertemente zonados con patrón normal evidenciado por núcleos enriquecidos en Ca y Mn (Grt1) y otros con una muy débil zonación (Grt2); los primeros generalmente corresponden a porfiroblastos ocasionalmente elongados y con inclusiones (Figura 18), mientras que aquellos que no están zonados generalmente son pequeños cristales subidiomorfos (Figura 19); en los perfiles composicionales obtenidos (Figura 20), se observa un ligero zonamiento de Ca y Mn y una tendencia lineal poco variable de Fe y Mg, esto sugiere homogenización de éstos elementos, los cuales son susceptibles a procesos de difusión que ocurren con altas temperaturas (>600°C).

Tabla 2. Resumen de los resultados de química mineral obtenidos para granate. Los cationes fueron calculados con base en 12 oxígenos.

Muestra	Granate														
	12-SACZ-31a			12-SACZ-31a			12-SACZ-31b			13-SACZ-17			13-SACZ-17		
	Grt1 - 41 análisis			Grt2 - 20 análisis			19 análisis			Grt1 - 59 análisis			Grt2 - 45 análisis		
	Rep.	Promedio		Rep.	Promedio		Rep.	Promedio		Rep.	Promedio		Rep.	Promedio	
	Óxido	Óxido	Cationes	Óxido	Óxido	Cationes	Óxido	Óxido	Cationes	Óxido	Óxido	Cationes	Óxido	Óxido	Cationes
SiO ₂	38,94	38,79	3,06	39,37	39,28	3,05	38,20	38,11	3,06	37,99	38,17	3,06	37,96	37,94	3,05
TiO ₂															
Al ₂ O ₃	21,35	21,28	1,98	21,52	21,63	1,98	20,53	20,76	1,96	21,24	21,11	1,99	21,00	20,99	1,99
FeO	28,07	28,62	1,89	29,73	29,49	1,92	29,11	28,40	1,91	32,56	32,01	2,14	32,09	32,20	2,17
MnO	2,25	1,95	0,13	1,05	1,07	0,07	3,32	3,23	0,22	4,06	4,62	0,31	4,37	3,99	0,27
MgO	4,77	4,92	0,58	5,34	5,43	0,63	2,65	2,68	0,32	2,95	2,79	0,33	2,77	2,88	0,34
CaO	3,90	3,64	0,31	3,52	3,66	0,30	5,26	5,74	0,49	1,19	1,23	0,11	1,26	1,36	0,12
Na ₂ O															
K ₂ O															
Cr ₂ O ₃															
Total	99,26	99,20		100,53	100,56		99,08	98,93		99,99	99,92		99,45	99,35	
Prop. Molar	Rep	Promedio		Rep	Promedio		Rep	Promedio		Rep	Promedio		Rep	Promedio	
Xgrs	0,114	0,106		0,101	0,104		0,153	0,168		0,035	0,036		0,037	0,040	
Xalm	0,640	0,650		0,663	0,656		0,662	0,648		0,749	0,740		0,745	0,747	
Xprp	0,194	0,199		0,212	0,215		0,108	0,109		0,121	0,115		0,115	0,119	
Xsps	0,052	0,045		0,024	0,024		0,077	0,075		0,095	0,108		0,103	0,094	

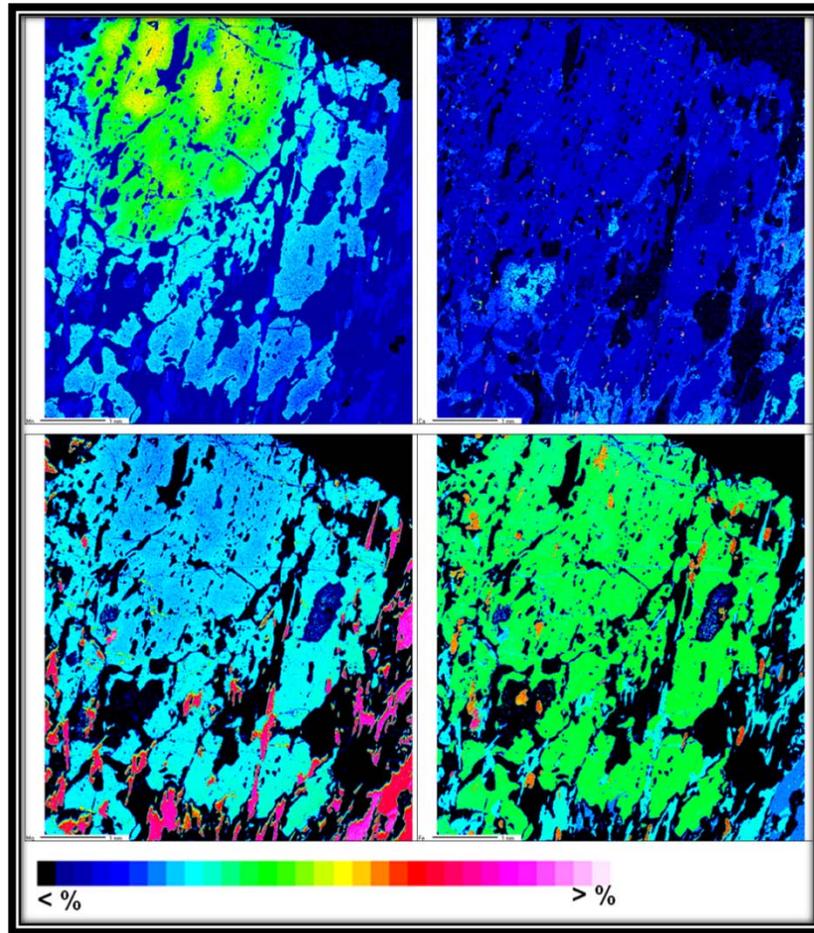


Figura 18. Mapas composicionales de rayos X para Mn – Ca – Mg – Fe respectivamente, en granate zonado con inclusiones (tipo Grt1).

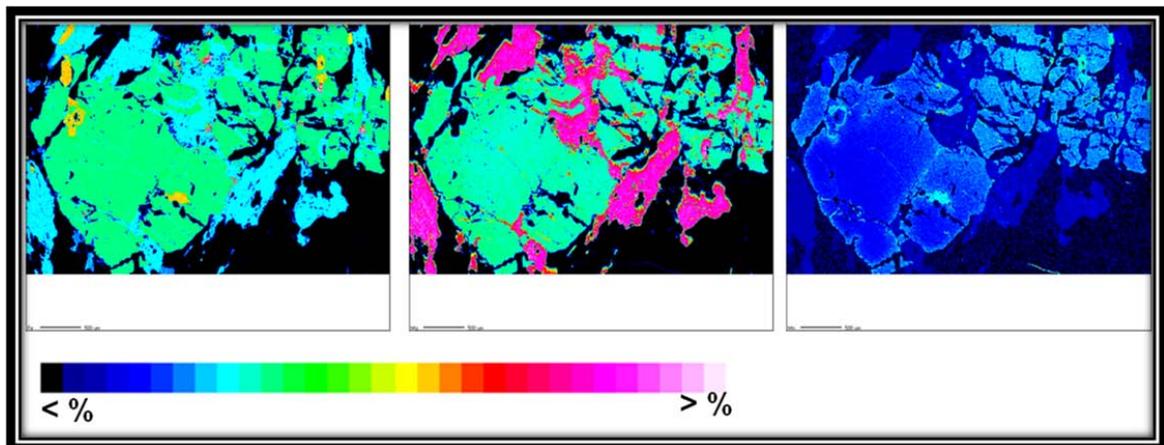


Figura 19. Mapas composicionales de rayos X para Fe – Mg – Mn respectivamente, en granate débilmente zonado sin inclusiones (tipo Grt2).

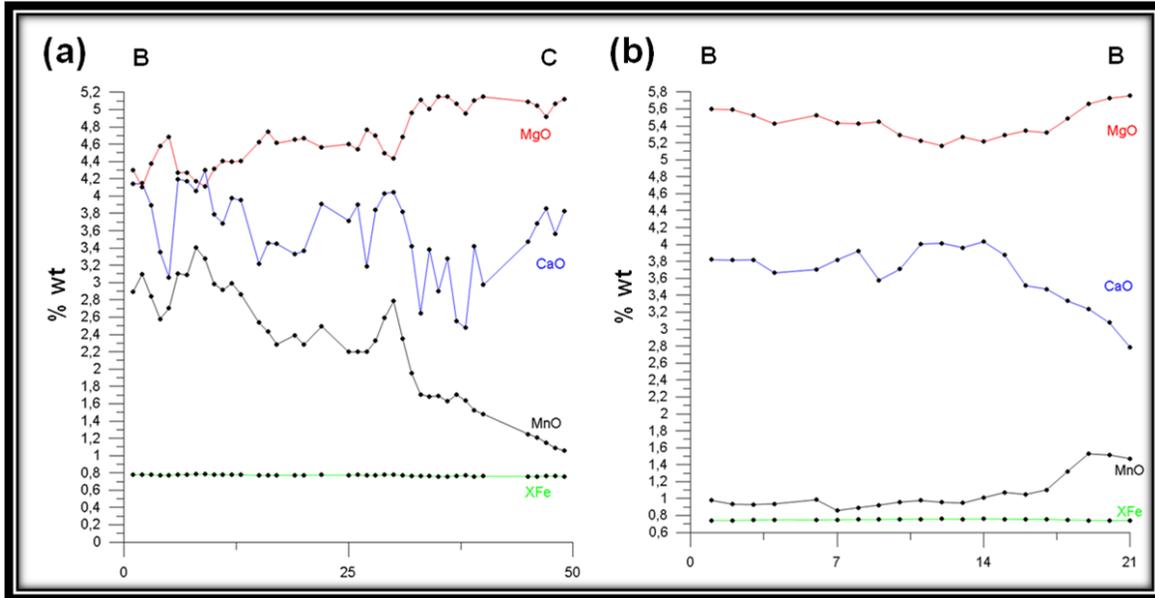


Figura 20. Distribución de elementos a lo largo de perfiles composicionales para granates. (a) Perfil de borde a centro en granate zonado (tipo Grt1). (b) Perfil de borde a borde en granate débilmente zonado (tipo Grt2)

Los cristales con buen desarrollo de la zonación se caracterizan por altos contenidos de Mn hacia el núcleo y bajos contenidos hacia el borde, contrario al comportamiento del Mg (Figura 20a). En una segunda muestra del sector de Vetas – Berlín (anfibolita granatífera, muestra 12-SACZ-31b), los granates, predominan en zonas leucocráticas y no presentan zonación por homogenización completa (Figura 21). Estos granates son más ricos en calcio (Figura 22) y con menos magnesio que los granates de los neises (muestra 12-SACZ-31a). En las rocas aflorantes al E de Berlín, se encontraron granates, (con y sin inclusiones) que se caracterizan por contenidos de Ca muy bajos en contraste con los de las anfibolitas y altos contenidos de Mn, generalmente desarrollan de zonación inversa (Figura 23a). En estos granates se observan núcleos amplios con poca variación y bajos contenidos de Mn, y bordes ricos en Mn y pobres en Mg. Estas características, son típicas de zonamiento por difusión que ocurre a temperaturas superiores a 600°C, durante el proceso de difusión los granates sufren una modificación de su composición y en la fase retrógrada se forman bordes ricos en Mn; el Ca y el Fe tienen una distribución más homogénea (Figura 23b).

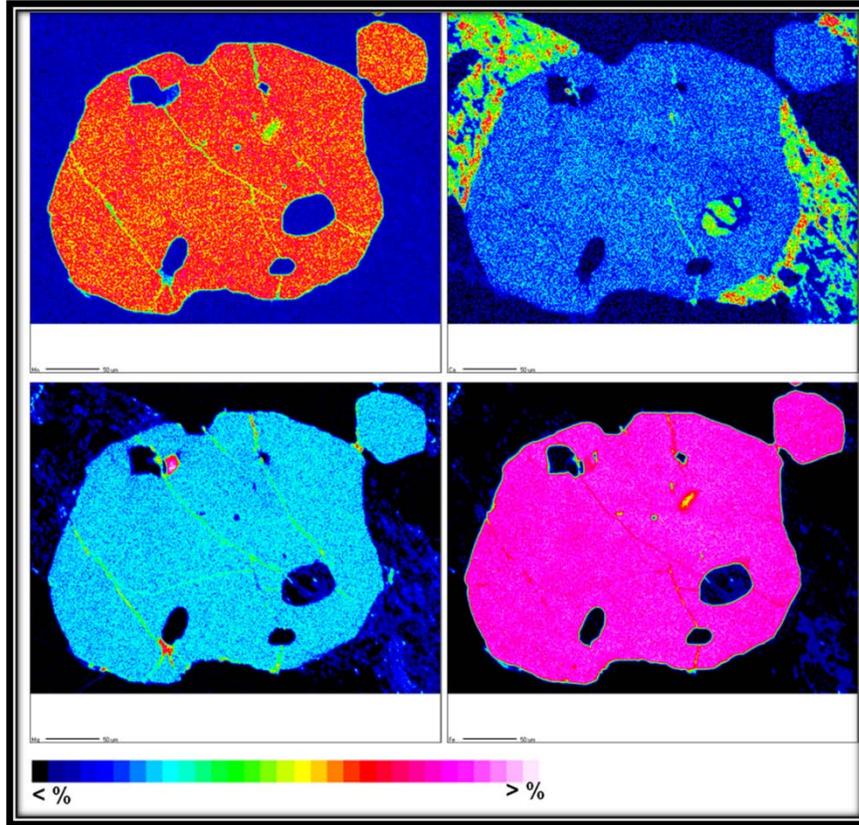


Figura 21. Mapas composicionales de rayos X para Mn – Ca – Mg – Fe respectivamente, en granate homogenizado (muestra 12-SACZ-31b).

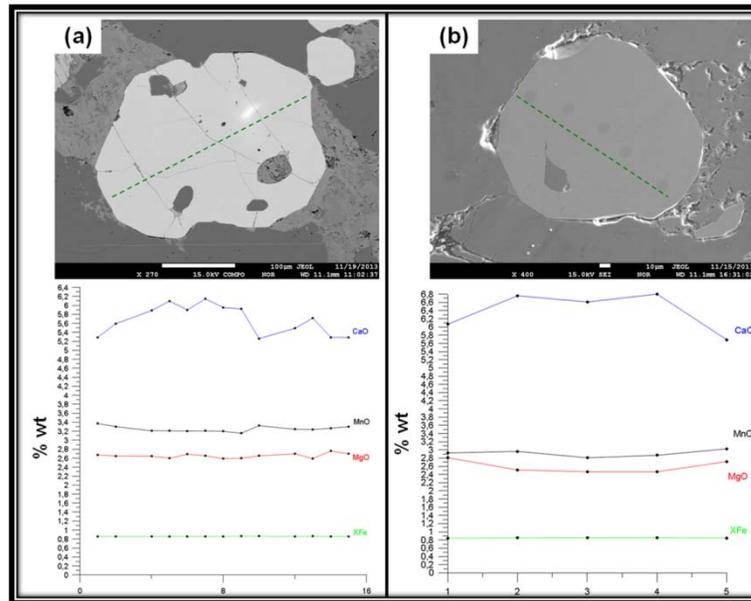


Figura 22. Distribución de elementos a lo largo de perfiles composicionales para granates homogenizados. (a) Perfil de borde a borde en granate con inclusiones. (b) perfil de borde a borde en granate sin inclusiones.

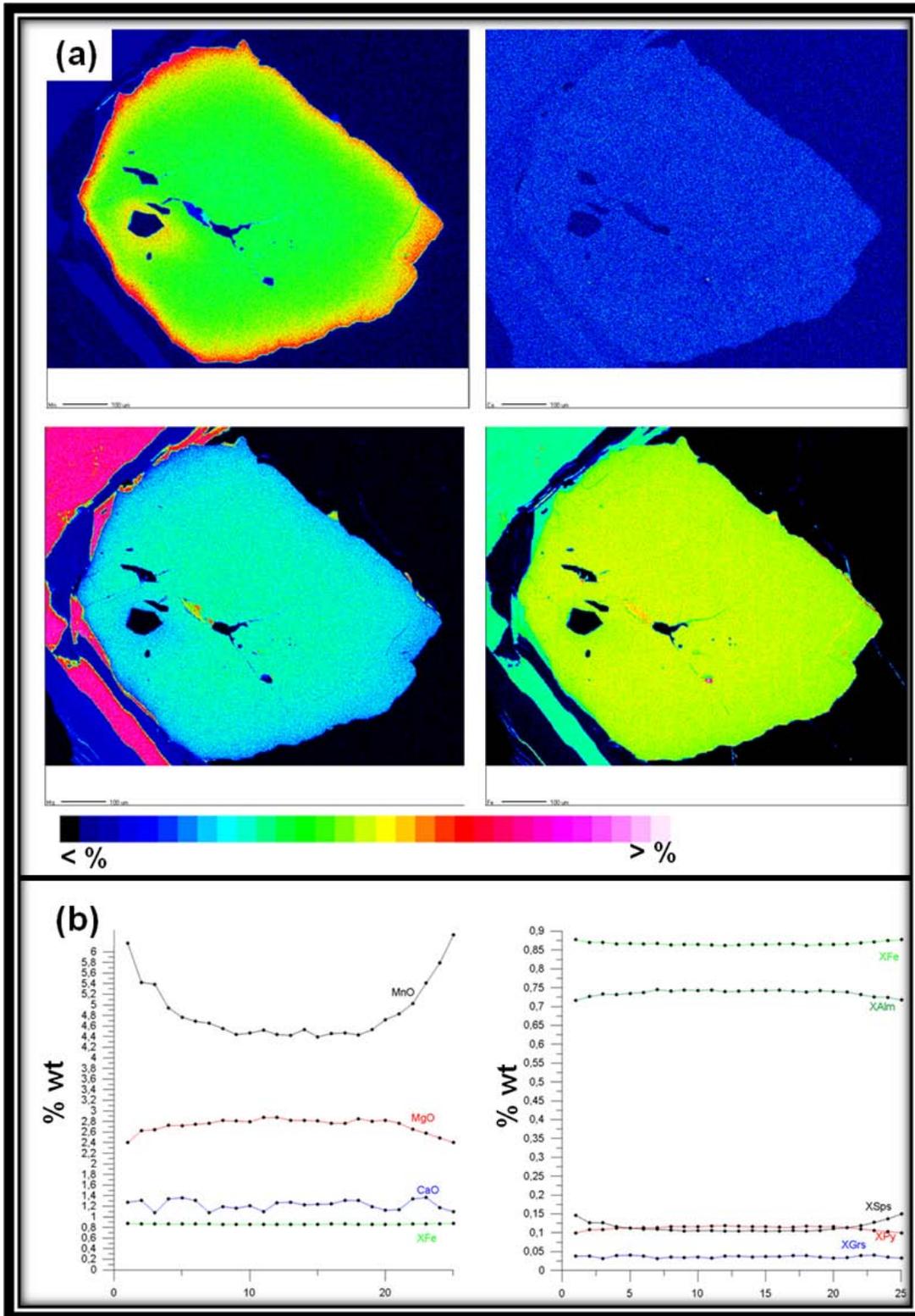


Figura 23. (a) Mapas composicionales de rayos X para Mn – Ca – Mg – Fe respectivamente, en granate con zonación inversa (b) Distribución de elementos y proporciones de miembros extremos a lo largo del perfil composicional de borde a borde.

Plagioclasa: dentro de las muestras analizadas se observaron algunas variaciones en la composición entre andesina y bytownita (An_{30} - An_{80}), que es observada tanto en leucosomas como en mesosomas, siendo ambos de composición muy similar (Tabla 3). Sin embargo, en las rocas néisicas al E de Berlín, la plagioclasa es tipo oligoclasa (An_{17}) y en general la roca se caracteriza por bajos contenidos de Ca (Figura 24a). No es común que se encuentren zonadas, pero en la muestra 12-SACZ-31a se observa zonamiento composicional en el que se presentan núcleos con contenidos de Na superiores a los del borde (tipo andesina - An_{30} hacia el núcleo y bytownita - An_{80} hacia el borde; Figura 24b), lo cual representa una zonación de tipo inverso que posiblemente se originó por la descomposición del anfíbol en reacciones continuas, que toman lugar con el aumento del grado de metamorfismo.

Anfíbol: en las anfibolitas y los neises hornbléndicos el anfíbol es principalmente magnesio-ferrohornblenda; en las anfibolitas granatíferas la proporción de Fe es mayor. En contraste, el anfíbol que se encuentra en los neises cuarzo-feldespáticos de silimanita, biotita, granate y anfíbol se caracteriza por contenidos muy bajos de aluminio (<3%, Tabla 3), y se clasifica como *dannemorita*, que es una cummingtonita rica en Mn (por reemplazamiento del Fe y el Mg). De acuerdo con Deer *et al.* (1992) este mineral se encuentra comúnmente asociado a formaciones de hierro que han sufrido metamorfismo de moderado a alto grado y se presenta en anfibolitas pobres en calcio de protolito ígneo básico; en esta roca el empobrecimiento relativo de Ca se evidencia también en los granates, en los que se predomina el contenido de Mg sobre el Ca (Figura 20).

Clinopiroxeno: fue analizado en las anfibolitas del área de Vetas, corresponde principalmente a augita, con una proporción de Fe (Ferro-silita - $Fs_{-10\%}$) menor al contenido de Ca y Mg correspondientes a wollastonita ($Wo_{38-47\%}$) y enstantita ($En_{40-44\%}$, Tabla 3). Es posible que su formación se deba a la descomposición del anfíbol, en la transición de la facies anfibolita a granulita.

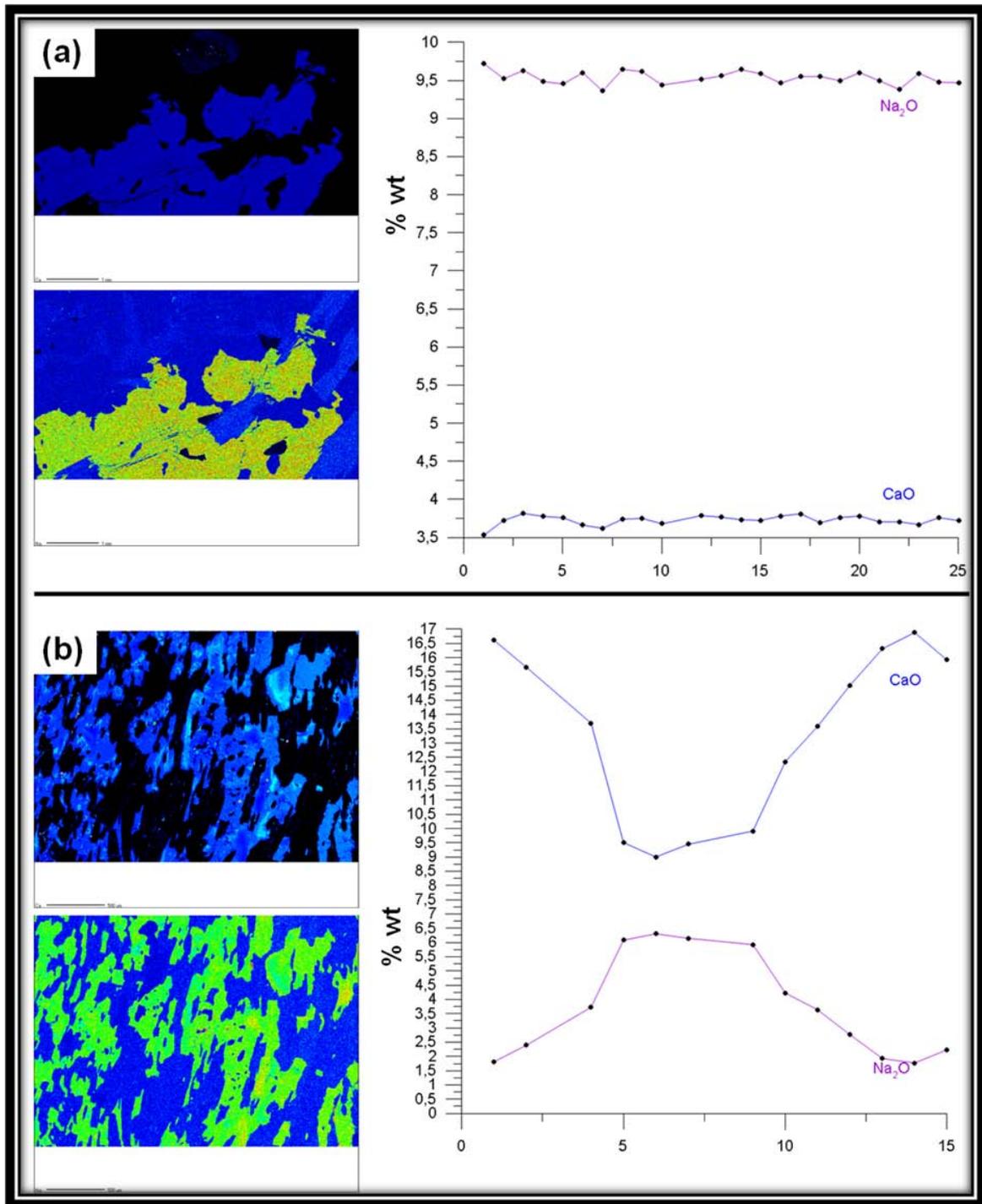


Figura 24. (a) Mapas composicionales de rayos X para Ca y Na, respectivamente y perfil composicional de borde a borde para plagioclasa An₁₇ no zonada. (b) Mapas composicionales de rayos X para Ca y Na, respectivamente y perfil composicional de borde a borde para plagioclasa An₃₀₋₈₀ con zonación inversa.

Biotita: en rocas del sector norte de Vetas - Berlín se caracteriza por presentar un alto contenido de Mg (Tabla 4), y de Ti (>3%), responsables de la coloración marrón rojizo en rocas de ese sector; sin embargo, es más común que el contenido de Fe predomine sobre el de Mg. Hacia el SW, en los sectores de Cepita y Umpalá la biotita tiene una coloración verde-café y los análisis muestran una disminución en el contenido de Ti. Estas diferencias pueden deberse tanto a cambios composicionales del protolito como a cambios en las condiciones de temperatura. También, cabe resaltar el importante contenido de MgO en la biotita que supera el 10% y podría ser interpretado como de alta temperatura, inclusive llegando a facies granulita.

Muscovita: fue analizada para la muestra ubicada al E de Berlín (13-SACZ-17), en el neis cuarzo-feldespático con biotita, muscovita, silimanita y granate; tiene contenidos importantes de Fe y Ti (alcanzan más del 1% cada uno. Tabla 4). El contenido de Ti puede estar relacionado a condiciones de más alta temperatura.

Cordierita: La composición encontrada es típica de rocas metamórficas en condiciones P-T similares al del Neis de Bucaramanga, donde predomina levemente la proporción de Mg con respecto al Fe (Tabla 4).

Los óxidos corresponden principalmente a ilmenita y teniendo en cuenta la ausencia de magnetita, se infiere que el contenido de Fe³⁺ en estas rocas es muy bajo y no estaría presente en minerales como la biotita y el piroxeno.

Tabla 4. Resumen de los resultados de química mineral obtenidos para biotita, muscovita y cordierita. Los cationes fueron calculados con base en 11 oxígenos para biotita y muscovita y 18 oxígenos para Cordierita

Muestra	Biotita - Muscovita - Cordierita														
	12-SACZ-31a			13-SACZ-17			13-SACZ-17			2012-18-CU			2012-18-CU		
	Bt - 21 análisis			Bt - 33 análisis			Ms - 55 análisis			Bt - 2 análisis			Cd - 13 análisis		
	Rep.	Promedio		Rep.	Promedio		Rep.	Promedio		Rep.	Promedio		Rep.	Promedio	
	Óxido	Óxido	Cationes	Óxido	Óxido	Cationes	Óxido	Óxido	Cationes	Óxido	Óxido	Cationes	Óxido	Óxido	Cationes
SiO ₂	37,23	37,69	2,773	35,11	34,65	2,640	46,01	46,17	3,120	35,21	35,21	2,660	48,50	48,04	3,054
TiO ₂	4,11	3,97	0,220	3,38	3,50	0,201	1,14	0,89	0,045	3,97	3,97	0,226	0,00	0,01	0,001
Al ₂ O ₃	16,29	15,59	1,355	19,49	19,65	1,766	33,83	33,76	2,691	18,73	18,73	1,669	33,00	32,86	2,464
FeO	14,81	15,36	0,945	20,46	20,35	1,297	1,46	1,47	0,083	18,55	18,55	1,172	7,58	7,49	0,398
MnO	0,08	0,04	0,002	0,18	0,21	0,013	0,01	0,01	0,000				0,46	0,35	0,019
MgO	14,61	14,65	1,607	7,87	7,85	0,891	0,66	0,69	0,069	9,50	9,50	1,070	7,96	7,93	0,751
CaO	0,02	0,12	0,009	0,02	-0,01	0,000	0,00	0,00	0,000	0,08	0,08	0,007	0,06	0,03	0,002
Na ₂ O	0,46	0,47	0,068	0,31	0,31	0,046	0,88	0,88	0,115	0,20	0,20	0,029	0,45	0,38	0,047
K ₂ O	8,83	8,15	0,767	9,18	9,19	0,893	9,90	9,85	0,849	9,51	9,51	0,916	0,02	0,01	0,001
Cr ₂ O ₃										0,03	0,03	0,002		0,00	0,000
H ₂ O	4,08	4,07		3,95	3,94		4,44	4,44		3,97	3,97		2,38	2,36	
Total	100,51	100,11		99,95	99,66		98,33	98,15		99,74	99,74		100,42	99,45	
Prop. Molar	Rep	Promedio		Rep	Promedio		Rep	Promedio		Rep	Promedio		Rep	Promedio	
XFe	0,363	0,370		0,593	0,593					0,523	0,523		0,348	0,347	
XMg	0,637	0,628		0,407	0,407		0,445	0,456		0,477	0,477		0,652	0,654	
Parag.							0,115	0,115							

3.2 Termobarometría

El metamorfismo de las rocas del Neis de Bucaramanga ha sido interpretado como de condiciones de presión media y alta temperatura, en facies anfibolita alta en la zona de la silimanita (García *et al.*, 2005; Urueña-Suárez & Zuluaga, 2011; Amaya, 2012) dentro. Sin embargo, la ausencia de datos netamente cuantitativos no ha permitido establecer el pico del metamorfismo para las diferentes litologías.

A partir de la asociación mineral en equilibrio y por medio del programa *THERMOCALC* se establecen reacciones entre miembros finales de las fases minerales presentes, las cuales son expresadas en términos de actividades que han sido calculadas con base en constantes termodinámicas para cada especie mineral; generando una serie de reacciones independientes que representan geobarómetros y geotermómetros con un espacio común en el diagrama P vs. T, indicador de la presión y temperatura de equilibrio en la roca.

Las estimaciones de presión y temperatura para cada una de las muestras estudiadas se presentan en la Tabla 5, junto con las reacciones que tienen lugar. Adicionalmente, se realizaron algunas estimaciones usando calibraciones para reacciones geotermómetros y geobarómetros independientes dentro de las que se encuentran reacciones de intercambio iónico, como Granate - Biotita, Granate - Anfíbol y Anfíbol - Plagioclasa - Cuarzo y reacciones de transferencia de masa como "GASP" Granate - Aluminosilicato - Plagioclasa - Cuarzo, Granate - Plagioclasa - Biotita - Muscovita, Granate - Muscovita - Biotita - Silimanita - Cuarzo y Granate - Plagioclasa - Hornblenda - Cuarzo. Con estas calibraciones se obtuvieron valores para T y P menores a los calculados en *THERMOCALC*, probablemente correspondan a condiciones posteriores al pico de metamorfismo y no equivalen a las condiciones del pico de metamorfismo debido evidencias de homogeneización, ya que no se toman en cuenta demás las fases minerales en cada reacción.

Dadas estas condiciones (Figura 25) es posible establecer que el metamorfismo del Neis de Bucaramanga ocurre a presión entre 6.5 a 7 Kbar en un rango de temperatura entre 670 y 810 °C siendo la temperatura más alta estimada para rocas de composición más máfica; es posible que estas altas temperaturas hayan sido alcanzadas durante el evento de migmatización relacionado en algunos casos a fusión parcial y sugiriendo que las rocas se encuentran en la transición a facies granulita.

Tabla 5. Estimaciones de Presión y temperatura obtenidas en THERMOCALC a partir de las reacciones en equilibrio, para cada muestra. (Abreviaturas minerales ver anexo D)

Muestra 12-SACZ-31a							
Litología Neis cuarzo-feldespático con biotita, anfíbol, silimanita y granate							
Reacción	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)	
1) ts + cumm + 2gr + 4q = 2tr + 4an	-3,95	2,29	-0,16	7,29	13,40	3,07	
2) 3tr + 2py + 4sill + 2q = 3cumm + 6an	125,85	3,00	-0,22	10,02	2,39	2,87	
3) 5tr + py + 9sill = 4cumm + 10an + H2O	324,08	4,57	-0,44	15,07	-1,93	4,35	
4) 6tr + 21an = 10py + 11gr + 27q + 6H2O	418,69	4,63	0,49	-48,14	-70,06	13,59	
5) 3a + 4py = 3cumm + 4alm	-71,98	3,16	0,02	-1,85	8,58	2,40	
6) 3gl + 4py + 10q = 3cumm + 6abh + 4sill	68,81	3,41	-0,27	12,57	15,24	4,61	
7) 7tr + 7ts + 14alm + 28q = 8cumm + 6grun + 28an	544,20	20,50	-0,87	53,33	0,49	12,94	
8) tr + east + py + 4q = ts + cumm + san	16,02	2,20	-0,01	1,39	-1,76	3,78	
9) ts + 2gr + san + 4sill = phl + 8an	100,88	2,63	-0,31	12,57	13,30	4,24	
10) 7tr + 2parg + 16sill = 4ts + gl + 4cumm + 10an	342,34	9,63	-0,33	13,84	-16,89	203,78	
11) 3grun + 9ann + 24an = 16alm + 8gr + 9san + 12H2O	257,03	11,61	0,30	-55,29	-15,24	31,49	
12) 14obi + 7py + 28q = 5cumm + 2grun + 7east + 7san	-17,03	7,27	0,06	10,65	-15,49	24,31	
13) 18cumm + 25ann + 80abh + 20sill = 40gl + 3b + 20alm + 25san	-2387,54	45,24	4,16	-137,57	-74,82	99,67	
P		6,5 ± 1,7 kbar					
T		675 ± 68 °C					
Muestra 12-SACZ-31b							
Litología Anfíbolita con granate							
Reacción	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)	
1) ts + cumm + 2gr + 4q = 2tr + 4an	66,38	0,00	0,00	0,01	-7,41	9,46	
2) 3ts + 2py + 4gr + 12q = 3tr + 12an	561,45	18,62	-0,66	0,63	8,68	13,68	
3) 5ts + 3gr + 11q = 3tr + 13an + 2H2O	736,50	21,85	-0,48	-2,48	-20,92	23,45	
4) 6grun + 21an = 14alm + 7gr + 27q + 6H2O	346,67	15,01	-0,61	16,71	22,66	9,61	
5) 5tr + 5ts + 10alm + 20q = 4cumm + 6b + 20an	-354,31	12,81	-0,14	-1,53	60,49	19,66	
6) 3ts + 7a + 6gr + 12q = 6tr + 4grun + 12an	-34,42	0,79	0,00	-0,47	4,26	1,31	
7) 2parg + 4cumm + 6an = 3tr + 2ts + gl + 4py	-111,74	5,94	0,31	-12,80	-14,44	8,10	
8) parg + py + 6q = cumm + abh + 2an	721,37	16,92	0,53	-42,04	-112,02	35,42	
P		7,0 ± 0,5 kbar					
T		795 ± 126 °C					
Muestra 13-SACZ-17							
Litología Neis cuarzo-feldespático con biotita, muscovita, silimanita y granate							
Reacción	a	sd(a)	b	c	ln_K	sd(ln_K)	
1) gr + 2sill + q = 3an	-11,71	0,70	0,13	-7,07	-6,73	1,99	
2) 3east + 6q = phl + py + 2mu	38,43	1,59	-0,24	10,64	12,99	3,96	
3) 11phl + 12sill = 7east + 5py + 4cel	241,19	3,03	0,21	-22,51	-34,92	8,75	
4) phl + 3an = py + gr + mu	56,75	2,06	0,01	-6,52	-1,90	2,26	
5) 7phl + 12an = 3east + 5py + 4gr + 4san + 4H2O	158,65	5,43	0,08	-9,69	-20,88	6,34	
6) ann + 3east + 6q = 2phl + alm + 2mu	128,65	5,43	0,08	-9,69	-15,94	3,90	
7) 29phl + 4ann + 36sill = 21east + 15py + 12fcel	99,75	4,60	0,11	-9,51	-17,58	4,81	
8) 3obi + py = 3phl + alm	6,73	1,27	0,04	-3,55	-1,40	1,54	
9) 3east + 2abh + 6q = phl + py + 2pa + 2san	38,63	1,52	0,04	-5,35	-5,41	2,30	
P		6,8 ± 1,0 kbar					
T		669 ± 69 °C					

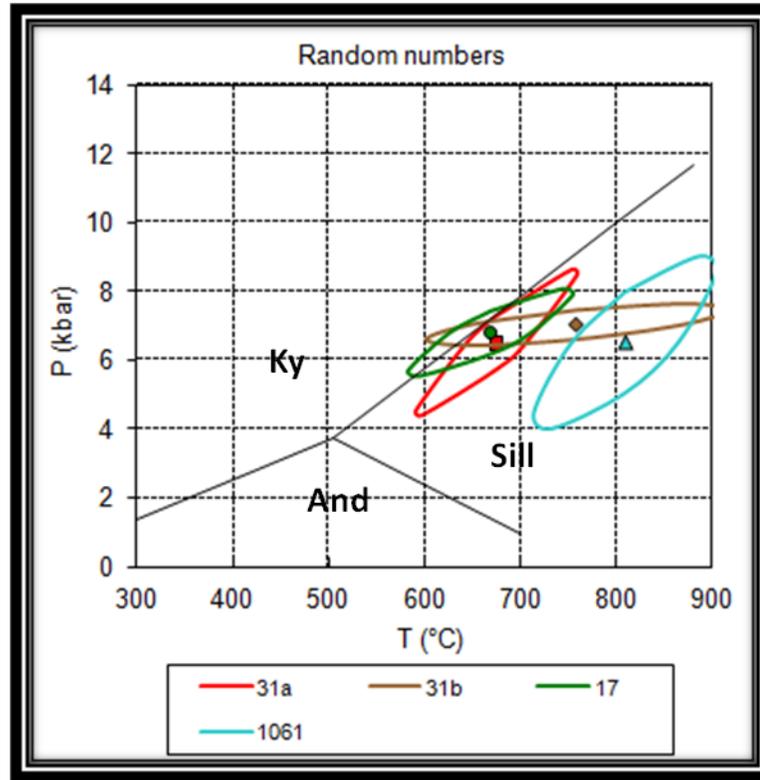


Figura 25. Diagrama Presión – Temperatura con los resultados obtenidos con la rutina “average PT” de THERMOCALC para las muestras analizadas (12-SACZ-31a – 31b, 13-SACZ-17 y CLU-1061).

En una posible interpretación de la evolución del metamorfismo en el Neis de Bucaramanga teniendo en cuenta las características minerales y composicionales que se presentan en respuesta a las condiciones bajo las cuales estuvieron sometidas estas rocas, se establecen al menos 3 etapas: (I) *fase prógrada inicial*, aumento de temperatura y presión, evidenciada por cristalización de granates en equilibrio con la biotita, plagioclasa y posiblemente con el anfíbol tipo cumingtonita, desarrollo de zonación característica de granates con núcleos enriquecidos en Mn en cristales poquiblastísticos con inclusiones orientadas; y plagioclasas con un aumento del contenido de anortita hacia los bordes, por reacciones que ocurren en el paso de facies epidota-anfibolita a anfibolita. (II) *fase prógrada final*, con un aumento de temperatura en condiciones isobáricas, etapa en la cual alcanza el pico de metamorfismo, cristalización de clinopiroxeno; durante esta etapa también ocurre la homogenización por difusión en granates. (III) *fase retrograda*, se reconoce por bordes enriquecidos en Mn en granates que exhiben zonación inversa, cloritización en fracturas.

3.3 Geoquímica de Roca Total

La composición química de las rocas del Neis de Bucaramanga (Tabla 6) con respecto a elementos mayores es representada en diagramas Harker (Figura 26), los cuales permiten definir variaciones de Al_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 y $\text{FeO}_{\text{total}}$ con respecto al SiO_2 . En estos diagramas se observa una relación inversa para la mayoría de los elementos, los diagramas de Na_2O y K_2O presentan gran dispersión y el de P_2O_5 tiene un comportamiento constante.

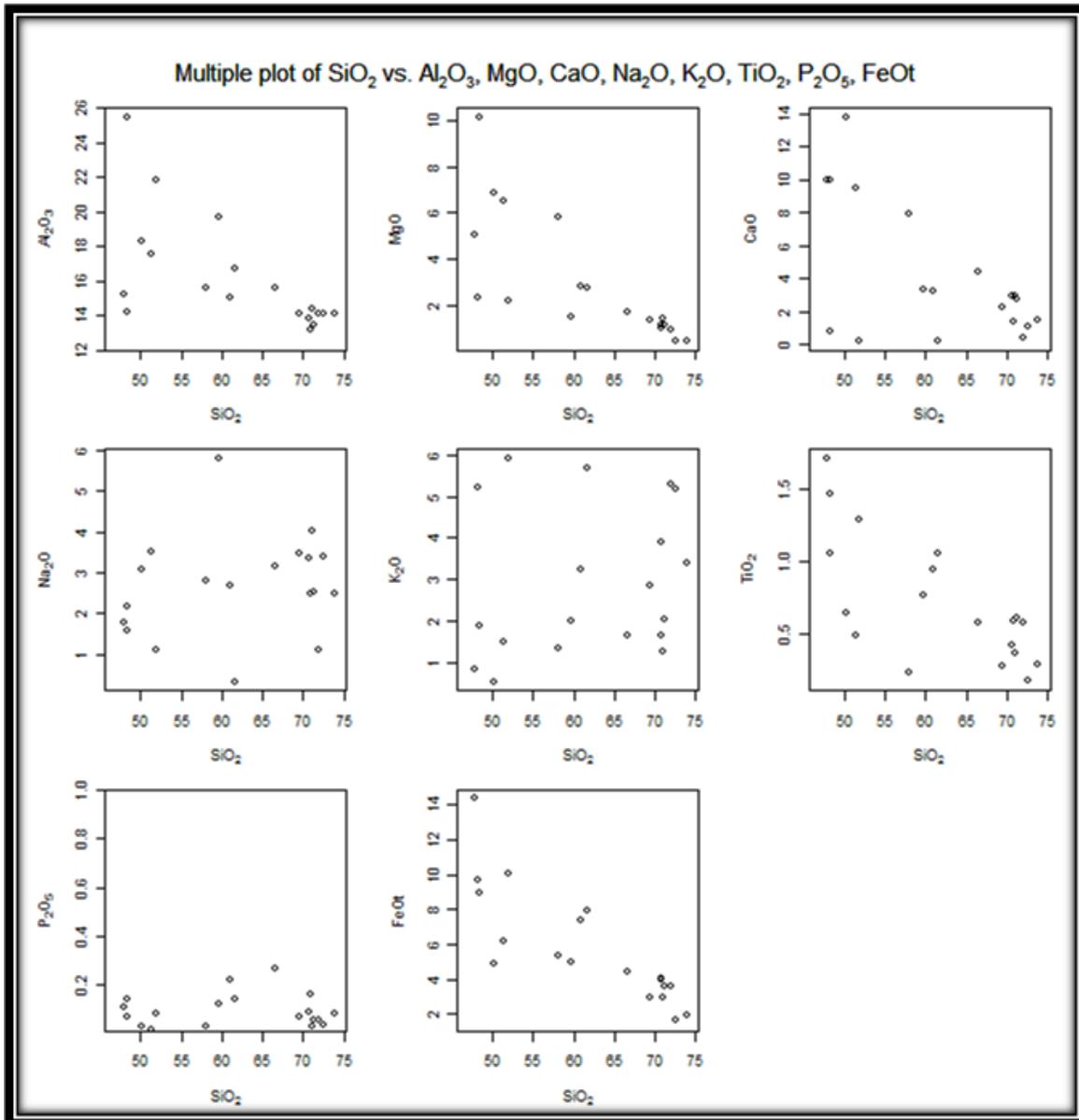


Figura 26. Diagrama Harker para elementos mayores. Variación de Al_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 y $\text{FeO}_{\text{total}}$ con respecto al SiO_2 .

MUESTRA COD.	ELEMENTO %wt																	NUCZ-ID (Leucosoma) 111	NUCZ-ID (Mesosoma) 112
	C11109-NB-06	C11109-NB-07	C11109-NB-09	07SACZ15	07SACZ17	CLU-1052	CLU-1055	CLU-1056	CLU-1059	CLU-1061	CLU-1062	CLU-1063	CLU-1065	CLU-1066	10SACZ-6C	10SACZ-10	NUCZ-18		
	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	108	109	110	111	112
SiO ₂	70,81	48,26	59,69	51,94	73,88	61,6	71,24	71,94	60,91	50,21	51,35	65,55	47,86	58,06	70,72	69,43	72,55	71,05	48,33
Al ₂ O ₃	13,19	25,5	19,66	21,82	14,09	16,71	13,46	14,09	15,08	18,3	17,6	15,61	15,22	15,61	13,81	14,12	14,13	14,42	14,17
Fe ₂ O ₃	4,51	10,78	5,54	11,14	2,15	8,86	4,02	3,99	8,26	5,4	6,92	4,88	15,97	5,92	4,4	3,28	1,84	3,28	9,92
MgO	1,04	2,33	1,49	2,22	0,46	2,76	1,13	0,97	2,83	6,85	6,53	1,71	5,03	5,79	1,13	1,36	0,47	1,46	10,12
CaO	1,37	0,82	3,35	0,27	1,49	0,23	2,74	0,38	3,22	13,77	9,54	4,43	10,02	7,95	2,92	2,31	1,08	2,99	10
Nb ₂ O	2,51	1,59	5,81	1,1	2,49	0,33	2,52	1,12	2,67	3,09	3,52	3,17	1,77	2,82	3,35	3,49	3,4	4,03	2,17
K ₂ O	3,92	5,22	2,01	5,91	3,4	5,68	2,07	5,28	3,25	0,56	1,51	1,66	0,87	1,35	1,67	2,87	5,17	1,27	1,88
TiO ₂	0,58	1,47	0,76	1,29	0,28	1,06	0,61	0,57	0,94	0,64	0,49	0,57	1,71	0,23	0,42	0,27	0,17	0,36	1,06
P ₂ O ₅	0,16	0,14	0,12	0,08	0,08	0,14	0,06	0,06	0,22	0,03	0,02	0,27	0,11	0,03	0,09	0,07	0,04	0,03	0,07
MnO	0,08	0,1	0,06	0,14	0,04	0,17	0,06	0,04	0,1	0,1	0,17	0,08	0,2	0,15	0,05	0,06	0,03	0,06	0,19
Cr ₂ O ₃	0,006	0,019	0,018	0,015	0,003	0,013	0,006	0,005	0,012	0,049	0,035	0,011	0,003	0,031	0,003	<0,002	<0,002	0,004	0,078
LOI	1,6	3,5	1,3	3,8	1,5	2,2	1,9	1,4	2,2	0,8	2,1	0,9	1	1,9	1,3	2,6	1	1	1,7
TOTAL	99,79	99,74	99,81	99,7	99,85	99,79	99,83	99,81	99,71	99,78	99,79	99,86	99,73	99,81	99,87	99,85	99,91	99,92	99,75

Tabla 6. Compilación de la composición química para las rocas del Neis de Bucaramanga con respecto a elementos mayores. (LOI: Pérdida por ignición en cada muestra). El código es el identificador en los diagramas de discriminación de protolito.

El Neis de Bucaramanga se ha descrito como una secuencia de rocas metasedimentarias teniendo en cuenta aspectos estructurales y en especial las asociaciones mineralógicas en las rocas; de estas se infiere una procedencia de rocas pelíticas y samíticas, destacando la presencia de aluminosilicatos (silimanita), abundancia de minerales micáceos y cuarzo-feldespáticos; no obstante, para rocas como los neises hornbléndicos y anfibolitas que presentan asociaciones minerales de composición más ferro-magnesiana la definición del protolito es menos obvia.

La información obtenida con la petrografía y química mineral aporta argumentos para asociar estas rocas, por ejemplo, a un origen vulcanosedimentario - sedimentario con aporte volcánico e inclusive no se descarta el protolito ígneo. En búsqueda de refinar y realizar una definición adecuada del protolito los análisis de geoquímica en roca total (Tabla 6) son proyectados en diagramas de discriminación de protolitos ígneos y sedimentarios para rocas metamórficas. Una primera aproximación es presentada en el diagrama de Werner (1987) que se basa en las relaciones MgO/CaO y P_2O_5/TiO_2 (Figura 27), en el cual es posible diferenciar entre una proveniencia ígnea y sedimentaria. Aunque algunas muestras se pueden asociar claramente a un campo del diagrama, varias se localizan próximas al límite, por lo cual se utilizaron otros diagramas como el propuesto por La Roche (1968) que se basa en las proporciones milicatiónicas de Al-Fe-Ti y Ca-Mg (Figura 28). En el diagrama de La Roche (1968) se observa una clara predominancia de protolitos tipo grauvacas: la mayoría de anfibolitas del sector de Vetas, incluyendo la anfibolita con clinopiroxeno (muestra 1061- 95), se ubican en el campo de andesitas y basaltos; sin embargo, hay una de las muestras que se encuentra en la zona de grauvacas calcáreas. Un segundo diagrama, propuesto por Leake (1964) que utiliza los parámetros c (CaO) y mg ($MgO / (FeO+MgO+MnO)$), conocidos como números de Niggli (Figura 29) muestra que para el mismo conjunto de rocas se diferencian entre rocas de afinidad pelítica y otras de proveniencia ígnea, que corresponden a anfibolitas, no es evidente que exista una mezcla de rocas calcáreas en este diagrama.

Para las muestras de afinidad sedimentaria también se empleó el diagrama de Herrón (1988) (Figura 30) para determinar la variedad de la roca sedimentaria, encontrándose que los protolitos sedimentarios correspondían a shales, grauvacas y arcosas; las muestras ubicadas en el campo de Fe-Shale corresponden a las muestras en las que determinó protolito ígneo.

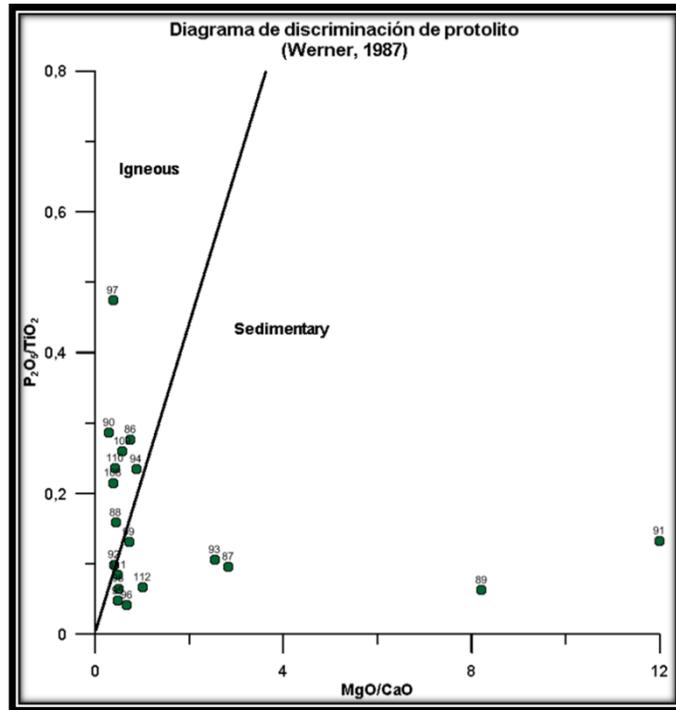


Figura 27. Diagrama de Werner (1987) para discriminación general de protolito entre rocas ígneas y sedimentarias.

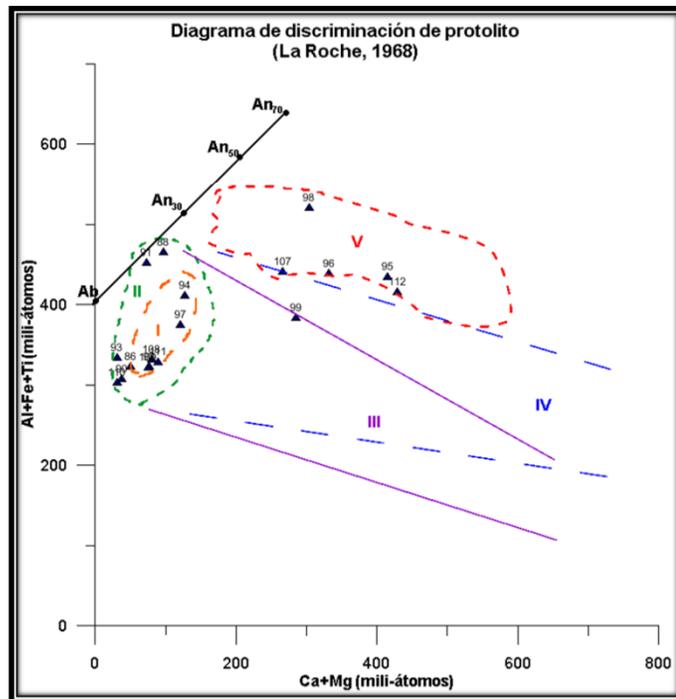


Figura 28. Diagrama de La Roche (1968) para discriminación del tipo de protolito. I. Grauvas. II. Subgrauvas. III. Grauvas dolomíticas. IV. Grauvas dolomíticas metamorfosadas. V. Basaltos-andesitas.

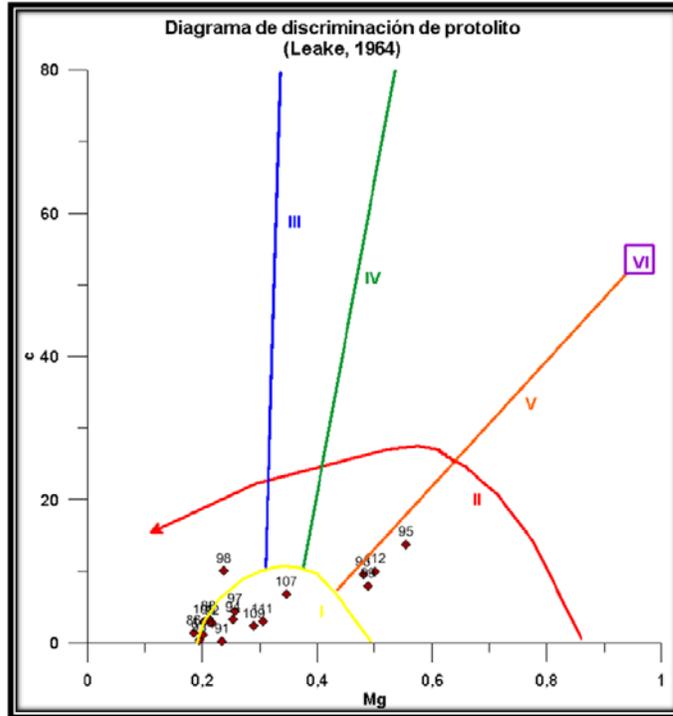


Figura 29. Diagrama de Leake (1964) para discriminación del tipo de protolito. I Rocas pelíticas. II. Rocas ígneas. III. Rocas calcáreas. IV. Zona de mezcla de rocas calcáreas-pelíticas. V. Zona de mezcla de rocas pelíticas-dolomíticas. VI. Dolomitas.

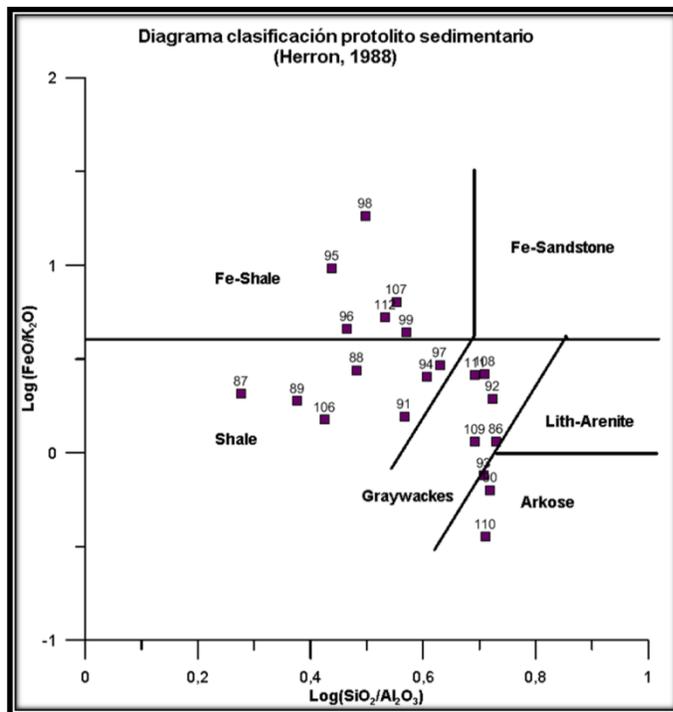


Figura 30. Diagrama de Herrón (1988) para discriminación entre protolitos sedimentarios.

4. Termocronología

Para el Neis de Bucaramanga se han realizado dataciones mediante el uso de diferentes métodos geocronológicos a fin de determinar la edad del evento regional de metamorfismo (Ward *et al.*, 1973), eventos sobre impuestos (Cardona *et al.*, 2010) e inclusive la edad del protolito (Restrepo-Pace *et al.*, 1997). Otros trabajos desarrollados con el propósito de estudiar la evolución tectono-estratigráfica de cuencas y estructuras relacionadas al Macizo de Santander, incluyen datos de termocronología, principalmente trazas de fisión en apatitos (van der Lelij, 2013; Caballero *et al.*, 2013; Pimentel, 2009; Shagam *et al.*, 1984) y algunas edades en circones (van der Lelij, 2013; Shagam *et al.*, 1984). Sin embargo, ninguno de estos estudios se ha concentrado en definir la evolución térmica posterior al metamorfismo de las rocas de Neis de Bucaramanga, cuyos datos también aportan información para entender la evolución del Macizo de Santander.

En este trabajo se presentan edades de trazas de fisión obtenidas en circones a partir de 5 muestras seleccionadas de las diferentes áreas de estudio, las cuales permiten complementar y realizar una comparación con la información existente sobre los eventos de exhumación relacionados al macizo de Santander. Teniendo en cuenta que se trata de termocronología de baja temperatura, las edades obtenidas son representativas del último evento en el que estas rocas pasaron por la temperatura de cierre del circón, en el rango de borrado parcial de huellas de 180 a 260°C (Bernet, 2009); debido a que las rocas han estado sometidas a temperaturas mucho más altas se produce borrado total de trazas generadas en eventos previos.

Aunque se separaron apatitos de 5 muestras correspondientes a neises cuarzo-feldespáticos con biotita y silimanita, y de una muestra de anfibolita de las diferentes áreas de estudio, extendidas desde el sector más sur (en Cepita) hacia el norte (en Vetas); no se obtuvieron edades debido a que los cristales son poco abundantes y luego de realizar el ataque químico no revelaron un número significativo de trazas.

4.1 Trazas de Fisión en Circón

La edad es calculada a partir de la razón entre las trazas de fisión espontáneas (Ns), contadas en un área cuadrada definida sobre el grano, y las trazas inducidas (Ni) por el flujo de neutrones térmicos, contadas sobre un área igual del detector externo libre de uranio (Figura 31a), la constante de decaimiento del uranio y el factor de corrección zeta; aunque no todos los cristales son aptos para realizar el conteo, debido a la cantidad de trazas que contienen (Figura 31b). Dicha cantidad de trazas depende principalmente de la concentración de uranio en el mineral y también del tiempo de ataque químico al que fue sometida la muestra.

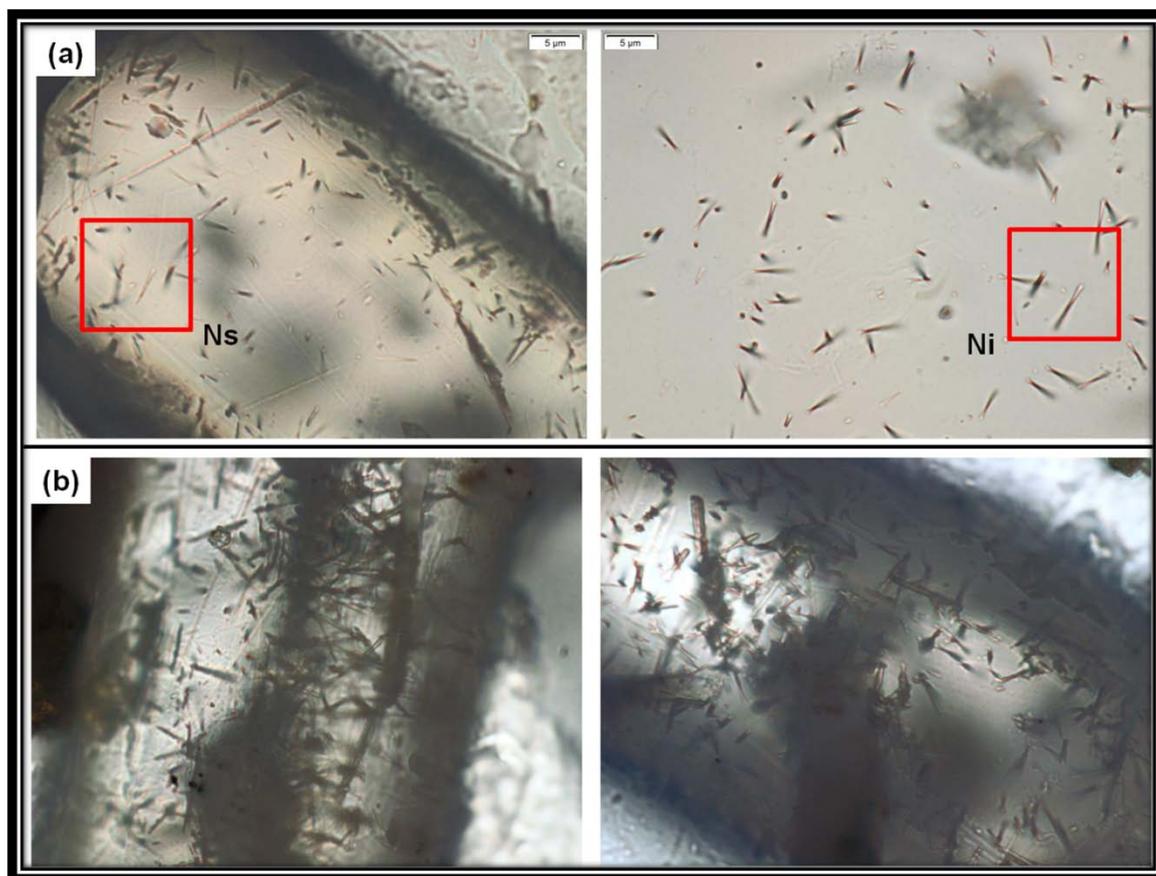


Figura 31. (a) Trazas espontáneas (Ns) en el cristal de circón (izq.) y trazas inducidas (Ni) sobre el detector de mica (der.); el recuadro rojo muestra el área de conteo. (b) Cristal con alto contenido de uranio hacia el núcleo y muchos defectos cristalinos que no permiten realizar un conteo adecuado (izq.) y cristal que presenta zonación y no tiene una distribución homogénea de trazas, así que no se toma en cuenta para el análisis (der.).

La de temperatura de cierre es definida como la temperatura en el momento correspondiente a la edad medida (Dodson, 1973), para el circón esta temperatura se

encuentran en el rango entre 175°C y 300°C (Harrison *et al.*, 1979) y se conoce como la zona de *annealing*, donde las trazas serán preservadas parcialmente; cuando la roca que contiene los circones sobrepasa la temperatura, las trazas no se preservan y por lo tanto, hay un reseteo del registro de eventos anteriores de menor temperatura. En este caso, debido a que las rocas han alcanzado altas temperaturas, el registro de las trazas de fisión corresponde al último evento en el que la roca alcanzó la temperatura de cierre del circón. En algunos casos es posible encontrar más de un evento de acuerdo con las poblaciones de trazas, esto depende tanto de la temperatura de los eventos como del contenido de uranio; cuando este contenido es alto se produce una mayor cantidad de trazas, debido al decaimiento de más átomos de ^{238}U y por lo tanto, los cristales tienden a sufrir un mayor daño en su estructura.

El conteo de las trazas se realizó en el Laboratorio de Trazas de Fisión del Servicio Geológico Colombiano, que cuenta con un Microscopio Olympus BX-51, acoplado con la unidad de magnificación U-CA, intercambiable y lente óptico con aumentos de 1X, 1.25X, 1.6X, y 2X, y dispositivo de dibujo de referencia U-DA. El sistema está adaptado al sistema FTStage desarrollado por Trevor Dimitru, que cuenta con una platina motorizada en X y Y con soporte para secciones 4"x3 y una tabla digitalizadora marca CAIcomp DrawingBoard IV (DBIV) de 12 x 12 pulgadas con un cursor de 16 botones con luz LED. Todo el sistema es manejado por el software FTStage 4. El análisis se hace a una magnificación de 1250 aumentos. Los cálculos de edad se realizaron con el programa BinomFit para Windows Versión 1.1 (Stewart & Brandon, 2004), este algoritmo calcula las edades e incertidumbres de distribuciones de edades concordantes y mixtas. Para la determinación de la densidad de trazas espontáneas e inducidas el valor de zetaCN1 usado fue 185.65 ± 6.24 .

Los circones para análisis de trazas de fisión fueron separados de 5 muestras, correspondientes a neises cuarzo-feldespáticos con biotita y biotita - silimanita de las diferentes áreas de estudio, extendidas desde el sector más sur (en Cepita) hacia el norte (en Vetas); en general, estas rocas contienen una gran cantidad de circones con formas cristalinas euhedrales y subherales (sub-redondeados), en su mayoría son de color rosado claro, con inclusiones y zonación, Figura 32.

En la Tabla 7, se resume la edad obtenida, el contenido de uranio, número de trazas espontáneas (Ns) e inducidas (Ni) y granos contados para cada muestra; se consideran

incertidumbres simétricas y para una de las muestras con valor de $\chi^2 = 0.5\%$, se considera una población no homogénea definiendo dos picos para la edad.

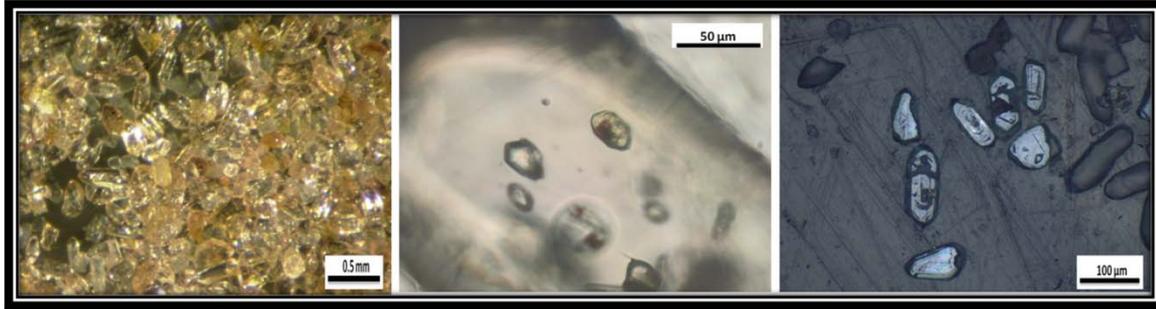


Figura 32. Cristales de circón separados para el análisis de trazas de fisión (izq). Cristal con inclusiones cristalinas (centro). Montaje de circones pulidos en teflón mostrando zonación (der.).

Tabla 7. Edades obtenidas por análisis de trazas de fisión en circones para las rocas del Neis de Bucaramanga (Rhos: densidad de trazas espontáneas por cm^2 , Ns: trazas espontáneas, Rhol: densidad de trazas inducidas por cm^2 , Ni: trazas inducidas, U: concentración de uranio, $P\chi^2$: probabilidad del test *chi cuadrado* con un intervalo de confianza del 95%.)

MUESTRA	LITOLÓGÍA	ESTE	NORTE	GRANOS	Rhos	Ns	Rhol	Ni	U (ppm)	$P\chi^2$	Edad (Ma)	\pm (Ma)
CLU-1052 (V)	Neis cuarzo feldespático	1134535	1300636	19	2,14E+06	254	2,89E+06	343	552	0,5	11,3	2,7
CLU-1052 (V)	biotítico	1134535	1300636	19	2,14E+06	254	2,89E+06	343	552	0,5	27	6,1
07SACZ-15 (B)	Neis con sillimanita y biotita	1108441	1279843	11	3,07E+06	223	3,08E+06	224	587	63,9	19,3	3,9
07SACZ-17 (B)	Neis con sillimanita y biotita	1112234	1278033	29	2,89E+06	745	2,32E+06	600	442	50,7	24	3,1
CIII09-NB-06 (C)	Neis cuarzo feldespático con bitita y muscovita	1125618	1238001	8	3,62E+06	171	2,20E+06	104	417	60,6	31,9	8,2
CIII09-NB-09 (C)	Neis cuarzo feldespático biotítico	1124778	1239530	40	3,75E+06	1028	2,13E+06	584	404	32,6	34,2	4,3

Los análisis de trazas de fisión permitieron determinar la edad relacionada al último evento de exhumación de los diferentes bloques donde aflora el Neis de Bucaramanga. En el bloque occidental, que se encuentra limitando con la Falla de Santa Marta – Bucaramanga se encontró que las edades más antiguas, alrededor de ± 30 M.a, se localizan hacia el sur (sector Cepitá); mientras que hacia el norte (Sector de Bucaramanga) las edades se encuentran alrededor de ± 22 M.a. Figura 33.

Para el bloque central, en el área de Vetas la distribución de edad es bimodal (Figura 33a); donde los circones con menor cantidad de uranio registran un evento a aproximadamente 27 M.a relacionado al evento tectónico de exhumación y un segundo evento a aproximadamente 11 M.a., registrado en circones con altos contenidos de uranio (> 450 ppm), el cual se ha considerado que corresponde al evento hidrotermal relacionado con las mineralizaciones de oro en este sector.

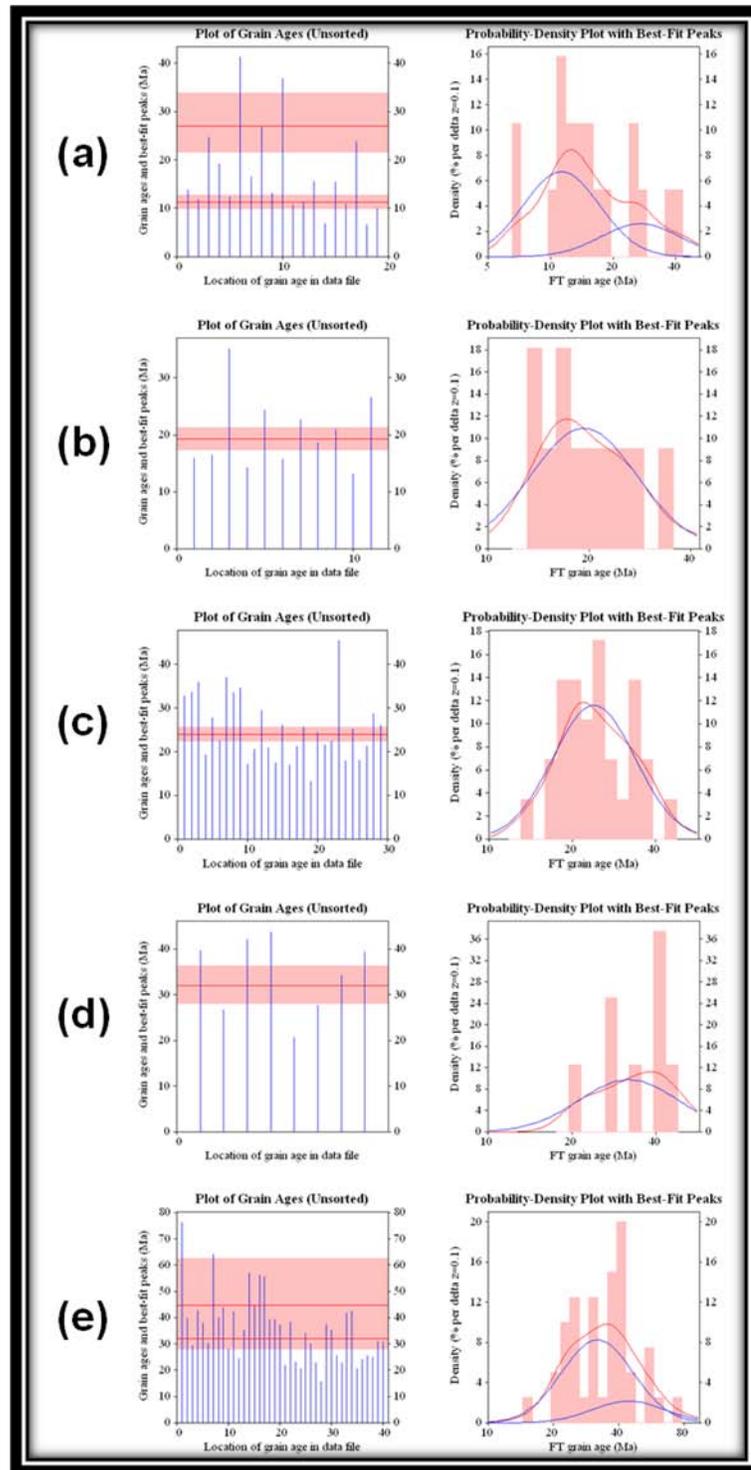


Figura 33. Histogramas de frecuencia para la determinación de edades obtenidas con el programa FTStage4 para las 5 muestras analizadas. De norte a sur (a) sector de Vetas, dos edades pico a 27 y 11 M.a. (b) y (c) Sector de Bucaramanga, edades alrededor de 22 M.a. (d) y (e) Sector de Cepitá, edades alrededor de 30 M.a., el último diagrama contiene dos picos completamente traslapados y el valor $P\chi^2 > \alpha$ a 5% indica que corresponde a una sola población.

Estudios de inclusiones fluidas llevados a cabo previamente, indican que la temperatura del fluido mineralizante se encuentra entre 250 y 330°C (Rojas, 2013), correspondiente con la temperatura de cierre del circón; en la Figura 34 se presentan las temperaturas de homogenización de las inclusiones fluidas atrapadas durante tres de los eventos mineralizantes y un evento post-mineralizante, definidos por Rojas (2013). De acuerdo con estos resultados es posible sugerir que la información obtenida de trazas de fisión corresponde al evento mineralizante 3, puesto que el evento 2 es de alta temperatura y pudo provocar borrado total de trazas generadas durante el evento 1, el cual se encuentra en el mismo rango de temperatura del evento 3. Adicionalmente, dataciones recientes de la mineralización por el método Ar/Ar en sericita registran edades entre 10 y 9 M.a. (Rojas, *en prensa*); soportando la información registrada en los circones.

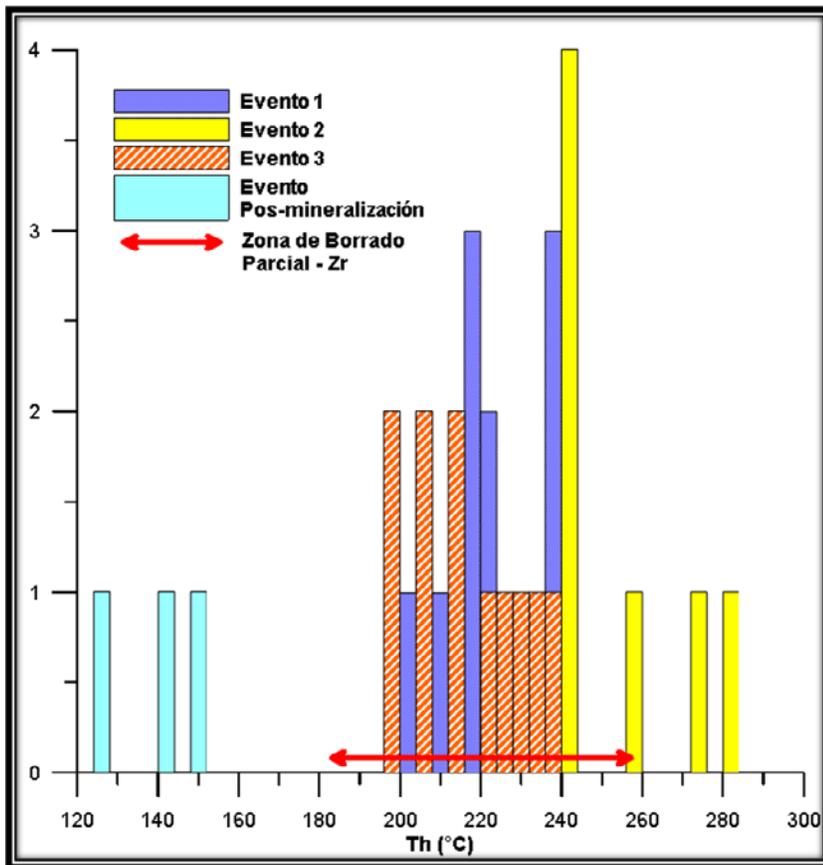


Figura 34. Resultados de análisis de microtermometría (Rojas, 2013) en inclusiones fluidas para rocas del sector de Vetas. Histograma de frecuencia para la temperatura de homogenización (Th en °C) de las inclusiones; se observa que las temperaturas del evento mineralizante 1 y 3 coinciden con la zona de borrado parcial de trazas en circón; sin embargo, el evento 2 de mayor temperatura posiblemente borro por completo las trazas del evento 1, de tal forma que la edad obtenida corresponde al evento mineralizante 3.

En este caso las edades más antiguas se encuentran relacionadas con circones de menor contenido de uranio, mientras que el evento hidrotermal solo se encuentra registrado en circones con altos contenidos de uranio, en la Figura 35 se observa la relación inversa.

En el mapa (Figura 36) se observa la distribución y la variabilidad de las edades obtenidas; las edades de exhumación determinadas para la zona de Bucaramanga y Vetas se ubican en el Oligoceno – Mioceno; hacia el sur en el sector de Cepitá, donde hay mayor evidencia de la tectónica compresiva, estas edades se extienden hasta finales del Eoceno.

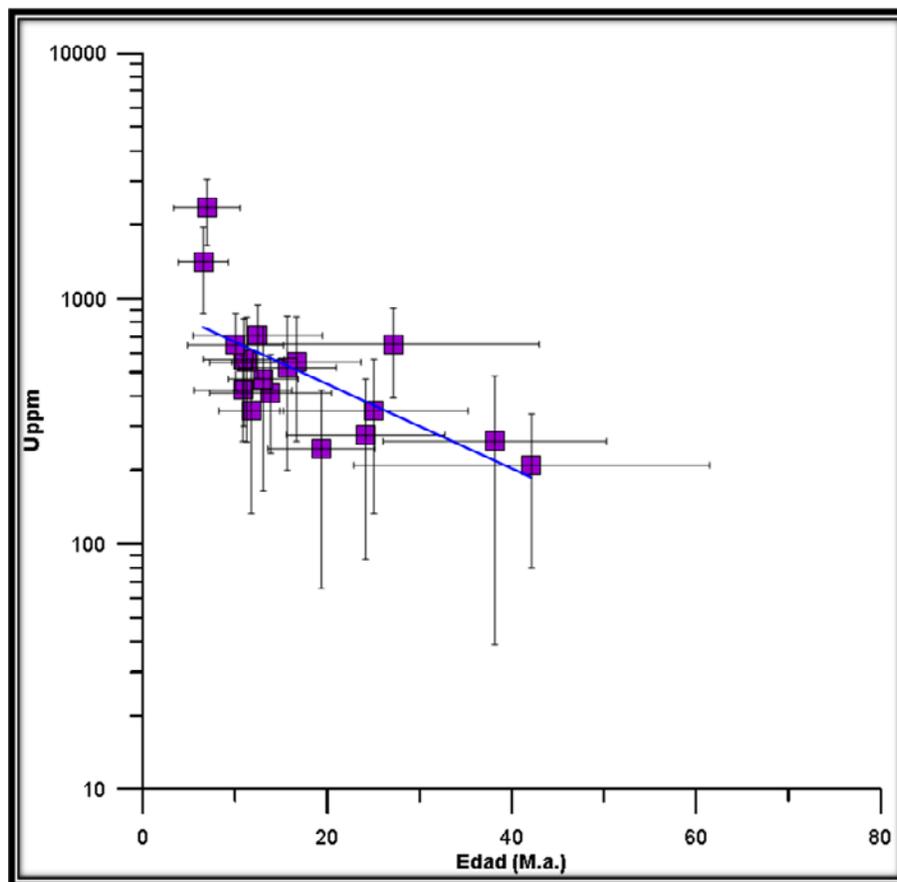


Figura 35. Relación entre la concentración de uranio (U en ppm) y la edad obtenida para la muestra del sector de Vetas (CLU-1052), con base en las trazas de fisión de los circones analizados. Se observa que a mayor contenido de uranio se registran edades más recientes, mientras que cristales con bajos contenidos de uranio no registran el evento hidrotermal.

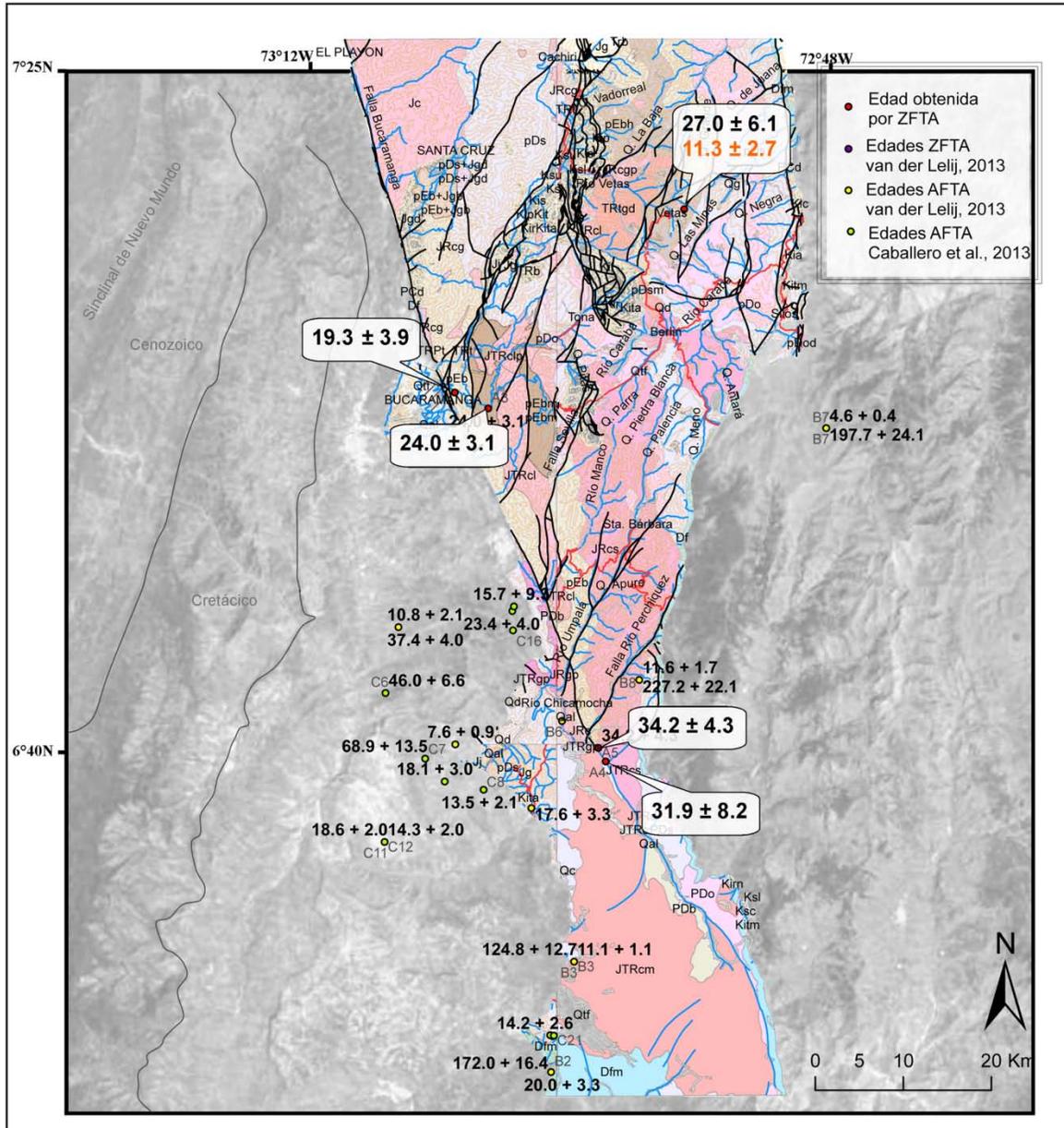


Figura 36. Mapa con la distribución de edades de exhumación obtenidas en este estudio para el Neis de Bucaramanga (recuadros blancos) en las localidades de Cepitá, Bucaramanga y Vetas; en rojo se resalta la edad obtenida para el evento hidrotermal. Adicionalmente el mapa contiene edades reportadas por diferentes autores en estudios previos. (ZFTA: análisis de trazas de fisión en circon y AFTA: análisis de trazas de fisión en apatitos). (Mapa geológico compilado de los cuadrángulos H12 Bucaramanga, H13 Pamplona y plancha 136 Málaga, Ingeominas 1976-77)

5. Discusión de Resultados

La recopilación de información obtenida mediante los diferentes análisis permitieron establecer aspectos genéticos como proveniencia y condiciones bajo las cuales ocurre el metamorfismo, además del proceso de exhumación más reciente del Neis de Bucaramanga; este conjunto de datos da una idea de la evolución general del Macizo de Santander.

Este trabajo permitió identificar problemas cartográficos regionales que deben conducir al replanteamiento de contactos entre unidades y el papel de las estructuras geológicas del área (este trabajo no se hizo aquí, pero se listan algunos puntos problemáticos abajo). Por ejemplo, en la concepción planteada por Ward *et al.* (1973), el Neis de Bucaramanga se define como una litología con una asociación de minerales que indica un metamorfismo tipo *Bosost* (comúnmente denominado tipo Abukuma o de alto gradiente térmico; Miyashiro, 1994) caracterizado por la ausencia de cianita y aluminosilicatos de baja presión y alta temperatura, esta definición fue utilizada en la cartografía de la zona para excluir de esta unidad las rocas que se encuentran aflorando al E del Neis de Bucaramanga en la zona del Páramo de Berlín (fueron cartografiadas como Esquistos de Silgará). Sin embargo, las litologías mencionadas son semejantes tanto textural como composicionalmente a las rocas que al NE de Bucaramanga (sector del Ciruelo) son cartografiadas como Neis de Bucaramanga, con la diferencia que las primeras contienen granate.

Otro ejemplo es la Falla de Bucaramanga que se ha considerado como límite para el macizo (García *et al.*, 2005); sin embargo, de acuerdo con la cartografía y las evidencias en campo se observa que los Esquistos de Silgará también afloran al W de la falla. Adicional a esto, los sectores donde la falla tiene un comportamiento inverso como ocurre al S del municipio de Cepitá, se encuentran bloques separados por cuerpos intrusivos en contactos fallados; que litológicamente corresponden a neises cuarzo feldespáticos con

silimanita y biotita, que desarrollan texturas migmatíticas pero, que de acuerdo con el mapa geológico también son cartografiados como rocas de los Esquistos de Silgará.

En cuanto al origen y evolución del Neis de Bucaramanga las características petrográficas y geoquímicas permiten establecer inicialmente un protolito principalmente sedimentario (pelitas, arcosas y las denominadas grauvacas, por algunos autores). De acuerdo con los diferentes diagramas de discriminación (Werner, 1987; La Roche, 1968; Leake, 1964 & Herrón, 1988). Para algunas muestras, especialmente las anfibolitas, se encontró una proveniencia ígnea, al igual que para neises que contienen anfíboles pobres en aluminio que ocurren típicamente en rocas con alto contenido de hierro; sin embargo, en algunos casos la tendencia no es tan clara y las litologías se ubican en los límites de los campos de los diagramas (ver Figura 27).

De acuerdo con los resultados de geoquímica en roca total se propone que las rocas que dieron origen al Neis de Bucaramanga consisten posiblemente en una sucesión vulcano-sedimentaria, en la que hay intercalación de episodios volcánicos y rocas inmaduras composicional y texturalmente, en las que se destaca un alto contenido de fosfato; sugiriendo distintas fuentes de aporte de material; posiblemente como litoarenitas, sublitoarenitas o sub-arcosas, siguiendo la clasificación de Folk (1980) para rocas sedimentarias que se basa en los aspectos composicionales y es independiente de las características texturales. Para una mayor certeza de los protolitos aparentemente ígneos en el Neis de Bucaramanga, sería apropiado realizar análisis geoquímicos en los neises hornbléndicos.

Algunos autores como Restrepo-Pace *et al.* (1997) y Cordani *et al.* (2005) reportaron edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y U/Pb (SHRIMP en circones) desde 1500 a ~800 M.a. para el protolito, las cuales están muy próximas a la edad del Neis de 945 ± 40 M.a. reportada por Ward *et al.* (1973) con base en K – Ar; sin embargo, van der Lelij (2013) propone una edad para el evento metamórfico de 505 a 472 M.a., de acuerdo con datos obtenidos por el método de U/Pb en circones; adicionalmente, hace una correlación con datos isotópicos de Pb y geoquímica de roca total, que le permiten establecer que el basamento cristalino del Macizo de Santander se deriva de una corteza con características similares a la de los Andes de Mérida, y es compatible isotópicamente con el Cratón Amazónico y el Escudo de la Guyana, sugiriendo un lapso de tiempo mayor entre la posible edad del protolito y el evento metamórfico.

En las rocas del Neis de Bucaramanga la paragénesis estable: granate \pm plagioclasa \pm cuarzo \pm silimanita \pm biotita \pm anfíbol \pm muscovita no permite hacer conclusiones de las condiciones de presión y temperatura. Los cálculos de termobarometría para el pico de metamorfismo arrojan valores para el Neis de $675 \pm 68^\circ\text{C}$ (neises cuarzo-feldespáticos con biotita, granate, silimanita, anfíbol o muscovita) y $670 - 810^\circ\text{C}$ (anfíbolitas con clinopiroxeno o granate), en ambos casos se obtuvo una presión entre 6.5 a 7 Kbar. Éstas rocas han sido afectadas por migmatización (fusión parcial e inyección; Amaya, 2012), lo que probablemente ocasiono una modificación en la composición química y distribución de los elementos de algunas fases (e.g., granate) y es posible que la temperatura estimada sea menor a la del pico de metamorfismo. Las evidencias de que las rocas alcanzaron altas temperaturas durante el metamorfismo se encuentran en diferentes minerales y apuntan a que las rocas entran en la transición a facies granulitas.

Dentro de las características mineralógicas asociadas a la fase prógrada del metamorfismo se encuentra zonación normal en porfiroblastos de granate que contienen inclusiones generalmente alineadas con la foliación y en algunos casos indicando movimientos de rotación. La zonación inversa observada en plagioclasa es atribuida a metamorfismo alta temperatura donde es mayor el fraccionamiento y se facilita la difusión (Shelley, 1993); con el aumento de la temperatura hacia facies anfíbolita disminuye la abundancia de epidota y clorita que eventualmente desaparecen, mientras el contenido de plagioclasa aumenta y se forman bordes cada vez más cálcicos por la descomposición de la epidota (Best, 2003); sin embargo, el contenido de anortita en la plagioclasa también depende del crecimiento de granate que involucra calcio en su estructura. Para las rocas del Neis de Bucaramanga se estima que la concentración de calcio en el protolito era bastante alta y por ende las plagioclasas alcanzan contenidos de An_{80} , sin embargo para los neises cuarzo-feldespáticos con biotita, granate, silimanita y muscovita que afloran al E de Berlín el bajo contenido de anortita (An_{30}) se atribuye a la composición del protolito.

La fase de migmatización probablemente se desarrolló durante un evento de aumento de temperatura en condiciones prácticamente isobáricas; puesto que, las estimaciones de presión no varían significativamente con respecto a las altas temperaturas durante esta fase ($>640^\circ\text{C}$), las cuales permitieron procesos de difusión que dieron lugar a la homogenización de granates en las rocas del Neis de Bucaramanga (ver por ejemplo Esteban *et al.*, 2005). Esto implica que allí las estimaciones termobarométricas

corresponderían a las condiciones de re-equilibrio subsecuentes a la migmatización. Existen también otras características mineralógicas y químicas relacionadas con la transición de las rocas a facies granulita como: contenidos de Ti en muscovita que pueden estar asociados a condiciones de más alta temperatura; biotita rica en Mg con altos contenidos de Ti y donde el Fe^{2+} corresponde al Fe_{total} ; los granates de rocas en facies granulitas tienen un mayor contenido de calcio (a diferencia de granates en metapelitas y semipelitas; Indares & Martignole, 1985).

En esta transición de facies anfibolita a granulita el cambio es gradacional, ocurren reacciones continuas a medida que aumenta la temperatura, por ejemplo: la hornblenda y la biotita solo permanecen en la parte baja de la facies granulita; la hornblenda se caracteriza petrográficamente por pleocroísmo café relacionado con los altos contenidos de Ti (Best, 2003); luego aparecen las fases anhidras, y en el caso de que el protolito sea relativamente cálcico dará lugar a la formación de clinopiroxeno por descomposición de la hornblenda; ésta característica es evidenciada en las anfibolitas con clinopiroxeno del sector de Vetas.

Posiblemente algunos productos de la deshidratación y fusión parcial corresponden a leucosomas formados por cuarzo y plagioclasa rica en sodio y en los neises cuarzo-feldespáticos con biotita, granate, silimanita y anfíbol del sector de Vetas presencia de granates tanto zonados como no zonados.

La fase retrógrada para las rocas del Neis de Bucaramanga se evidencia por formación de bordes de granate ricos en Mn, que exhiben un típico zonamiento por difusión generado después de la homogenización y re-equilibrio de la fase mineral. Otros procesos ocurridos durante esta fase es la cloritización de granate, hornblenda y biotita, así como la alteración en algunos minerales (plagioclasa, cordierita, silimanita) y el desarrollo de simplectitas y mirmequitas, que ocurren en respuesta de ajustes parciales por caídas de temperatura (Shelley, 1993).

Las edades de trazas de fisión obtenidas en circones son representativas del proceso de exhumación de la unidad, que no necesariamente indican levantamiento; ya que la edad corresponde al momento en que la roca pasó por última vez por la temperatura de la zona de borrado parcial (PAZ: partial annealing zone), lo cual puede ocurrir tanto por adelgazamiento cortical como por levantamiento y erosión (Figura 37).

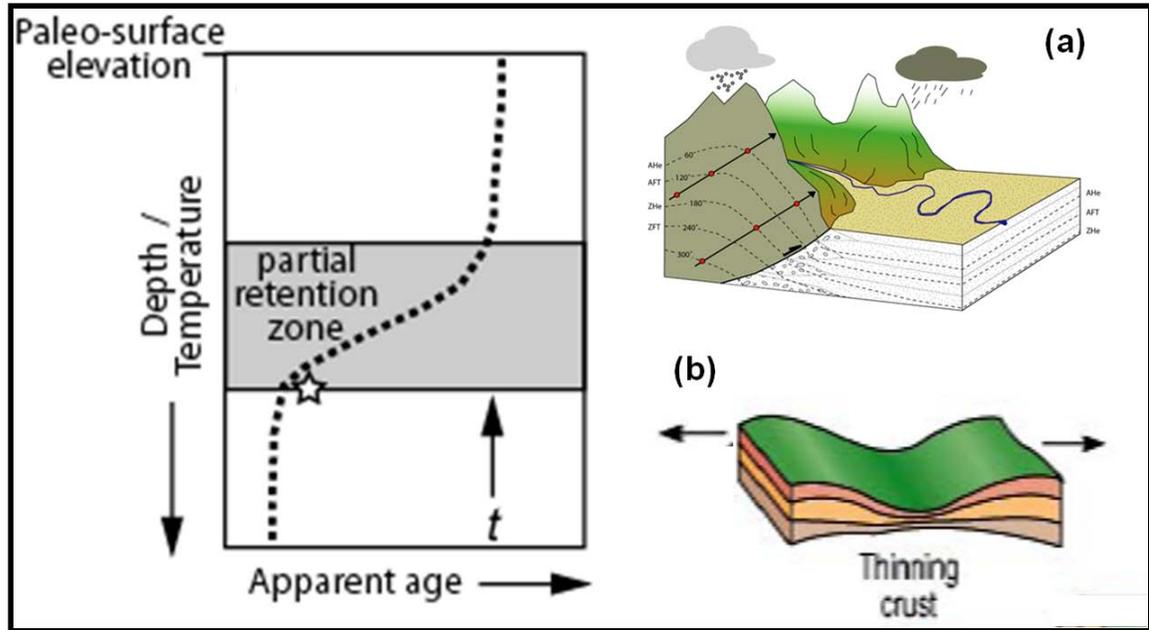


Figura 37. Esquema para la generación y preservación de trazas de fisión de acuerdo con la temperatura. La zona de borrado parcial puede ser alcanzada ya sea por procesos de levantamiento o erosión (a) o por procesos de adelgazamiento cortical debido a esfuerzos distensivos (b). (Modificado de Bernet, 2013).

Los resultados indican que la exhumación hacia el sur en la faja occidental que limita con la Falla de Bucaramanga inició hace 34.2 ± 4.3 M.a., desde el Eoceno tardío y se va haciendo más joven hacia el norte donde se encontraron edades alrededor de 23 M.a. (Oligoceno a Mioceno). Esta información coincide con edades obtenidas en algunos de los estudios previos (Tabla 8 y Figura 36) relacionados con el macizo; por ejemplo, Pimentel (2009) define el periodo de enfriamiento para el Neis de Bucaramanga entre 25 y 9 M.a con base en análisis de trazas de fisión en apatitos, Caballero *et al.* (2013) estima una exhumación de 5 km dentro del periodo de 35 a 15 M.a., y van der Lelij (2013) propone que la exhumación del macizo inicio hace aproximadamente 40 M.a. durante el periodo de convergencia acelerada entre la placa Nazca/Farallón y el margen occidental de Sur América.

En contraste, los datos obtenidos para el Neis de Bucaramanga por Shagam *et al.* (1984) se encuentran entre 12 y 4 M.a. para apatitos y 67 ± 7 M.a. para circones, estas últimas indican un levantamiento hacia el Cretácico tardío – Paleoceno. Aunque dentro de este estudio no se encontraron edades tan antiguas, la información concuerda con la depositación sin-tectónica propuesta por Caballero *et al.* (2013) para la Formación Lisama de edad Paleoceno. Es posible que las edades de enfriamiento en el intervalo

entre Paleoceno y Eoceno hayan sido borradas totalmente debido a algún evento que provocó un aumento de temperatura superior a 180°C (Caballero *et al.*, 2013). La historia térmica Pre-Jurásica también fue borrada debido a las numerosas intrusiones de granitoides a ~200 M.a. (van der Lelij, 2013).

El solapamiento entre las edades obtenidas con trazas de fisión en circones y las edades reportadas previamente (Shagam *et al.*, 1984; Pimentel, 2009; Caballero *et al.*, 2013 y van der Lelij, 2013) de trazas de fisión en apatitos, sugiere un rápido enfriamiento durante el evento de exhumación para el periodo Eoceno - Oligoceno.

Tabla 8. Recopilación de edades de trazas de fisión obtenidas y reportadas para el Macizo de Santander. (ZFTA: análisis de trazas de fisión en circon, AFTA: análisis de trazas de fisión en apatitos. Cod A: resultados obtenidos en este estudio; Cod B: edades reportadas por van der Lelij, 2013; Cod C: edades reportadas por Caballero *et al.*, 2013)

Cod	MUESTRA	LITOLÓGÍA	ESTE	NORTE	EDAD ZFTA	EDAD AFTA
A1	CLU-1052	NB	1134535	1300636	11.3 + 2.7	
A1	CLU-1052	NB	1134535	1300636	27.0 + 6.1	
A2	07SACZ-15	NB	1108441	1279843	19.3 + 3.9	
A3	07SACZ-17	NB	1112234	1278033	24.0 + 3.1	
A4	CIII09-NB-06	NB	1125618	1238001	31.9 + 8.2	
A5	CIII09-NB-09	NB	1124778	1239530	34.2 + 4.3	
B1	10VDL-05	G Corcova	1117154,1	1232722,3	44.1 + 4.6	17.6 + 3.3
B2	10VDL-22	G Pescadero	1119399,1	1202777,8	172.0 + 16.4	20.0 + 3.3
B3	10VDL-23	NB	1122018,0	1215293,2	124.8 + 12.7	11.1 + 1.1
B6	10VDL-37	Ortoneis	1120640,0	1242598,4	167.1 + 15.0	8.5 + 1.5
B7	10VDL-49	ES	1150698,0	1275799,9	197.7 + 24.1	4.6 + 0.4
B8	10VDL-52	TParamorico	1129426,7	1247246,3	227.2 + 22.1	11.6 + 1.7
B10	10VDL-59	GAguablanca	1102032,1	1253240,0	37.4 + 4.0	10.8 + 2.1
B11	10VDL-61	G Suratá	1108500,2	1239934,9	38.3 + 4.3	7.6 + 0.9
C6	996-27	Fm. Bocas	1100558,1	1245770,7		46.0 + 6.6
C7	996-30	Fm. Tiburón	1105069,2	1238320,2		68.9 + 13.5
C8	996-39	Intrusivo	1111713,2	1234799,9		13.5 + 2.1
C9	996-37	ES	1119561,0	1206851,3		15.7 + 1.7
C10	996-31	ES	1119561,0	1206851,3		21.4 + 4.2
C11	996-36	NB	1100460,1	1228861,0		18.6 + 2.0
C12	996-20	NB	1100460,1	1228861,0		14.3 + 2.0
C16	996-35	Fm. Santos	1115065,1	1252868,0		171.5 + 10.6
C17	996-3	Fm. Jordan	1114987,1	1255060,5		23.4 + 4.0
C18	996-34	Intrusivo	1119307,1	1206956,3		10.4 + 10.6
C19	996-2	ES	1115170,1	1255578,4		15.7 + 9.3
C20	996-41	NB	1107296,2	1235733,7		18.1 + 3.0
C21	996-33	NB	1119722,0	1206915,3		14.2 + 2.6

Teniendo en cuenta la variabilidad de las edades de un sector a otro, es muy probable que la exhumación del macizo haya sido a diferentes tiempos y tasas en bloques fallados. Según Shagam *et al.* (1984), el Macizo de Santander exhibe características estructurales como un mosaico de bloques rómbicos separados por fallas.

A partir de ~17 M.a. la exhumación del macizo es diacrónica en diferentes bloques, con tasas de exhumación de 0.5 – 1 km/ M.a., como resultado de esfuerzos compresivos en sentido E – W asociados a la indentación del bloque Panamá – Chocó (van der Lelij, 2013).

Se encuentran también eventos térmicos de tipo hidrotermal en las rocas del Neis de Bucaramanga (no relacionados con eventos tectónicos). Estos eventos se evidencian en poblaciones de circones no homogéneas, una muestra arrojó una edad de 11.3 ± 2.7 M.a. para este evento hidrotermal; el evento térmico registrado es correlacionado con la mineralización de oro (en el sector de Vetas), para la cual se proponen edades entre 10 y 9 M.a. con base en datos de Ar/Ar en sericita (Rojas, *en prensa*). Adicionalmente, datos de microtermometría en inclusiones fluidas, indican que la edad obtenida por medio del método de huellas de fisión, corresponde al tercer evento mineralizante definido por Rojas (2013).

La información obtenida del análisis de trazas de fisión en circones dan una buena idea sobre la exhumación general del macizo; no obstante, puede ser precisada usando métodos termocronológicos adicionales que permitan, el entendimiento de la dinámica temporal del levantamiento del macizo, así como la influencia de fallas asociadas y la relación con otros bloques cristalinos de la Cordillera Oriental; del los cuales se conocen edades de exhumación más recientes. Además, una de las mayores dificultades para establecer un modelo de evolución tectono-metamórfica en el Macizo de Santander (a pesar de tener la información petrológica y termocronológica), es no contar con un modelo estructural preciso que permita realizar una interpretación adecuada del conjunto de datos.

6. Conclusiones

1. El Neis de Bucaramanga litológicamente comprende en su mayoría, Neises migmatíticos cuarzo-feldespáticos con diferentes asociaciones minerales: con muscovita, biotita, silimanita y granate; con biotita, anfíbol, silimanita y granate; con biotita, silimanita y cordierita; con biotita y silimanita o solamente con biotita; también contiene amplias intercalaciones con Neises migmatíticos hornbléndicos, anfibolitas con y sin granate y cuarcitas. Los leucosomas son de composición tonalítica y monzogranítica.
2. En campo la unidad es identificada con base en la cartografía geológica y las características texturales y estructurales; más no es determinante la presencia o ausencia de una fase mineral. Dentro de las características mencionadas se encuentran: texturas migmatíticas, bandeamiento composicional, delgados niveles micáceos esquistosos de apariencia similar en las diferentes localidades y desarrollo de leucosomas cuarzo-feldespáticos concordantes con la foliación.
3. Petrográficamente las rocas del Neis de Bucaramanga se caracterizan por tener tamaño de grano medio a grueso, desarrollar texturas granoblásticas, nematoblásticas y ocasionalmente lepidoblásticas; comúnmente presenta evidencias de recristalización, deformación sin-metamórfica y pos-metamórfica y de reacciones propias de desequilibrio.
4. El protolito del Neis de Bucaramanga consiste probablemente en una sucesión vulcano-sedimentaria, representada por intercalaciones de episodios volcánicos de afinidad intermedia a básica y rocas inmaduras textural y composicionalmente; en las que se destaca un alto contenido de fosfato y de hierro, en algunos neises hornbléndicos, sugiriendo distintas fuentes de aporte de material.
5. Considerando como asociación mineral estable la paragénesis granate \pm plagioclasa \pm cuarzo \pm silimanita \pm biotita \pm anfíbol \pm muscovita; se obtuvo para el pico de metamorfismo, presión entre 6.5 a 7 Kbar y temperatura en un rango de entre 670 y 810 °C.

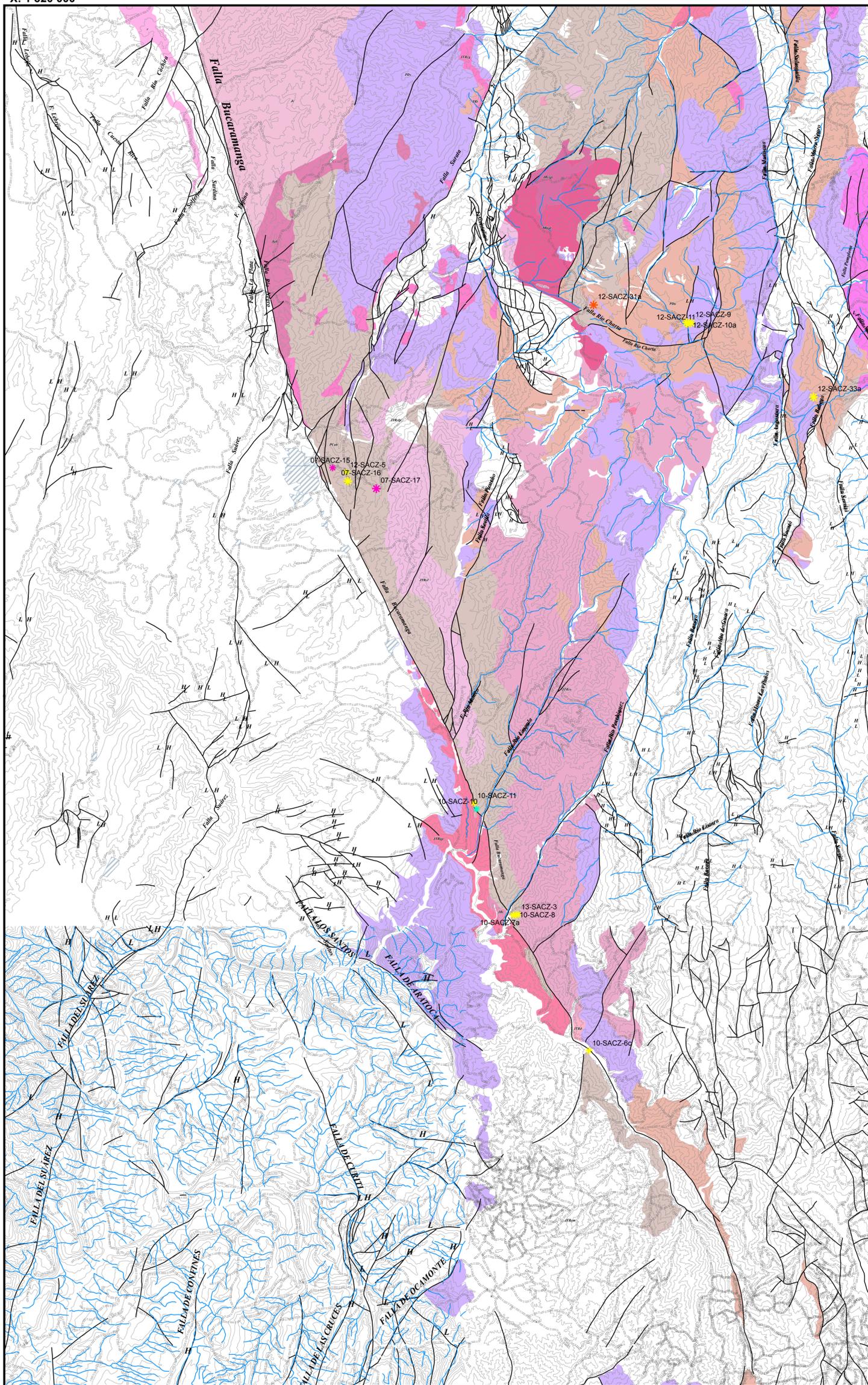
6. Las temperaturas más altas se alcanzaron durante el evento de migmatización; provocando una modificación en la composición química y distribución de los elementos de algunas fases, como en el caso del granate. Estas características indican que las rocas del Neis de Bucaramanga alcanzan facies granulita.
7. La homogenización de granates es ocasionada por temperaturas lo suficientemente elevadas que dan lugar a procesos de difusión y re-equilibrio del mineral; por tanto, es muy probable que la temperatura estimada sea menor a la del pico de metamorfismo y puede corresponder a las condiciones mínimas, subsecuentes a la fase de migmatización.
8. Se establecieron tres etapas que definen la evolución del metamorfismo para el Neis de Bucaramanga: *(I) fase prógrada inicial*; definida con base en el desarrollo de zonación normal de granates, que generalmente contienen inclusiones alineadas con la foliación o en algunos casos indicando movimientos de rotación y desarrollo de zonación inversa en plagioclasas. *(II) fase prógrada final*, enmarcada por aumento de temperatura en condiciones isobáricas; identificado con base en la homogenización de granates por procesos de difusión, cristalización de clinopiroxeno, altos contenidos de Ti en minerales micáceos y desarrollo de migmatitas. *(III) fase retrograda*; se reconoce por bordes enriquecidos en Mn en granates que exhiben zonación inversa, cloritización en fracturas y bordes de minerales (granate, hornblenda y biotita) y desarrollo de simplectitas y mirmequitas.
9. Los análisis de trazas de fisión en circones indican que la exhumación de las rocas del Neis de Bucaramanga se inicia en el Eoceno tardío (~35 - 30 M.a.), hacia el sur en el sector de Cepitá; mientras que hacia el norte (sector de Bucaramanga - Vetas) inicia entre el Oligoceno a Mioceno (~25 - 20 M.a.). La variación de los datos puede estar relacionada con diferentes tiempos y tasas de exhumación en bloques fallados. Es posible identificar un rápido enfriamiento para el periodo Eoceno - Oligoceno, debido al solapamiento con edades de trazas de fisión en apatitos obtenidas en estudios anteriores.
10. No se encontró registro de eventos de exhumación anteriores al Eoceno, puesto que los eventos térmicos relacionados con actividad ígnea y emplazamiento de cuerpos plutónicos habrían borrado totalmente las trazas de fisión; no obstante, se considera un levantamiento en el Paleoceno, durante la depositación de la Formación Lisama.

11. Se identificó un evento térmico posterior a 11.3 ± 2.7 M.a., en el área de Vetas, relacionado a la actividad magmática-hidrotermal; el cual es correspondiente al tercer evento mineralizante identificado.
12. En relación con otros bloques cristalinos de la Cordillera Oriental, en el Neis de Bucaramanga se han encontrado las edades de última exhumación más antiguas. Sin embargo, es necesario conocer con mayor detalle la evolución estructural del macizo que permita plantear un modelo tectono-metamórfico más concreto.

A. Anexo: Mapa Geológico.

X: 1 320 000

Y: 1 080 000



Y: 1 155 000

X: 1 200 000

Convenciones

Unidades Litológicas

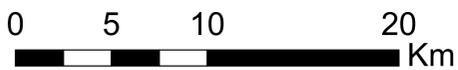
- JRgp Granito de Pescadero
- JRcs Cuarzomonzonita de Santa Bárbara
- JRc Cuarzomonzonita
- JRcl Cuarzomonzonita La Corcova
- JRcg Cuarzomonzonita - Granito
- JRcgp Aplitas
- TRt Tonalita
- TRtgd Tonalita - Granodiorita
- TRcl Cuarzomonzonita
- dg Granito Durania

- pDo Ortoneis
- pDod Ortoneis
- pDs Esquistos de Silgará
- pDsm Mármoles de Silgará
- pEb Neis de Bucaramanga
- pEbh Neis de Bucaramanga

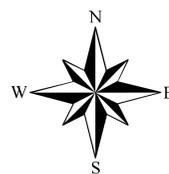
Muestreo

- ★ Estación con muestra
- ★ Análisis Químico
- ★ Sección delgada
- ★ Sección delgada y ZFTA
- ★ Sección delgada y Análisis Químico
- ★ Sección delgada, Análisis Químico y ZFTA
- Camino
- Carretera
- Lago
- Río
- Falla geológica

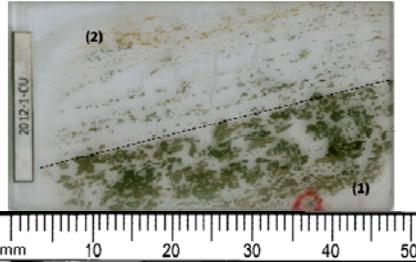
Escala: 1:175.000



Compiló: Urueña-Suárez, C.

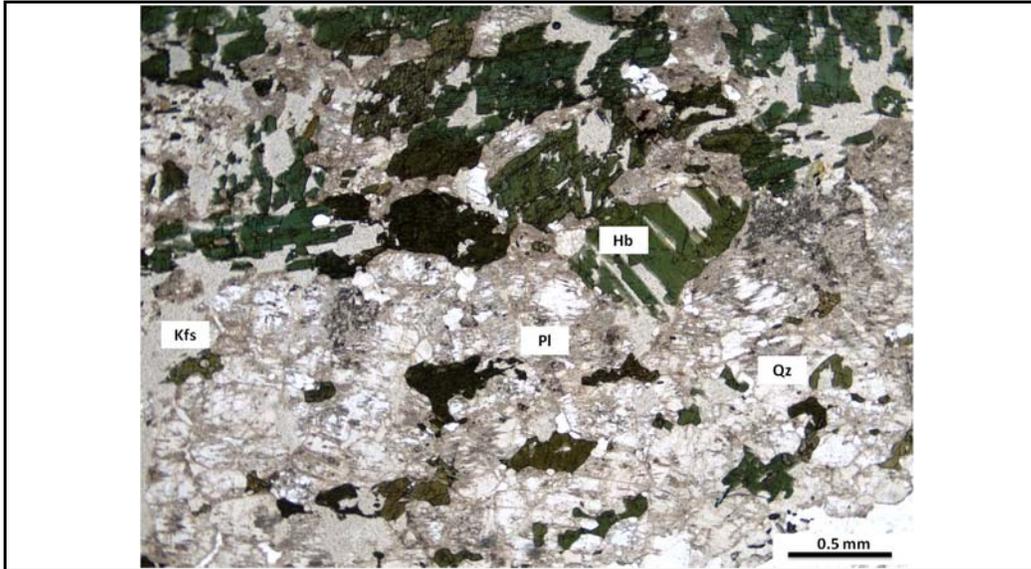


B. Anexo: Petrografía.

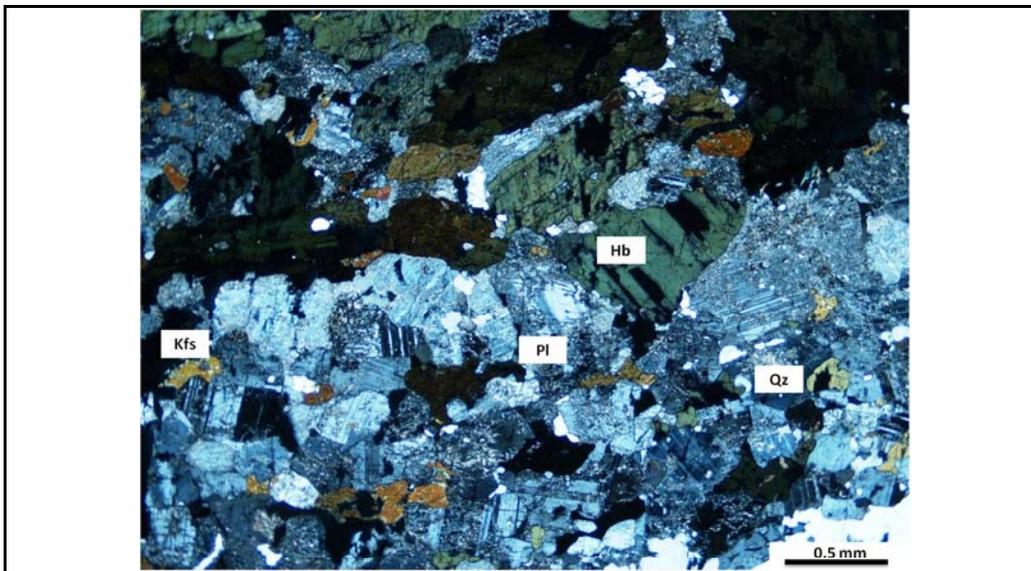
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA	
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER	
Información General	
Muestra No	2012-1-CU
Unidad:	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1130044
Localidad:	Vía Berlín - Vetas
N:	1294711
Descripción Macroscópica	
<p>Roca de grano medio a grueso, con foliación gruesa; presenta estructuras migmatíticas, en la que se reconocen leucosomas concordantes (L) de composición tonalítica (plagioclasa y cuarzo), que varían entre 3mm y 3cm de espesor. Los mesosomas (m) son de composición anfibólica.</p>	
Descripción Microscópica	
<p>Roca de grano medio a grueso de textura granoblástica a nematoblástica con orientación de anfíboles y biotitas. Presenta una notoria variación composicional, se observa un nivel (1) más anfibólico formado principalmente por hornblenda y plagioclasa con accesorios como circón, esfena, apatito y clinopiroxeno. El nivel (2) tiene una composición cuarzo feldespática, disminuye el contenido de hornblenda y se observa biotita café ocasionalmente cloritizada, se desarrollan cristales más grandes de esfena, adicionalmente las plagioclasas se encuentran sericitizadas; este nivel se considera como un leucosoma</p>	

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	33		Esfena	1
Plagioclasa	25		Epidota	1
Feldespato potásico	15		Apatito	Tz
Hornblenda	15		Clinopiroxeno	1
Biotita	7		Circón	Tz
			Minerales Opacos	1
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	1			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Hornblenda - Feldespato potásico - Biotita - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo	Orogénico	X	Térmico	Dinámico
Facies	Anfibolita alta		Protolito	
Clasificación	Neis Hornbléndico con clinopiroxeno			
			Según	SCMR
Descrpción de minerales				
Hornblenda: Corresponde a cristales grandes orientados, tiene pleocroísmo de verde claro a verde oliva, los cortes basales son de color café. Presenta inclusiones redondeadas de cuarzo, plagioclasa y esfena, ocasionalmente presenta cloritización y oxidación en fracturas.				
Plagioclasa: Cristales subhedrales a euhedrales de tamaño de grano medio, ligeramente más gruesas en el nivel (1); desarrollan maclas tipo Carlsbad y albita combinadas y maclas de deformación. Presenta una fuerte sericitización.				
Cuarzo: Está asociado al nivel cuarzo feldespático, ocurre como cristales anhedrales de tamaño grueso con contactos entre granos irregulares y rectos; desarrolla extinción ondulante.				
Biotita: Se encuentra restringida al nivel cuarzo feldespático. Corresponde a cristales de grano fino a medio, euhedrales de forma tabular, generalmente orientados con la foliación; tiene pleocroismo verde-café, se observa migración de Fe en las fracturas, cloritización e inclusiones de minerales opacos. Algunos cristales tienen una ligera deformación (plegamientos tipo kink).				
Epidota: Está en muy baja proporción, se encuentra como agregados cristalinos en hornblenda y biotita; los cristales tiene alto relieve, un ligero pleocroismo verde claro, tonos de interferencia segundo-tercer orden.				
Esfena: Generalmente ocurre como inclusiones en hornblenda y plagioclasa, algunos cristales son de grano grueso, euhedrales con formas hexagonales, son poco coloreados y presenta tonos de interferencia de cuarto orden.				
Apatito: Corresponde a cristales muy finos, euhedrales, prisma hexagonal y tonos grises de interferencia; se encuentran como inclusiones en hornblenda junto con la esfena.				
Clinopiroxeno: Cristal con alto relieve, leve pleocroísmo y tonos de interferencia amarillos de segundo orden, extinción inclinada a 33°; se encuentra en paragénesis con hornblenda y plagioclasa.				
Clorita: Se encuentra asociada a los bordes de biotita y hornblenda y como parches anhedrales con tonalidades verde claro-amarillo, birrefringencia muy baja o azul berlín.				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis hornblendico formado por hornblenda, plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo (2X - PPL)



Neis hornblendico formado por hornblenda, plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo (2X - XPL)

DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER

Información General

Muestra No	2012-2-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1130044	Localidad:	Vía Berlín - Vetas
N:	1294711		

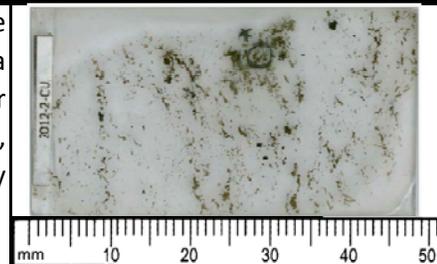
Descripción Macroscópica

Roca de grano medio y grueso, con foliación desarrollando orientación de minerales en láminas discontinuas. Se encuentra conformada por niveles cuarzo feldespáticos y niveles biotíticos, presenta fracturas rellenas por epidota.



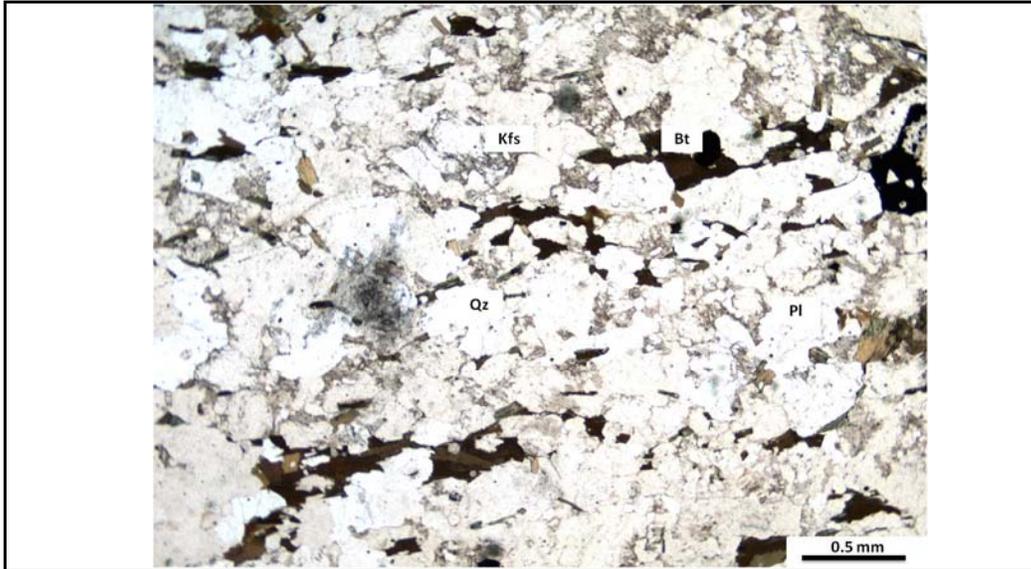
Descripción Microscópica

Roca de grano medio con textura granoblástica en niveles de composición cuarzo feldespática y foliación dada por la biotita. Su composición es muy homogénea, formada por cuarzo, plagioclasa sericitizada y delgadas láminas paralelas, discontinuas de biotita, se observan inclusiones de apatitos y de cuarzo en plagioclasa.

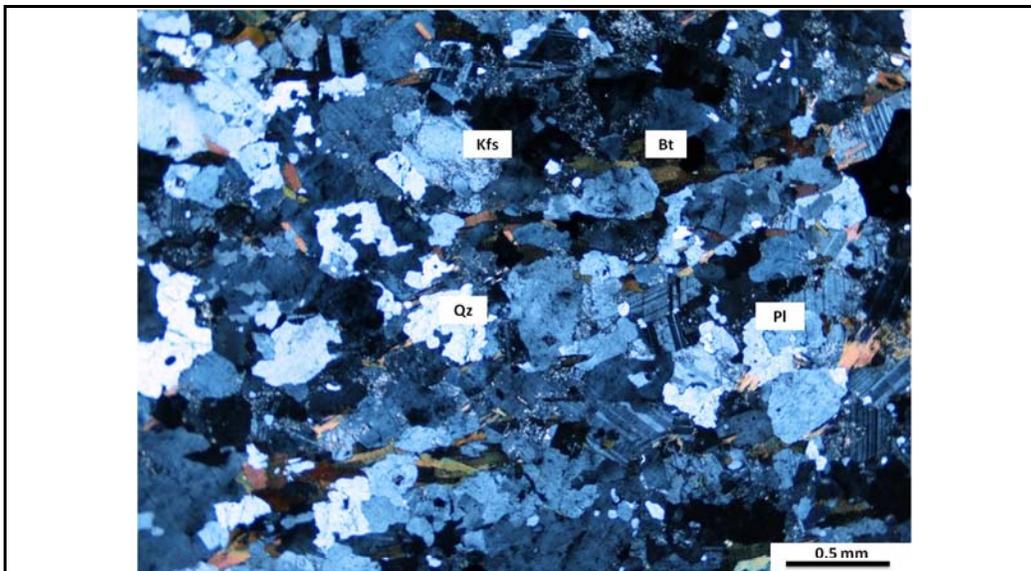


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	27		Hornblenda	2
Plagioclasa	37		Circón	1
Feldespato potásico	10		Apatito	1
Biotita	18		Muscovita	1
			Minerales Opacos	2
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	1			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Biotita - Cuarzo - Feldespato potásico - Hornblenda				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita			Protolito Arcosa lítica	
Clasificación Neis cuarzo feldespático con biotita y hornblenda				
Según SCMR				
Descrpción de minerales				
<p><u>Plagioclasa</u>: Corresponde a cristales medios, subhedrales; desarrollan maclas finas tipo albita y combinadas con Carlsbad, algunos cristales no presentan macla pero desarrollan sericitización hacia los bordes y se observan maclas mecánicas de transformación. Se observan texturas mirmequíticas, intercrecimientos simplectíticos e inclusiones redondeadas de cuarzo.</p> <p><u>Cuarzo</u>: Cristales anhedrales con bordes ligeramente lobulados, con fuerte extinción ondulante mostrando un alto grado de deformación generando bordes de subgrano.</p> <p><u>Feldespato potásico</u>: Corresponde a cristales finos, subhedrales, con bordes rectos, se observa su clivaje. Presenta una ligera extinción ondulante e inclusiones redondeadas de cuarzo.</p> <p><u>Biotita</u>: Se encuentra como cristales finos, euhedrales, con forma tabular, orientados, con pleocroismo café - marrón y ocasionalmente bordes cloritizados. Se encuentra asociada a cristales muy finos de muscovita que está en muy baja proporción. Contiene algunas inclusiones de circones euhedrales.</p> <p><u>Hornblenda</u>: Corresponde a cristales medios, subhedrales, dispuestos en forma perpendicular a la foliación y cortados por cristales de biotita (en un sector de la sección). Tienen pleocroismo verde oliva y extinción inclinada.</p> <p><u>Apatito</u>: Son cristales de tamaño muy fino, con formas prismáticas de seis lados y generalmente se encuentra como inclusiones en plagioclasa y feldespato potásico.</p>				

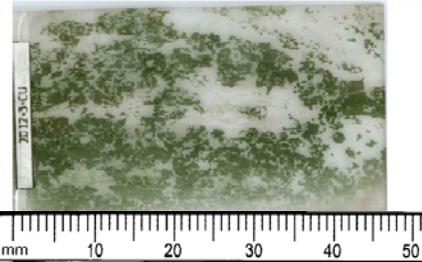
REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con biotita y hornblenda (2x - PPL)

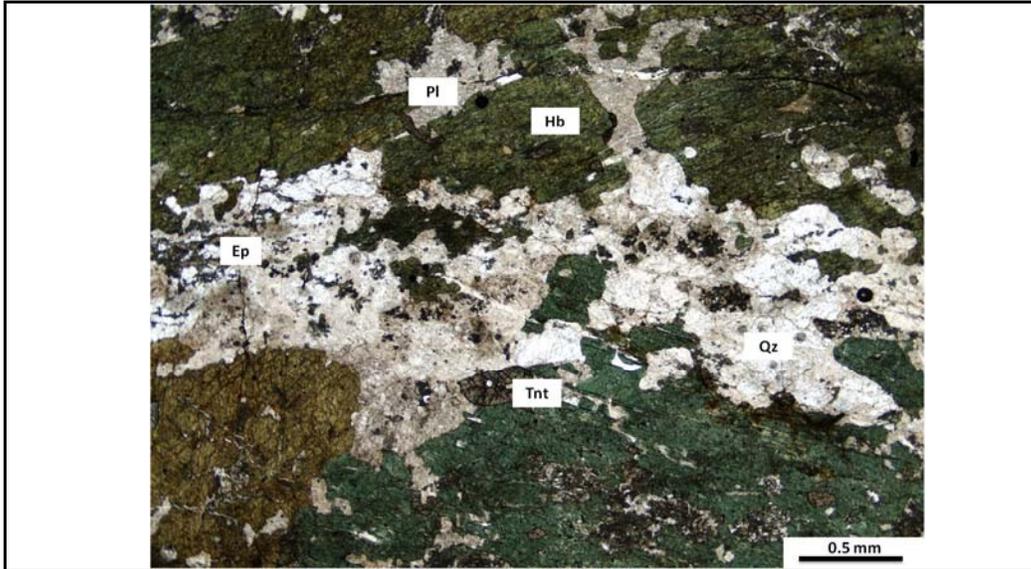


Neis cuarzo feldespático con biotita y hornblenda (2x - XPL)

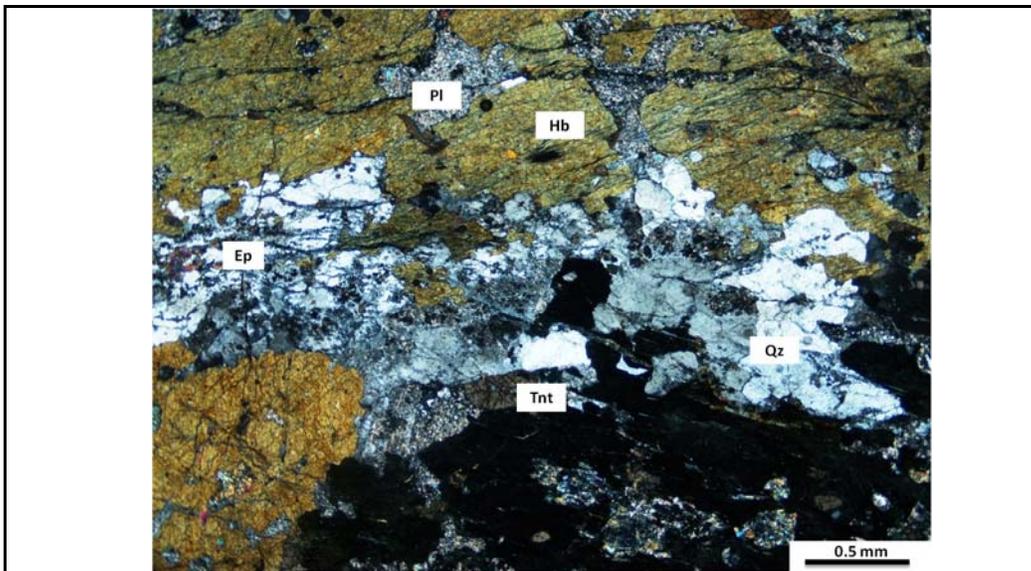
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA	
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER	
Información General	
Muestra No	2012-3-CU
Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1122730
N:	1252176
Localidad:	Camino Umpalá - La Urgua
Descripción Macroscópica	
<p>Roca de grano grueso que desarrolla foliación incipiente; compuesta en un 80% por anfíbol y 20% de plagioclasa que ocasionalmente se encuentra en lentes irregulares discordantes con la foliación.</p>	
Descripción Microscópica	
<p>Roca de grano grueso, con textura granoblástica y orientación de minerales. Se observan intercrecimientos entre cristales de hornblenda y plagioclasa la cual, tiene un alto grado de sericitización. Se encuentran niveles de cuarzo que siguen la foliación y ocasionalmente forman bandas con estructuras "annealing" y de recristalización, donde se desarrollan cristales más finos. También se observan venillas delgadas de epidota paralelas y subparalelas a la exfoliación de los anfíboles; asociada a la hornblenda se encuentra esfena con formas rómbicas. Las microestructuras presentes, como el desarrollo de lentes de cuarzo recristalizado y venillas dan evidencia de procesos dinámicos sobreimpuestos.</p>	

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Hornblenda	43		Esfena	5
Plagioclasa	35		Epidota	3
Cuarzo	12			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	2			
Sericita	Tz			
Leucoxeno	Tz			
Total				100
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Roca volcánica o volcanosedimentaria		
Clasificación Anfibolita		Según SCMR		
Descripción de minerales				
<p>Hornblenda: Corresponde a cristales de tamaño grueso y muy grueso, subhedrales, con orientación preferencial, los bordes se encuentran corroídos y disueltos. Presentan numerosas inclusiones de esfena, cuarzo y epidota en venillas, ocasionalmente esta cloritizada.</p> <p>Plagioclasa: Presentan una fuerte sericitización, en algunos cristales se alcanzan a observar maclas de formación y maclas mecánicas.</p> <p>Cuarzo: Corresponde a cristales gruesos, anhedrales, posiblemente porfiroclastos. En algunos sectores se desarrollan lentes y venillas de cuarzo recrystalizado, subparalelas a la foliación y sobreimpuestas una a otras, que muestran un alto grado de deformación plástica.</p> <p>Epidota: Corresponde a cristales finos, subhedrales, agrupados en venillas sobre los planos de exfoliación de la hornblenda.</p> <p>Esfena: Se encuentra como cristales finos y medios, euhedrales, con formas rómbicas y dos planos de clivaje. Es de color marrón claro y esan asociadas principalmente a hornblenda; algunos cristales estan cortados por venillas de cuarzo.</p> <p>Clorita: Solo se encuentra en un sector de la sección entre cristales de hornblenda y plagioclasa, tiene morfología subhdral, con pleocroismo verde muy claro y tonos de interferencia café. Se desarrollan algunos minerales opacos en los bordes.</p> <p>Leucoxeno y Sericita: Son producto de alteración que afecta cristales de plagioclasa.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anfibolita, formada por hornblenda, plagioclasa, cuarzo con esfena (Tnt) y epidota. (2x - PPL)

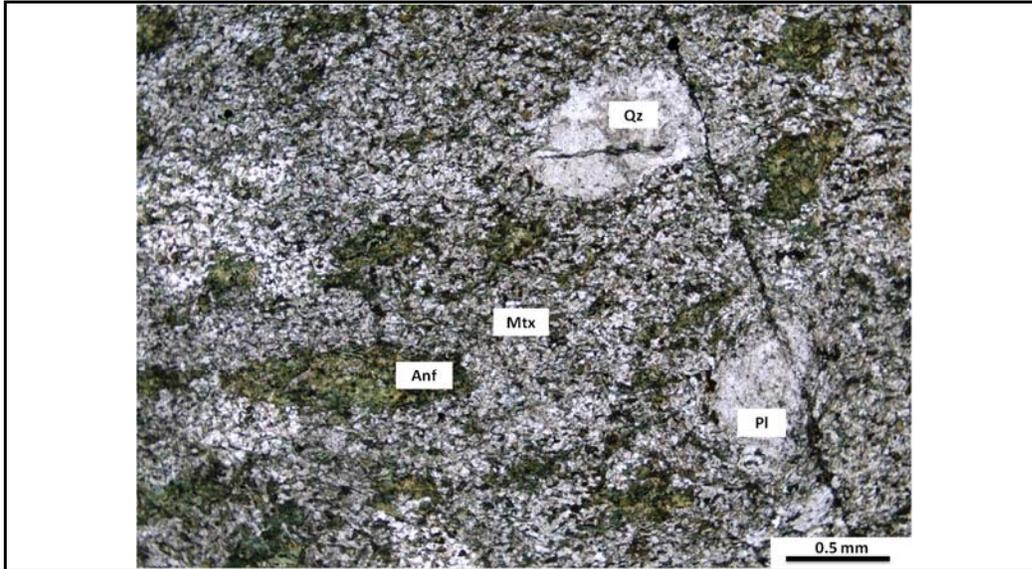


Anfibolita, formada por hornblenda, plagioclasa, cuarzo con esfena (Tnt) y epidota. (2x - XPL)

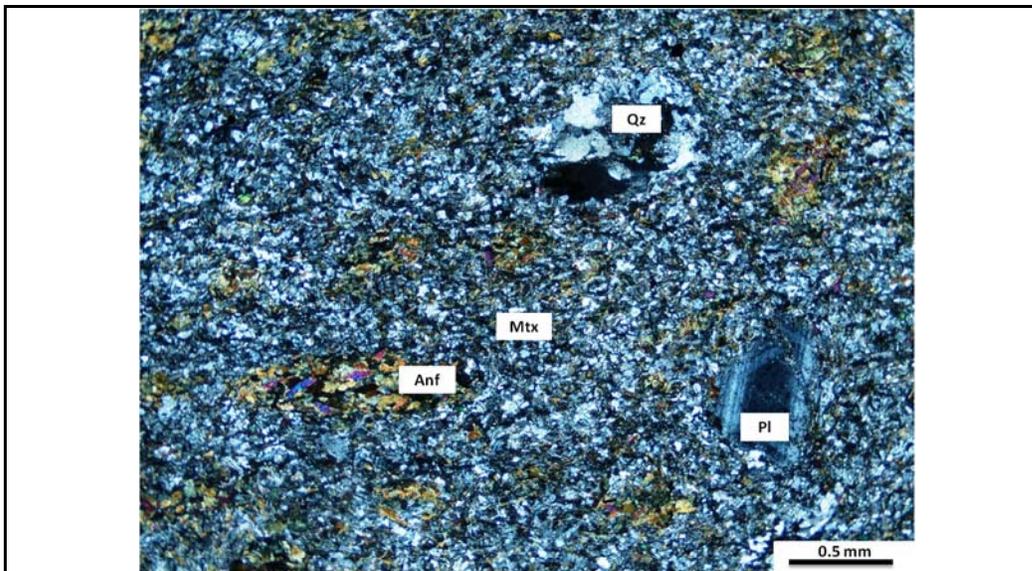
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA	
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER	
Información General	
Muestra No	2012-4-CU
Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1122720
Localidad:	Camino Umpalá - La Urgua
N:	1252156
Descripción Macroscópica	
<p>Roca de grano fino de color verde oscuro con textura masiva en la que se reconocen fenocristales(?) de plagioclasa en una matriz muy fina. La roca en afloramiento se encuentra cortando las secuencias de neises cuarzo feldespáticos y anfíbolitas.</p>	
Descripción Microscópica	
<p>Roca de grano fino y muy fino, que desarrolla foliación y se observan minerales recristalizados fragmentados (porfiroclastos). En general corresponde a una roca formada por una matriz generalmente recristalizada formada por cristales finos de anfíbol ocasionalmente cloritizados y cristales con recristalización de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, también se reconocen cristales de epidota y esfena. Dentro de la matriz hay cristales de tamaño medio, subhedrales de plagioclasa maclada y zonada, cuarzo en agregados policristalinos con extinción ondulante, deformación, recristalización y feldespato con bordes redondeados (de reabsorción ?); se observan agregados de anfíbol no orientados. Debido al alto grado de recristalización puede ser considerada como una roca de falla con apariencia ígnea.</p>	

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	38		Esfena	3
Plagioclasa	17		Epidota	4
Feldespato potásico	10		Apatito	Tz
Anfíbol	20			
Biotita	8			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	< 1			
Sericita	< 1			
Total				100
Paragénesis				
Tipo de metamorfismo	Orogénico	Térmico	Dinámico	X
Facies	Protolito Neis hornbléndico			
Clasificación	Neis cuarzo feldespático con hornblenda y biotita			
	Cataclástico	Según	SCMR	
Descrpción de minerales				
<p>Anfíbol: Cristales de tamaño fino, euhedrales, con pleocroísmo verde claro a oscuro, altos tonos de interferencia y ocasionalmente zonación. Algunos cristales muestran orientación preferencial y otros se encuentran en agregados "cumulares" junto con epidota.</p> <p>Plagioclasa: Se encuentra como cristales de tamaños muy finos en la matriz recrystalizada, con formas subhedrales, bordes suturados y lobulados; ocasionalmente se encuentra maclada. Los cristales de mayor tamaño desarrollan macla tipo albita muy delgada, algunos están zonados, bordes redondeados y se encuentran aislados o en agregados con cuarzo y feldespato potásico.</p> <p>Feldespato Potásico: Se reconoce en agregados cristalinos en los que se desarrollan intercrecimientos simplectíticos.</p> <p>Cuarzo: En la matriz; corresponde a cristales muy finos con extinción ondulante, bordes suturados y lobulados evidenciando procesos de recrystalización, es predominante endectores donde disminuye el contenido de anfíbol. También se observan agregados policristalinos recrystalizados mostrando estructuras de deformación como bordes de subgrano.</p> <p>Biotita: Se encuentra asociada a los agregados "cumulares" de anfíboles, es de tamaño fino, euhedral, con pleocroísmo marón claro a oscuro; puede estar ligeramente cloritizada.</p> <p>Epidota: Corresponde a cristales muy finos y finos, subhedrales, pleocroísmo leve verde claro. Se encuentra distribuida en la matriz o en agregados con anfíbol.</p> <p>Esfena: Cristales finos, poco coloreados, con forma euhedral, se observan el clivaje. Es poco abundante y se encuentra diseminada.</p>				

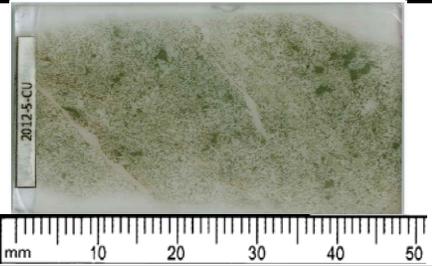
REGISTRO FOTOGRÁFICO



Cataclasita con porfiroclastos de plagioclasa, agregados policristalinos de cuarzo y anfíbol, en una matriz cuarzofeldespática (2x - PPL)

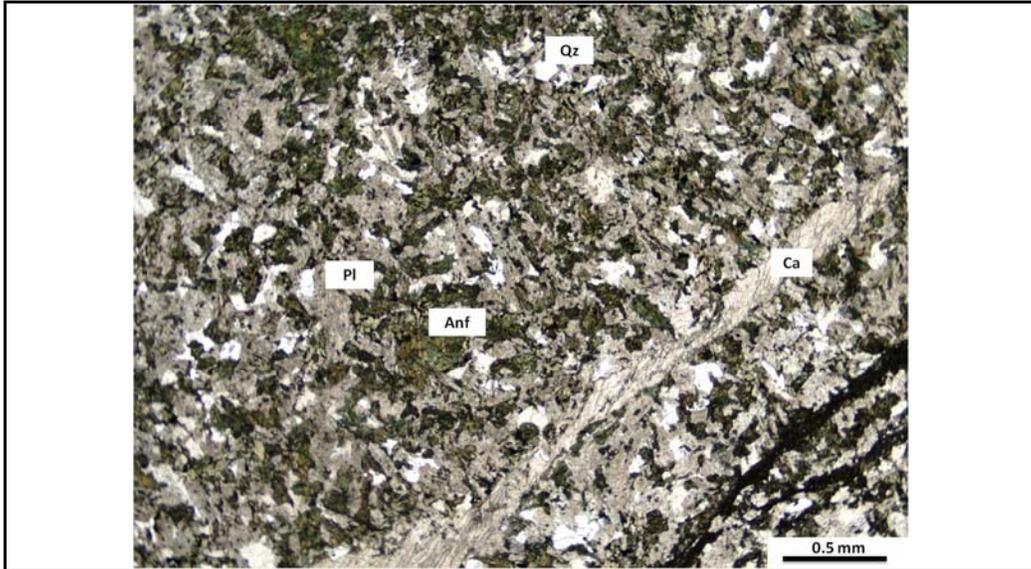


Cataclasita con porfiroclastos de plagioclasa, agregados policristalinos de cuarzo y anfíbol, en una matriz cuarzofeldespática (2x - XPL)

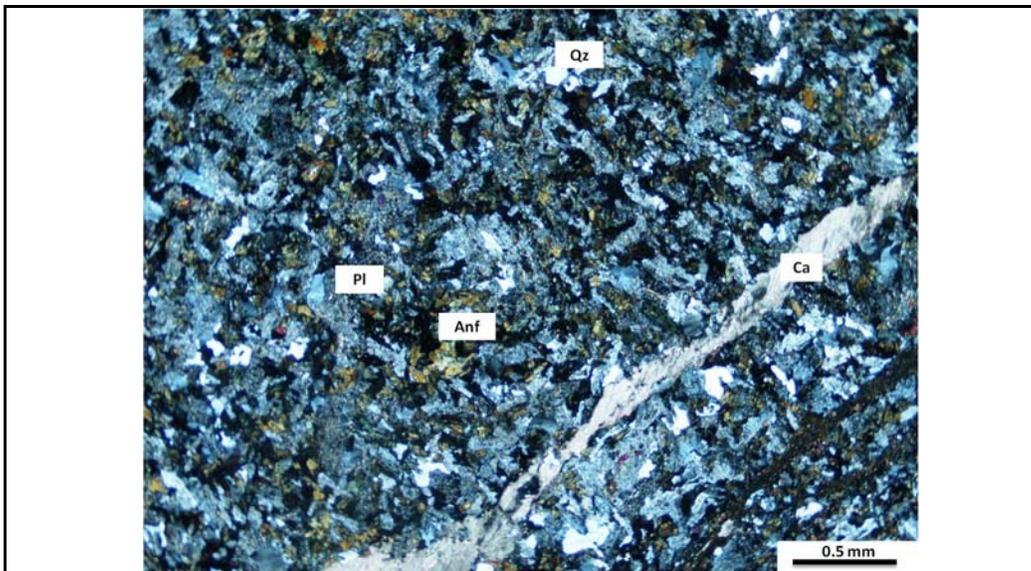
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA			
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER			
Información General			
Muestra No	2012-5-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1122321	Localidad:	Camino Umpalá - La Urgua
N:	1251280		
Descripción Macroscópica			
<p>Roca de grano fino de color verde y composición anfibólica; no se reconoce foliación ni orientación mineral. Se encuentra asociada a anfibolitas con texturas migmatíticas separadas por venas de composición cuarzo feldespática</p>			
Descripción Microscópica			
<p>Roca de grano fino, no desarrolla orientación; con alto grado de alteración, principalmente sericitización y se observan lentes de carbonato. Se evidencian procesos cataclásticos ya que los minerales se encuentran fragmentados. Presenta fracturas abiertas y venillas de epidota, clorita y carbonato. El material fragmentado corresponde a plagioclasa fuertemente sericitizada, cuarzo, anfíbol y epidota.</p>			
<p>Se observan porfiroclastos de plagioclasa, cuarzo y agregados de anfíbol - plagioclasa. Como minerales accesorios hay apatitos y circones que ocurren como inclusiones en plagioclasa.</p>			

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	22		Esfena	2
Plagioclasa	38		Epidota	7
Anfíbol	18		Apatito	Tz
			Circón	Tz
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	5		Calcita	8
Sericita (%sobre Pl)	20		Epidota	7
Total				100
Paragénesis				
Tipo de metamorfismo	Orogénico	Térmico	Dinámico	X
Facies	Protolito Neis hornbléndico			
Clasificación	Neis hornbléndico cataclástico			
	Según	SCMR		
Descrpción de minerales				
<p><u>Cuarzo</u>: Corresponde a cristales anhedrales con bordes irregulares, extinción ondulante.</p> <p><u>Plagioclasa</u>: Se presenta en cristales subhedrales de forma tabular, con bordes corroídos y contactos entre granos irregulares, las maclas estan poco desarrolladas y ocasionalmente deformadas; presenta una fuerte alteración a sericita.</p> <p><u>Anfíbol</u>: Cristales subhedrales, con forma tabular, de color verde oliva y alteración a clorita. Se encuentran fragmentados y en agregados con epidota y clorita.</p> <p><u>Epidota</u>: Son cristales anhedrales, de tamaño muy fino, con un ligero pleocroísmo verde claro; dispuestos en agregados cristalinos con anfíboles y en venillas como agregados granulares.</p> <p><u>Carbonato (calcita)</u>: Cristales anhedrales, generalmente dispuestos en lentes de tamaño de grano grueso y asociado a venillas de epidota.</p> <p><u>Esfena</u>: Se encuentra como cristales fragmentados con formas subhedrales.</p> <p><u>Clorita</u>: Ocurren como cristales elongados, con exfoliación en una dirección, es de color verde claro, tonos de interferencia café y azul berlín; se encuentra asociada a anfíboles.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Cataclasita formada por porfiroclastos de anfíbol, plagioclasa y cuarzo. Se observa venilla de calcita (2x - PPL)



Cataclasita formada por porfiroclastos de anfíbol, plagioclasa y cuarzo. Se observa venilla de calcita (2x - XPL)

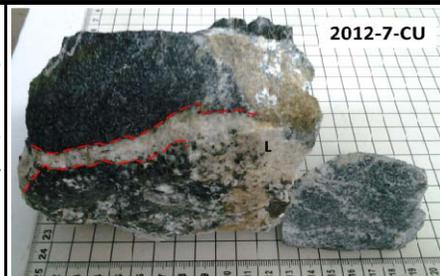
**DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER**

Información General

Muestra No	2012-7-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1121937	Localidad:	Camino Umpalá - La Urgua
N:	1250439		

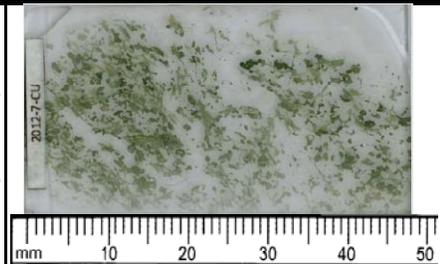
Descripción Macroscópica

Roca de grano grueso, en la que se observan porciones con textura granoblástica de composición anfibolítica y porciones de composición granítica, que muestran estructuras pegmatíticas; en algunos sectores se observa lineación de minerales y bandeamiento composicional, generado por formación de bandas leucocráticas y melanocráticas.



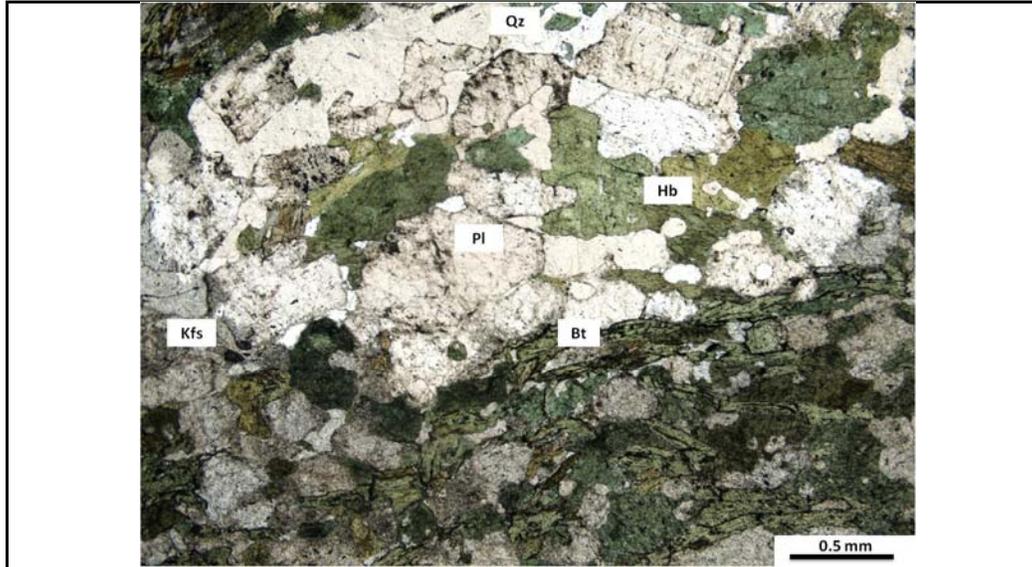
Descripción Microscópica

Roca de grano medio a grueso, se desarrolla orientación de minerales, pero no se desarrolla una foliación continua. La mayor parte de la roca está formada por hornblenda y plagioclasa, con un contenido importante de cuarzo, que está asociado a inclusiones e intercrecimientos con los otros minerales. Hay pequeños cristales sub-redondeados de circón y esfena asociados a la hornblenda.

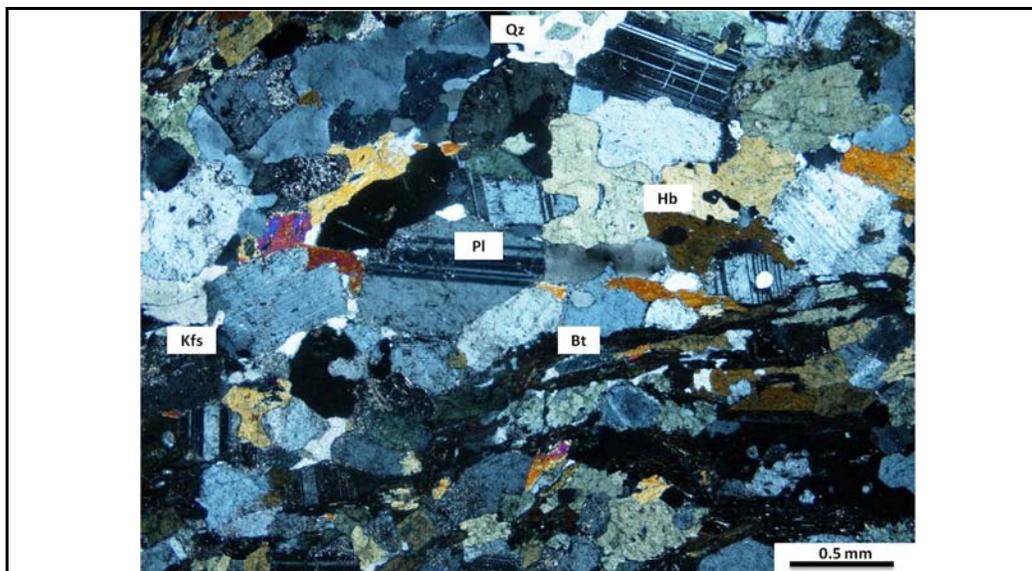


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Hornblenda	27		Esfena	1
Plagioclasa	22		Epidota	5
Feldespató potásico	12		Circón	1
Cuarzo	17		Minerales Opacos	2
Biotita	13			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita (% en Bt)	8			
Sericita (% en Pl)	13			
Total				100
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa - Feldespató potásico - Biotita - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo	Orogénico	X	Térmico	Dinámico
Facies	Anfibolita		Protolito	
Clasificación	Neis hornbléndico con biotita y feldespató potásico			
			Según	SCMR
Descrpción de minerales				
Hornblenda: Correponde a cristales de tamaño grueso, formas subhedral a anhedral, con pleocroismo verde oliva a pardo, se observan algunos corte basales con dos direcciones de exfoliación. Presenta texturas poiquilíticas con inclusiones redondeadas de cuarzo y plagioclasay se observa epidota y clorita hacia los bordes.				
Plagioclasa: Se presenta como cristales tabulares, euhedrales y subhedrales, sericitizada hacia los bordes; desarrollan macla tipo albita y frecuentemente hay maclas mecánicas generadas por deformación (flexura). Algunos cristales se encuentran fuertemente alterados y tienen morfologías irregulares. Ocasionalmente contienen inclusiones redondeadas de clinozoicita.				
Cuarzo: Ocurre como cristales anhedrales, con bordes lobulados e irregulares, generalmente son de tamaño fino y medio; se encuentra principalmente ocupando espacios intercrystalinos entre hornblenda y plagioclasa y también como inclusiones en esos minerales. Muestra evidencias de deformación como extinción ondulante y en menor proporción límites de subgrano y bandas de deformación.				
Feldespató potásico: Son cristales de tamaño grueso, subhedrales a anhedrales, con macla tipo microclina y se desarrollan lamelas de exsolución, pertitatas y simplectitas. Está restringido a un sector de la sección donde no hay anfíbol.				
Biotita: Corresponde a cristales de tamaño fino, euhedrales a subhedrales orientados, presentan pleocroísmo verde claro; generalmente hacia los bordes y sobre las líneas de exfoliación se encuentran minerales opacos y cloritización que muestran tonos de interferencia azul berlín y café. Se asocia niveles máficos con hornblenda y epidota.				
Epidota (-clinozoicita): Son cristales de tamaño fino y muy fino, se encuentra como agregados anhedrales asociado a hornblenda y biotita como inclusiones y ocupando espacios intercrystalinos.				
Esfena: Son cristales de tamaño muy fino, subhedrales a anhedrales, se encuentran fracturados y es de color café claro.				

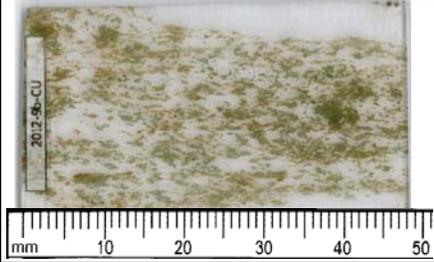
REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis hornbléndico con plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, hornblenda y biotita.
(2x - PPL)



Neis hornbléndico con plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, hornblenda y biotita.
(2x - XPL)

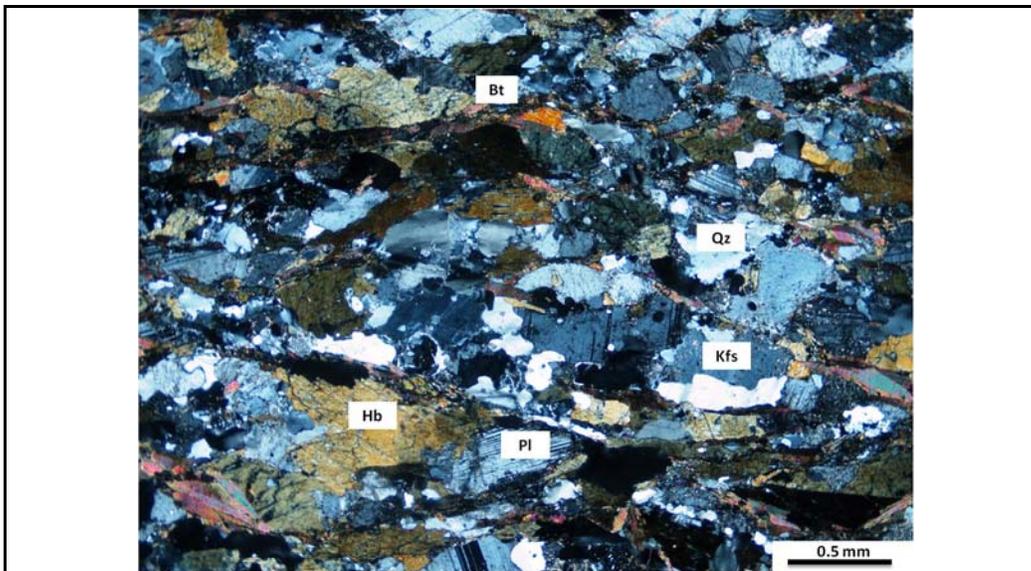
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA			
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER			
Información General			
Muestra No	2012-9b-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1121743	Localidad:	Sendero Umpalá - V. La Garrapata
N:	1248566		
Descripción Macroscópica			
<p>Roca de grano medio a grueso, foliada; se observa el desarrollo de venas de composición cuarzo feldespática que cortan la foliación de forma perpendicular. Esta formada por anfíbol (60%), biotita (15%), plagioclasa (15%) y cuarzo (10%).</p>			
Descripción Microscópica			
<p>Roca de grano medio, con textura foliada nematoblástica dada por los anfíboles; se diferencian niveles máficos caracterizados por la asociación mineral hornblenda-biotita-epidota-esfena y niveles cuarzo feldespáticos formados por cuarzo-plagioclasa-feldespato potásico. Se reconocen procesos dinámicos sobreimpuestos por presencia de bandas de cuarzo y feldespato recristalizados.</p>			

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	20		Epidota	8
Plagioclasa	20		Calcita	3
Feldespato potásico	10			
Hornblenda	20			
Biotita	15			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	< 1			
Sericita	4			
Total				100
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa - Feldespato potásico - Biotita - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Roca volcánica o volcanosedimentaria		
Clasificación Neis hornbléndico con biotita y feldespato potásico				
Según SCMR				
Descrpción de minerales				
<p>Plagioclasa: Son cristales de tamaño medio, subhedrales con contactos rectos, desarrollan macla tipo albita y ocasionalmente maclas mecánicas de deformación. Presentan sericitización sobre las líneas de exfoliación.</p> <p>Feldespato potásico: Son cristales de tamaño fino y medio, subhedrales a anhedrales con contactos rectos, no desarrolla macla, pero ligeramente deformados. Se encuentra en zonas mayormente deformadas.</p> <p>Hornblenda: Corresponde a cristales de tamaño medio y grueso, subhedrales y euhedrales, presenta pleocroísmo de verde azul a verde claro, tienen hábito tabular primático, los cortes basales presentan exfoliación en dos direcciones y macla simple; contiene inclusiones de epidota y cuarzo. Se encuentra asociado a niveles máficos con biotita.</p> <p>Cuarzo: Se encuentra como cristales de tamaño medio, anhedrales, con contactos suturados, muestran extinción ondulante; algunos cristales tienen un mayor grado de recristalización y deformación. También se encuentra como inclusiones redondeadas en hornblenda.</p> <p>Biotita: Cristales de tamaño medio, subhedrales y euhedrales, con hábito hojoso y formas tabulares, tienen pleocroísmo café-marrón y algunos se encuentran cloritizados hacia los bordes.</p> <p>Epidota: Cristales finos, subhedrales y anhedrales, con alto relieve, poco pleocróicos con fuertes tonos de birrefringencia; está asociada a hornblenda y biotita.</p> <p>Carbonato: Se encuentra en "parches" anhedrales en los niveles máficos.</p> <p>Clorita: Ocurre como alteración de la biotita, en agregados fibrosos muy finos de color verde claro.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis hornbléndico con biotita, feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo (2x - PPL)



Neis hornbléndico con biotita, feldespato potásico, plagioclasa y cuarzo (2x - XPL)

DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER

Información General

Muestra No	2012-10-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1121768	Localidad:	Sendero Umpalá - V. La Garrapata
N:	1248576		

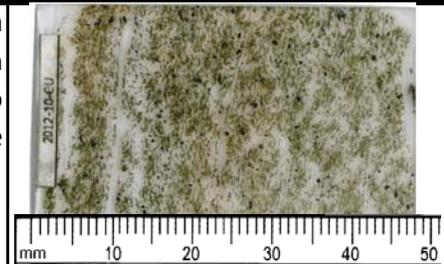
Descripción Macroscópica

Roca de grano medio a grueso, foliada; se observan niveles leucocráticos en venas de composición cuarzo feldespática dispuestas en forma paralela a la foliación. Esta formada por anfíbol (40%), biotita (20%), plagioclasa (25%) y cuarzo (15%).



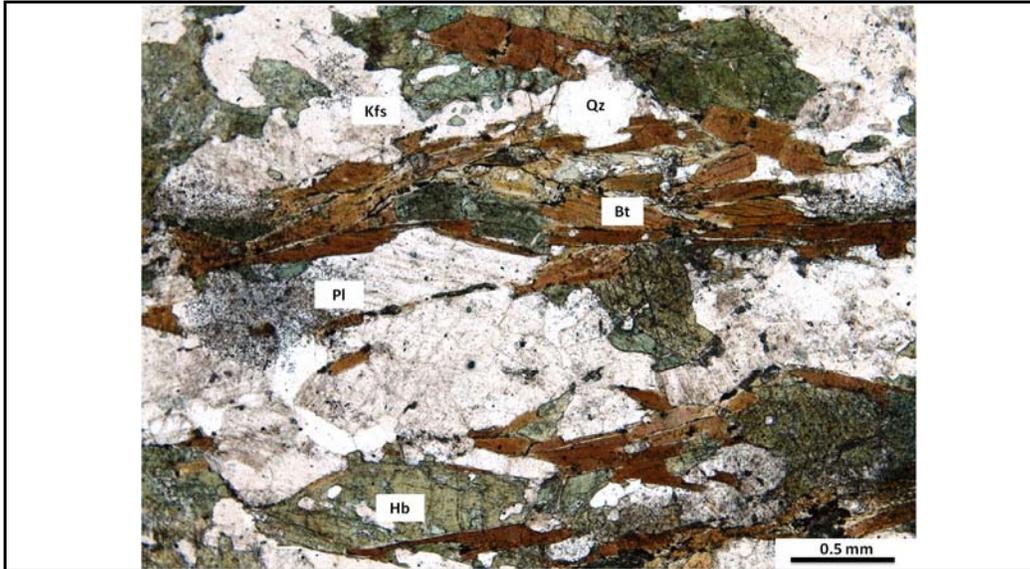
Descripción Microscópica

Roca de grano medio, foliada con textura nematoblástica dada por la orientación de biotita y anfíbol que forman láminas discontinuas que separan niveles cuarzo feldespáticos. Como minerales accesorios se reconoce epidota, esfena y apatito.

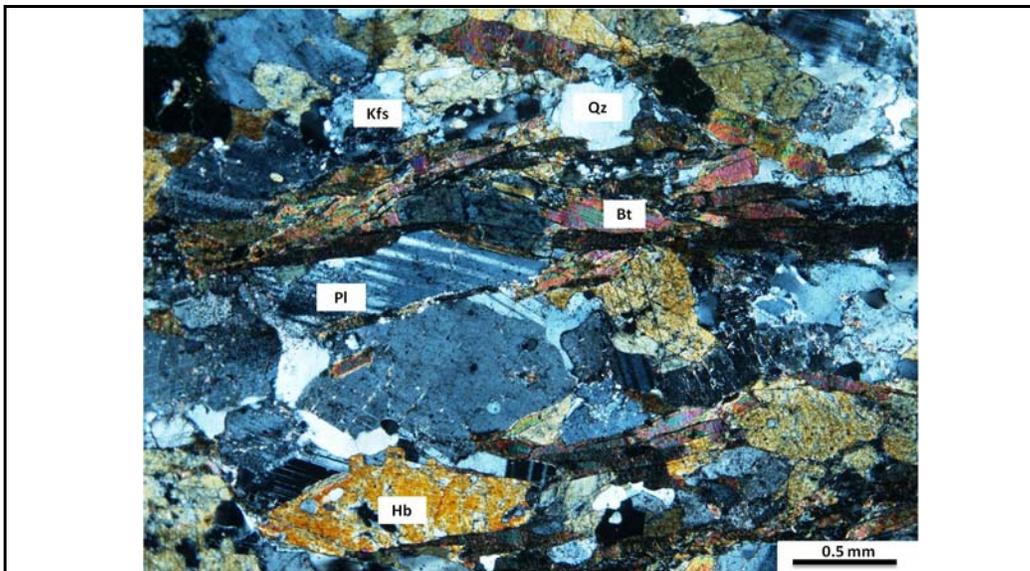


MINERALOGÍA					
Principales	%		Accesorios	%	
Cuarzo	10		Epidota	5	
Plagioclasa	18		Apatito	6	
Feldespato potásico	14		Minerales Opacos	10	
Hornblenda	20		Esfena	< 1	
Biotita	15		Circón	2	
Alteración	%		Introducción	%	
Sericita	Tz				
Total				100	
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa - Biotita - Feldespato potásico - Cuarzo					
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico					
Facies Anfibolita			Protolito Roca volcánica o volcanosedimentaria		
Clasificación Neis hornbléndico con biotita y feldespato potásico					
			Según SCMR		
Descrpción de minerales					
<p>Cuarzo: Cristales de tamaño medio, anhedrales, con bordes suturados, presenta una fuerte extinción ondulante, se observan otras estructuras como bandas de deformación y bordes de subgrano producidas por deformación mecánica. Hay procesos de recristalización de cristales muy finos alrededor de cristales más grandes.</p> <p>Feldespato potásico: Cristales de tamaño fino y medio, anhedrales a subhedrales, presentas texturas de exsolución y ocasionalmente desarrollan macla tipo Carlsbad. Contienen pequeñas inclusiones de epidota y cuarzo, se encuentran ligeramete alterados.</p> <p>Plagioclasa: Corresponde a cristales de tamaño medio, subhedrales, con contactos entre granos rectos, la mayoría de los cristales desarrollan macla tipo albita o combinada con Carlsbad y algunos con maclas mecánicas. Es comun observar intercrecimientos simplectíticos y texturas de exsolución; contienen inclusiones de epidota y biotita e inclusiones redondeadas de cuarzo y apatito. Leve alteracion a sericita.</p> <p>Hornblenda: Se encuentra como cristales de tamaño fino y medio, subhedrales, con dosdirecciones de exfoliación en cortes basales y una dirección en cortes longitudinales; presenta un fuerte pleocroísmo verde oliva a amarillo claro, extinción oblicua y algunos cristales desarrollan macla simple. Se encuentra en paragénesis con biotita y epidota y contiene inclusiones de cuarzo y minerales opacos.</p> <p>Biotita: Cristales de tamaño medio, euhedrales con hábito hojoso y formas tabulares, fuerte pleocroísmo café-marron a verde-amarillo, tonos de interferencia de tercer orden. Algunos cristales se observan flexurados.</p> <p>Epidota: Corresponde a cristales de tamaño fino y muy fino, anhedrales y subhedrales, que se encuentran en agregados, con un ligero pleocroísmo verde claro. Se encuentra asociada a niveles con mayor contenido de máficos.</p> <p>Apatito: Ocurre como cristales de tamaño muy fino, euhedrales y subhedrales, con formas hexagonales y redondeadas; relieve moderado y muy baja birrefringencia. Se encuentraa principalmente como inclusiones en hornblenda, plagioclasa y cuarzo.</p> <p>Minerales Opacos: Son cristales de tamaño fino y medio, euhedrales a subhedrales de formas cuadrangulares; ocasionalmente presentan tonalidades rojizas considerándolos minerales de hierro.</p> <p>Esfena: Cristales de tamaño muy fino euhedrales.</p> <p>Sericita: Ocurre como alteración asociada a los feldespatos.</p>					

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis hornbléndico con biotita y feldespato potásico (2x - PPL)



Neis hornbléndico con biotita y feldespato potásico (2x - XPL)

**DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER**

Información General

Muestra No	2012-11-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1120675	Localidad:	Vía Quince Letras - Umpalá
N:	1250369		

Descripción Macroscópica

Roca de grano medio a grueso, con desarrollo de foliación y estructura migmatítica; se diferencian niveles cuarzo feldespáticos que conforman el leucosoma y niveles micáceos con biotita y muscovita.



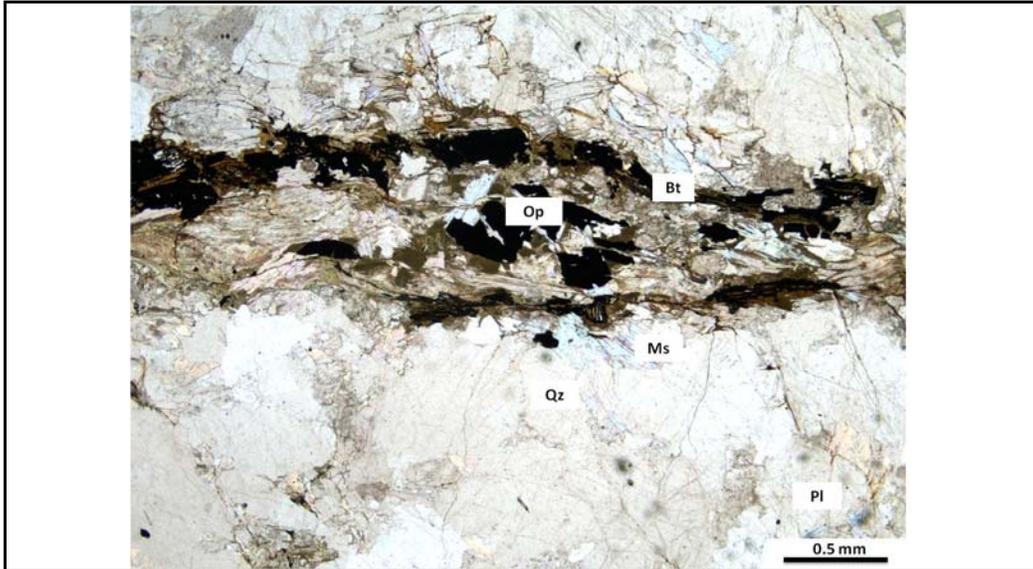
Descripción Microscópica

Roca con textura granoblástica de grano grueso y medio, no desarrolla foliación ni orientación mineral. Los minerales micáceos se encuentran en espacios intercrystalinos en niveles discontinuos y zonas con recristalización. Presencia de carbonato.

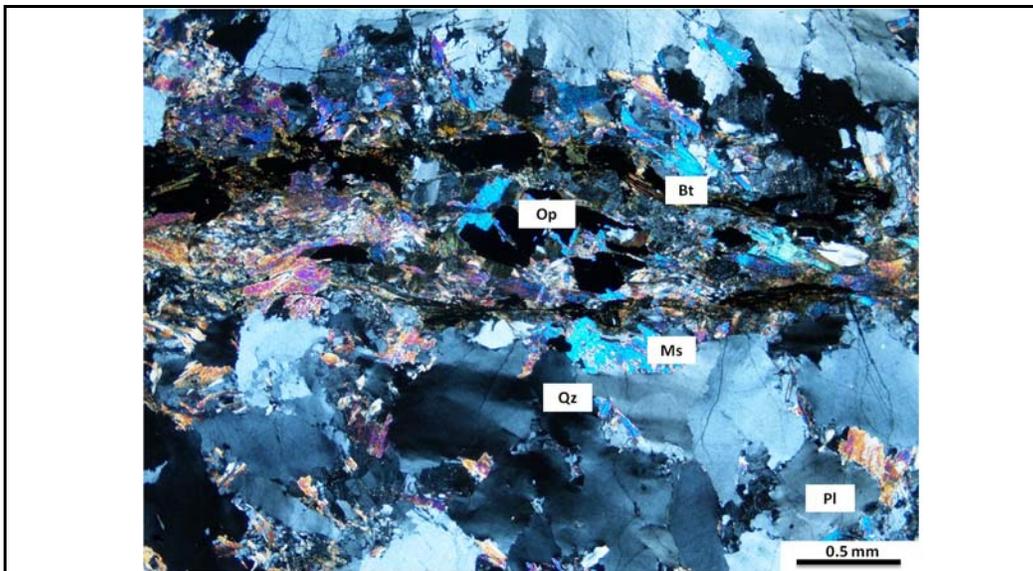


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	52		Minerales Opacos	8
Plagioclasa	12		Circón	< 1
Muscovita	15		Calcita	<1
Biotita	8			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	2			
Sericita	3			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Cuarzo - Biotita - Muscovita				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Pelita arenosa		
Clasificación Neis cuarzo feldespático con biotita y muscovita				
Según SCMR				
Descrpción de minerales				
<p>Cuarzo: Cristales de tamaño grueso, anhedrales, con bordes suturados, fuerte extinción ondulante, desarrolla bandas de deformación; algunas veces presenta fracturas que estan rellenas por micas. Contiene inclusiones de muscovita, biotita y circón.</p> <p>Plagioclasa: Corresponde a cristales de tamaño medio y fino, bordes rectos. Algunos cristales desarrollan macla tipo periclina, en otros no se reconoce debido a la sericitización.</p> <p>Biotita: Cristales de tamaño medio y fino, subhedrales con hábito hojoso, de color verde claro ligeramente pleocróicos debido a cloritización. Se encuentra en niveles micáceos y se observan minerales opacos asociados a planos de exfoliación que reemplazan parcialmente cristales de biotita.</p> <p>Muscovita: Se presenta como cristales de tamaño fino y medio, euhedrales y subhedrales, con formas tabulares, son incoloros y tonos de interferencia azul - verde. Aunque no hay orientación se asocian en sectores micáceos con biotita.</p> <p>Carbonato: Ocurre solo en un sector de la sección y se encuentra como cristales anhedrales maclados.</p> <p>Minerales Opacos: Están asociados principalmente a la biotita; corresponden a cristales subhedrales, con tonalidades rojizas y se desarrollan estructuras de crecimiento, posiblemente corresponden a hematita.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con biotita y muscovita (2x - PPL)



Neis cuarzo feldespático con biotita y muscovita (2x - XPL)

**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER**

Información General

Muestra No	2012-14-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1123851	Localidad:	Vía Cepitá - Pescadito
N:	1240657		

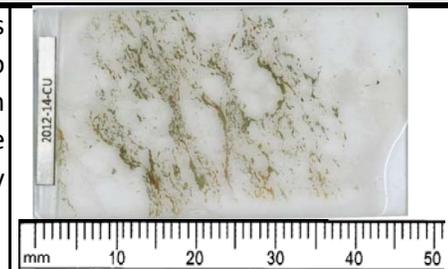
Descripción Macroscópica

Roca de grano grueso, con bandeamiento composicional, se diferencian niveles cuarzo feldespáticos predominantes de niveles delgados de minerales micáceos, principalmente biotita, allí se observa cristales de tamaño medio con forma hexagonal que posiblemente corresponden a apatito.



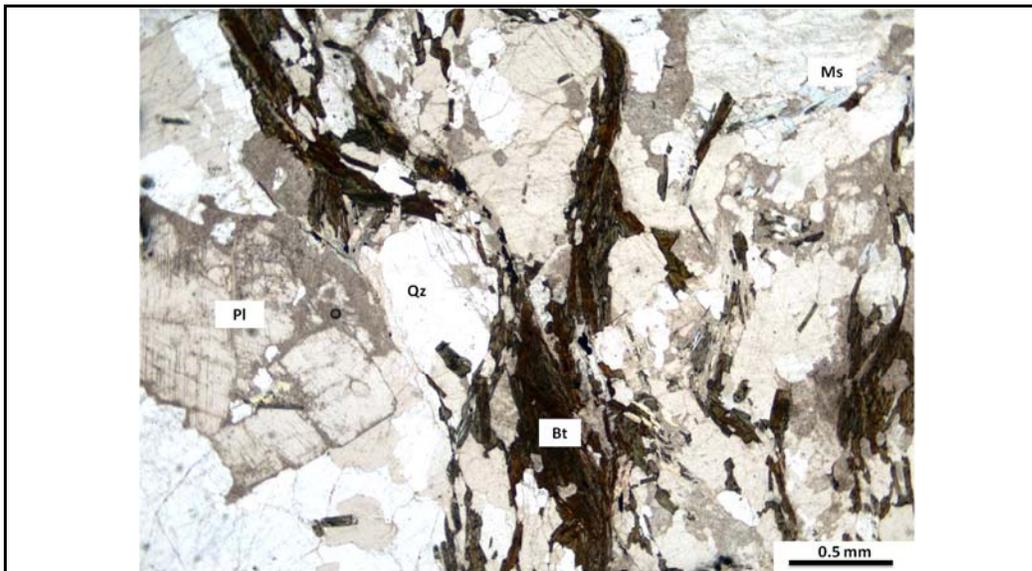
Descripción Microscópica

Roca foliada con lineación mineral y textura neisosa; hacia los extremos de la sección se presentan niveles cuarzo feldespáticos de grano grueso, con texturas de exsolución en feldespatos. Están separados por un nivel en el que se desarrollan láminas de minerales micáceos orientados y láminas cuarzo feldespáticas de grano medio.

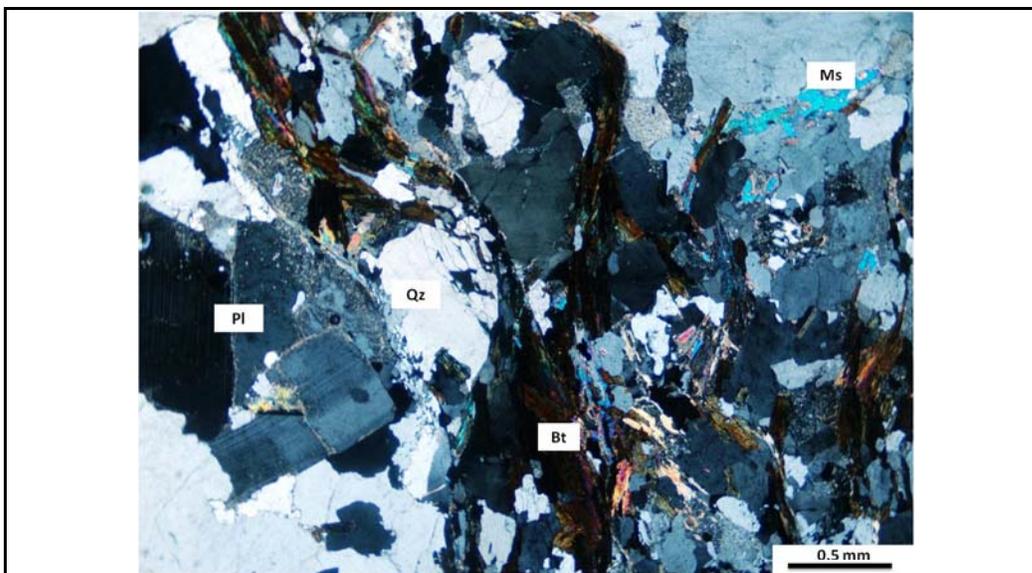


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	40		Apatito	2
Plagioclasa	20		Minerales Opacos	3
Feldespato potásico	8			
Biotita	15			
Muscovita	10			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita (% en Bt)	10			
Sericita	4			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Biotita - Muscovita - Feldespato potásico - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Pelita arenosa		
Clasificación Neis cuarzo feldespático con biotita y muscovita				
Según SCMR				
Descrpción de minerales				
<p>Cuarzo: Cristales anhedrales, de tamaño grueso y medio, orientados, con contactos suturados e irregulares, presentan extinción ondulante y ocasionalmente se desarrollan bordes de subgrano.</p> <p>Plagioclasa: Corresponde a cristales subhedrales, de tamaño grueso y medio, desarrollan maclas delgadas tipo albita y maclas mecánicas, presentan texturas de exsolución con feldespatos. Contienen inclusiones de cuarzo y muestran sericitización selectiva.</p> <p>Feldespato potásico: Ocurre en los niveles cuarzo feldespáticos de tamaño grueso como cristales anhedrales de bordes irregulares y presenta intercrecimientos simplectíticos y texturas de exsolución con plagioclasa en los bordes.</p> <p>Biotita: Los cristales son de tamaño fino y medio, con formas tabulares y dispuestos en forma paralela a la foliación. Se restringe a niveles micáceos en el sector central de la sección. Presenta un alto grado de cloritización, algunos cristales son de color amarillo claro, se desarrollan cristales de minerales opacos en los bordes de los cristales.</p> <p>Muscovita: Cristales de tamaño fino, euhedrales, incoloros con altos tonos de interferencia. Se encuentran dispuestos en láminas micáceas asociada a la biotita y ocupando espacios intercristalinos en los niveles cuarzo feldespáticos.</p> <p>Apatito: Se encuentran cristales euhedrales, con formas hexagonales de tamaño fino y medio, son incoloros, casi isotrópicos y se encuentran en agregados cristalinos.</p> <p>Minerales Opacos: Cristales anhedrales, de tamaño fino y asociados principalmente a biotita.</p>				

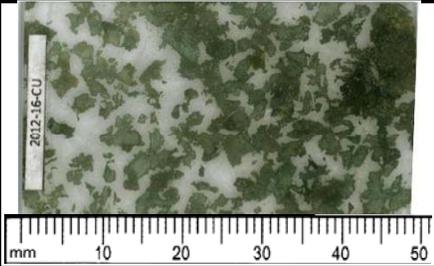
REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con biotita y muscovita (2x - PPL)

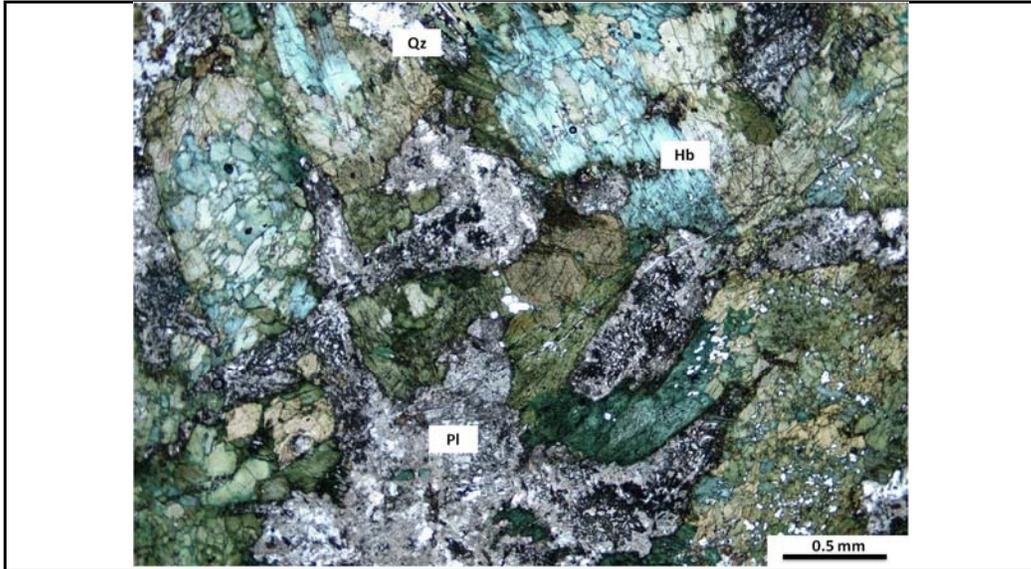


Neis cuarzo feldespático con biotita y muscovita (2x - XPL)

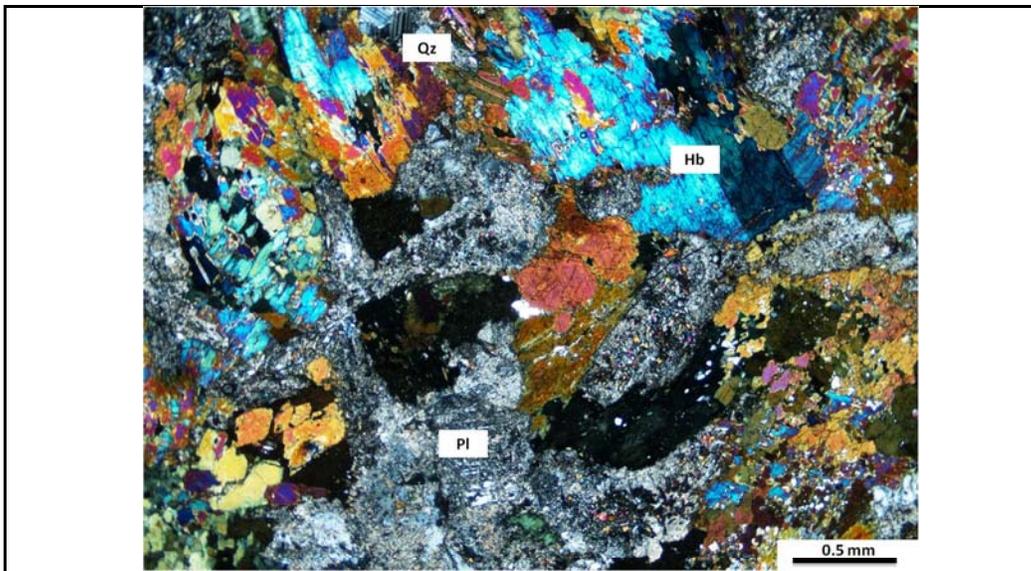
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA			
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER			
Información General			
Muestra No	2012-16-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1123778	Localidad:	Vía Cepitá - Pescadito
N:	1239750		
Descripción Macroscópica			
<p>Roca de grano medio y grueso, de textura granoblástica en la que no se reconoce de forma evidente orientación mineral; esta compuesta por cristales euhedrales de hornblenda con tonos verde oscuro a verde oliva en un 60% y plagioclasa que constituye el 40% de la roca.</p>			
Descripción Microscópica			
<p>Roca de grano grueso, con textura granoblástica que no desarrolla foliación. Presenta texturas poiquilíticas con inclusiones de epidota y apatito en anfíboles, los cuales también se encuentran cortados por venas de epidota; otros accesorios como óxidos y esfena. Tienen un alto grado de alteración en plagioclasas.</p>			

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	10		Epidota	8
Plagioclasa	30		Esfena	2
Hornblenda	40		Apatito	1
			Minerales Opacos	5
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	5			
Sericita (% en Pl)	20			
Total				100
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfíbolita		Protolito Roca volcánica o volcanosedimentaria		
Clasificación Anfíbolita				
Según SCMR				
Descripción de minerales				
<p>Plagioclasa: Cristales de tamaño medio y grueso, euhedrales a subhedrales, desarrollan macla tipo albita, contienen algunas inclusiones de epidota y se encuentran bastante sericitizados.</p> <p>Hornblenda: Son cristales de tamaño medio y grueso, subhedrales, de color verde oliva con pleocroísmo a verde-amarillo, presenta tonos de interferencia de segundo orden desde amarillo a azul y morado, los cortes basales muestran dos direcciones de clivaje y ocasionalmente desarrollan macla simple y doble. Muchos de los cristales tienen texturas poiquilíticas debido a que contienen inclusiones semi-esféricas de cuarzo, apatito y epidota. También se caracteriza por desarrollar agregados cristalinos en mosaico, donde los cristales que lo forman tienen ángulos de extinción diferentes, algunos posiblemente se encuentran levemente cloritizados.</p> <p>Cuarzo: Corresponde a cristales anhedrales, de tamaño fino y medio, con bordes irregulares, presentan extinción ondulante y ocasionalmente bordes de subgrano. También se encuentran como inclusiones redondeadas en hornblenda.</p> <p>Epidota: Cristales de tamaño muy fino, subhedrales y anhedrales, con suave pleocroísmo a verde claro, tienen tonos de interferencia de segundo y tercer orden y algunos de estos corresponderían a clinzoicita. Se encuentra como agregados cristalinos en pequeñas acumulaciones, como cristales aislados incluidos en hornblenda y plagioclasa y rellenando venillas que cortan cristales de los mismos minerales.</p> <p>Esfena: Cristales de tamaño fino y muy fino, anhedrales y subhedrales, son de color café claro y se asocian a hornblenda, también se encuentran formando coronas alrededor de minerales opacos.</p> <p>Apatito: Cristales de tamaño muy fino, subhedrales, algunos con formas prismáticas y ocurren como inclusiones en plagioclasa y anfíbol.</p> <p>Minerales Opacos: Se encuentran como cristales anhedrales, de tamaño muy fino, asociados a los planos de exfoliación de la hornblenda y sectores con clorita. Tienen coloración rojiza y se consideran óxidos de hierro.</p> <p>Clorita: Está asociada a la alteración de hornblenda principalmente en cristales de menor tamaño y en los que forman los agregados cristalinos; se desarrolla como cristales muy finos fibrosos.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anfibolita formada por plagioclasa, hornblenda y cuarzo (2x - PPL)

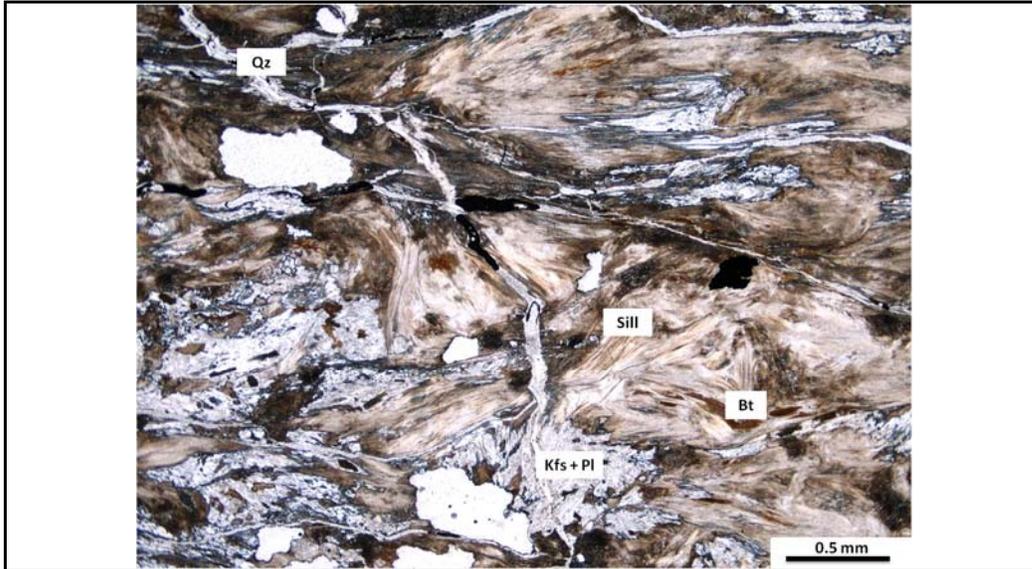


Anfibolita formada por plagioclasa, hornblenda y cuarzo (2x - XPL)

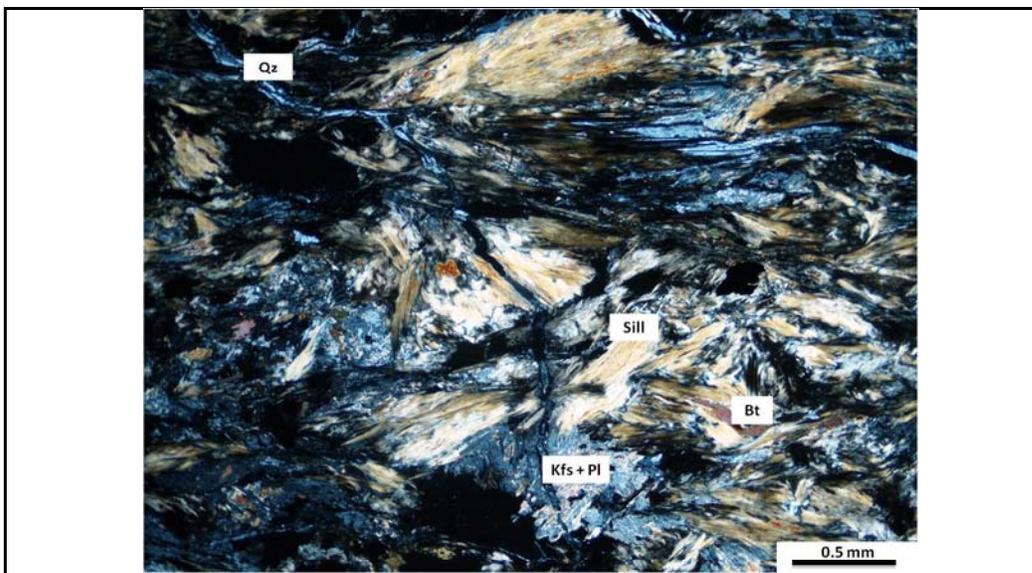
DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA			
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER			
Información General			
Muestra No	2012-17-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1125465	Localidad:	Vía El Barro - La Chorrera
N:	1237812		
Descripción Macroscópica			
<p>Roca de grano medio, con foliación y desarrollo de niveles cuarzo feldespáticos en venas que se entre cruzan entre sí en zonas posible con recristalización, los niveles oscuros son de composición micácea.</p>			
Descripción Microscópica			
<p>Roca de grano fino, foliada, con marcada lineación mineral, tienen un alto contenido de silimanita fibrosa y pequeños cristales de biotita y plagioclasa ligeramente maclados; el feldespato potásico no se reconoce petrográficamente. Se observan delgadas venillas rellenas por sílice con textura fibrosa.</p>			

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Silimanita	40		Minerales Opacos	5
Plagioclasa	15		Muscovita	Tz
Feldespato potásico	30			
Biotita	8			
Alteración	%		Introducción	%
			Sílice	2
Total				100
Paragénesis Silimanita - Feldespato potásico - Plagioclasa - Biotita				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Pelita / arcosa		
Clasificación Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita				
		Según SCMR		
Descrpción de minerales				
<p>Silimanita: Se encuentra como cristales de tamaño fino, de hábito fibroso, incoloros de relieve moderado y tonos de interferencia de primer orden; están orientados definiendo la foliación de la roca, asociados a biotita, plagioclasa y pequeños cristales de muscovita.</p> <p>Plagioclasa: Cristales de tamaño fino y medio, subhedrales, algunos están debilmente maclados (tipo albita y periclina) y otros no se encuentran maclados pero tienen figura de interferencia biáxica negativa.</p> <p>Biotita: Cristales de tamaño fino, subhedrales, con hábito hojoso, de color café - pardo pleocrícos a tonos más claros, birrefringencia verde de segundo orden y extinción en ojo de pájaro; se encuentra asociado a la silimanita.</p> <p>Muscovita: Cristales muy pequeños asociados a la silimanita, que se reconocen por altos tonos de interferencia.</p> <p>Minerales Opacos: Cristales de tamaño fino, anhedrales, con tonalidades rojizas que posiblemente corresponden a óxidos de hierro. Ocurren en niveles silimaníticos.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita (2x - PPL)



Neis cuarzo feldespático con silimanita y biotita (2x - XPL)

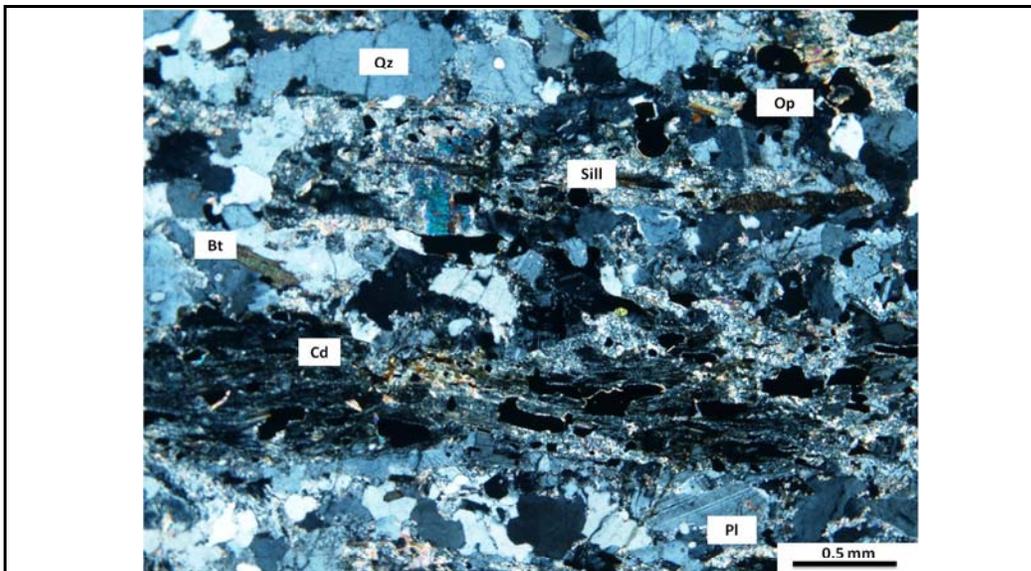
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA			
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER			
Información General			
Muestra No	2012-18-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1125623	Localidad:	Vía El Barro - La Chorrera
N:	1237861		
Descripción Macroscópica			
<p>Roca de grano medio a grueso, foliada con estructura migmatítica; presenta leucosomas poco abundantes de composición cuarzo feldespática y mesosomas compuestos por biotita, silimanita, cuarzo y plagioclasa.</p>			
Descripción Microscópica			
<p>Roca de grano fino a medio, foliada con orientación mineral. Se diferencian niveles cuarzo feldespáticos y niveles de silimanita y biotita; se observan sectores con alto gado de sericitización en el que se encuentra cordierita junto con epidota, clorita, muscovita y circones.</p>			

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	25		Epidota	Tz
Plagioclasa	17		Muscovita	3
Feldespato potásico	8		Minerales Opacos	7
Biotita	15		Circón	1
Silimanita	5			
Cordierita	12			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	3			
Sericita	4			
Total				100
Paragénesis Silimanita - Plagioclasa - Feldespato potásico - Biotita - Cuarzo - Cordierita				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfíbolita		Protolito Pelita		
Clasificación Neis cuarzo feldespático con biotita, cordierita y silimanita				
Según SCMR				
Descripción de minerales				
<p>Cuarzo: Cristales de tamaño fino y medio, anhedrales con bordes irregulares, tiene extinción ondulante; también se encuentra como inclusiones esféricas en cordierita, plagioclasa y feldespato potásico.</p> <p>Plagioclasa: Corresponde a cristales de tamaño medio, subhedrales; generalmente desarrolla macla tipo albita delgada e incipiente, se observan algunas maclas mecánicas.</p> <p>Feldespato potásico: Cristales de tamaño fino y medio, anhedrales; desarrolla lamelas de exolución asociadas a plagioclasa, también contiene algunas inclusiones esféricas de cuarzo.</p> <p>Biotita: Se encuentra como cristales de tamaño fino y medio, euhedrales, con formas tabulares, color café-pardo pleocróicos a verde-amarillo; se orientan siguiendo la foliación en niveles continuos; están asociados a silimanita y minerales opacos, predominando en los niveles cuarzo feldespáticos.</p> <p>Silimanita: Corresponde a cristales de tamaño fino, con hábito fibroso y prismático muy delgados, tiene tonos de interferencia amarillo y naranja de primer orden, se encuentra asociada a biotita y algunas veces en sectores con cordierita.</p> <p>Cordierita: Cristales de tamaño fino y medio, anhedrales, se observa una coloración amarilla muy tenue, es de relieve bajo, tonos de interferencia gris de primer orden, figura de interferencia biáxica negativa. Contiene múltiples inclusiones de cuarzo, minerales opacos, circones y fuerte sericitización hacia los bordes de los cristales; se encuentra en niveles orientados de forma paralela con la foliación y a veces asociada a silimanita.</p> <p>Clorita: Cristales de tamaño fino, subhedrales, con hábito hojoso, presenta pleocroísmo verde claro, con tonos de interferencia anómalos azul berlín. Ocurre como alteración de la biotita, sin embargo se observan cristales aislados orientados de manera perpendicular a la foliación.</p> <p>Muscovita: Se encuentra en setores fuertemente sericitizados, donde los cristales de la alteración alcanzan un tamaño mayor.</p> <p>Minerales Opacos: Son cristales de tamaño fino, anhedrales, se pueden encontrar como inclusiones esféricas asociadas a cordierita y a biotita.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con biotita, cordierita y silimanita (2x - PPL)



Neis cuarzo feldespático con biotita, cordierita y silimanita (2x - XPL)

DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER

Información General

Muestra No	2012-19a-CU	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1125637	Localidad:	El Barro
N:	1237884		

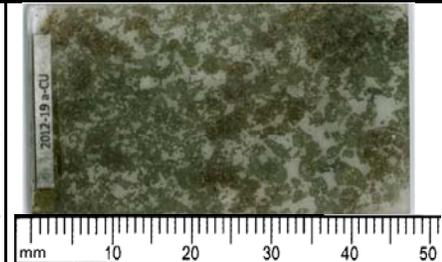
Descripción Macroscópica

Roca de grano medio, con desarrollo incipiente de lineación mineral; formada principalmente por hornblenda y plagioclasa, se observan algunos lentes y venillas de composición cuarzo feldespática que generan estructuras migmatíticas.



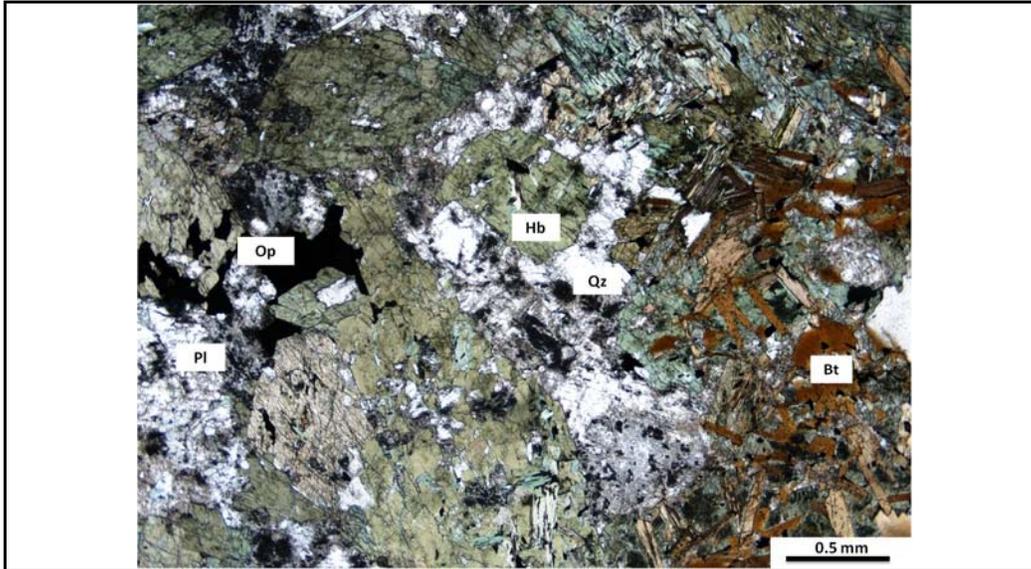
Descripción Microscópica

Roca de grano medio a grueso, con textura granoblástica, sin orientación mineral. Esta compuesta por hornblenda, plagioclasa, biotita y epidota como inclusión. El cuarzo se restringe a una delgada venilla que atraviesa la sección. No se evidencia la presencia de feldespato potásico, sin embargo se reconocen texturas de exsolución e intercrecimientos simplectíticos.

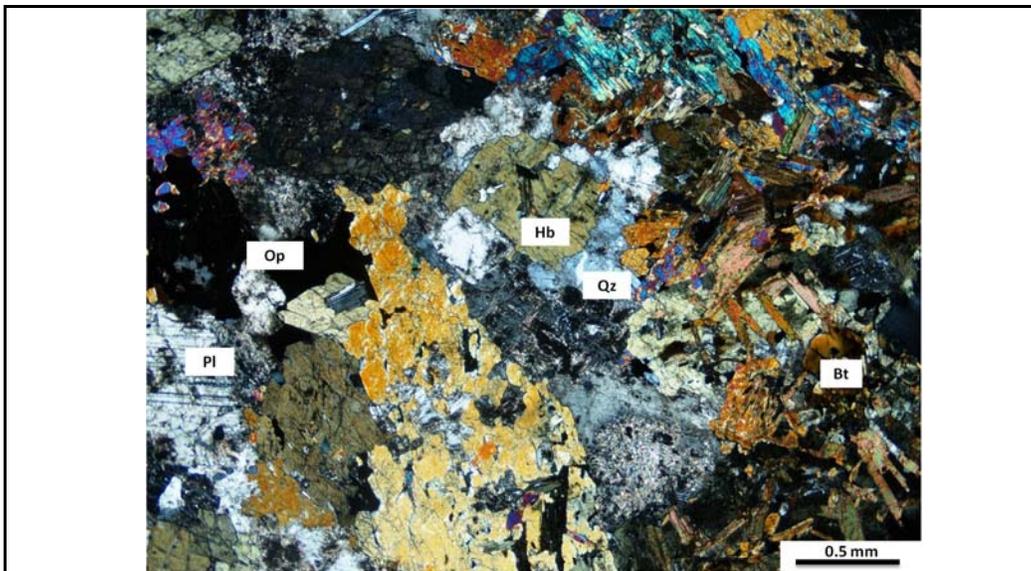


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Hornblenda	55		Epidota	1
Plagioclasa	22		Minerales Opacos	3
Biotita	15			
Alteración	%		Introducción	%
Sericita	7		Cuarzo	1
Total				100
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa - Biotita				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita			Protolito Roca volcánica o volcanosedimentaria	
Clasificación Anfibolita				
Según SCMR				
Descrpción de minerales				
<p>Plagioclasa: Cristales de tamaño fino y medio, subhedrales y anhedrales, generalmente presentan macla tipo albita y Carlsbad, en algunos cristales es incipiente; se desarrollan texturas de exsolución. Algunos cristales esta afectados fuertemente por alteración a sericita.</p> <p>Biotita: Son cristales de tamaño fino y medio, euhedrales, con forma tabular, de color café-pardo pleocróicos a tonos amarillo claro, está asociada a hornblenda en sectores aunque no se encuentra orientada. Ocasionalmente se desarrollan minerales opacos en los planos de exfoliación.</p> <p>Hornblenda: Corresponde a cristales de tamaño medio y grueso, subhedrales, agrupados en agregados cristalinos, son de color verde oliva con pleocroísmo a tonos amarillos; algunos cristales presentan macla simple y contienen inclusiones de epidota y minerales opacos asociados a los planos de exfoliación.</p> <p>Minerales Opacos: Cristales de tamaño fino, anhedrales, se observan tonalidades amarillo - naranja hacia sus bordes; estan asociados a biotita y hornblenda.</p>				

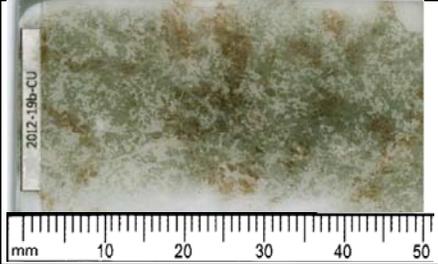
REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anfibolita compuesta por plagioclasa, hornblenda, biotita y cuarzo (2x - PPL)



Anfibolita compuesta por plagioclasa, hornblenda, biotita y cuarzo (2x - XPL)

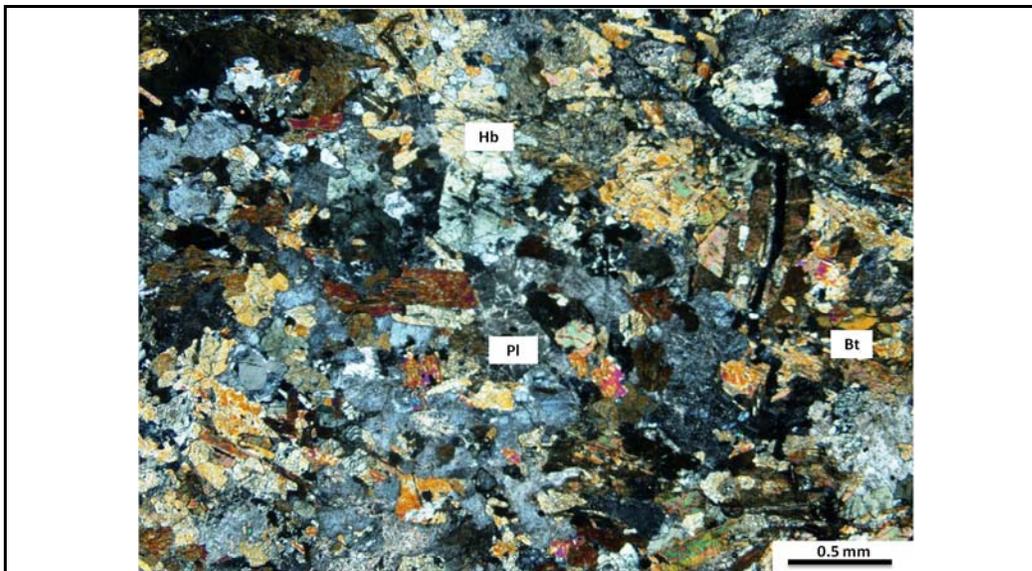
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA	
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER	
Información General	
Muestra No	2012-19b-CU
Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1125637
Localidad:	El Barro
N:	1237884
Descripción Macroscópica	
<p>Roca de grano grueso, con textura granoblástica con amplios niveles compuestos por plagioclasa y anfíbol; en general es muy similar a la muestra 2012-19a-CU, la diferencia principal es el tamaño de grano</p>	
Descripción Microscópica	
<p>Roca de grano fino y medio, con textura granoblástica, no desarrolla lineación mineral, tiene una fuerte alteración evidenciada por cloritización de anfíboles y sericitización de plagioclasas. Adicionalmente, hay evidencias de procesos dinámicos sobreimpuestos como fragmentación y recristalización de cuarzo en lentes y venillas.</p>	

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Hornblenda	43		Minerales Opacos	2
Plagioclasa	15			
Biotita	18			
Cuarzo	7			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita (% en Hb)	20			
Sericita	15			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Biotita - Hornblenda - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Roca volcánica o volcanosedimentaria		
Clasificación Anfibolita con biotita				
		Según SCMR		
Descripción de minerales				
<p>Plagioclasa: Cristales de tamaño fino y medio, subhedrales, fuertemente sericitizados, en algunos cristales se alcanzan a reconocer delgadas maclas tipo albita.</p> <p>Biotita: Cristales de tamaño fino a medio, euhedrales y subhedrales, con hábito hojoso, color café-pardo pleocróicos; están agrupados con hornblenda.</p> <p>Hornblenda: Corresponde a cristales de tamaño fino y medio, subhedrales a anhedrales, son de color verde claro pleocróicos y con bajos tonos de interferencia debido a la alteración casi en su totalidad a clorita. Algunos cristales se encuentran fragmentados.</p> <p>Cuarzo: Cristales de tamaño fino y medio, anhedrales, con extinción ondulante y recristalización hacia los bordes; también se encuentra rellenando venillas y formando lentes recristalizados.</p>				

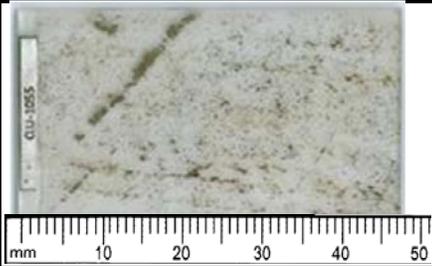
REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anfibolita formada por plagioclas, hornblenda y biotita (2x - PPL)

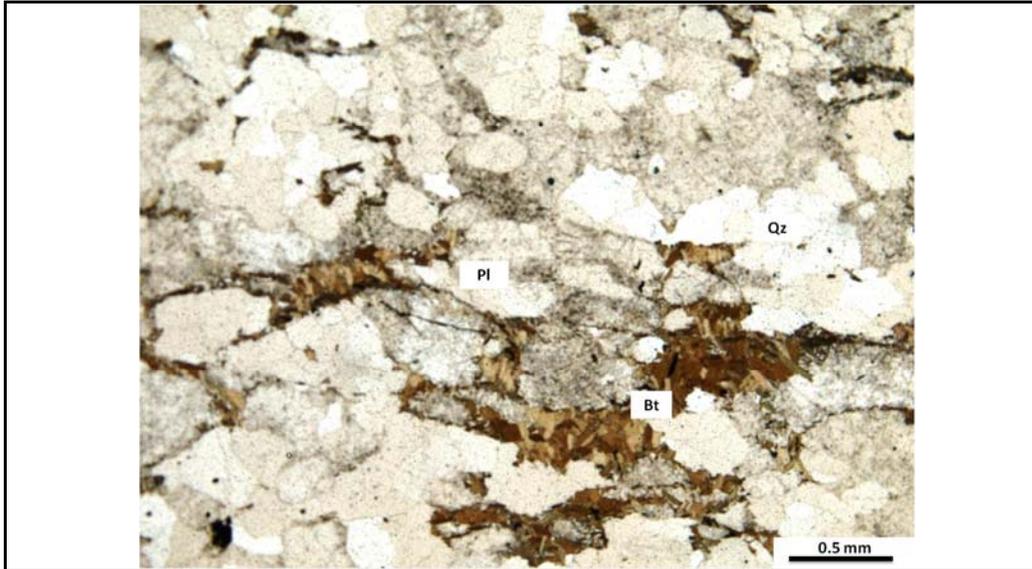


Anfibolita formada por plagioclas, hornblenda y biotita (2x - XPL)

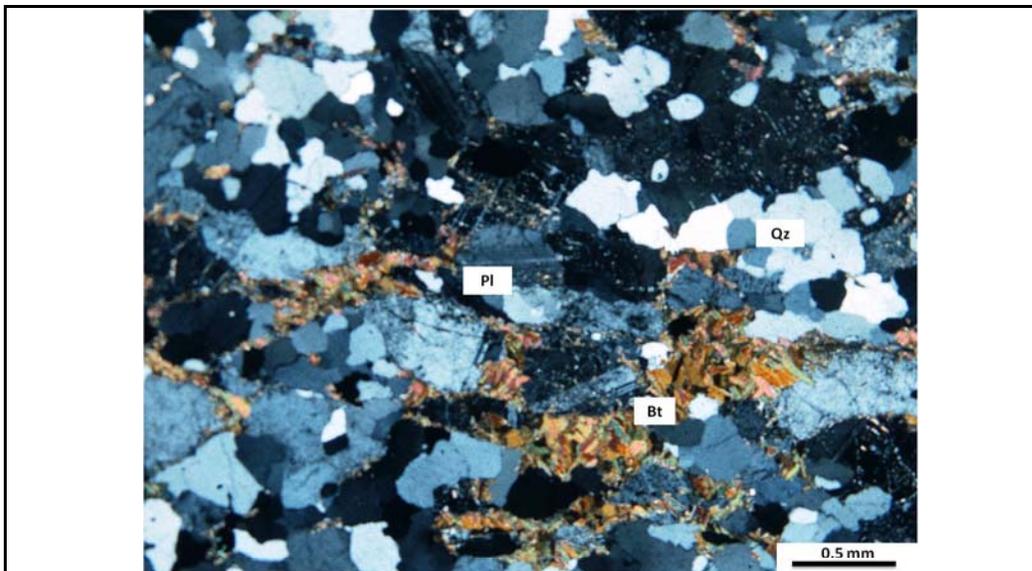
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA			
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER			
Información General			
Muestra No	CLU-1055	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1134455	Localidad:	Vetas - Reina de Oro
N:	1301141		
Descripción Macroscópica			
<p>Roca de grano medio, con lineación mineral con venillas de sulfuros; se reconocen láminas de minerales máficos como anfíbol y biotita; y láminas cuarzo feldespáticas.</p>			
Descripción Microscópica			
<p>Roca foliada con orientación mineral, se desarrollan algunas láminas delgadas y continuas. Es de grano fino y se caracteriza por formar agregados de cuarzo en mosaicos poligonales y sectores con recristalización separados por delgadas láminas de biotita y muscovita-sericita, que no siguen el patrón de foliación. Se observa venillas discontinuas de minerales opacos. Se encuentran como accesorios cristales euhedrales de circón y apatito.</p>			

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	20		Muscovita	7
Plagioclasa	40		Minerales Opacos	10
Biotita	17		Apatito	Tz
			Circón	1
Alteración	%		Introducción	%
Sericita	5			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Biotita - Cuarzo - Muscovita				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Pelita/ Arcosa		
Clasificación Neis cuarzo feldespático con biotita				
		Según SCMR		
Descrpción de minerales				
<p><u>Cuarzo</u>: Son cristtales de tamaño fino, anhedrales, con bordes irregulares y ocasionalmente rectos, formando mosaicos poligonales; presentan extinción ondulante y se desarrollan bordes de subgrano en sectores con recristalización.</p> <p><u>Plagioclasa</u>: Cristales de tamaño fino ocasionalmente medio, subhedrales, desarrollan macla tipo albita incompleta y Carlsbad. La mayoría tienen alteración a sericita.</p> <p><u>Biotita</u>: Corresponde a cristales de grano fino, subhedrales y euhedrales, de color cafe - verde, con pleocroísmo verde - pardo, se encuentran orientados definiendo la foliación; algunos cristales conienen minerales opacos que se desarrollan a lo largo de planos de exfoliación.</p> <p><u>Muscovita</u>: Posiblemente corresponde a sericita de mayor tamaño, aunque hay algunos cristales de tamaño fino asociados a biotita; también se encuentra en plagioclasas como cristales de tamaño fino, subhedrales con hábito fibroso y hojoso formando nidos (texturas decusadas) que no siguen el patrón de foliación.</p> <p><u>Minerales Opacos</u>: Cristales de tamaño fino y medio, anhedrales y subhedrales; la mayoría se encuentran en venillas y otros estan asociados a planos de exfoliación de la biotita.</p>				

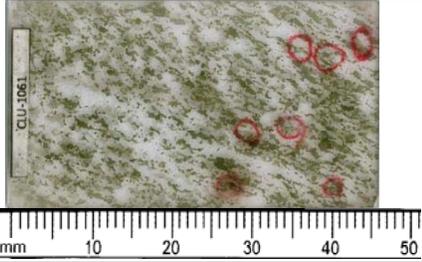
REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con biotita (2x - PPL)

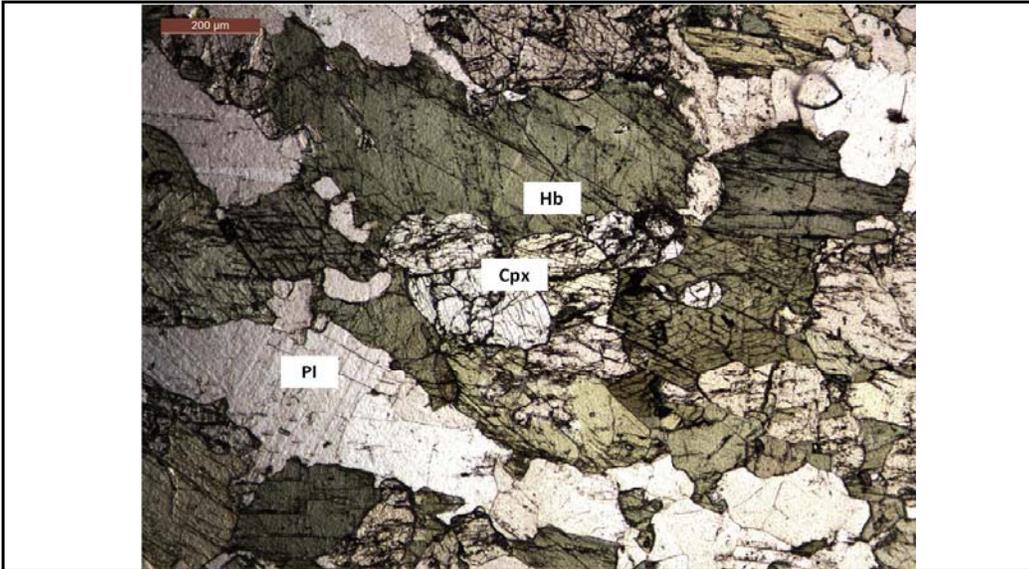


Neis cuarzo feldespático con biotita (2x - XPL)

DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA			
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER			
Información General			
Muestra No	CLU - 1061	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1131189	Localidad:	Vetas, V. Ortegón
N:	1300716		
Descripción Macroscópica			
<p>Roca de grano medio, foliada, compuesta por plagioclasa (20%), cuarzo (15%), biotita (35%) y anfíbol (30%). Se observa alteración a clorita en biotita y algunos cristales de color verde claro posiblemente a epidota.</p>			
Descripción Microscópica			
<p>Roca de grano medio, con textura granoblástica que desarrolla foliación gruesa definida por la orientación de anfíboles que desarrollan textura nematoblástica. Se encuentra formada principalmente por plagioclasa, hornblenda y piroxeno, con muy bajo contenido de cuarzo. Se observa una alta proporción de esfena asociada a los niveles máficos, sin embargo la mayor parte esta en un nivel fuertemente alterado con clinozoicita que corta de forma oblicua la foliación.</p>			

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Hornblenda	27		Esfena	6
Plagioclasa	35		Epidota	1
Clinopiroxeno	25		Cuarzo	4
			Clinozoicita	2
			Circón	Tz
Alteración	%		Introducción	%
Sericita	< 1			
Total				100
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa -Clinopiroxeno				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Roca volcánica		
Clasificación Anfibolita con clinoporoxeno				
		Según SCMR		
Descrpción de minerales				
<p>Plagioclasa: Corresponde a cristales de tamaño medio, euhedrales, con bordes rectos. La mayoría de los cristales se encuentran maclados con macla tipo periclina y albita delgada; ocasionalmente se observan texturas de exsolución e inclusioness de circón, clinozoicita y esfena. Algunos cristales estan bastante sericitizados.</p> <p>Hornblenda: Cristales de tamaño fino y medio, euhedrales con forma tabular, de color verde oliva a café claro, tonos de interferencia amarillo y naranja de segundo orden; orientados definiendo la foliación, contiene numerosas inclusiones de esfena y plagioclasa.</p> <p>Clinopiroxeno: Cristales de tamaño medio, subhedrales, incoloros o con ligero pleocroísmo verde, tienen extinción inclinada y altos tonos de interferencia (augita-diopsido), sin embargo algunos cristales tienen tonos de interferencia de primer orden y el ángulo de extinción es menor a 10° no se identifican claramente ortopiroxenos. Se encuentran asociados a niveles anfibólicos desarrollando intercrecimiento con hornblenda, ocasionalmente se observan núcleos de anfíbol con cristales de piroxeno alrededor, lo cual indica una reacción prógrada de metamorfismo.</p> <p>Cuarzo: Se encuentra en muy baja proporción y corresponde a cristales de tamaño fino, anhedrales de bordes irregulares, con una ligera extinción ondulante.</p> <p>Epidota: Son cristales de tamaño muy fino, anhedrales, que se encuentran en agregados cristalinos asociados a plagioclasa y hornblenda. Algunos cristales de tamaño muy fino, euhedrales con formas cúbicas y tonos de interferencia amarillo-azul se han identificado como <u>Clinozoicita</u>, se encuentran hacia los bordes de la hornblenda.</p> <p>Esfena: Cristales de tamaño fino y muy fino, euhedrales de formas rómbicas, generalmente se encuentran en agregados cristalinos asociados a hornblenda.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anfibolita con clinopiroxeno (10x - PPL)



Anfibolita con clinopiroxeno (10x - XPL)

DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER

Información General

Muestra No	CLU-1065	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1132899	Localidad:	Vetas, V. La Tosca
N:	1301206		

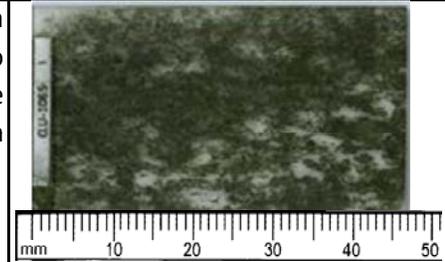
Descripción Macroscópica

Roca de grano fino a medio, foliada, con un alto contenido de minerales máficos que corresponden principalmente a biotita; se desarrollan delgadas venillas con epidota y pirita que cortan la foliación y son propias del evento hidrotermal.



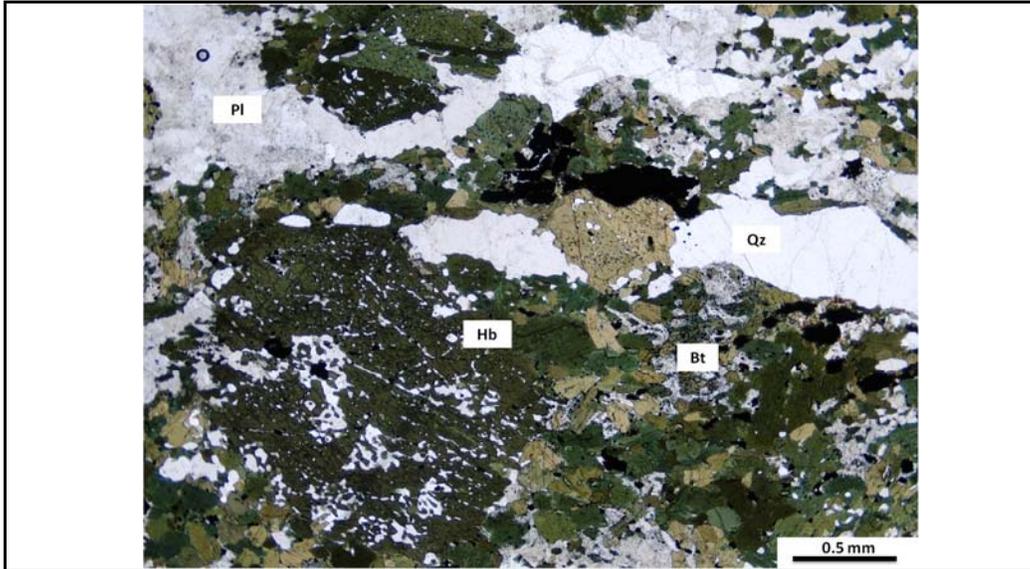
Descripción Microscópica

Roca foliada de grano medio, que desarrolla textura nematoblástica en niveles con anfíboles y lentes cuarzo feldespáticos concordantes con la foliación. Se reconoce epidota, esfena y circón como minerales accesorios y sericita y clorita como minerales de alteración.

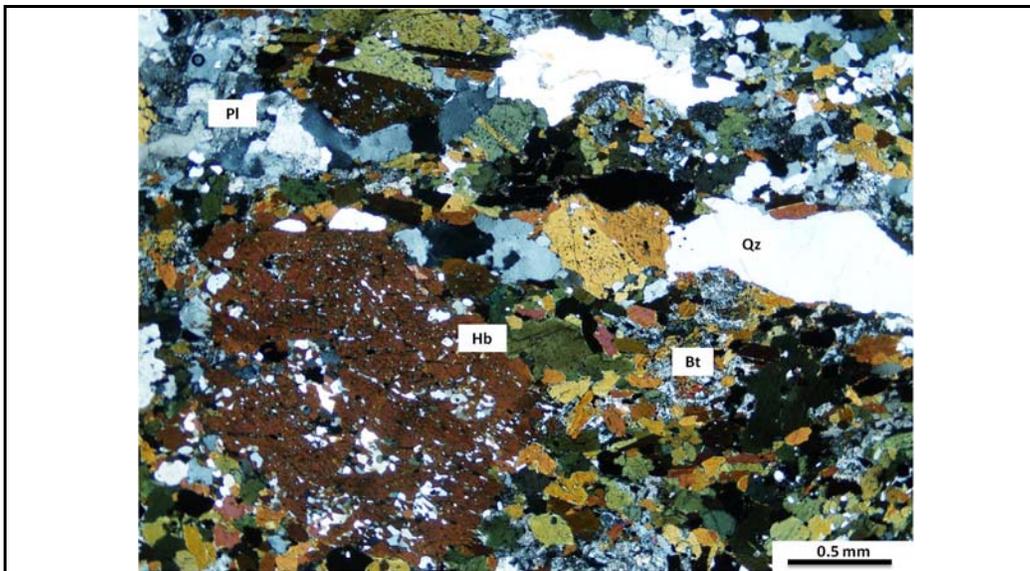


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Hornblenda	35		Esfena	1
Plagioclasa	27		Epidota	1
Cuarzo	12		Circón	Tz
Biotita	8		Minerales Opacos	10
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	1			
Sericita	5			
Total				100
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa - Biotita - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita			Protolito Roca Volcanosedimentaria	
Clasificación Anfibolita con biotita				
			Según SCMR	
Descrpción de minerales				
<p>Cuarzo: Cristales de tamaño fino y medio, anhedrales, con bordes irregulares; presentan extinción ondulante y ocasionalmente recristalización hacia los bordes; tambien se encuentra como inclusiones semi-esféricas en hornblenda.</p> <p>Plagioclasa: Cristales euhedrales y subhedrales, de tamaño fino y medio; desarrollan maclas tipo albita algunas veces periclina y maclas mecánicas. Estan parcialmente sericitizadas.</p> <p>Biotita: Cristales de tamaño fino, euhedrales, con forma tabular, de color café y pleocroismo de pardo a verde. Se encuentra restringido a los niveles anfibólicos.</p> <p>Hornblenda: Cristales de tamaño medio y fino, subhedrales, de color verde oliva, pleocróicos a tonos amarillo-verde; ocasionalmente cristales en cortes basales tienen macla simple y doble. Algunos cristales tienen textura poiquilítica con inclusiones esféricas de cuarzo, epidota y minerales opacos asociados a cristales de esfena; ocasionalmente presentan cloritización hacia los bordes.</p> <p>Minerales Opacos: Cristales subhedrales a euhedrales de tamaño fino y medio, que se encuentran diseminados y asociados a niveles máficos. Algunos se encuentran como inclusiones en hornblenda y presentan coronas de esfena conformadas por cristales anhedrales de tamaño fino.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anfibolita con biotita (2x - PPL)



Anfibolita con biotita (2x - XPL)

**DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER**

Información General

Muestra No	CLU-1066	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1133095	Localidad:	Vetas, V. El Volcán
N:	1300675		

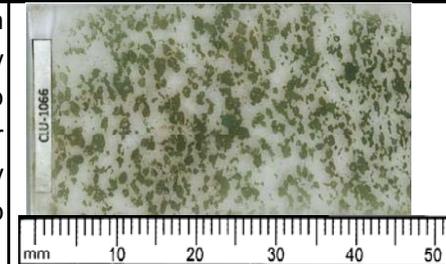
Descripción Macroscópica

Roca de grano medio, desarrolla lineación mineral, se encuentra formada principalmente por anfíbol (55%) y plagioclasa (35%), otros minerales como biotita y cuarzo alcanzan el 10%.



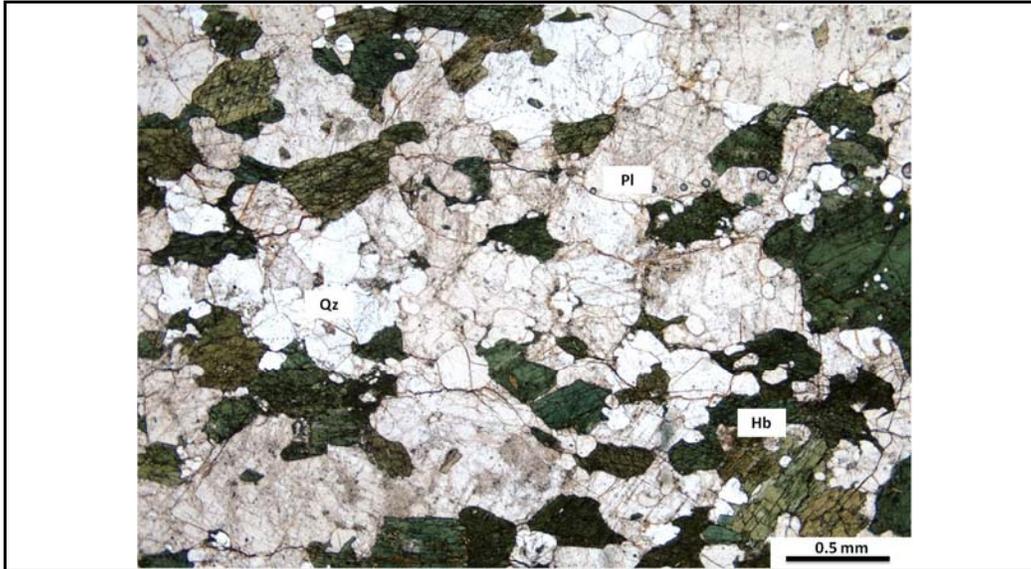
Descripción Microscópica

Roca de grano medio y grueso, no foliada, con textura granoblástica; está formada principalmente por hornblenda y plagioclasa, con bajos contenidos de cuarzo y feldespato potásico. Los procesos de alteración se evidencian por venillas de oxidación y cloritización parcial en anfíboles y total en minerales de hábito hojoso de color verde-café claro ligeramente pleocroicos, asociados a planos de exfoliación de anfíboles que posiblemente correspondían a biotita.

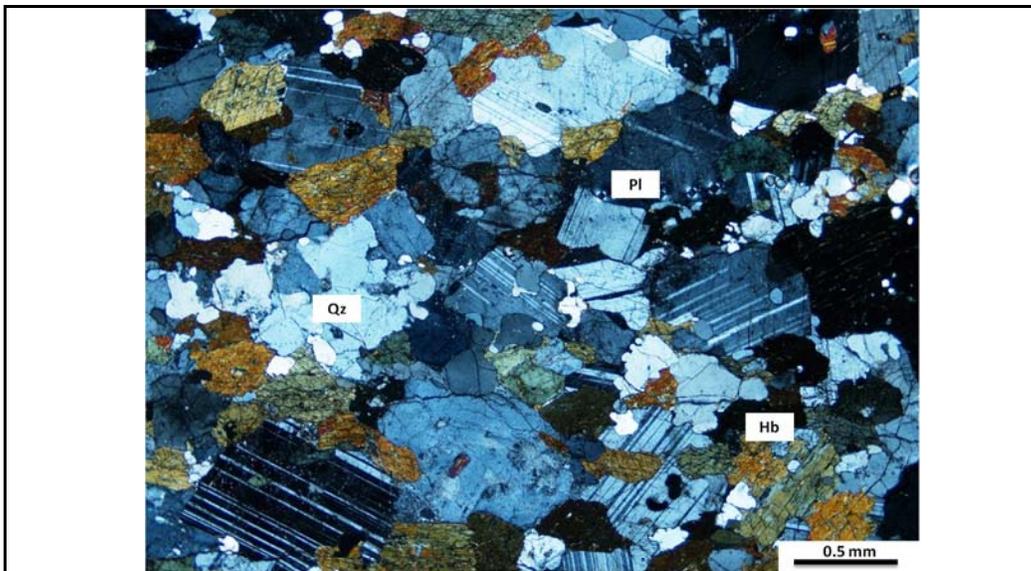


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	12		Minerales Opacos	3
Plagioclasa	23			
Feldespató potásico	10			
Hornblenda	48			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	4			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Hornblenda - Feldespató potásico - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita			Protolito Roca volcanosedimentaria	
Clasificación Anfibolita				
Según SCMR				
Descrpción de minerales				
<p>Hornblenda: Cristales de tamaño medio y grueso, subhedrales, de color verde, pleocroicos a tonos más claros. Algunos cristales tienen cloritización hacia sus bordes, presentan fracturas rellenas por óxidos y contienen algunas inclusiones esféricas de cuarzo.</p> <p>Cuarzo: Cristales de tamaño fino y medio, anhedrales, con bordes irregulares; presentan extinción ondulante y también ocurre como inclusión en plagioclasas y anfíboles.</p> <p>Plagioclasa: Corresponde a cristales de tamaño medio, subhedrales, con bordes rectos, desarrollan maclas delgadas y gruesas tipo albita; contiene inclusiones de cuarzo y anfíbol.</p> <p>Feldespató potásico: Corresponde a cristales sin macla que desarrollan texturas de exsolución, intercrecimientos simplectíticos y mirmequíticas; son de tamaño medio, subhedrales y anhedrales con bordes irregulares; es posible que petrográficamente no se diferencien de plagioclasas sin macla.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anfibolita compuesta por plagioclasa, hornblenda y cuarzo (2x - PPL)



Anfibolita compuesta por plagioclasa, hornblenda y cuarzo (2x - XPL)

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER

Información General

Muestra No	10-SACZ-10	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1120912	Localidad:	
N:	1250173		

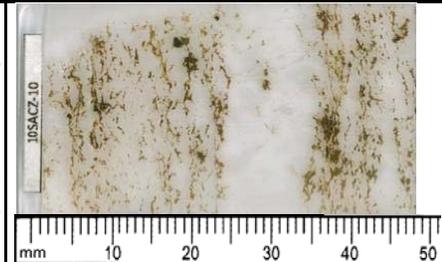
Descripción Macroscópica

Roca de grano medio, foliada; compuesta por cuarzo (30%), plagioclasa (35%), feldespato potásico (10%) y biotita (25%) dispuesta en láminas discontinuas.



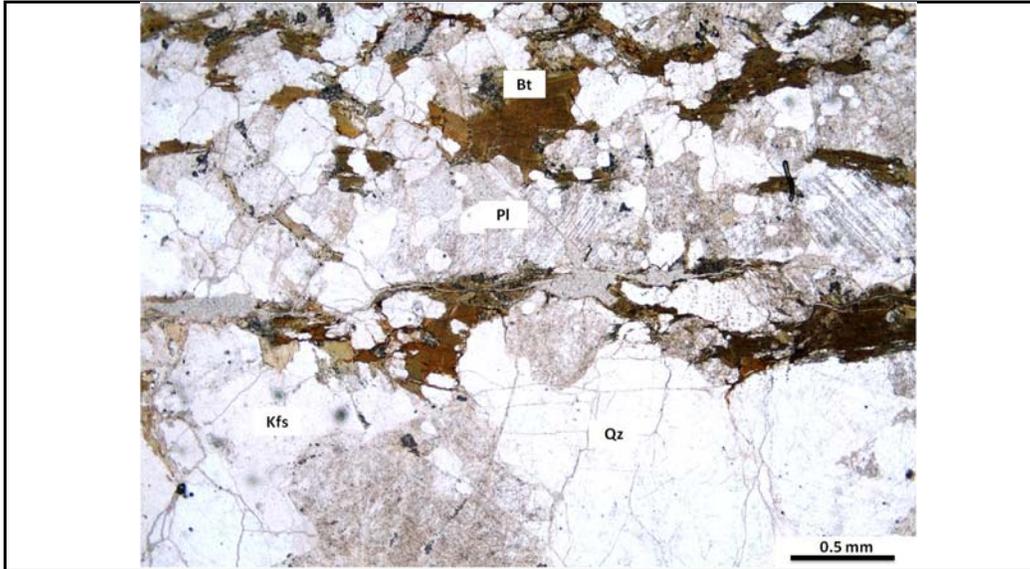
Descripción Microscópica

Roca de grano medio, foliada con lineación mineral; se observan niveles de grano grueso cuarzo feldespáticos en los que predomina el feldespato potásico, niveles de grano medio y fino compuestos por cuarzo, feldespatos y biotita, y, niveles con material recristalizado de grano muy fino con texturas en mosaico y cristales con bordes suturados que cruzan la foliación en forma oblicua.

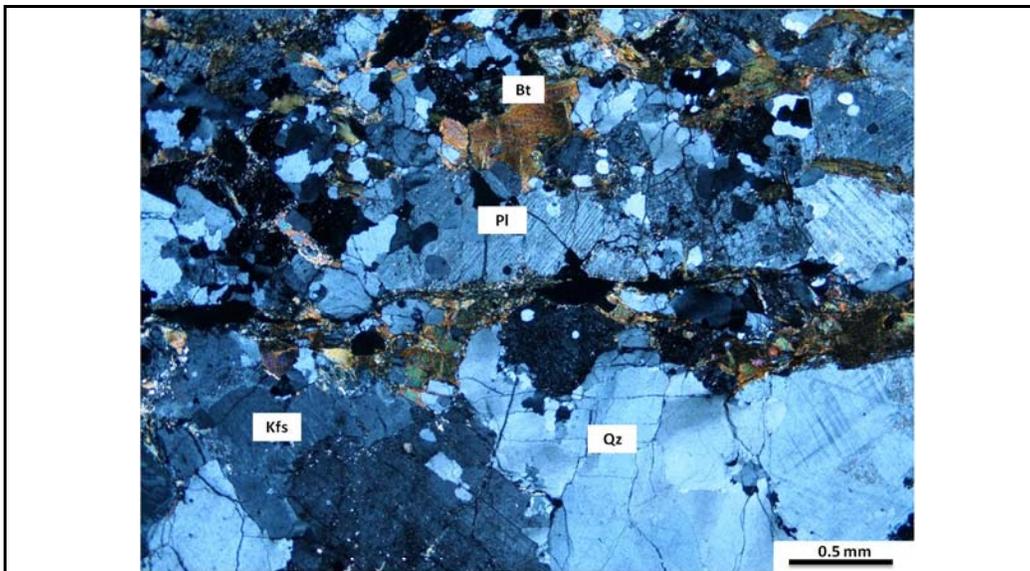


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	24		Minerales Opacos	3
Plagioclasa	20		Epidota	5
Feldespato potásico	28			
Biotita	15			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	3			
Sericita	2			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Biotita - Feldespato potásico - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Pelita /arcosa		
Clasificación Neis cuarzo feldespático con biotita				
		Según SCMR		
Descrpción de minerales				
<p><u>Plagioclasa</u>: Cristales de tamaño medio, subhedrales, que desarrollan maclas tipo albita y periclina ocasionalmente dobladas y maclas mecánicas; se observan texturas de exsolución con feldespato potásico y contiene inclusiones de cuarzo. Presentan alteración leve a sericita.</p> <p><u>Cuarzo</u>: Corresponde a cristales de tamaño fino y medio, anhedrales, con bordes irregulares y formas esféricas cuando se encuentra como inclusión; presenta una fuerte extinción ondulante y bandas de deformación que disminuyen en los niveles de grano grueso.</p> <p><u>Feldespato potásico</u>: Son cristales de tamaño medio y grueso, subhedrales y anhedrales. Se observan lamelas de exsolución, intercrecimientos simplectíticos y se desarrollan maclas tipo microclina truncadas por maclas mecánicas de deformación.</p> <p><u>Biotita</u>: Corresponde a cristales de tamaño finos y medios, subhedrales y euhedrales, de color verde oscuro a pardo pleocróicos a tonos café; están dispuestos en forma paralela a la foliación, formando láminas discontinuas. Presenta cloritización hacia los bordes de los cristales y oxidación en los planos de exfoliación. Se encuentran asociados minerales opacos y epidota en cristales de tamaño fino, subhedrales.</p>				

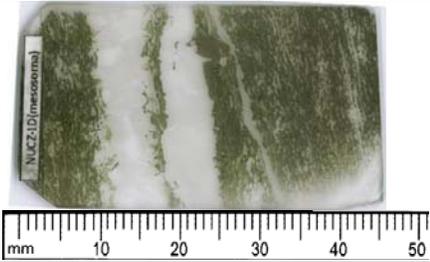
REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con biotita (2x - PPL)

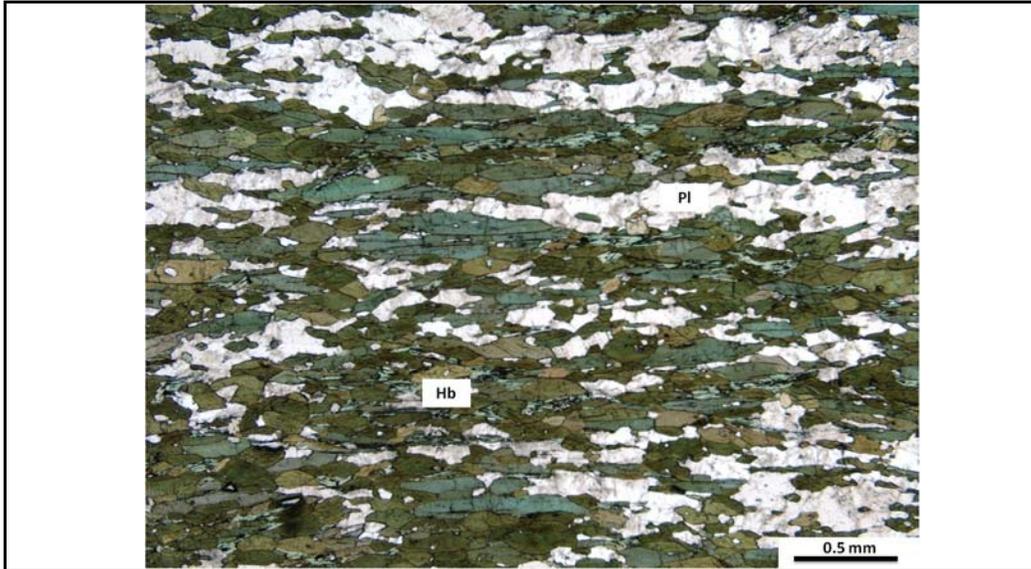


Neis cuarzo feldespático con biotita (2x - XPL)

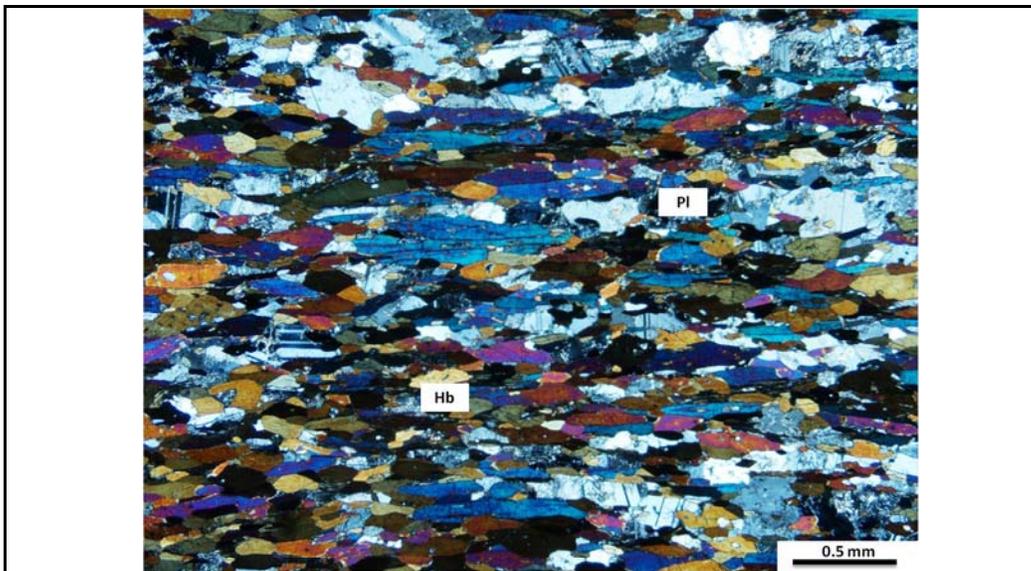
DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA	
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER	
Información General	
Muestra No	NUCZ-1D
Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	Localidad:
N:	
Descripción Macroscópica	
<p>Roca de grano medio y grueso, foliada; presenta amplios niveles de leucosoma de composición granítica, concordantes con la foliación de la roca, están formados por cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico; los niveles de mesosoma están conformados por anfíbol, plagioclasa y biotita; estos minerales se encuentran orientados.</p>	
Descripción Microscópica	
<p>Corresponde a dos secciones en una se encuentra el mesosoma y en otra el leucosoma: la primera corresponde a una roca de grano medio, foliada, con textura nematoblástica, con niveles formados por anfíbol y clorita, separados por un nivel cuarzo feldespático de mayor espesor y grano grueso muy alterado, en el que se desarrollan cristales de muscovita dispuestos en forma perpendicular a la foliación. La sección del leucosoma corresponde a una roca de grano medio, sin foliación con textura granoblástica formada por cristales anhedral de cuarzo con extinción ondulante, plagioclasa euhedral con maclas tipo albita y periclina e inclusiones esféricas de cuarzo; feldespato potásico con texturas de exsolución y pequeños cristales de biotita de color café pleocroica a tonos pardos que ocasionalmente está cloritizada que se encuentra en espacios intercrystalinos o como inclusión en plagioclasas.</p>	

MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo (leucosoma)	35		Esfena	1
Cuarzo	7		Circón	Tz
Plagioclasa (leucosoma)	32		Minerales Opacos	1
Plagioclasa	15			
Feldespato potásico (leucosoma)	18			
Feldespato potásico	8			
Hornblenda	38			
Biotita	6			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	12			
Sericita	13			
Muscovita	3			
Total mesosoma				100
Paragénesis Plagioclasa - Hornblenda - Feldespato potásico - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Roca volcánica o volcanosedimentari		
Clasificación Anfibolita con leucosoma monzogranítico				
		Según SCMR		
Descrpción de minerales				
<p>Plagioclasa: Cristales de tamaño fino y grueso, subhedrales, con macla delgada tipo albita. Presenta una fuerte alteración a sericita y muscovita.</p> <p>Feldespato potásico: Corresponde a cristales de tamaño grueso, anhedrales, no desarrollan macla. Se observa una venilla en la que se desarrollan lamelas de exsolución; presenta alteración.</p> <p>Cuarzo: Se encuentra desde cristales de tamaño fino hasta grueso, anhedrales de bordes irregulares, con extinción ondulante y desarrollo de bandas de deformación. Esta asociado a los niveles leucocráticos sin mostrar alteración.</p> <p>Hornblenda: Cristales de tamaño medio, subhedrales y anhedrales, de color verde oliva con pleocroísmo a amarillo, dispuestos en láminas asociadas a biotita cloritizada y plagioclasa; algunos cristales contienen inclusiones de esfena con forma rómbica.</p> <p>Clorita: Se encuentra reemplazando totalmente cristales subhedrales, de hábito hojoso que corresponderían a biotita. Tienen color verde claro, levemente pleocróicos, con tonos de interferencia café y azul berlín; están asociados a laminas formadas por los anfíboles.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



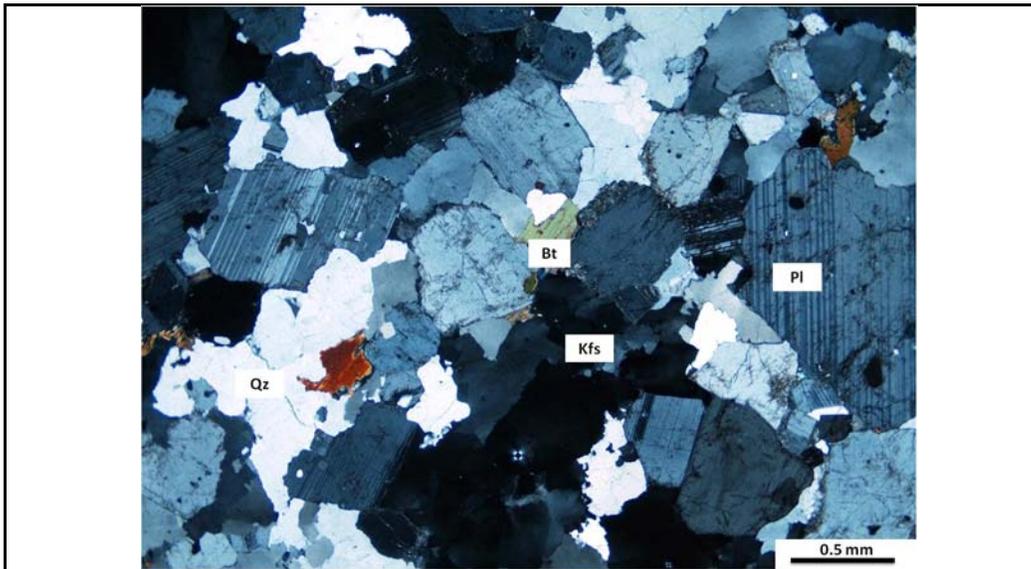
Mesosoma de composición anfibolitica (2x - PPL)



Mesosoma de composición anfibolitica (2x - PPL)



Leucosoma de composición monzogranítica con biotita (2x - PPL)



Leucosoma de composición monzogranítica con biotita (2x - XPL)

DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER

Información General

Muestra No	12-SACZ-31a	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1131059	Localidad:	Vía Berlín - Vetas, Loma Volcán Amarillo
N:	1293992		

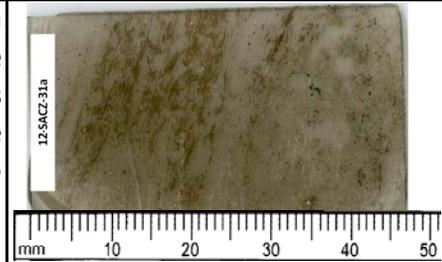
Descripción Macroscópica

Roca de grano medio, foliada, en la que se observa el desarrollo de láminas formadas por biotita, silimanita plagioclasa, cuarzo y posiblemente anfíbol; dentro de las cuales se reconocen pequeños cristales de color rojo subhedrales que corresponden a granates.



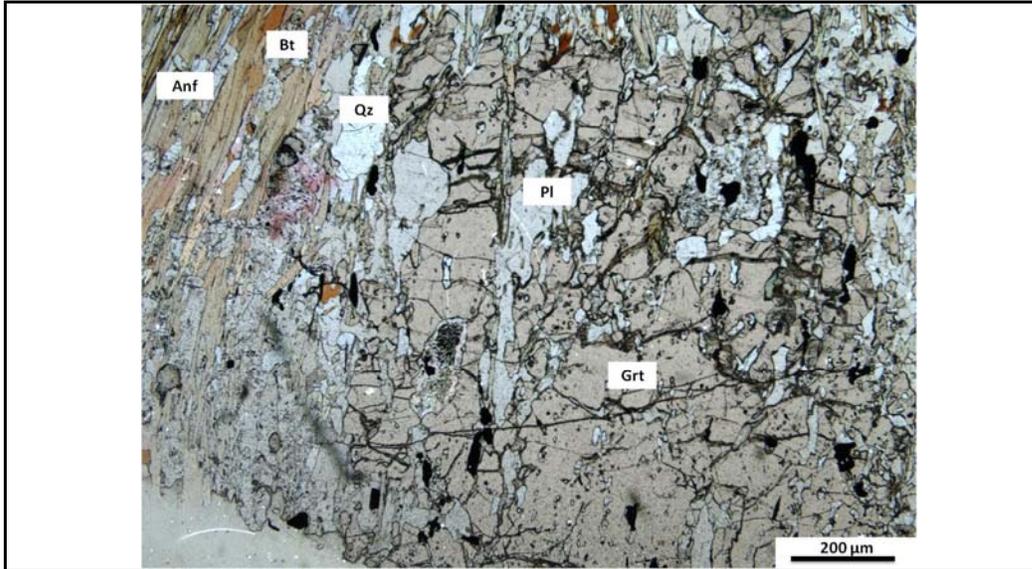
Descripción Microscópica

Roca de grano fino y medio, foliada, en la que se desarrollan niveles cuarzo feldespáticos y micáceos con presencia de anfíboles; se observa lineación mineral formando láminas casi continuas. Se observan delgadas venillas de sílice que cortan los cristales. como minerales accesorios se reconoce circón, apatito y esfena.

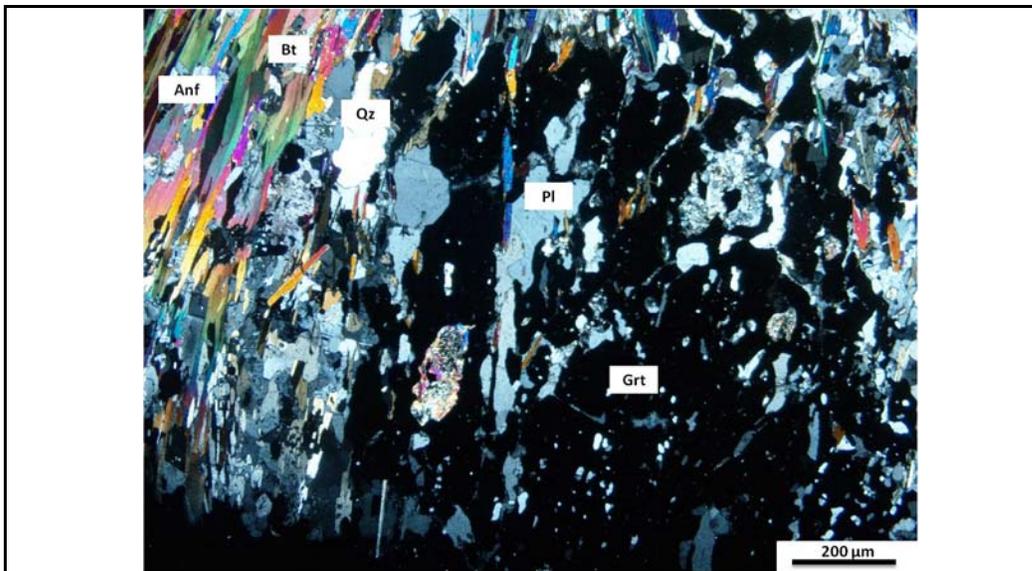


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	15		Silimanita	2
Plagioclasa	20		Circón	1
Biotita	20		Apatito	3
Anfíbol	20		Minerales Opacos	2
Granate	12			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	5			
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Biotita - Anfíbol - Granate - Muscovita - Cuarzo - Silimanita				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita alta		Protolito Roca volcánica o volcanosedimentari		
Clasificación Neis cuarzo feldespático con anfíbol, biotita, silimanita y granate				
		Según SCMR		
Descrpción de minerales				
<p>Plagioclasa: Corresponde a cristales de tamaño medio y fino, subhedrales, con contactos suturados; generalmente presentan macla tipo albita y peiclina, se evidencian procesos de disolución y recristalización hacia los bordes de los cristales, además se evidencian procesos de deformación mecánica. Algunos porfiroblastos contienen inclusiones de apatito, biotita, cuarzo y anfíbol.</p> <p>Anfíbol: Cristales de tamaño fino y medio, subhedrales y anhedrales, de color amarillo claro, ligeramente pleocroicos, tonos de interferencia de segundo orden en cortes basales, algunas veces de primer orden en cortes longitudinales, tiene extinción inclinada; ocasionalmente se observan poikilocristales con numerosas inclusiones de cuarzo y plagioclasa que generan estructuras esqueletales y se reconocen por la continuidad óptica.</p> <p>Biotita: Cristales de tamaño de grano medio y grueso, subhedrales, con hábito hojoso, son de color café marrón (rojizo) con fuerte pleocroísmo y altos tonos de interferencia. Se encuentra distribuida en láminas asociada a muscovita, anfíbol y opacos, también se encuentra intercrecida con finos cristales de silimanita.</p> <p>Cuarzo: Se encuentra como cristales de tamaño medio y fino, anhedrales, con bordes irregulares y contactos suturados que dan evidencia de procesos de recristalización; tiene una fuerte extinción ondulante y bordes de subgrano; está asociado a plagioclasa a niveles félsicos.</p> <p>Granate: Son cristales de tamaño grueso, subhedrales, generalmente fracturados, son de color rojizo claro, de tipo porfiroblastos envueltos en finos cristales de cuarzo, plagioclasa y muscovita que constituyen las sombras de presión. Algunos cristales contienen inclusiones de sub-redondeadas y sub-angulares de cuarzo y apatitos, las cuales generalmente están orientadas con la foliación; en las fracturas se desarrolla cloritización y desarrollo de minerales opacos.</p> <p>Muscovita: Cristales de tamaño medio y fino, euhedrales, con formas tabulares, ocasionalmente fibrosos, incoloros con altos tonos de interferencia; se encuentra asociada a la biotita y anfíboles, algunas veces como</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con anfíbol, biotita, slimanita y granate (10x - PPL)



Neis cuarzo feldespático con anfíbol, biotita, slimanita y granate (10x - XPL)

**DESCRIPCIÓN PETROGRAFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER**

Información General

Muestra No	12-SACZ-31b	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1131059	Localidad:	Vía Berlín - Vetas, Loma Volcán Amarillo
N:	1293992		

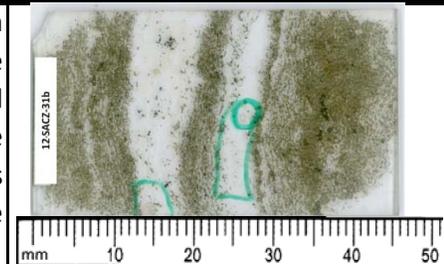
Descripción Macroscópica

Roca de grano medio a grueso, foliada, formada por niveles leucocráticos que conforman leucosomas concordantes con la foliación y son de composición cuarzo feldespática y niveles melanocráticos que constituyen mesosomas de composición anfibolitica con hornblenda y piroxeno; se destaca la presencia de porfiroblastos de granate de color rojo, que están entre 1 y 6 mm.



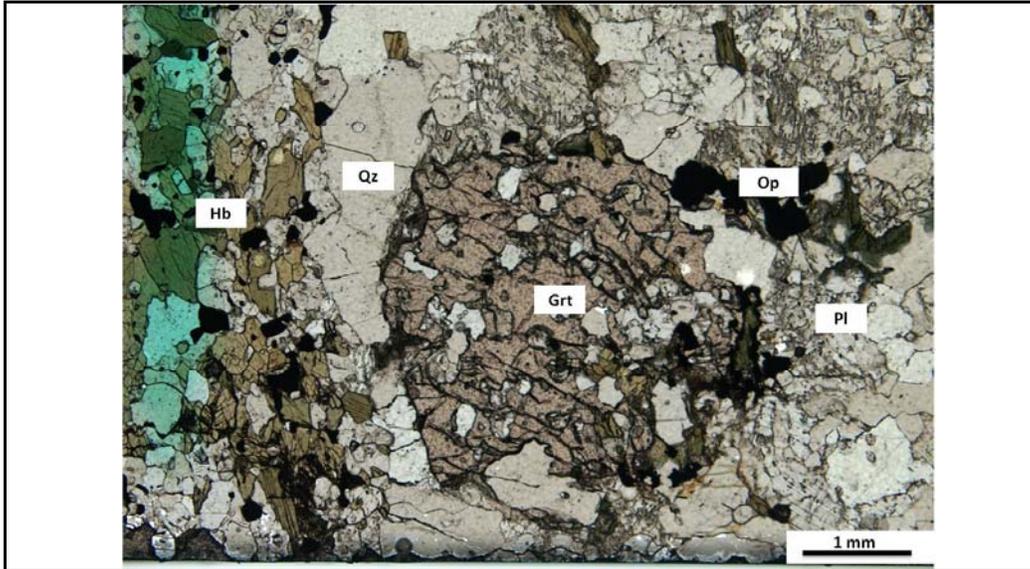
Descripción Microscópica

Roca con tamaño de grano medio, foliada, con textura nematoblástica. Se diferencian bandas alterantes de composición máfica en los que se encuentra restringido el anfíbol y los minerales opacos, hay pequeños cristales de cuarzo, plagioclasa y apatitos muy abundantes; estos niveles estan separados por niveles cuarzo feldespáticos, que contienen cristales medianos y grandes de cuarzo, plagioclasa (mayormente alterada), granate y apatitos de mayor tamaño pero menos abundantes, los pequeños cristales de anfíbol ocurren como inclusiones en plagioclasa.

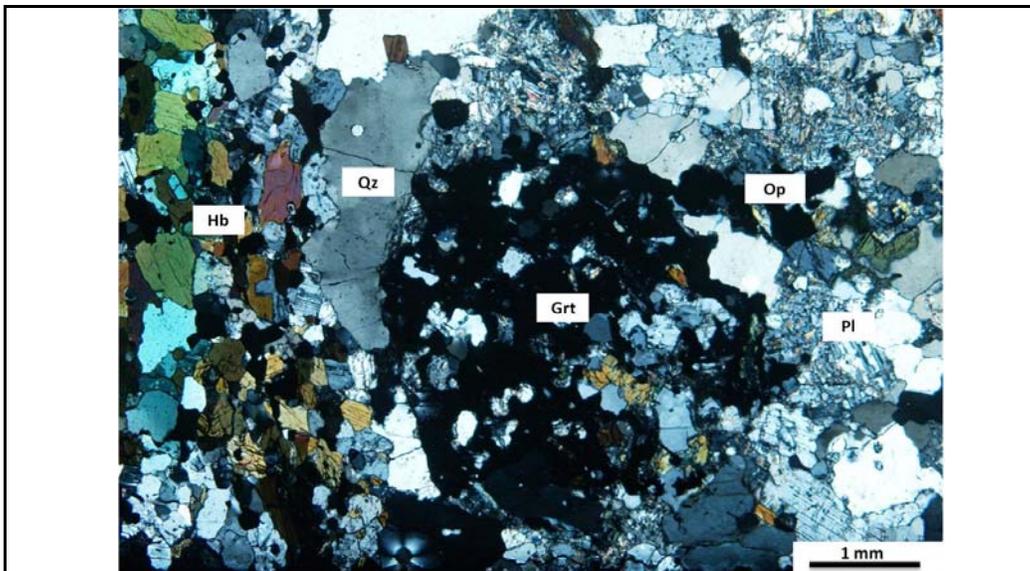


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	15		Biotita	< 1
Plagioclasa	20		Minerales Opacos	7
Granate	10			
Hornblenda	30			
Apatito	10			
Alteración	%		Introducción	%
Clorita	2			
Sericita	6			
Total				100
Paragénesis Hornblenda - Plagioclasa - Granate - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita alta		Protolito Roca volcánica		
Clasificación Anfibolita con granate				
		Según SCMR		
Descrpción de minerales				
<p>Plagioclasa: Cristales de tamaño grueso, medio y fino, subhedrales, que desarrollan maclas polisintéticas. Los cristales de mayor tamaño contienen inclusiones de cuarzo, apatito y anfíbol y presentan una fuerte sericitización.</p> <p>Hornblenda: Cristales de tamaño fino y medio, subhedrales y euhedrales, orientados, de color verde oliva pleocroicos a amarillo claro, tienen dos direcciones de clivaje y algunos cristales se encuentran maclados, tienen altos tonos de interferencia, contienen numerosas inclusiones de apatito, cuarzo y minerales opacos ocasionalmente reemplazando (opacitización).</p> <p>Cuarzo: Se encuentra como cristales de tamaño medio y fino, anhedrales, con bordes suturados, presentan extinción ondulante. Se encuentra principalmente en niveles cuarzo feldespáticos y puede contener inclusiones de apatitos y anfíbol. Se observan delgadas venillas de sílice paralelas a la foliación, serpenteantes, algunos cristales se encuentran con fracturas perpendiculares a la orientación mineral, posiblemente por presión.</p> <p>Granate: Son cristales de tamaño fino y medio, euhedrales a subhedrales, de color rosado muy claro, con alto relieve, están fuertemente fracturados, y contienen inclusiones de cuarzo principalmente, plagioclasa y anfíbol; en ocasiones son tan abundantes que dan una apariencia esquelética del cristal.</p> <p>Apatito: Cristales de tamaño fino y muy fino, euhedrales, con formas prismáticas cortas y algunas sub-esféricas; son incoloros, tienen tonos de interferencia muy bajos; se concentran principalmente en los niveles máficos asociados a anfíboles, los cristales de mayor tamaño se encuentran en niveles cuarzo feldespáticos asociados a granate.</p> <p>Minerales Opacos: Cristales de tamaño de grano fino y muy fino, euhedrales y subhedrales, con formas rectangulares; se encuentran asociados a los niveles máficos con anfíbol y ocasionalmente se encuentran en los niveles cuarzo feldespáticos con bordes alterados. Corresponden principalmente a ilmenita.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Anfibolita con granate (4x - PPL)



Anfibolita con granate (4x - XPL)

**DESCRIPCIÓN PETROGRÁFICA DE MUESTRAS EN SECCIÓN DELGADA
BASAMENTO CRISTALINO MACIZO DE SANTANDER**

Información General

Muestra No	13-SACZ-17	Unidad	Neis de Bucaramanga
Coordenadas E:	1139194	Localidad:	Vía Berlín - Ranchadero
N:	1292349		

Descripción Macroscópica

Roca de grano medio a grueso, foliada con estructura migmatítica y bandeamiento composicional, en el que se diferencian niveles cuarzo feldespáticos con abundante contenido de muscovita y niveles máficos compuestos principalmente por biotita y granate.



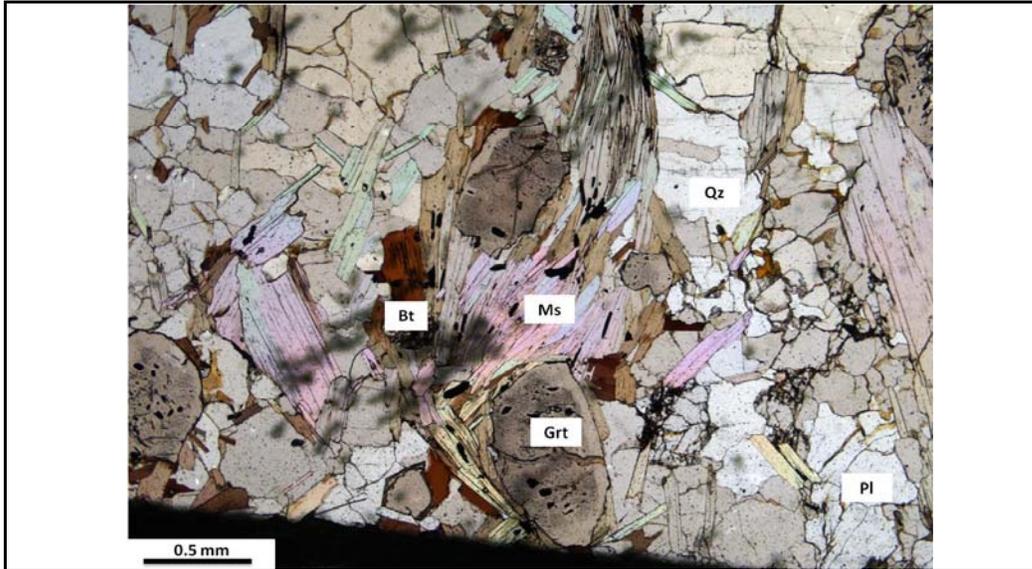
Descripción Microscópica

Roca de tamaño de grano medio a grueso, con orientación mineral. Se encuentra formada por plagioclasa, cuarzo, muscovita, biotita, granate y cristales muy finos de silimanita asociada a niveles micáceos. Estructuralmente desarrolla crenulación. Como minerales accesorios se encuentran circón y apatito.

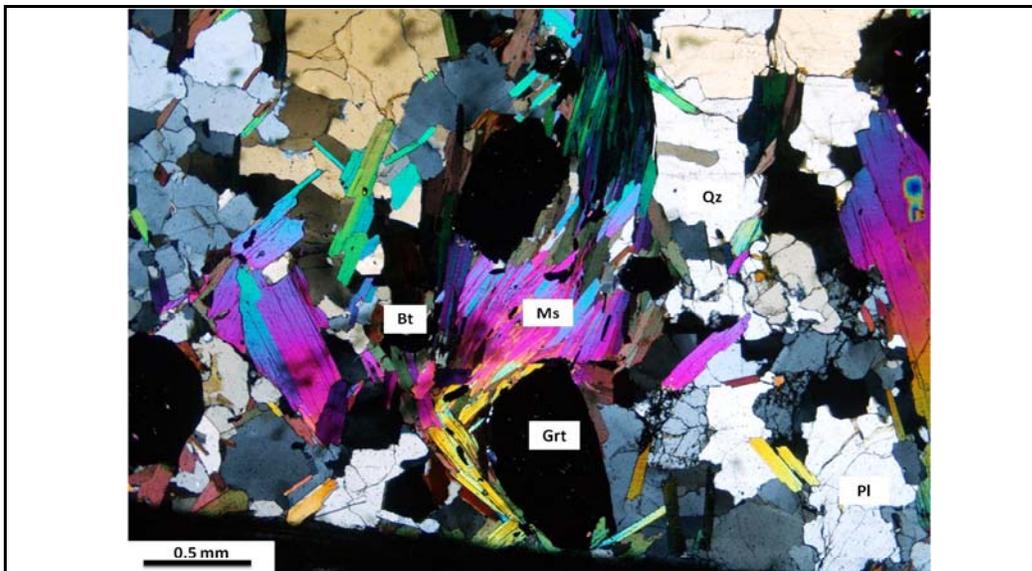


MINERALOGÍA				
Principales	%		Accesorios	%
Cuarzo	25		Silimanita	3
Plagioclasa	15		Circón	1
Muscovita	22		Apatito	2
Biotita	18		Minerales Opacos	2
Granate	12			
Alteración	%		Introducción	%
Total				100
Paragénesis Plagioclasa - Granate - Biotita - Muscovita - Silimanita - Cuarzo				
Tipo de metamorfismo Orogénico X Térmico Dinámico				
Facies Anfibolita		Protolito Pelita/ Sub-arcosa		
Clasificación Neis cuarzo feldespático con granate, biotita, muscovita y silimanita				
		Según SCMR		
Descrpción de minerales				
<p>Plagioclasa: Corresponde a cristales de tamaño medio, subhedrales, con bordes rectos y suturados; generalmente presentan macla tipo albita y peiclina. Algunos cristales contienen inclusiones esféricas de apatito y cuarzo.</p> <p>Biotita: Cristales de tamaño de grano medio y fino, euhedrales y subhedrales, con hábito tabular que tienden a estar orientados, pero no siguen una lineación continua. Son de color café marrón (rojizo) con fuerte pleocroísmo. Se encuentra asociada a muscovita e intercrecida con silimanita, contiene inclusiones de opacos y circones.</p> <p>Cuarzo: Se encuentra como cristales de tamaño medio y grueso, anhedrales, con bordes suturados; tiene una fuerte extinción ondulante y bordes de subgrano por deformación y fracturamiento; contienen algunas inclusiones esféricas en plagioclasa.</p> <p>Granate: Son cristales de tamaño medio y fino, euhedrales y subhedrales, algunos cristales se encuentran elongados, son de color rojo muy claro. Se encuentran asociados a micas, cuarzo y plagioclasa; contienen inclusiones esféricas de cuarzo, apatito y minerales opacos, algunas veces concordantes con la foliación y otras veces perpendiculares, dando evidencia de rotación de los porfiroblastos.</p> <p>Muscovita: Cristales de tamaño medio y grueso, euhedrales, con hábito hojoso, que en general tienden a estar orientados; son incoloros con altos tonos de interferencia; se encuentra asociada a la biotita y silimanita.</p> <p>Silimanita: Cristales de tamaño muy fino, con hábito fibroso, incoloros o ligeramente amarillos, con tonos de interferencia de primer orden; se encuentra asociada principalmente a biotita.</p> <p>Minerales Opacos: Corresponde a cristales de tamaño fino, subhedrales, se encuentran diseminados y como inclusiones con formas cúbicas en granates y biotita. Generalmente corresponden a ilmenita.</p>				

REGISTRO FOTOGRÁFICO



Neis cuarzo feldespático con biotita, muscovita, granate y silimanita (2x - PPL)



Neis cuarzo feldespático con biotita, muscovita, granate y silimanita (2x - XPL)

C. Anexo: Resultados Termocronología.

Mayo 3 2013 11:38

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 1

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\831_18-2012-51.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\828_18-2012-49.ftz

NEW PARAMETERS - ZETA METHOD

EFFECTIVE TRACK DENSITY FOR FLUENCE MONITOR (tracks/cm²): 2,08E+05
 RELATIVE ERROR (%): 1,74
 EFFECTIVE URANIUM CONTENT OF MONITOR (ppm): 39,81
 ZETA FACTOR AND STANDARD ERROR (yr cm²): 185,65 6,24
 SIZE OF COUNTER SQUARE (cm²): 6,06E-07

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

Grain no.	RhoS (cm ⁻²)	(Ns)	RhoI (cm ⁻²)	(Ni)	Squares	U+/-2s	Grain Age (Ma)		
							Age	--95% CI--	
1	1,55E+06	(15)	2,17E+06	(21)	16	414 179	13.8	6.6	28.1
2	1,10E+06	(6)	1,83E+06	(10)	9	350 217	11.7	3.5	35.2
3	2,38E+06	(13)	1,83E+06	(10)	9	350 217	25.0	10.2	63.8
4	1,28E+06	(7)	1,28E+06	(7)	9	245 179	19.3	5.8	64.4
5	2,37E+06	(23)	3,71E+06	(36)	16	709 236	12.4	7.0	21.4
6	2,42E+06	(22)	1,10E+06	(10)	15	210 130	42.1	19.3	100.0
7	2,48E+06	(12)	2,89E+06	(14)	8	552 290	16.6	7.0	38.5

Mayo 3 2013 11:38

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 2

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\831_18-2012-51.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\828_18-2012-49.ftz

NEW PARAMETERS - ZETA METHOD

EFFECTIVE TRACK DENSITY FOR FLUENCE MONITOR (tracks/cm²): 2,09E+05
 RELATIVE ERROR (%): 1,67
 EFFECTIVE URANIUM CONTENT OF MONITOR (ppm): 39,81
 ZETA FACTOR AND STANDARD ERROR (yr cm²): 185,65 6,24
 SIZE OF COUNTER SQUARE (cm²): 6,06E-07

Grain no.	RhoS (cm ⁻²)	(Ns)	RhoI (cm ⁻²)	(Ni)	Squares	U+/-2s	Grain Age (Ma)		
							Age	--95% CI--	
8	4,81E+06	(35)	3,44E+06	(25)	12	655 260	27.1	15.8	47.3
9	1,65E+06	(6)	2,48E+06	(9)	6	471 306	13.0	3.8	40.6
10	2,75E+06	(10)	1,38E+06	(5)	6	262 223	38.1	12.1	143.2
11	1,24E+06	(15)	2,23E+06	(27)	20	424 162	10.8	5.3	21.0
12	1,65E+06	(8)	2,89E+06	(14)	8	550 289	11.2	4.0	28.3
13	2,20E+06	(8)	2,75E+06	(10)	6	524 324	15.6	5.3	43.6
14	4,40E+06	(16)	1,24E+07	(45)	6	2356 703	6.9	3.6	12.5
15	2,20E+06	(12)	2,75E+06	(15)	9	524 267	15.6	6.6	35.5
16	1,65E+06	(10)	2,97E+06	(18)	10	566 264	10.9	4.4	24.6
17	1,83E+06	(10)	1,47E+06	(8)	9	279 192	24.1	8.6	70.4
18	2,48E+06	(9)	7,43E+06	(27)	6	1414 541	6.5	2.7	14.2
19	1,75E+06	(17)	3,40E+06	(33)	16	648 225	10.0	5.2	18.5

POOLED 2,14E+06(254) 2,89E+06(343) 196 552 63 14.3 12.0 17.1

CHI² PROBABILITY (%): 0.5

POOLED AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 14.3, 13.0 -- 15.6 (-1.2 +1.4)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 12.0 -- 17.1 (-2.3 +2.8)

CENTRAL AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 14.8, 13.1 -- 16.8 (-1.7 +2.0)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 11.6 -- 18.9 (-3.2 +4.1)
 AGE DISPERSION (%): 35.6

Mayo 3 2013 11:38

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 3

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\831_18-2012-51.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\828_18-2012-49.ftz

FIT OPTION: Best-fit peaks using the binomial model of Galbraith and Green

INITIAL GUESS FOR MODEL PARAMETERS (number of peaks to fit = 2)

Peak #.	Peak Age	Theta	Fraction(%)	Count
1.	6.70	0.257	9.7	1.85
2.	14.20	0.424	29.2	5.55

Total range for grain ages: 6,7 to 41,3 Ma
 Number of active grains (Num. used for fit): 19
 Number of removed grains: 0
 Degrees of freedom for fit: 16
 Average of the SE(Z)'s for the grains: 0,4
 Estimated width of peaks in PD plot in Z units: 0,47

PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

* Standard error for peak age includes group error

* Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

#.	Peak Age(Ma)	68%CI	95%CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1.	11.3	-1,3 ...+1,4	-2,4 ...+3,0	0.42	71.4	16.0	13.6
2.	27.0	-5,4 ...+6,8	-9,6 ...+14,9	0.44	28.6	16.0	5.4

Log-likelihood for best fit: -49,458
 Chi-squared value for best fit: 15,674
 Reduced chi-squared value: 0,980
 Probability for F test: 0%
 Condition number for COVAR matrix: 5,69
 Number of iterations: 26

Mayo 3 2013 11:38

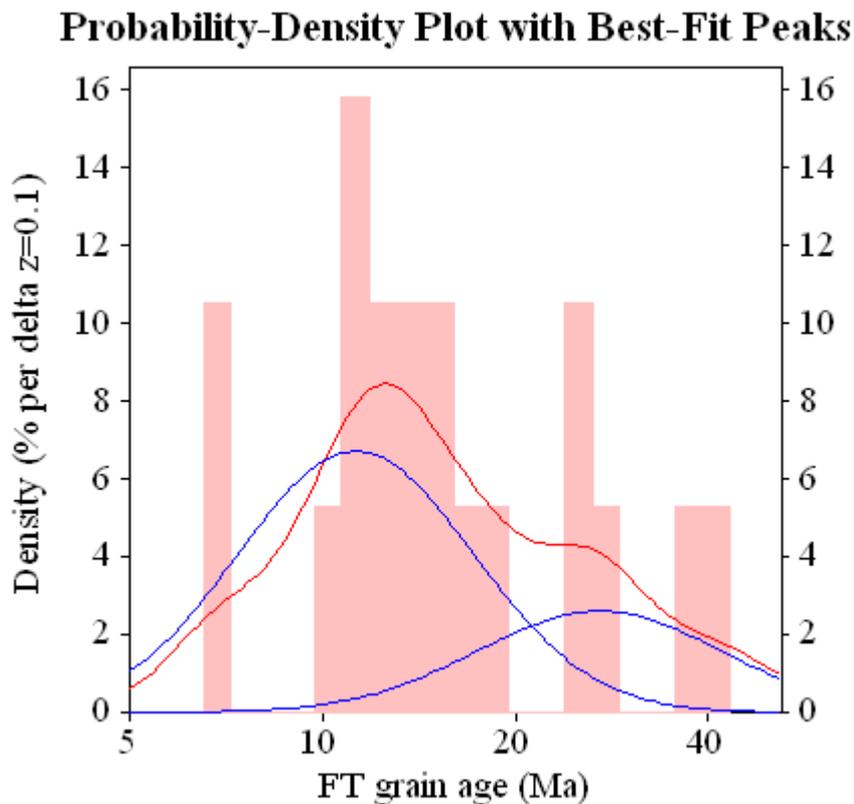
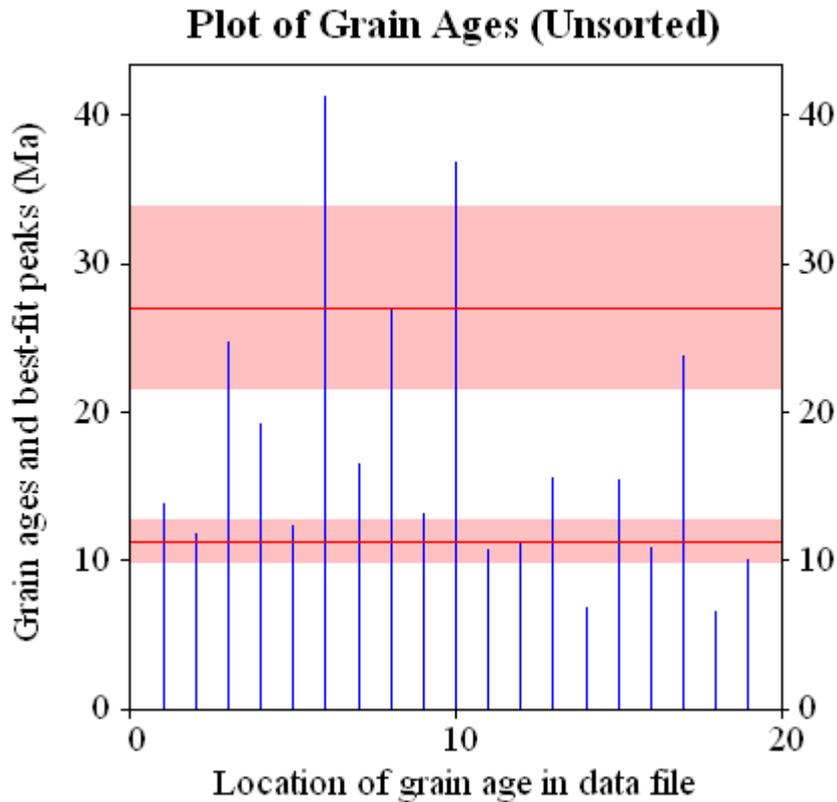
BinomFit for Windows ver.1.1

Page 4

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\831_18-2012-51.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\828_18-2012-49.ftz



Mayo 3 2013 11:38

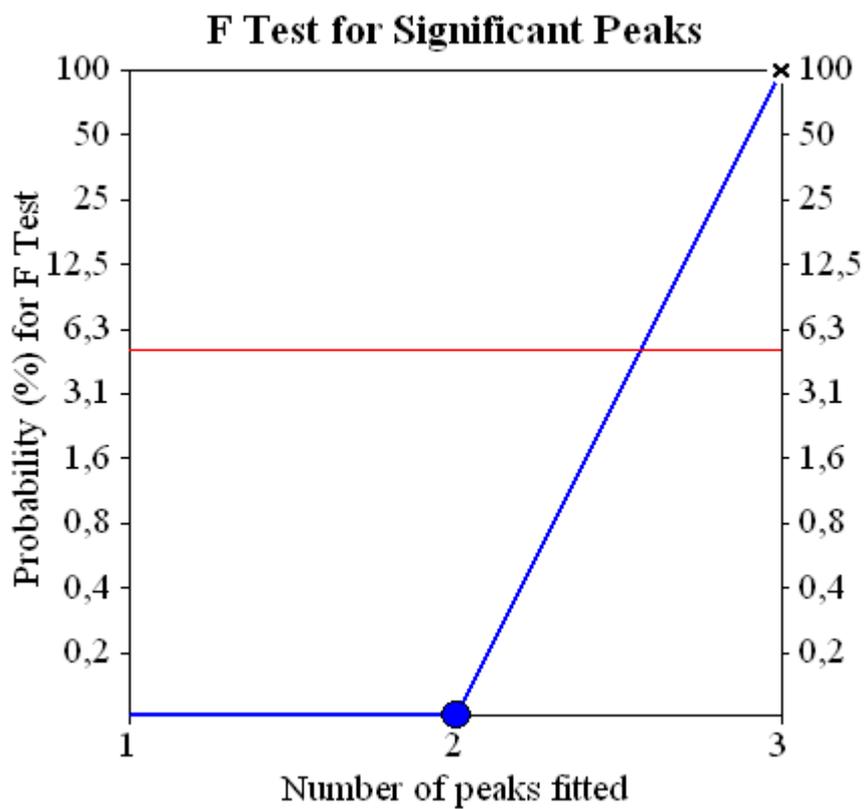
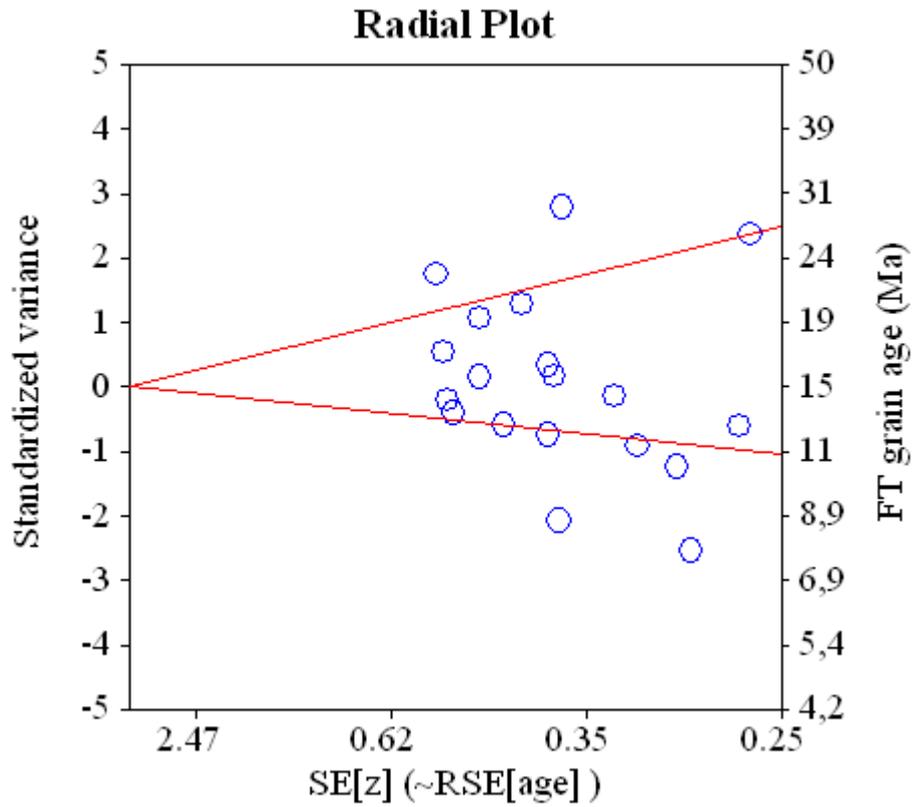
BinomFit for Windows ver.1.1

Page 5

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\831_18-2012-51.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\828_18-2012-49.ftz



Mayo 3 2013 13:14

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 1

Datafile: D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\829_18-2012-50.ftz

Title: Sample No.829 Irr 18-2012-50

NEW PARAMETERS - ZETA METHOD

EFFECTIVE TRACK DENSITY FOR FLUENCE MONITOR (tracks/cm²): 2,09E+05
 RELATIVE ERROR (%): 1,70
 EFFECTIVE URANIUM CONTENT OF MONITOR (ppm): 39,81
 ZETA FACTOR AND STANDARD ERROR (yr cm²): 185,65 6,24
 SIZE OF COUNTER SQUARE (cm²): 6,06E-07

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

Grain no.	RhoS (cm ⁻²)	(Ns)	RhoI (cm ⁻²)	(Ni)	Squares	U+/-2s	Grain Age (Ma)		
							Age	--95% CI--	
1	3,08E+06	(28)	3,74E+06	(34)	15	713 244	16.0	9.3	27.1
2	4,40E+06	(24)	5,13E+06	(28)	9	979 368	16.6	9.2	29.7
3	4,13E+06	(15)	2,20E+06	(8)	6	419 288	35.9	14.4	98.3
4	2,20E+06	(8)	3,03E+06	(11)	6	577 341	14.2	4.9	38.4
5	1,93E+06	(14)	1,51E+06	(11)	12	288 170	24.5	10.4	59.8
6	2,15E+06	(13)	2,64E+06	(16)	10	503 248	15.8	7.0	34.9
7	3,58E+06	(26)	3,03E+06	(22)	12	577 244	22.8	12.5	42.3
8	5,13E+06	(28)	5,32E+06	(29)	9	1014 375	18.7	10.7	32.6
9	3,30E+06	(12)	3,03E+06	(11)	6	577 341	21.1	8.5	52.7
10	2,09E+06	(19)	3,08E+06	(28)	15	587 221	13.2	6.9	24.4
11	2,97E+06	(36)	2,15E+06	(26)	20	409 160	26.7	15.7	46.2
POOLED	3,07E+06	(223)	3,08E+06	(224)	120	587 81	19.2	15.8	23.5

CHI² PROBABILITY (%): 63.9

POOLED AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 19.2, 17.4 -- 21.3 (-1.9 +2.1)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 15.8 -- 23.5 (-3.5 +4.2)

CENTRAL AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 19.3, 17.4 -- 21.3 (-1.9 +2.1)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 15.8 -- 23.5 (-3.5 +4.2)
 AGE DISPERSION (%): 0.5

Mayo 3 2013 13:14

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 2

Datafile: D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\829_18-2012-50.ftz

Title: Sample No.829 Irr 18-2012-50

FIT OPTION: Best-fit peaks using the binomial model of Galbraith and Green

INITIAL GUESS FOR MODEL PARAMETERS (number of peaks to fit = 1)

Peak #.	Peak Age	Theta	Fraction(%)	Count
1.	19.20	0.498	41.0	4.51

Total range for grain ages: 13,2 to 35,2 Ma
 Number of active grains (Num. used for fit): 11
 Number of removed grains: 0
 Degrees of freedom for fit: 10
 Average of the SE(Z)'s for the grains: 0,34
 Estimated width of peaks in PD plot in Z units: 0,4

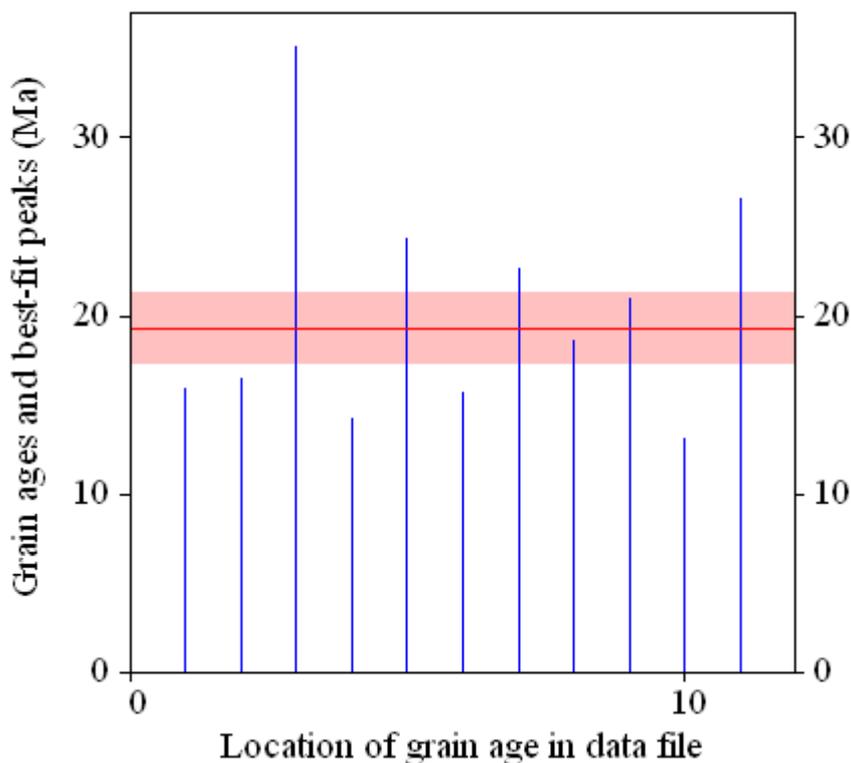
PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

- * Standard error for peak age includes group error
- * Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

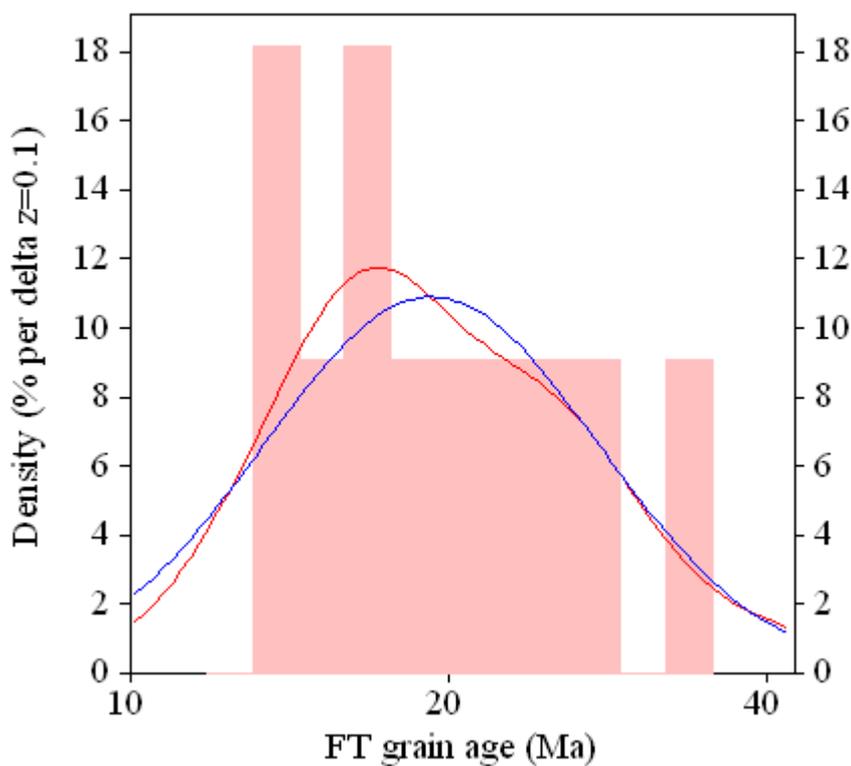
#.	Peak Age(Ma)	68%CI	95%CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1.	19.3	-1,9 ...+2,1	-3,5 ...+4,2	0.37	100.0	0.0	11.0

Log-likelihood for best fit: -26,310
 Chi-squared value for best fit: 7,891
 Reduced chi-squared value: 0,789
 Probability for F test: 0%
 Condition number for COVAR matrix: 1,00
 Number of iterations: 5

Plot of Grain Ages (Unsorted)



Probability-Density Plot with Best-Fit Peaks



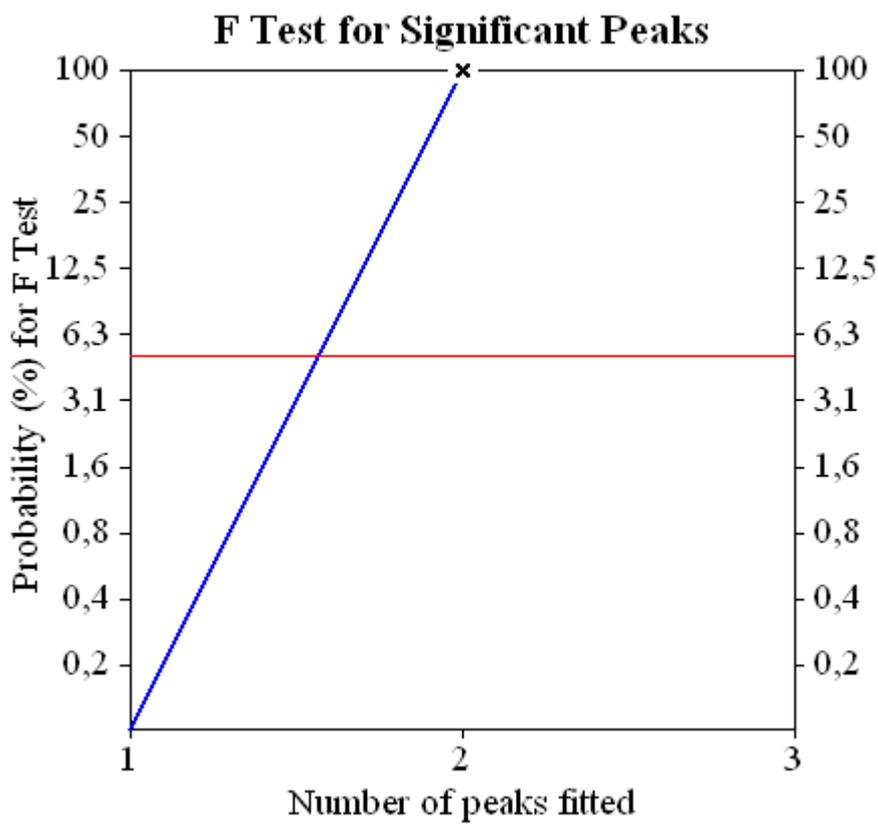
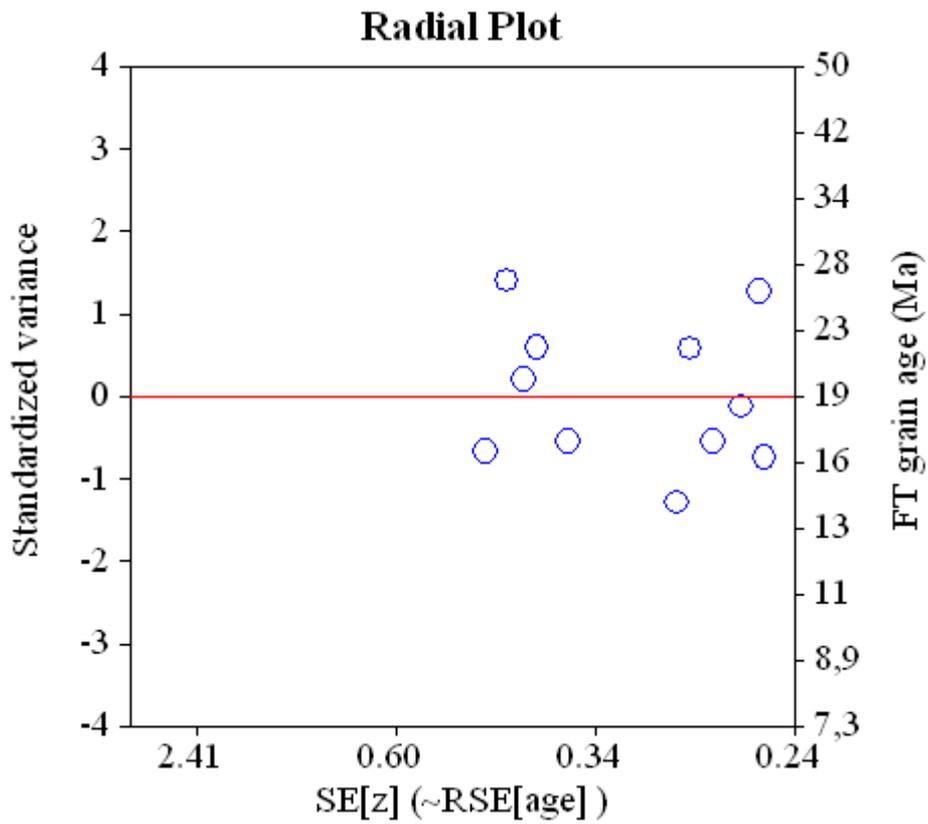
Mayo 3 2013 13:14

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 4

Datafile: D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\829_18-2012-50.ftz

Title: Sample No.829 Irr 18-2012-50



Mayo 2 2013 10:27

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 1

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\825_18-2012-48.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\18-2012-44_zircon-821.ft40

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\821_18-2012-44.ftz

NEW PARAMETERS - ZETA METHODEFFECTIVE TRACK DENSITY FOR FLUENCE MONITOR (tracks/cm²): 2,10E+05

RELATIVE ERROR (%): 1,64

EFFECTIVE URANIUM CONTENT OF MONITOR (ppm): 39,81

ZETA FACTOR AND STANDARD ERROR (yr cm²): 185,65 6,24SIZE OF COUNTER SQUARE (cm²): 6,06E-07**GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER**

Grain no.	RhoS (cm ⁻²)	(Ns)	RhoI (cm ⁻²)	(Ni)	Squares	U+/-2s	Grain Age (Ma)		
							Age	--95% CI--	
1	3,92E+06	(19)	2,27E+06	(11)	8	431 255	33.3	15.2	77.7
2	2,37E+06	(23)	1,34E+06	(13)	16	255 139	34.1	16.7	73.6
3	4,40E+06	(32)	2,34E+06	(17)	12	444 213	36.3	19.7	70.0
4	2,27E+06	(22)	2,27E+06	(22)	16	431 182	19.4	10.3	36.8
5	3,42E+06	(29)	2,36E+06	(20)	14	448 198	28.1	15.4	52.4
6	3,58E+06	(13)	3,03E+06	(11)	6	575 340	22.9	9.5	56.5
7	4,79E+06	(58)	2,48E+06	(30)	20	470 171	37.4	23.7	60.3
8	2,93E+06	(16)	1,65E+06	(9)	9	314 204	34.2	14.4	88.2

Mayo 2 2013 10:27

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 2

Merged dataset:

- D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\825_18-2012-48.ftz
- D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\18-2012-44_zircon-821.ft40
- D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\821_18-2012-44.ftz

NEW PARAMETERS - ZETA METHOD

EFFECTIVE TRACK DENSITY FOR FLUENCE MONITOR (tracks/cm²): 2,11E+05
 RELATIVE ERROR (%): 1,52
 EFFECTIVE URANIUM CONTENT OF MONITOR (ppm): 39,81
 ZETA FACTOR AND STANDARD ERROR (yr cm²): 185,65 6,24
 SIZE OF COUNTER SQUARE (cm²): 6,06E-07

Grain no.	RhoS (cm ⁻²)	(Ns)	RhoI (cm ⁻²)	(Ni)	Squares	U+/-2s	Grain Age (Ma)		
							Age	--95% CI--	
9	2,97E+06	(36)	1,65E+06	(20)	20	311 138	35.0	19.8	64.0
10	3,16E+06	(23)	3,58E+06	(26)	12	675 263	17.3	9.4	31.5
11	2,97E+06	(54)	2,81E+06	(51)	30	530 148	20.7	13.8	31.0
12	3,52E+06	(32)	2,31E+06	(21)	15	436 189	29.7	16.6	54.3
13	2,38E+06	(26)	2,20E+06	(24)	18	415 168	21.2	11.7	38.5
14	3,30E+06	(18)	3,67E+06	(20)	9	692 306	17.6	8.8	35.0
15	2,13E+06	(31)	1,58E+06	(23)	24	299 123	26.3	14.9	47.3
16	2,89E+06	(14)	3,30E+06	(16)	8	623 307	17.1	7.7	37.4
17	2,32E+06	(45)	2,11E+06	(41)	32	399 124	21.4	13.7	33.6
18	2,06E+06	(20)	1,55E+06	(15)	16	292 149	26.0	12.7	54.6
19	2,75E+06	(30)	4,03E+06	(44)	18	761 229	13.4	8.1	21.7
20	2,61E+06	(19)	2,06E+06	(15)	12	389 198	24.7	11.9	52.3
21	2,75E+06	(20)	2,48E+06	(18)	12	467 218	21.7	10.9	43.5
22	2,66E+06	(29)	2,29E+06	(25)	18	433 172	22.6	12.8	40.3
23	4,68E+06	(17)	1,93E+06	(7)	6	363 266	46.7	18.7	134.3
24	2,48E+06	(12)	2,68E+06	(13)	8	506 276	18.1	7.5	42.8
25	3,51E+06	(17)	2,68E+06	(13)	8	506 276	25.5	11.7	57.1
26	2,06E+06	(25)	2,23E+06	(27)	20	421 161	18.1	10.1	32.4
27	4,22E+06	(23)	3,85E+06	(21)	9	727 314	21.4	11.3	40.6
28	2,48E+06	(15)	1,65E+06	(10)	10	311 192	29.1	12.3	72.7
29	2,23E+06	(27)	1,65E+06	(20)	20	311 138	26.3	14.3	49.6
POOLED	2,89E+06	(745)	2,32E+06	(600)	426	442 39	24.1	21.2	27.4

CHI² PROBABILITY (%): 50.7

POOLED AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 24.1, 22.5 -- 25.7 (-1.5 +1.6)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 21.2 -- 27.4 (-2.9 +3.3)

CENTRAL AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 24.2, 22.5 -- 25.9 (-1.6 +1.7)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 21.1 -- 27.7 (-3.1 +3.5)
 AGE DISPERSION (%): 9.7

Mayo 2 2013 10:27

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 3

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\825_18-2012-48.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\18-2012-44_zircon-821.ft40

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\821_18-2012-44.ftz

FIT OPTION: Best-fit peaks using the binomial model of Galbraith and Green

INITIAL GUESS FOR MODEL PARAMETERS (number of peaks to fit = 1)

Peak #.	Peak Age	Theta	Fraction(%)	Count
1.	24.00	0.552	42.5	12.31

Total range for grain ages: 13,4 to 45,5 Ma
 Number of active grains (Num. used for fit): 29
 Number of removed grains: 0
 Degrees of freedom for fit: 28
 Average of the SE(Z)'s for the grains: 0,32
 Estimated width of peaks in PD plot in Z units: 0,37

PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

* Standard error for peak age includes group error

* Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

#.	Peak Age(Ma)	68%CI	95%CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1.	24.0	-1,5 ...+1,6	-2,9 ...+3,3	0.34	100.0	0.0	29.0

Log-likelihood for best fit: -74,611
 Chi-squared value for best fit: 27,538
 Reduced chi-squared value: 0,984
 Probability for F test: 0%
 Condition number for COVAR matrix: 1,00
 Number of iterations: 5

Mayo 2 2013 10:27

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 4

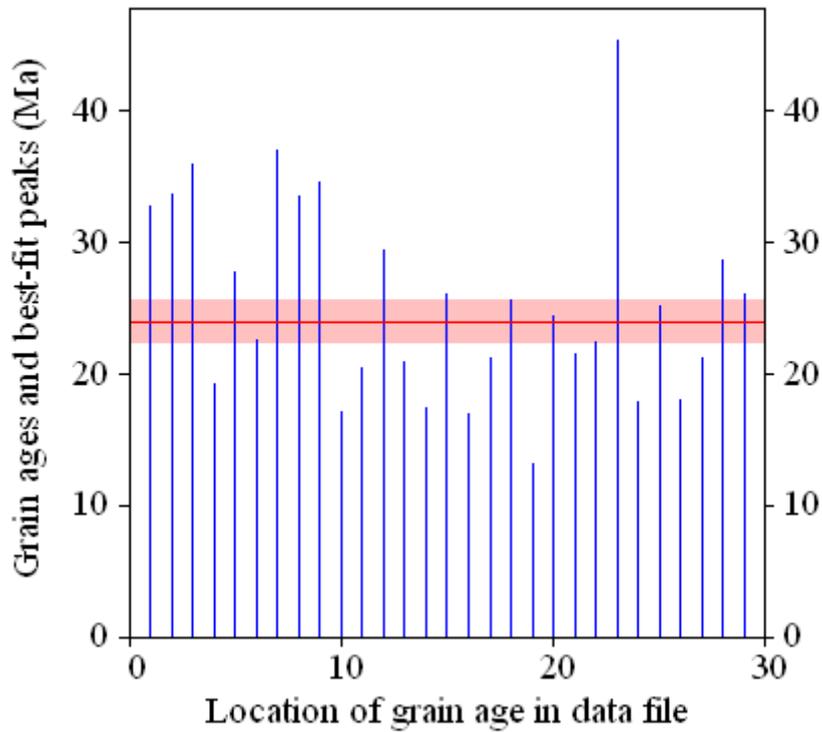
Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\825_18-2012-48.ftz

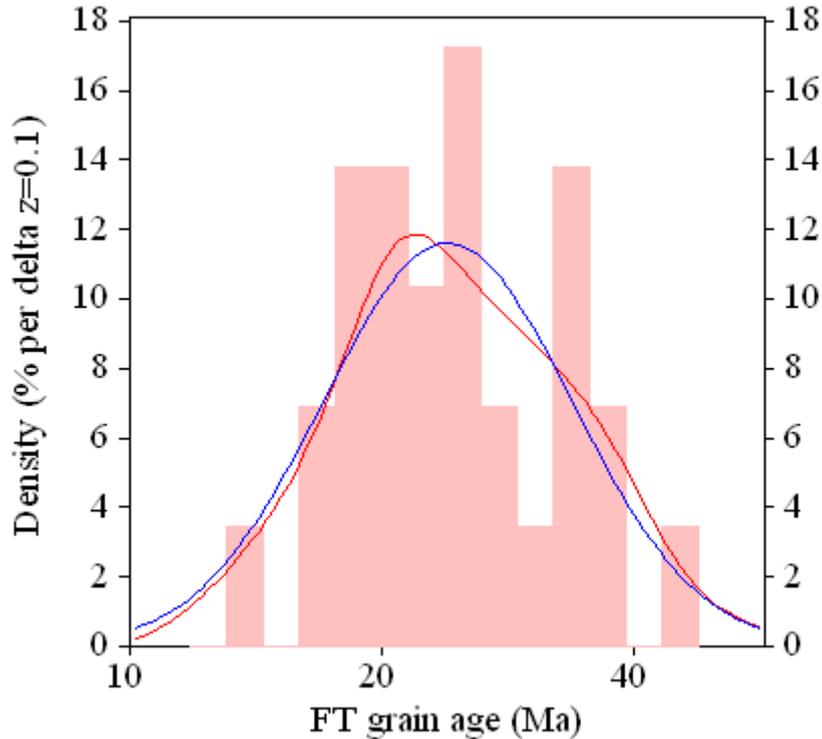
D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\18-2012-44_zircon-821.ft40

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\821_18-2012-44.ftz

Plot of Grain Ages (Unsorted)



Probability-Density Plot with Best-Fit Peaks



Mayo 2 2013 10:27

BinomFit for Windows ver.1.1

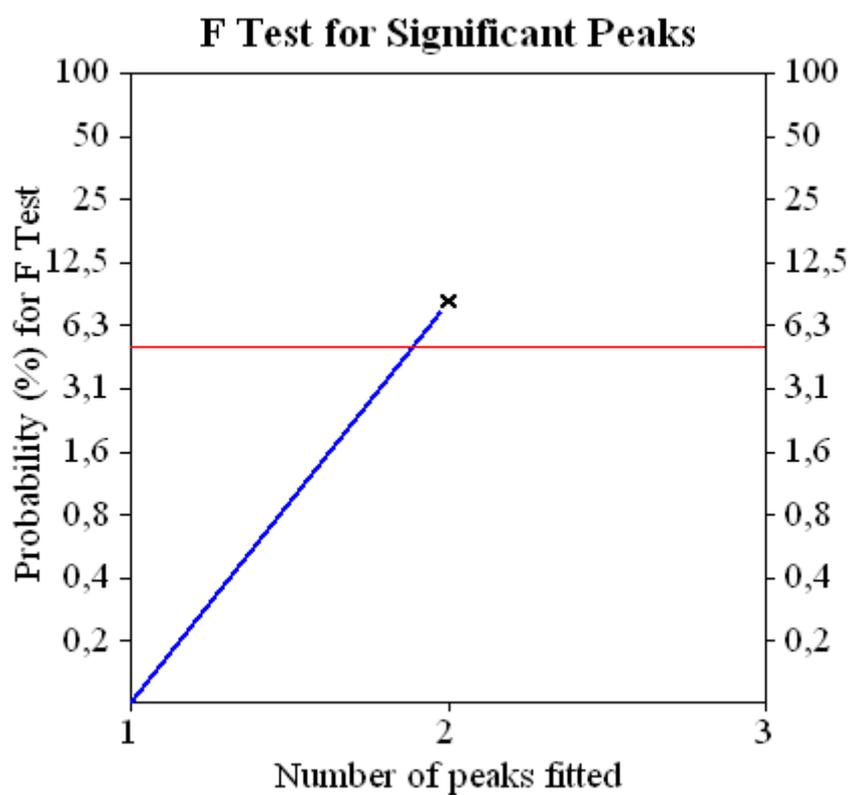
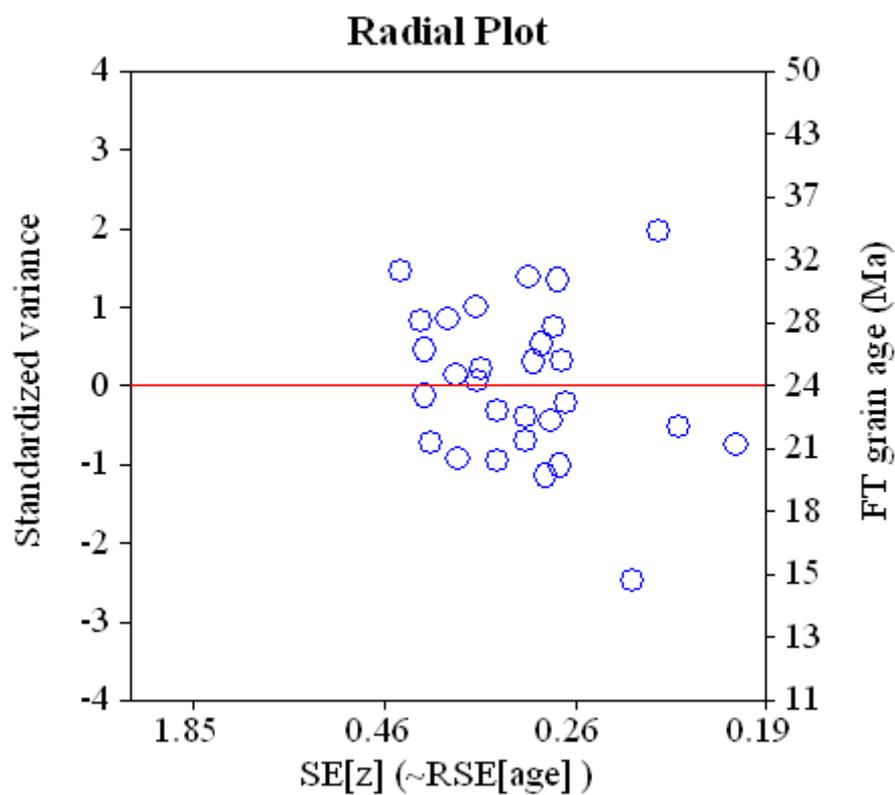
Page 5

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\825_18-2012-48.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\18-2012-44_zircon-821.ft40

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\821_18-2012-44.ftz



Mayo 2 2013 11:19

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 1

Datafile: D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\824_18-2012-47.ftz

Title: Sample No.824 Irr 18-2012-47

NEW PARAMETERS - ZETA METHOD

EFFECTIVE TRACK DENSITY FOR FLUENCE MONITOR (tracks/cm²): 2,10E+05
 RELATIVE ERROR (%): 1,61
 EFFECTIVE URANIUM CONTENT OF MONITOR (ppm): 39,81
 ZETA FACTOR AND STANDARD ERROR (yr cm²): 185,65 6,24
 SIZE OF COUNTER SQUARE (cm²): 6,06E-07

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

Grain no.	RhoS (cm ⁻²)	(Ns)	RhoI (cm ⁻²)	(Ni)	Squares	U+/-2s	Grain Age (Ma)		
							Age	--95% CI--	
1	3,47E+06	(21)	1,65E+06	(10)	10	313 194	40.4	18.4	96.6
2	3,85E+06	(14)	2,75E+06	(10)	6	522 323	27.1	11.2	68.3
3	3,30E+06	(18)	1,47E+06	(8)	9	278 191	43.2	18.1	115.5
4	3,85E+06	(21)	1,65E+06	(9)	9	313 203	44.8	19.9	111.8
5	4,26E+06	(31)	3,99E+06	(29)	12	757 280	20.8	12.1	35.7
6	5,36E+06	(26)	3,71E+06	(18)	8	705 328	28.0	14.8	54.3
7	2,27E+06	(11)	1,24E+06	(6)	8	235 184	35.2	12.1	116.6
8	2,99E+06	(29)	1,44E+06	(14)	16	274 144	40.0	20.6	82.2
POOLED	3,62E+06	(171)	2,20E+06	(104)	78	417 83	31.8	24.7	41.0

CHI² PROBABILITY (%): 60.6

POOLED AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 31.8, 27.9 -- 36.2 (-3.9 +4.4)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 24.7 -- 41.0 (-7.1 +9.2)

CENTRAL AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 32.0, 28.1 -- 36.4 (-3.9 +4.4)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 24.8 -- 41.2 (-7.2 +9.3)
 AGE DISPERSION (%): 2.2

Mayo 2 2013 11:19

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 2

Datafile: D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\824_18-2012-47.ftz

Title: Sample No.824 Irr 18-2012-47

FIT OPTION: Best-fit peaks using the binomial model of Galbraith and Green

INITIAL GUESS FOR MODEL PARAMETERS (number of peaks to fit = 1)

Peak #.	Peak Age	Theta	Fraction(%)	Count
1.	31.80	0.621	37.5	3.00

Total range for grain ages: 20,8 to 43,9 Ma
 Number of active grains (Num. used for fit): 8
 Number of removed grains: 0
 Degrees of freedom for fit: 7
 Average of the SE(Z)'s for the grains: 0,38
 Estimated width of peaks in PD plot in Z units: 0,44

PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

- * Standard error for peak age includes group error
 * Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

#.	Peak Age(Ma)	68%CI	95%CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1.	31.9	-3,9 ...+4,4	-7,2 ...+9,2	0.41	100.0	0.0	8.0

Log-likelihood for best fit: -18,089
 Chi-squared value for best fit: 5,440
 Reduced chi-squared value: 0,777
 Probability for F test: 0%
 Condition number for COVAR matrix: 1,00
 Number of iterations: 5

Mayo 2 2013 11:19

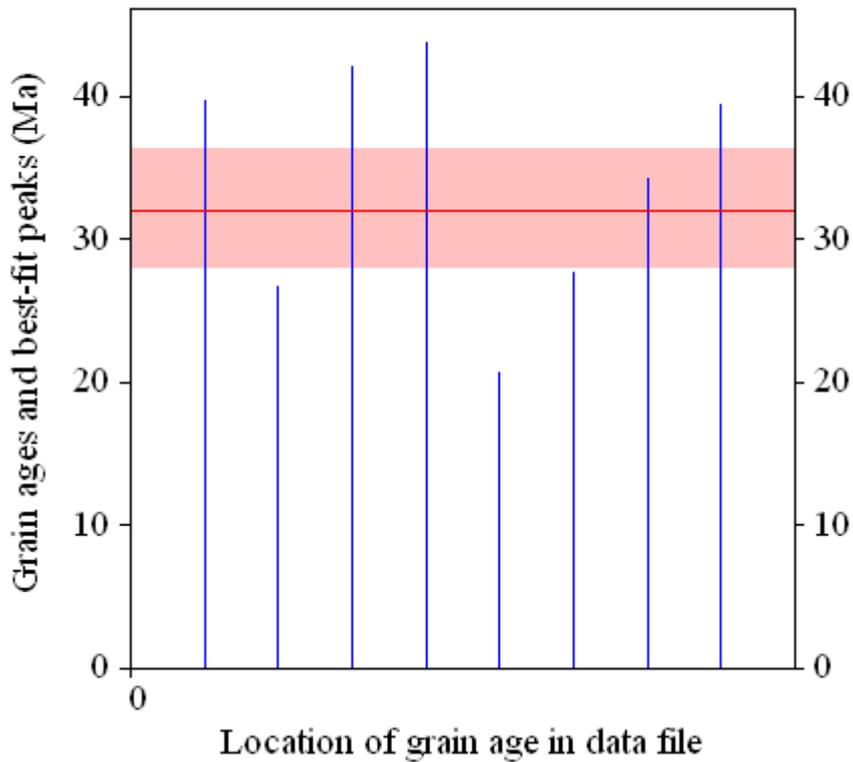
BinomFit for Windows ver.1.1

Page 3

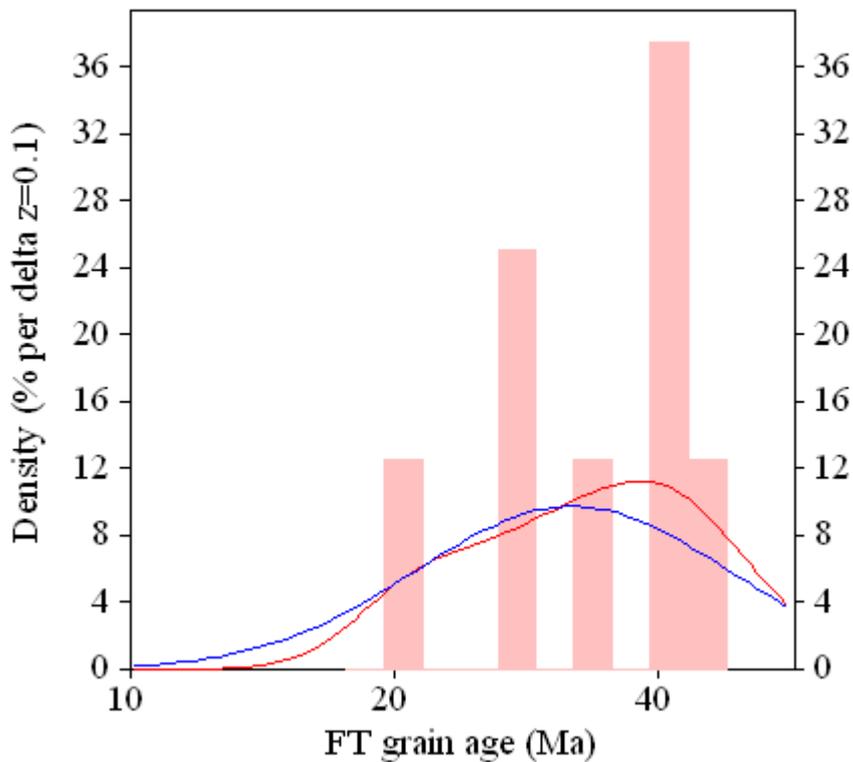
Datafile: D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\824_18-2012-47.ftz

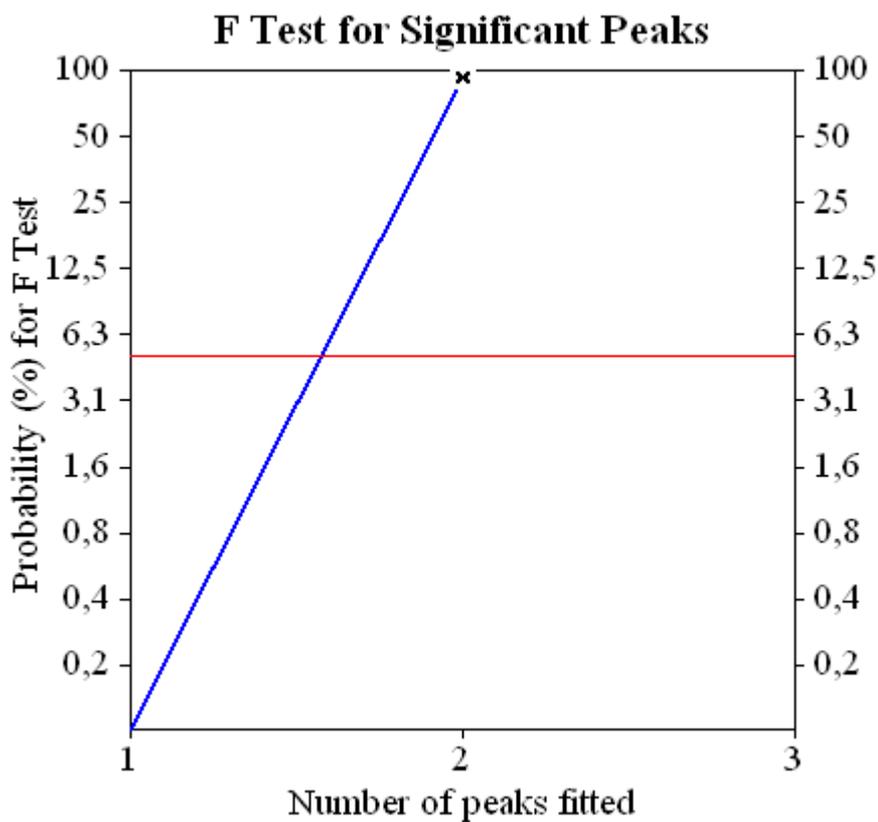
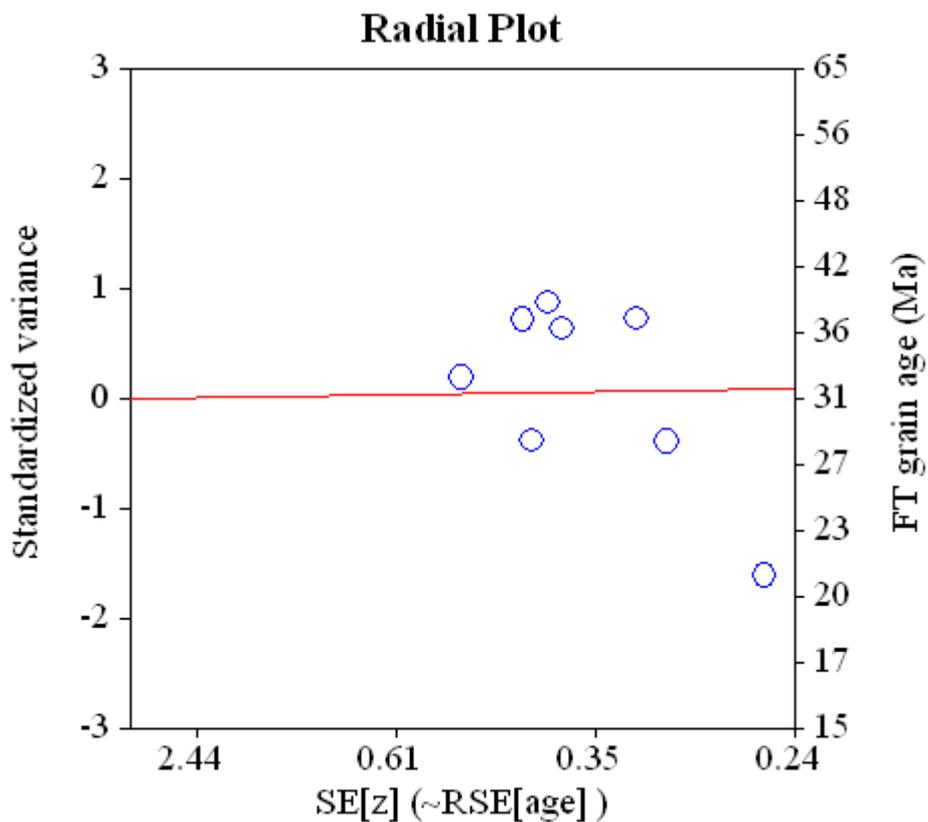
Title: Sample No.824 Irr 18-2012-47

Plot of Grain Ages (Unsorted)



Probability-Density Plot with Best-Fit Peaks





Mayo 15 2013 10:30

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 1

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\822_18-2012-45a.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\823_18-2012-46.ftz

NEW PARAMETERS - ZETA METHOD

EFFECTIVE TRACK DENSITY FOR FLUENCE MONITOR (tracks/cm²): 2,11E+05
 RELATIVE ERROR (%): 1,55
 EFFECTIVE URANIUM CONTENT OF MONITOR (ppm): 39,81
 ZETA FACTOR AND STANDARD ERROR (yr cm²): 185,65 6,24
 SIZE OF COUNTER SQUARE (cm²): 6,06E-07

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

Grain no.	RhoS (cm ⁻²)	(Ns)	RhoI (cm ⁻²)	(Ni)	Squares	U+/-2s	Grain Age (Ma)		
							Age	--95% CI--	
1	2,39E+06	(29)	5,78E+05	(7)	20	109 80	79.1	34.6	215.4
2	3,14E+06	(19)	1,49E+06	(9)	10	281 182	40.7	17.7	102.8
3	2,75E+06	(20)	1,79E+06	(13)	12	338 184	29.9	14.2	65.5
4	3,71E+06	(27)	1,65E+06	(12)	12	312 177	43.5	21.5	94.6
5	4,13E+06	(30)	2,06E+06	(15)	12	390 199	38.8	20.3	77.7
6	4,40E+06	(16)	2,75E+06	(10)	6	520 321	31.0	13.3	76.7
7	5,78E+06	(21)	1,65E+06	(6)	6	312 245	66.8	26.6	203.9
8	4,68E+06	(17)	2,20E+06	(8)	6	416 286	41.0	16.9	110.3
9	4,13E+06	(30)	1,79E+06	(13)	12	338 184	44.6	22.8	93.6
10	4,54E+06	(22)	3,09E+06	(15)	8	585 298	28.5	14.2	59.2
11	2,97E+06	(18)	1,32E+06	(8)	10	250 171	43.3	18.2	115.9
12	3,40E+06	(33)	2,68E+06	(26)	16	507 198	24.7	14.4	43.1
13	3,85E+06	(35)	2,09E+06	(19)	15	395 179	35.8	20.0	66.3
14	7,70E+06	(42)	2,57E+06	(14)	9	485 255	57.9	31.3	115.3
15	4,81E+06	(35)	2,06E+06	(15)	12	390 199	45.2	24.2	89.3
16	4,95E+06	(27)	1,65E+06	(9)	9	312 203	57.7	26.7	140.2
17	4,22E+06	(64)	1,45E+06	(22)	25	275 116	56.3	34.4	96.3
18	4,26E+06	(31)	2,06E+06	(15)	12	390 199	40.0	21.1	80.1
19	2,53E+06	(23)	1,21E+06	(11)	15	229 135	40.4	19.1	92.2
20	4,81E+06	(35)	2,48E+06	(18)	12	468 218	37.7	20.9	70.9

Mayo 15 2013 10:30

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 2

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\822_18-2012-45a.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\823_18-2012-46.ftz

NEW PARAMETERS - ZETA METHOD

EFFECTIVE TRACK DENSITY FOR FLUENCE MONITOR (tracks/cm²): 2,10E+05
 RELATIVE ERROR (%): 1,58
 EFFECTIVE URANIUM CONTENT OF MONITOR (ppm): 39,81
 ZETA FACTOR AND STANDARD ERROR (yr cm²): 185,65 6,24
 SIZE OF COUNTER SQUARE (cm²): 6,06E-07

Grain no.	RhoS (cm ⁻²)	(Ns)	RhoI (cm ⁻²)	(Ni)	Squares	U+/-2s	Grain Age (Ma)		
							Age	--95% CI--	
21	4,68E+06	(17)	4,13E+06	(15)	6	781 398	22.1	10.4	47.4
22	3,92E+06	(38)	1,96E+06	(19)	16	371 168	38.7	21.9	71.3
23	2,97E+06	(18)	2,48E+06	(15)	10	469 239	23.3	11.1	49.8
24	3,30E+06	(28)	3,06E+06	(26)	14	580 226	21.0	11.9	37.2
25	4,40E+06	(32)	2,48E+06	(18)	12	469 218	34.5	18.8	65.4
26	3,40E+06	(33)	2,17E+06	(21)	16	410 177	30.5	17.2	55.6
27	3,48E+06	(19)	2,93E+06	(16)	9	556 274	23.1	11.3	48.0
28	3,58E+06	(13)	4,40E+06	(16)	6	833 411	15.9	7.0	35.1
29	3,30E+06	(16)	1,65E+06	(8)	8	313 215	38.5	15.7	104.5
30	4,13E+06	(15)	2,20E+06	(8)	6	417 286	36.1	14.5	98.9
31	3,30E+06	(24)	2,48E+06	(18)	12	469 218	25.9	13.5	50.7
32	3,30E+06	(32)	2,78E+06	(27)	16	527 202	23.1	13.4	40.0
33	3,67E+06	(20)	1,65E+06	(9)	9	313 203	42.8	18.8	107.3
34	2,93E+06	(16)	1,28E+06	(7)	9	243 178	43.9	17.3	127.0
35	2,93E+06	(16)	2,75E+06	(15)	9	521 265	20.8	9.6	45.1
36	3,67E+06	(20)	2,93E+06	(16)	9	556 274	24.3	12.0	50.2
37	3,30E+06	(20)	2,48E+06	(15)	10	469 239	25.9	12.6	54.4
38	3,51E+06	(17)	2,68E+06	(13)	8	508 277	25.4	11.7	56.9
39	3,22E+06	(39)	1,98E+06	(24)	20	375 152	31.6	18.6	54.9
40	4,33E+06	(21)	2,68E+06	(13)	8	508 277	31.3	15.0	68.2
POOLED	3,75E+06	(1028)	2,13E+06	(584)	452	404 36	34.2	30.2	38.8

CHI² PROBABILITY (%): 32.6

POOLED AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 34.2, 32.1 -- 36.5 (-2.1 +2.2)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 30.2 -- 38.8 (-4.0 +4.5)

CENTRAL AGE W/ 68% CONF. INTERVAL(Ma): 34.2, 32.0 -- 36.6 (-2.2 +2.4)
 95% CONF. INTERVAL(Ma): 30.0 -- 39.0 (-4.2 +4.8)
 AGE DISPERSION (%): 12.3

Mayo 15 2013 10:30

BinomFit for Windows ver.1.1

Page 3

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\822_18-2012-45a.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\823_18-2012-46.ftz

FIT OPTION: Best-fit peaks using the binomial model of Galbraith and Green

INITIAL GUESS FOR MODEL PARAMETERS (number of peaks to fit = 2)

Peak #.	Peak Age	Theta	Fraction(%)	Count
1.	34.30	0.638	36.8	14.73
2.	56.10	0.742	16.6	6.65

Total range for grain ages: 15,9 to 76,4 Ma
 Number of active grains (Num. used for fit): 40
 Number of removed grains: 0
 Degrees of freedom for fit: 37
 Average of the SE(Z)'s for the grains: 0,34
 Estimated width of peaks in PD plot in Z units: 0,4

PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

* Standard error for peak age includes group error

* Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

#.	Peak Age(Ma)	68%CI	95%CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1.	31.9	-4,0 ...+4,5	-7,3 ...+9,5	0.38	79.0	44.5	31.6
2.	44.6	-12,9 ...+18,1	-21,7 ...+42,2	0.39	21.0	44.5	8.4

Log-likelihood for best fit: -101,148
 Chi-squared value for best fit: 36,042
 Reduced chi-squared value: 0,974
 Probability for F test: 0%
 Condition number for COVAR matrix: 75,14
 Number of iterations: 8

Mayo 15 2013 10:30

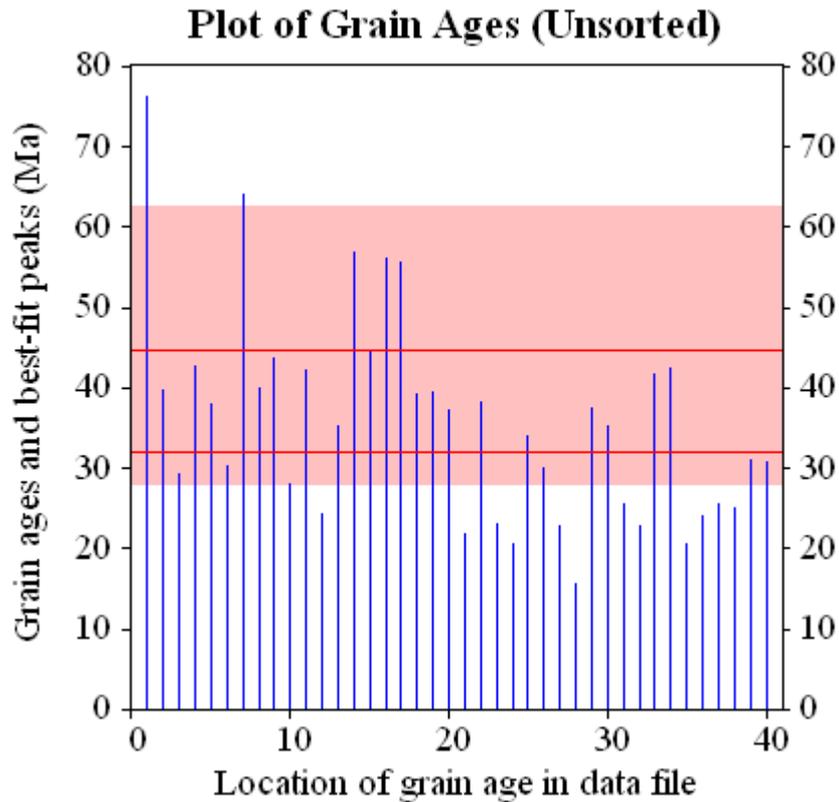
BinomFit for Windows ver.1.1

Page 4

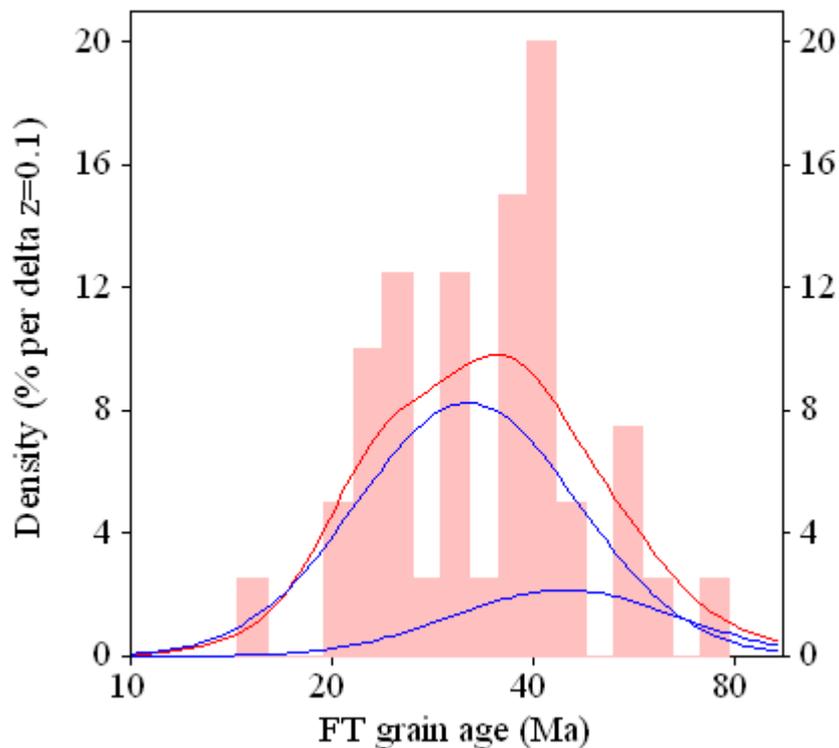
Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\822_18-2012-45a.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\823_18-2012-46.ftz



Probability-Density Plot with Best-Fit Peaks



Mayo 15 2013 10:30

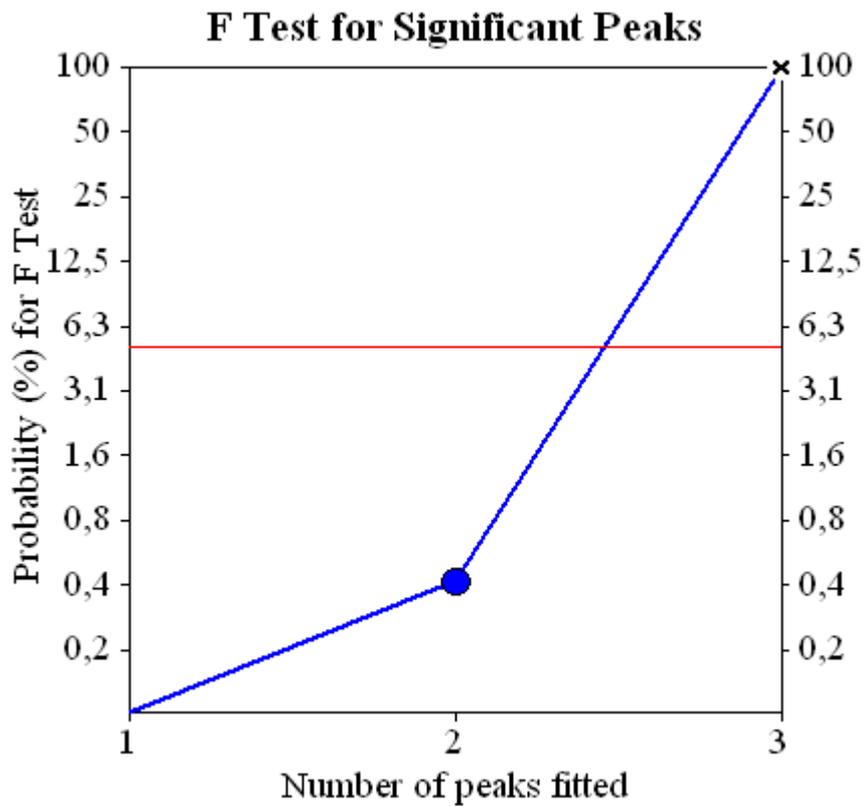
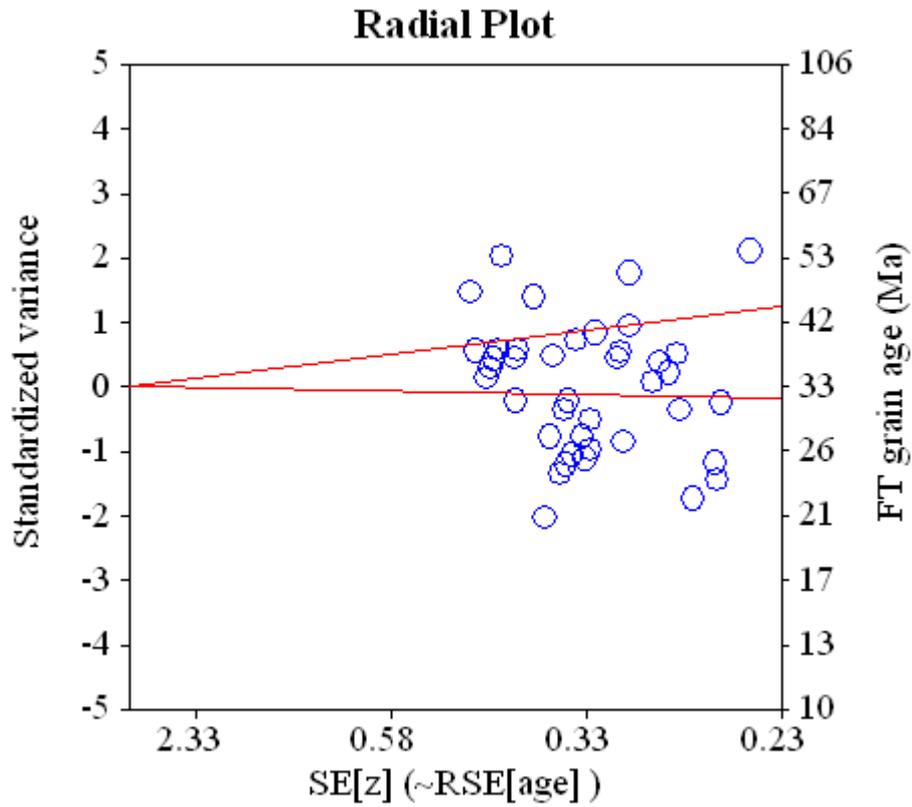
BinomFit for Windows ver.1.1

Page 5

Merged dataset:

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\822_18-2012-45a.ftz

D:\FT analysis\Cindy\18-2012_zircon_NB\823_18-2012-46.ftz



D. Anexo: Tabla abreviaturas minerales.

- Abreviaturas minerales usadas en THERMOCALC.

Amphibole		Other minerals/phases	
Clinoamphibole	cam	Osumilite	osm
Hornblende	hb	Sapphirine	sa
Glaucophane	gl	Ilmenite	ilm
Actinolite	act	Magnetite	mt
Cummingtonite	cu	Ulvospinel	ulv
Orthoamphibole	oam	Spinel	sp
Anthophyllite	anth	Garnet	g
Gedrite		Epidote	ep
ged		Haematite	hem
Pyroxene		Talc	ta
orthopyroxene	opx	Dolomite	dol
clinopyroxene	cpx	Siderite	sid
diopside	di	Melt	liq
omphacite	o	Fluid	fluid
jadeite	jd	Pure phases (endmembers)	
Feldspar		Quartz	q
Plagioclase	pl	Sillimanite	sill
K-feldspar	ksp	Andalusite	and
Albite	ab	Kyanite	ky
Mica		Rutile	ru
Biotite	bi	Sphene	sph
Muscovite	mu	Calcite	cc
Paragonite	pa	Clinozoisite	cz
Other minerals/phases		Zoisite	zo
Chlorite	chl	Albite	ab
Chloritoid	ctd	Lawsonite	law
Cordierite	cd	H2O	H2O
Staurolite	st		

▪ **Abreviaturas minerales tomadas de Whitney & Evans (2010).**

TABLE 1. Updated list of abbreviations

Symbol	Mineral Name	IMA status*	Symbol	Mineral Name	IMA status*	Symbol	Mineral Name	IMA status*
Acm	acmite	D	Chu	clinochlore	G	Ged	gedrite	Rd
Act	actinolite	A	Cpt	clinoptilolite	A	Gh	gehlenite	G
Adl	adularia	I	Cpx	clinopyroxene	GROUP	Gk	geikielite	G
Aeg	aegirine	A	Czo	clinozoisite	G	Gbs	gibbsite	A
Ak	åkermanite	G	Cln	clintonite	A	Gis	gismondine	A
Ab	albite	G	Coe	coesite	A	Glt	glauconite	GROUP
Afs	alkali feldspar	GROUP	Coh	cohenite	G	Gln	glaucophane	Rd
Aln	allanite	A	Crđ	cordierite	G	Gme	gmelinite	A
Alm	almandine	G	Crr	corrensite	G	Gth	goethite	A
Als	aluminosilicate (Al ₂ SiO ₅ polymorphs)	GROUP	Crn	corundum	G	Gdd	grandierite	G
Alu	alunite	Rd	Cv	covellite	G	Gr	graphite	G
Amk	amakinite	Rd	Crs	crystalite	G	Gre	greenalite	G
Ame	amesite	G	Crt	crossite	D	Grs	grossular	A
Amp	amphibole	GROUP	CrI	cryolite	G	Gru	grunerite	Rd
Anl	analclime (analcite)	A	Cbn	cubanite	G	Gp	gypsum	G
Ant	anatase	A	Cum	cumingtonite	Rd	Hl	halite	G
And	andalusite	G	Cpr	cuprite	G	Hrm	harmotome	A
Adr	andradite	G	Csp	cuspidine	G	Hst	hastingsite	Rd
Ang	anglesite	G	Dph	daphnite	not listed	Hsm	hausmannite	G
Anh	anhydrite	G	Dat	datolite	G	Hyn	häuyne	G
Ank	ankerite	G	Dbr	daubreelite	G	Hzl	heazlewoodite	G
Ann	annite	A	Dee	deerite	A	Hd	hedenbergite	A
An	anorthite	G	Dia	diamond	G	Hem	hematite	A
Ano	anorthoclase	I	Dsp	diaspore	G	Hc	hercynite	G
Ath	anthophyllite	Rd	Dck	dickite	G	Hul	heulandite	A
Atg	antigorite	Rn	Dg	digenite	A	Hbn	hibonite	G
Ap	apatite	GROUP	Di	diopside	A	Hbs	hibschite	Rn
Apo	apophyllite	GROUP	Dpt	diopside	G	Hgb	högbomite	D
Arg	aragonite	G	Dol	dolomite	G	Hol	hollandite	G
Arf	arfvedsonite	A	Drv	dravite	G	Hlm	holmquistite	Rd
Arm	armalcolite	Rd	Dum	dumortierite	G	Hbl	hornblende	GROUP
Apy	arsenopyrite	A	Eas	eastonite	Rd	Hw	howieite	A
Aug	augite	A	Ec	ecandrewsite	A	Hu	humite	G
Awr	awaruite	G	Eck	eckermannite	A	Hgr	hydrogrossular	GROUP
Ax	axinite	GROUP	Ed	edenite	A	Hyp	hypersthene	D
Bab	babingtonite	G	Elb	elbaite	G	Ill	illite	GROUP
Bdy	baddeleyite	G	Ell	ellenbergerite	A	Ilm	ilmenite	G
Brt	barite (baryte)	A	Eng	enargite	G	Ilv	ilvaite	G
Brs	barroisite	Rd	En	enstatite (ortho-)	A	Jd	jadeite	A
Bel	beidellite	G	Ep	epidote	GROUP	Jrs	jarosite	Rd
Brl	beryl	G	Eri	erionite	A	Jim	jimthompsonite	A
Bt	biotite	GROUP	Esk	eskolaite	G	Jhn	johannsenite	A
Bxb	bixbyite	G	Ess	esseneite	A	Krs	kaersutite	Rd
Bhm	böhmite (boehmite)	G	Eud	eudialite	A	Kls	kalsilite	G
Bn	bornite	A	Fas	fassalite	D	Kam	kamacite (α-FeNi)	D
Brk	brookite	G	Fa	fayalite	G	Kln	kaolinite	A
Brc	brucite	G	Fsp	feldspar	GROUP	Ktp	kataphorite	Rd
Bst	bustamite	G	Fac	ferro-actinolite	Rd	Kfs	K-feldspar	Informal
Cal	calcite	G	Fath	ferro-anthophyllite	Rd	Khl	K-hollandite	H
Ccn	cancrinite	G	Fbrs	ferrobarroisite	A	Kir	kirschsteinite	G
Cnl	cannilloite	H	Fcar	ferrocarpholite	A	Krn	kornepurine	G
Cb	carbonate mineral	GROUP	Fcel	ferroceladonite	A	Kos	kosmochlor	A
Car	carpholite	G	Fec	ferro-eckermannite	Rd	Kut	kutnohorite (kutnohorite)	G
Cst	cassiterite	G	Fed	ferro-edenite	Rd	Ky	kyanite	A
Cel	celadonite	A	Fgd	ferrogedrite	Rd	Lrn	larnite	G
Clt	celestine	A	Fgl	ferroglaucophane	Rd	Lmt	laumontite	A
Cls	celsian	G	Fkrs	ferrokaersutite	A	Lws	lawsonite	G
Cer	cerussite	G	Fny	ferronyboite	H	Lzl	lazulite	A
Cbz	chabazite	A	Fprg	ferropargasite	Rd	Lzr	lazurite	G
Cct	chalcocite	G	Frct	ferrorichterite	A	Lpd	lepidolite	GROUP
Ccp	chalcopyrite	G	Fs	ferrosillite	Rn	Lct	leucite	G
Chm	chamosite	G	Fts	ferrotschermakite	Rd	Lm	lilmonite	not listed
Chs	chesterite	A	Fwn	ferrowinchite	Rd	Liq	liquid	
Chl	chlorite	GROUP	Fl	fibrolite (fibrous sillimanite)	Informal	Lz	lizardite	G
Cld	chloritoid	G	Fl	fluorite	G	Lo	löllingite (loellingite)	G
Chn	chondrodite	G	Fo	forsterite	G	Mgh	maghemite	G
Chr	chromite	G	Fos	foshagite	G	Marf	magnesio-arfvedsonite	Rd
Ccl	chrysocolla	A	Frk	franklinite	G	Mcar	magnesio-carpholite	A
Ctl	chrysotile	Rd	Ful	fullerite	N	Mfr	magnesioferrite	G
Cin	cinnabar	G	Ghn	gahnite	G	Mhs	magnesiohastingsite	Rd
Cam	clinoamphibole	GROUP	Glx	galaxite	G	Mhb	magnesiohornblende	Rd
Clc	clinochlore	G	Gn	galena	G	Mkt	magnesiokataphorite	Rd
Cen	clinoenstatite	A	Grt	garnet	GROUP			
Cfs	clinoferrrosillite	A						

Symbol	Mineral Name	IMA status*	Symbol	Mineral Name	IMA status*	Symbol	Mineral Name	IMA status*
Mrbk	magnesioriebeckite	Rd	Pgt	pigeonite	A	Tae	taenite (γ -Fe, Ni)	G
Msdg	magnesiosadanagite	Rd	Pl	plagioclase	GROUP	Tlc	talc	G
Mst	magnesioataurilita	A	Prh	prehnite	G	Trm	taramite	Rd
Mtm	magnesiotaramite	Rn	Prm	prismaticite	Rd	Tnt	tennantite	G
Mws	magnesioaluminosilicate	not listed	Psb	pseudobrookite	Rd	Tnr	tenorite	A
Mgs	magnesite	A	Pmp	pumpellyite-(Al)	A	Tep	tephroite	G
Mag	magnetite	G	Py	pyrite	G	Ttr	tetrahedrite	A
Maj	majorite	A	Pcl	pyrochlore	A	Thm	thomsonite	A
Mlc	malachite	G	Prp	pyrope	G	Thr	thorite	G
Mng	manganosite	G	Pph	pyrophanite	G	Tly	tilleyite	G
Mrc	marcasite	G	Prl	pyrophyllite	G	Ttn	titanite (sphene)	A
Mrg	margarite	A	Pxf	pyroferroite	A	Tpz	topaz	G
Mar	marialite	G	Pxm	pyroxmangite	G	Tur	tourmaline	GROUP
Mei	melonite	G	Po	pyrrhotite	G	Tr	tremolite	Rd
Mll	mellite	GROUP	Qnd	qandilite	A	Trd	tridymite	G
Mw	merwinite	G	Qz	quartz	A	Tro	trollite	G
Mes	mesolite	A	Rnk	rankinite	G	Ts	tschermakite	Rd
Mc	microcline	G	Rlg	realgar	G	Usp	ulvöspinel	G
Mlr	millerite	G	Rds	rhodochrosite	A	Urn	uraninite	G
Mns	minnesotaite	G	Rdn	rhodonite	A	Uv	uvarovite	A
Mog	moganite	A	Rct	richterite	A	Vtr	vaterite	A
Mol	molybdenite	G	Rbk	riebeckite	Rd	Vrm	vermiculite	G
Mnz	monazite	A	Rwd	ringwoodite	A	Ves	vesuvianite	A
Mtc	monticellite	G	Rdr	roedderite	A	Wds	wadsleyite	A
Mnt	montmorillonite	G	Rsm	rossmanite	A	Wag	wagnerite	Rd
Mor	mordenite	A	Rt	rutile	G	Wrk	walrakitite	A
Mul	mullite	G	Sdg	sadanagaite	Rd	Wav	wavellite	A
Ms	muscovite	A	Sa	sanidine	G	Wht	whitlockite	G
Ntr	natrolite	A	Sap	saponite	G	Wlm	willmenite	G
Nph	nepheline	G	Spr	sapphirine	G	Wnc	winchite	Rd
Nrb	norbergite	G	Scp	scapolite	GROUP	Wth	witherite	G
Nsn	nosean	G	Sch	scheelite	G	Wo	wollastonite	A
Nyb	nyböite	Rd	Srl	schorl	G	Wur	wurtzite	G
Ol	olivine	GROUP	Scb	schreibersite	G	Wus	wüstite	G
Omp	omphacite	A	Sep	sepiolite	G	Xtm	xenotime	A
Opl	opal	G	Ser	sericite	D	Xon	xonotlite	G
Opq	opaque mineral	informal	Srp	serpentine	GROUP	Yug	yugawaralite	A
Orp	orpiment	G	Sd	siderite	G	Zeo	zeolite	GROUP
Oam	orthoamphibole	GROUP	Sil	sillimanite	G	Znw	zinnwaldite	GROUP
Or	orthoclase	A	Sme	smectite	GROUP	Zrn	zircon	G
Oen	orthoenstatite	D	Sdl	sodalite	G	Zo	zoisite	G
Opx	orthopyroxene	GROUP	Sps	spessartine	A			
Osm	osumilite	G	Sp	sphalerite	A			
Plg	palygorskite	G	Spn	sphene (titanite)	D			
Pg	paragonite	A	Spl	spinel	G			
Prg	pargasite	Rd	Spd	spodumene	A			
Pct	pectolite	G	Spu	spurrite	G			
Pn	pentlandite	G	St	staurolite	G			
Per	pericla	G	Stv	stevensite	Q			
Prv	perovskite	G	Stb	stilbite	A			
Ptl	petalite	G	Stp	stilpnomelane	A			
PhA	phase A	not listed	Sti	stishovite	A			
Ph	phengite	G	Str	strontianite	G			
Php	phillipsite	A	Sud	sudoite	Rd			
Phl	phlogopite	A	Syl	syilite	G			
Pmt	pleiomontite	A						

* International Mineralogical Association (IMA) abbreviations: A = Approved; D = Discredited; G = Grandfathered (generally regarded as valid mineral name); GROUP = Name designates a group of mineral species; H = hypothetical (e.g., synthetic); I = Intermediate in a solid-solution series; Q = questionable; Rd = Redefinition approved by IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification (CNMNC); Rn = Renamed with approval of the CNMNC.

Bibliografía

- AMAYA, S., 2012. Caracterización Petrográfica y Petroológica de los Neises, Migmatitas y Granulitas del Neis de Bucaramanga, en el Macizo de Santander, Departamento de Santander. (Tesis) 130p., Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- ARENAS, J. E., 2004. Litología y Petrología de las Metamorfitas Carbonatadas y Metasedimentitas Asociadas de la Formación Silgará, Faja Noroeste de Mutiscua (Macizo de Santander), Norte de Santander (Trabajo de grado). 261p., Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- BERNET, M., 2009. A field-based estimate of the zircon fission-track closure temperature. *Chemical Geology*, 259 (3), 181–189.
- BEST, M., 2003. *Igneous and Metamorphic Petrology*. Blackwell Publishing. Second edition. 729p.
- BOHLEN, S., & LINDSLEY, D., 1987. Thermometry and Barometry of Igneous and Metamorphic Rocks. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 15, 397-420.
- CABALLERO, V., MORA, A., QUINTERO, I., BLANCO, V., PARRA, M., ROJAS, L. E., LÓPEZ, C., SÁNCHEZ, N., HORTON, B., STOCKLI, D., & DUDDY, I., 2013. Tectonic controls on sedimentation in an intermontane hinterland basin adjacent to inversion structures: the Nuevo Mundo syncline, Middle Magdalena Valley, Colombia. En: Nemcok, M., Mora, A. & Cosgrove, J. W. (eds) 2013. *Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion*. Geological Society, London, Special Publications, 377. <http://dx.doi.org/10.1144/SP377.12>.
- CAMPBELL, C. J., 1965. The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting. Fourth Caribbean Geological Conference. Trinidad. Memoria: 247-261.
- CASTELLANOS, O., RÍOS, C., & TAKASU, A., 2008. A new approach on the tectonometamorphic mechanisms associated with P-T paths of the Barrovian-type Silgara Formation at the Central Santander Massif, Colombian Andes. *Journal Earth Sciences Research*, 12, 125-155.
- CARDONA, A.; CHEW, D.; VALENCIA, V.; BAYONA, G.; MISCOVIC, A. & IBAÑEZ-MEJIA, M., 2010. Grenvillian remnants in the Northern Andes: Rodinia and

- Phanerozoic paleogeographics perspectives. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 92-104.
- CORDANI, U.G., CARDONA, A., JIMENEZ, D., NUTMAN, A. P., 2005. Geochronology of Proterozoic basement inliers from the Colombian Andes: tectonic history of remnants from a fragmented Grenville belt. En: Cardona, A., Chew, D., Valencia, V., Bayona, G., Miscovic, A., Ibañez-Mejía, M. (2009): Grenvillian remnants in the Northern Andes: Rodinia and Phanerozoic paleogeographics perspectives. *Journal of South American Earth Sciences*.
- CUELLAR, M. A., LÓPEZ, J. A., OSORIO, J. A., CARRILLO, E. J., 2012. Análisis Estructural del Segmento Bucaramanga del Sistema de Fallas de Bucaramanga (SFB) entre los Municipios de Pailitas y Curumaní, Cesar – Colombia. *Boletín de Geología*, 34 (2)
- DE LA ROCHE, M. H. 1968. Comportement géochimique différentiel de Na, K et Al dans les formations volcaniques et sédimentaires: un guide pour l'étude des formations métamorphiques et plutoniques. *Comptes Rendus Académie. des Sciences. Paris*, 267 D, 39-49.
- DEER, W. A., HOWIE, R. A., & ZUSSMAN, J., 1992. An introduction to the rock-forming minerals. Longman Scientific & Technical. Pennsylvania State University. 696p.
- DODSON, M.H., 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40 (3), 259–274.
- DÖRR, W., GRÖSSER, J. R., RODRIGUEZ, G. I., & KRAMM, U. 1995. Zircon U-Pb age of the Paramo Rico tonalite-granodiorite, Santander Massif (Cordillera Oriental, Colombia) Geotectonic significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 8 (2), 187-194.
- ESTEBAN, J. J., CUEVAS, J., TUBIA, J. M., GIL IBARGUCHI, J. I., & SEWARD, D. 2005. Metamorfismo, exhumación y termocronología de la Unidad de Yunquera (Alpujárrides occidentales, Cordilleras Béticas). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 18 (1-2), 61 – 74.
- FETTES, D. & DESMONS, J. (Editores) 2007. *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks*. Cambridge University Press, Cambridge. 244 p.
- FLEISCHER, R. L., PRICE, P. B., WALKER, R. M. 1975. *Nuclear Tracks in Solids. Principles and Applications*. University of California Press, Berkeley. 605p.
- FOLK, R., 1980. *The Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Company. Austin Texas. 182p.

- FORERO-SUÁREZ, A. 1990. The basement of the Eastern Cordillera, Colombia allochthonous terrane in the northwestern South America - *Journal of South American Earth Sciences*, 3 (2/3), 141-151.
- GARCÍA, C., RÍOS, C., & CASTELLANOS, O. 2005. Medium-pressure metamorphism in the Central Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. *Boletín de Geología*, 27 (2), 43 – 68.
- GOLDSMITH, R.; MARVIN, R. & MEHNERT, H. 1971. Radiometric Ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. US Geological Survey, Professional Paper, (750D), D44-D49. Denver.
- HARRISON, T. M., ARMSTRONG, R. L., NAESER, C. W., & HAKAL, J. E. 1979. Geochronology and thermal history of the Coast Plutonic Complex, near Prince Rupert, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16, 400-410.
- HERRÓN, M. M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core of log data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58 (5), 820–829.
- INDARES, A., & MARTIGNOLE, J. 1985. Biotite-garnet geothermometry in granulite facies: the influence of Ti and Al in biotite. *American Mineralogist*, 70, 272-278.
- JULIVERT, M., & TÉLLEZ, N. 1961. Sobre la presencia de Fallas de edad precretácica y post-Girón (Jura-Triásico) en el flanco W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 12, 5-17.
- KEPPIE J.D. & ORTEGA-GUTIÉRREZ F. 1999. Middle American Precambrian basement: a missing piece of the reconstructed 1 Ga orogen, en Ramos V. A., Keppie J. D. (eds.), *Laurentia-Gondwana Connections before Pangea: Geological Society of America, Special Paper*, 336, 199–210.
- LEAKE, E. 1964. The chemical distinction between ortho and para-amphibolites. *Journal of Petrology*, 5, 238 – 253.
- MIYASHIRO, A. 1994. *Metamorphic Petrology*. Oxford University Press. New York. 404p.
- NAVARRO, A. & REYES, R. 1983. Estudio geológico petrográfico orientado a la prospección de Uranio en un sector al occidente del Municipio de Abrego (Vereda Capitán Largo), Norte de Santander (Trabajo de grado) 145p., Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Geociencias, Bogotá.
- PIMENTEL, C. A. 2009. Aplicación de la técnica AFTA (Apatite Fission Track Analysis) para la evaluación de la historia termal y evolución tectónica de un sector del Macizo de Santander. (Trabajo de grado) 78p., Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología. Bucaramanga.

- POLSON, I. L. & HENAO, D. 1968. "The Santa Marta wrench fault: a rebuttal", Transactions, 4th Caribbean Geological Conference, 263-266.
- RAMOS, V. 2010. The Grenville – age basement of the Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 77-91.
- RESTREPO-PACE, P., RUIZ, J., GEHRELS, G., & COSCA, M. 1997. Geochronology and Nd isotopic data of the 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, 427-441.
- RIOS, C., TAKASU, A., & GARCIA, C. 2003. Tectono-metamorphic evolution of the Silgará Formation metamorphic rocks in the southwestern Santander Massif, Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 16 (2), 133 – 154.
- ROJAS, S. 2013. (Tesis) p., Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias, Bogotá.
- ROYERO, J. & VARGAS, R. 2001. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander, Escala 1:400.000; Memoria Explicativa. INGEOMINAS.
- SCHMID, R., FETTES, D., HARTE, B., DAVIS, E., & DESMONS, J. 2007. A systematic nomenclature for metamorphic rocks. 1. How to name a metamorphic rock. Recommendations by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Metamorphic Rocks. . <http://www.bgs.ac.uk/SCMR>.
- SHAGAM, R., KOHN, B. P., BANKS, P. O., DASCH, L. E., VARGAS, R., RODRIGUEZ, G. I., & PIMENTEL, N. 1984. Tectonic implications of Cretaceous–Pliocene fission-track ages from rocks of the circum-Maracaibo Basin region of western Venezuela and eastern Colombia. *Geological Society of America Memoir*, 162, 385–412.
- SHELLEY, D. 1993. *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman & Hall, 445p.
- TAGAMI, T. & O’SULLIVAN, P. 2005. Fundamentals of Fission-Track Thermochronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58, 19-47.
- TOUSSAINT, J. 1993. *Evolución Geológica de Colombia: Pre Cambriano – Paleozoico*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín.
- TSCHANZ, C., JIMENO, A., & CRUZ, J. 1969. *Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta area, Colombia*. Informe interno 1829. INGEOMINAS. Bogotá. Preliminary report, 288p.

- TSCHANZ, C., MARVIN, R., CRUZ, J., & MEHNERT, H. 1974. Geologic evolution of The Sierra Nevada de Santa Marta, North Eastern Colombia. *Bulletin Geological Society of America*, 85 (2), 273-284.
- URUEÑA-SUÁREZ C. & ZULUAGA C. 2011. Petrografía del Neis de Bucaramanga en cercanías a Cepitá, Berlín y Vetas – Santander. *Geología Colombiana, Edición Especial*, 36 (1), 37-56
- VAN DER LELIJ, R. 2013. Reconstructing north-western Gondwana with implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans : a geochronological, thermochronological and geochemical study. (Tesis) 221p. Universidad de Ginebra. Facultad de Ciencias, Ginebra, Suiza.
- VARGAS, R., ARIAS, A., JARAMILLO, L., & TELLEZ, N. 1976. Cartografía Geológica Plancha 136 – Málaga. – Ingeominas.
- WARD D., GOLDSMITH R., CRUZ J., RESTREPO A. 1973. Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. Ingeominas, *Boletín Geológico*, 21 (1-3), 1- 132.
- WARD, D., GOLDSMITH, R., U.S., GEOLOGICAL SURVEY, CRUZ, J., JARAMILLO, L., & VARGAS, R. 1977. Geología del Cuadrángulo Pamplona H13. – Ingeominas.
- WARD, D., GOLDSMITH, R., U.S., GEOLOGICAL SURVEY, JIMENO, A., CRUZ, J., RESTREPO, A., & GÓMEZ, E. 1977. Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga. – Ingeominas.
- WERNER, C. D. 1987. Saxonian granulites-igneous or lithoigneous: a contribution to the geochemical diagnosis of the original rock in high-metamorphic complexes. In: Gerstenberger, H. (Ed.), *Contribution to the geology of Saxonian granulite massifs (Sächsisches Granulitgebirge)*. *ZfI-Mitteilungen*, 133, 221–250.
- WHITNEY, D. L. & EVANS, B. W. 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. – *American Mineralogist*, 95, 185-187.
- ZULUAGA C. & STOWELL H. 2012. Late Cretaceous–Paleocene metamorphic evolution of the Sierra Nevada de Santa Marta: Implications for Caribbean geodynamic evolution. *Journal of South American Earth Sciences*, 34, 1-9.