

**ESTUDIO PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE (CUERPOS ÍGNEOS
SUBVOLCÁNICOS) AFLORANTES EN ÁREAS DE LOS MUNICIPIOS
PIEDRECUESTA Y ARATOCA (SECTOR SUROCCIDENTAL DEL MACIZO DE
SANTANDER)**

AURA MARIA TRASLAVIÑA PRADA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2011**

**ESTUDIO PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE (CUERPOS ÍGNEOS
SUBVOLCÁNICOS) AFLORANTES EN ÁREAS DE LOS MUNICIPIOS
PIEDRECUESTA Y ARATOCA (SECTOR SUROCCIDENTAL DEL MACIZO DE
SANTANDER)**

AURA MARIA TRASLAVIÑA PRADA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Geóloga**

Director:

**LUIS CARLOS MANTILLA FIGUEROA
Geólogo Ph. D.**

Codirector:

**CRISTHIAN ELADIO SILVA ARIAS
Geólogo**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN MINPETGEO
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

*A Dios que siempre ha sido mi guía y fortaleza en cada día de mi vida
A mi madre hermosa a quien le debo todo,
que con su amor, confianza, trabajo y sacrificios me saco adelante,
A mi familia y hermanos, especialmente Ludy y María Cristina que siempre han
estado conmigo compartiendo y colaborándome en cada instante de mi vida
Al amor de mi vida por su amor, por su apoyo incondicional, quien ha sido mi
inspiración, por llenar mi vida de tanta pero tanta felicidad “te amo”*

AGRADECIMIENTOS

A mi director Luis Carlos Mantilla Figueroa por haber confiado en mí para la elaboración de este proyecto, por sus sabios consejos y colaboración en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A los profesores de la Escuela de Geología, por sus enseñanzas y conocimientos a lo largo de mi formación como profesional.

A la profesora Julieta, por su ayuda y colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A mi bbchito bello quien ha sido mi compañía, apoyo incondicional, por su amor, por haber compartido cada día, cada instante llenándolo de felicidad y alegrías.

A don Eladio y doña Margarita por su cariño y colaboración en el desarrollo de este trabajo

A mis amigos del alma Jenny, Judy, Caro, Joaco, Diego, gracias por todos los momentos compartidos, por sus consejos.

A mi compañeros tesis Ever, Dewin, Lady y en especial a Monika por su compañía y ayuda en el desarrollo de esta tesis.

A todas aquellas personas que de alguna manera hicieron posible mi realización como profesional.

TABLA DE CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i>	21
1 <i>OBJETIVOS</i>	22
2 <i>METODOLOGIA</i>	23
2.1 Fase de Pre – Campo.....	23
2.2 Fase de Campo	23
2.3 Fase de Laboratorio.....	23
3 <i>GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO</i>	31
3.1 Localización	31
3.2 Aspectos Geográficos y Fisiográficos	33
3.3 Infraestructura vial y urbana	34
4 <i>ANTECEDENTES</i>	35
4.1 Estratigrafía	35
5 <i>RESULTADOS</i>	42
5.1 Interpretación Visual de Imágenes Satelitales y Aéreas.....	42
5.2 Aspectos geológicos generales de las rocas ígneas subvolcánicas objeto de estudio.....	43
□ Aspectos geológicos generales del sector Piedecuesta (Vía los Santos): ...	44
□ Aspectos geológicos generales del sector de Los Santos:	48
□ Aspectos geológicos generales del sector Aratoca (a 1 Km. del peaje Pescadero, vía Bucaramanga – San Gil).	49
6 <i>DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE LAS ROCAS RIODACITICAS Y DIQUES DIABASICOS DE LOS SECTORES OBJETO DE ESTUDIO</i>	53
6.1.1 Descripción microscópica de las muestras objeto de estudio.....	53
□ Consideraciones Preliminares sobre Microtexturas Ígneas:	54
6.1.2 Descripción microscópica de las rocas colectadas en el Sector de Piedecuesta.....	56

6.2	Descripción microscópica de las rocas colectadas en el Sector Aratocha	.59
6.3	Descripción microscópica de la muestra colectada en el Sector de los Santos	66
7	<i>CLASIFICACION MODAL DE LAS ROCAS SUBVOLCANICAS</i>	68
8	<i>IDENTIFICACION DE FASES MINERALES MEDIANTE DIFRACCION DE RAYOS X</i>	70
8.1	Rocas Sector Piedecuesta	70
	<i>Rocas de contacto del cuerpo riolítico:</i>	70
9	<i>ESTUDIO GEOQUÍMICO DE ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZAS EN ROCA TOTAL</i>	80
9.1	Análisis geoquímicos de óxidos mayores	80
9.2	Análisis de intensidad de meteorización	81
9.3	Composición Normativa	82
9.4	Concentración de sílice	83
9.5	Concentración de alúmina	84
9.6	Clasificación TAS (Total-alkalis-silica)	85
9.7	Clasificación de rocas ígneas utilizando cationes	87
9.8	Discriminación de series subalcalinas y alcalinas	88
9.8.1	Consideraciones preliminares	88
9.9	Diagramas de variación de Harker	92
9.10	Diagramas Geoquímicos de Elementos Traza	93
9.11	Tierras Raras (REE)	95
10	<i>QUIMICA MINERAL</i>	98
10.1	Consideraciones Previas	98
10.2	Datos obtenidos mediante análisis de microsonda electrónica	99
11	<i>CONCLUSIONES</i>	108
12	<i>RECOMENDACIONES</i>	111
13	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	112
14	<i>ANEXOS</i>	115

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Aspecto de la lupa estereoscópica Carl Zeiss Jena. Laboratorio de Arcillas, Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander (UIS).	24
FIGURA 2. Microscopio de luz transmitida Nikon Eclipse-50i con cámara fotográfica DS-L1. Laboratorio de Microscopía Óptica. Escuela de Geología. UIS	25
FIGURA 3. Aspecto del difractómetro marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Escuela de Química, UIS.....	27
FIGURA 4. Microsonda electrónica CAMECA SX-100.	30
FIGURA 5. Localización de los cuerpos ígneos subvolcánicos estudiados, reconocidos en áreas de los municipios de Piedecuesta y Aratoca.....	31
FIGURA 6. Localización de las muestras colectadas en la sección de Piedecuesta (Vía los Santos).	32
FIGURA 7. Localización de las muestras colectadas en la sección de Aratoca (a 1 Km. del peaje Pescadero, vía Bucaramanga – San Gil).	33
FIGURA 8. Imagen Landsat donde se encuentran localizados los sectores de muestreo durante el desarrollo de la investigación.	34
FIGURA 9. Imagen satelital de los sectores de estudio y las principales fallas presentes.	42
FIGURA 10. Aspecto de las rocas de la Formación Jordán (las cuales hospedan las rocas ígneas subvolcánicas en el sector de los Santos), presentan variedades tipo areniscas de grano medio a grueso, con alteraciones como oxidación y alteración de las plagioclasas.	45

FIGURA 11. Aspecto de las rocas porfiríticas riolíticas aflorantes en el sector Piedecuesta, a) Pórfido riolítico de color morado grisáceo y b) Imagen del pórfido en la sección que se encuentra mayormente oxidada.	46
FIGURA 12. Imágenes de la Formación Silgara aflorando en el área del sector de Piedecuesta. a) Esquistos micáceos, apreciando el grado de oxidación y b) se observa el contacto entre el pórfido riolítico y la Formación Silgara.	47
FIGURA 13. Esquema geológico ilustrativo de la sección de Piedecuesta, en el cual se indican las litologías reconocidas y la localización de las correspondientes muestras.	47
FIGURA 14. Esquema geológico, en el cual se indica la relación del dique de diabasa, respecto a la roca encajante (Formación Jordan).	48
FIGURA 15. Aspecto del cuerpo ígneo de composición diabásica, de coloración verdosa el cual intruye la Formación Jordán, ubicado a la margen derecha del río Chicamocha a la altura del Municipio de Jordán Sube.	49
FIGURA 16. Imágenes del afloramiento, donde se observa el dique diabásico (cortando de manera perpendicular los planos de foliación regional) de la Formación Silgara.	50
FIGURA 17. Imagen del xenolito máfico dentro de la riolita, en el sector de Aratoca.	51
FIGURA 18. Esquema geológico ilustrativo de la sección de Aratoca, en el cual se indican los cuerpos objeto de estudio y la localización de las muestras tomadas.	51
FIGURA 19. a) Fenocristales de cuarzo (Qtz), en una matriz afanítica con textura de engolfamiento. b) Se observan cristales de moscovita (Ms) oxidada,	

embebidos en una matriz afanítica compuesta por sericita. Microfotografías tomadas con objetivo 5x. a),b) Luz plana no analizada.	57
FIGURA 20. Aspecto de cristales de plagioclasa (Pl) alterándose a calcita, en una matriz afanítica con textura microcristalina. Microfotografías tomadas con objetivo 5x. Luz plana no analizada.	60
FIGURA 21. a) Aspecto de cristales de clorita (Chl), presentando bordes de reacción de epidota (Ep), como también haciendo parte de la matriz; además de esto cristales de hornblenda (Hbl) y actinolita. Microfotografías tomadas con objetivo 5x a) Luz no plana analizada y b). Luz polarizada.....	60
FIGURA 22. Aspecto de la Vena de calcita, cortando las rocas de composición microgabro (diabasa). Microfotografía tomada con objetivo 5x. Luz no plana analizada.	61
FIGURA 23. a) Aspecto cristales de clinocloro, asociados a plagioclasa cálcica, alterándose a calcita, c) cristales de plagioclasa (Pl) con zonación, e) vena de calcita con maclado polisintético. a),c),e) Luz no plana analizada, y b),d),f) Luz polarizada.	63
FIGURA 24. a),b) Aspecto de las relaciones entre los cristales de plagioclasa (Pl), embebidos en una matriz esferulítica, con maclas tipo albita. c) Cristal de cuarzo con engolfamiento, estando rodeado por cristales de ortoclasa (textura ocelar). d) Esfena, mineral accesorio. Microfotografías tomadas con objetivo 5x. Luz no plana analizada.....	65
FIGURA 25. a) Aspecto de cristales de plagioclasa (Pl), con textura interrumpida, c) Cristal de calcita con maclado polisintético, además de esto se observan cristales de plagioclasa (Pl) en una matriz compuesta principalmente por clinocloro. a),c) Luz no plana analizada y b),d) Luz polarizada.....	67

FIGURA 26. Diagrama de clasificación modal de las rocas subvolcánicas según el contenido mineralógico modal, en donde se denominan las muestras colectadas como riolitas.....	69
FIGURA 27. Diagrama de clasificación modal de las rocas subvolcánicas según el contenido mineralógico modal, en donde se denominan las muestras colectadas como gabros (diabasa).	69
FIGURA 28. Difractograma para la muestra TAT-003, esquisto perteneciente a la Formación Silgara, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales como cuarzo, caolinita, anatasa y moscovita.	71
FIGURA 29. Difractograma para la muestra TAT-003, arenisca perteneciente a la Formación Jordán, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales como cuarzo, moscovita férrica y clinocloro.	72
FIGURA 30. Difractograma para la muestra TAT-001, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales como cuarzo, moscovita férrica e illita.....	74
FIGURA 31. Difractograma para la muestra TAT-010, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales de la tabla 14.	74
FIGURA 32. Difractograma para la muestra TAT-011, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales de la tabla 14.	75
FIGURA 33. Difractograma para la muestra TAT-004, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales como cuarzo, vermiculita, albita, magnesio hornblenda férrica, calcita y clinocloro.....	76
FIGURA 34. Difractograma para la muestra TAT-005, en el cual se relacionan los minerales de la tabla 16.	77

FIGURA 35. Difractograma para la muestra TAT-006, en el cual se relacionan los minerales de la tabla 17.....	78
FIGURA 36. Difractograma para la muestra GR-135-209-001, en el cual se relacionan los minerales de la tabla 18.....	79
FIGURA 37. Clasificación química y nomenclatura de rocas volcánicas, usando el diagrama de proyección de los álcalis versus sílice (TAS).	86
FIGURA 38. Clasificación química y nomenclatura de rocas plutónicas, usando el diagrama de proyección de los álcalis versus sílice (TAS). La línea curva gruesa subdivide las rocas en alcalinas (parte superior) y subalcalinas (parte inferior). ...	86
FIGURA 39. Clasificación de rocas volcánicas según porcentajes catiónicos de Al, (FeT + Ti) y Mg, mostrando los campos toleíticos, calcoalcalinos y komatiíticos. .	87
FIGURA 40. Subdivisión de las rocas ígneas en series (línea gruesa). Según Irvine y Baragar (1971), apoyado en el diagrama de proyección de los álcalis versus sílice.....	89
FIGURA 41. Diagrama de distinción entre la serie toleítica y calco-alcalina.....	90
FIGURA 42. Subdivisión de las rocas subalcalinas, usando el diagrama de proyección K ₂ O versus SiO ₂ . Las líneas son los campos en los cuales caen los límites entre series.....	91
FIGURA 43. Diagramas de variación de Harker, óxidos vs sílice, para las rocas de los sectores de Piedecuesta y Aratoca.	92
FIGURA 44. Aragnigrama expresando los elementos traza.	95
FIGURA 45. Aragnigrama expresando los elementos de las tierras raras normalizados según el condrito 1.	97

FIGURA 46. Ubicación de los puntos analizados con microsonda electrónica en la muestra TAT-006, con sus respectivos análisis.....	100
FIGURA 47. Microfotografía mostrando los sitios en los cuales se realizo análisis de química mineral a las plagioclasas, a la muestra TAT-006, análisis 01.....	100
FIGURA 48. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 01....	101
FIGURA 49. Microfotografía mostrando los sitios en los cuales se realizo análisis de química mineral a las plagioclasas, a la muestra TAT-006, análisis 03.....	102
FIGURA 50. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 03....	103
FIGURA 51. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 03....	103
FIGURA 52. Microfotografía mostrando los sitios en los cuales se realizo análisis de química mineral a las plagioclasas, a la muestra TAT-006, análisis 04.....	104
FIGURA 53. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 04....	105
FIGURA 54. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 04....	105
FIGURA 55. Microfotografía mostrando los sitios en los cuales se realizo análisis de química mineral a las plagioclasas, a la muestra TAT-006, análisis 07.....	106
FIGURA 56. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 07....	107

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Especificaciones técnicas del difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB, utilizado en el análisis de DRX.	27
TABLA 2. Estándares para análisis de silicatos, utilizados durante los análisis de QM.	30
TABLA 3. Muestras colectadas en las cuales se relaciona su ubicación, tipo de roca y el tipo de análisis que se llevo a cabo para cada una de ellas.	44
TABLA 4. Relación de las muestras colectadas con sección delgada.	53
TABLA 5. Muestras colectadas en sector de Piedecuesta con sección delgada. .	56
TABLA 6. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en las rocas riolíticas del sector del Piedecuesta (TAT-001, TAT-010, TAT-011).	58
TABLA 7. Relación de las muestras colectadas en el sector de Aratoca.	59
TABLA 8. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en la roca diabásica del sector de Aratoca (TAT-004).	61
TABLA 9. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en la roca diabásica del sector de Aratoca TAT-005. (Diabasa).	64
TABLA 10. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en la roca riolítica del sector de Aratoca TAT-006. (Riolita).	66

TABLA 11. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en la roca diabásica del sector de los Santos de la muestra GR-135-209-001. (Diabasa).....	67
TABLA 12. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de arenisca mostrando las fases minerales presentes.....	71
TABLA 13. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de esquisto, mostrando las fases minerales presentes.....	72
TABLA 14. Fases minerales presentes en las rocas riolíticas TAT-001, TAT-010, TAT-011. El rango de los porcentajes reportados (cálculos semicuantitativos), son tomados de los valores mínimos y máximos de los análisis de DRX.....	73
TABLA 15. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de TAT-004, mostrando las fases minerales presentes.....	76
TABLA 16. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de TAT-005, mostrando las fases minerales presentes.....	77
TABLA 17. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de TAT-006, mostrando las fases minerales presentes.....	78
TABLA 18. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de GR-135-209-001, mostrando las fases minerales presentes.....	79
TABLA 19. Relación de las muestras a las cuales se les realizó análisis geoquímicos.....	81
TABLA 20. Resultados de Fluorescencia de rayos x, expresados en % en peso. Hierro total expresado como Fe ₂ O ₃	81
TABLA 21. Relación de índice químico de meteorización (CIA), de las rocas estudiadas.	82

TABLA 22. Composición Normativa de las muestras analizadas en los sectores de Piedecuesta y Aratoca.	83
TABLA 23. Clasificación de las rocas de acuerdo al índice de saturación de alúmina.	84
TABLA 24. Resultados análisis químicos ICP- MS expresados en ppm y % en peso.	94
TABLA 25. Elementos traza normalizados según el condrito 1, Sun and MacDonough (1989).	94
TABLA 26. Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en la Muestra TAT-006, análisis 01	101
TABLA 27. Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en la Muestra TAT-006, análisis 03.	102
TABLA 28. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 04....	104
TABLA 29. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 07....	106

LISTA DE ANEXOS

<i>ANEXOS 1. CATALOGO PETROGRAFICO.....</i>	<i>115</i>
<i>ANEXOS 2. DRX</i>	<i>138</i>
<i>ANEXOS 3. RESULTADOS ANALISIS DE ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZA.....</i>	<i>159</i>
<i>ANEXOS 4. RESULTADOS DE ANALISIS DE TIERRAS RARAS.....</i>	<i>164</i>

TITULO: ESTUDIO PETROGRÁFICO Y GEOQUÍMICO DE (CUERPOS ÍGNEOS SUBVOLCÁNICOS) AFLORANTES EN ÁREAS DE LOS MUNICIPIOS PIEDECUESTA Y ARATOCA (SECTOR SUROCCIDENTAL DEL MACIZO DE SANTANDER)¹

AUTOR: AURA MARIA TRASLAVIÑA PRADA²

PALABRAS CLAVE: Geoquímica, Petrografía, Riolitas Porfíricas, Diabasa.

RESUMEN

Éste documento es el resultado de un trabajo de grado 'Modalidad Investigación', desarrollado en áreas puntuales de los municipios de Piedecuesta y Aratoca, en las cuales se estudiaron algunas manifestaciones de rocas subvolcánicas, sobre las cuales existe poca información geológica. En el área de Piedecuesta (tramo Tres Esquinas-La Punta), se reconocieron litologías tipo riolitas porfíricas, cortando rocas de la Formación Silgará. Durante los estudios petrográficos, se estableció que estas litologías presentan una importante alteración supergéna, y con una alteración relíctica previa responsable de la formación de filosilicatos, principalmente sericita. En el área del Municipio de Aratoca (tramo Pescadero-Panachi), se reconocieron nuevamente cuerpos riolíticos porfíricos con xenolitos de diabasa (microgabros), los cuales también estaban cortando la formación Silgará. El estudio geoquímico de las rocas del tramo Pescadero, permitieron clasificarlas como riolitas, según la relación 'totalidad de Alkalís vs Sílice'. También se pudo establecer su afinidad calco-alcalina alta en potasio. Esto, permite considerar el ambiente de formación de estas litologías riolíticas en un contexto de subducción de margen continental activo. A falta de datos geocronológicos, éstos rasgos permiten relacionar temporalmente éstas litologías, con eventos magmáticos del Juratríasico. Las rocas riolíticas porfíricas de Piedecuesta, geoquímicamente se proyectan en el campo de las dacitas y riolitas. Sin embargo, se considera que ésta clasificación no es representativa, debido a la pérdida de alquilis que han sufrido estas rocas, durante los procesos de alteración hidrotermal y supergéna. Por esta razón, estas rocas son clasificadas igualmente dentro del grupo de las riolitas. Respecto a las diabasas aflorantes en el tramo Pescadero-Panachi, éstas son consideradas de afinidad calco-alcalina media en potasio, coincidiendo químicamente con los xenolitos presentes en las riolitas descritas previamente en éste mismo tramo. Estas características, junto a los rasgos geológicos regionales, permiten sugerir un ambiente de corteza continental adelgazada. Por otro lado, a falta de datos geocronológicos, estos rasgos permiten relacionar temporalmente éstas litologías con eventos magmáticos posiblemente de edad Paleozoico Superior.

¹ Proyecto de Grado

² Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-químicas. Escuela de Geología. Director Ph D. Luis Carlos Mantilla Figueroa. Codirector: Cristhian Eladio Silva.

TITLE: PETROGRAPHIC AND GEOCHEMICAL STUDY OF SUB VOLCANIC IGNEOUS ROCKS OUTCROPPING AT THE AREAS OF PIEDECUESTA AND ARATOCA (SUB OCCIDENTAL SECTOR OF THE SANTANDER MASSIF)¹.

AUTOR: AURA MARIA TRASLAVIÑA PRADA².

KEYWORDS: Geochemistry, Petrography, rhyolite porphyritic, diabase.

ABSTRACT

This document is the result from an investigation developed at punctual areas of Piedecuesta and Aratoca, in which it has been studied some manifestations of subvolcanic rocks that don't have a lot of geologic information available. At the area of Piedecuesta, has been recognized a rhyolitic porphyritic lithology, intruding rocks from Silgara Formation. Through the petrographic study it has been establish that these rocks present an important supergenic alteration with a previous relictic alteration responsible of the formation of phyllosilicates, principally sericite. At the Area or Aratoca, it has been recognized rhyolitic porphyritic rocks with xenoliths of diabase (microgabros), in which they also intrude the Silgara Formation. The geochemical study of the rocks from Pescadero, puts them as rhyolites according to the total alkalis silica classification. Also it has been establish its calc-alkaline affinity high in potassium. This made us consider the formation environment of this rhyolitic rocks in a active subduction continental margin. the absence of geochronological data, these features allow them temporarily to relate lithologies with magmatic events possibly of Juratriasico age.

The rhyolitic porphyritic rocks of Piedecuesta, geochemically are projected as dacites and rhyolites. However this classification is not representative due to the loss of alkalis that these rocks have suffer through hydrothermal and supergenic alteration processes. For this reason, these rocks are classified in the field of rhyolites. Respect the diabases that outcrops in Pescadero, are considered with calc-alkaline affinity medium in K, coinciding chemically with the xenoliths present in the rhyolites describes previously. These characteristics with the geological features suggest a thinned continental crust environment. On the other hand, the absence of geochronological data, these features allow them temporarily to relate lithologies with magmatic events possibly of Paleozoic age.

¹ Graduate Project.

²Faculty of Physical and Chemical Engineering. Geology School. Director: Luis Carlos Mantilla Figueroa. Codirector: Cristhian Eladio Silva.

INTRODUCCIÓN

El presente documento se da como resultado de un trabajo de pregrado bajo la “Modalidad de Investigación” desarrollado por iniciativa del grupo de Investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica (MINPETGEO), adscrito a la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

El objetivo principal de este trabajo fue estudiar un grupo de rocas ígneas, consideradas preliminarmente como emplazadas en ambientes subvolcánicos, aflorantes en los sectores de Piedecuesta, Aratoca y La Mesa de Los Santos, sobre los cuales existe muy poca información geológica, hasta el punto que varios de estos cuerpos no se reportan en los mapas geológicos publicados hasta la fecha.

La interpretación de los resultados petrológicos como geoquímicos permitieron clasificar estos diques como riolitas porfíricas, en el sector de Piedecuesta y en el sector de Aratoca, además diques diabásicos en el sector de Aratoca y La Mesa de Los Santos, correspondiendo a una serie calcoalcalina, lo cual apunta claramente a un ambiente magmático de suprasubducción.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo General:

- Realizar un estudio petrográfico y geoquímico de los cuerpos ígneos reconocidos en puntos concretos del municipio de Piedecuesta (vía Los Santos) y Aratoca (vía Pescadero Panachi).

1.2 Objetivos Específicos:

- Realizar un análisis de la información geológica existente relacionada con los cuerpos ígneos subvolcánicos reconocidos en los sectores objeto de estudio.
- Realizar un reconocimiento en campo del área de estudio, con el objetivo de muestrear y documentar las litologías ígneas objeto de estudio.
- Elaborar esquemas geológicos con base a la cartografía geológica existente y apoyada en algunos controles puntuales de campo.
- Describir macroscópicamente las muestras recolectadas en campo.
- Realizar un estudio mineralógico – petrográfico de las muestras de rocas ígneas subvolcánicas objeto de estudio.
- Realizar análisis geoquímicos de elementos mayores, menores y trazas para establecer la serie magmática y el posible contexto tectónico de su emplazamiento, utilizando diagramas geoquímicos para tal fin, propuestos en la bibliografía especializada.

2 **METODOLOGIA**

Para la realización del presente estudio se llevo a cabo una metodología fundamentada en las siguientes actividades: a) Recopilación y análisis de material bibliográfico existente sobre el área de trabajo (Fase de Pre-campo); b) Realización de trabajos de campo con fines de reconocimiento, toma de datos y muestreo (Fase de campo); c) Fase de laboratorio; d) Interpretación de los datos obtenidos y elaboración de un informe final para entregar a la Universidad Industrial de Santander.

2.1 Fase de Pre – Campo

En esta fase se recopilaron antecedentes bibliográficos existentes del área de estudio, con el fin de tener un enfoque mas preciso sobre la geología regional, y aspectos geológicos locales que puedan estar relacionados a las características propias de los cuerpos a estudiar.

2.2 Fase de Campo

El trabajo de campo se realizo llevando a cabo un exhaustivo muestreo y toma de datos de los cuerpos de estudio y litologías presentes en sus alrededores, en los sectores de Piedecuesta y Aratoca como se ha mencionado anteriormente.

2.3 Fase de Laboratorio

Dada la importancia de la fase de laboratorio, en la obtención de nuevos datos en el marco del presente estudio, a continuación se presenta de manera detallada los aspectos metodológicos propios de esta fase.

Esta fase se refiere esencialmente a las actividades y métodos analíticos que se emplearon para llevar a cabo los diferentes análisis en las rocas muestreadas para

las áreas de estudio. Estas se agruparon según finalidades concretas de obtención de datos en: Microscopía Óptica y Electrónica, Difracción de Rayos X (DRX) y Fluorescencia de Rayos X.

Este trabajo se apoyo a partir de una descripción macroscópica de las muestras de mano para análisis mineralógico, escogiendo las muestras de interés para la realización de estudios petrográficos y geoquímicos. La descripción macroscópica de las muestras de mano recolectadas en campo, se realizó con ayuda de la lupa estereoscópica marca Stemi DV4, Carl Zeiss Jena (Figura 1), propiedad del Laboratorio de Arcillas de la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander. Esta descripción consistió en la determinación de las principales características macroscópicas de las rocas, venas, bolsas y brechas, tales como color, textura, estructura, composición y clasificación.

FIGURA 1. Aspecto de la lupa estereoscópica Carl Zeiss Jena. Laboratorio de Arcillas, Escuela de Geología. Universidad Industrial de Santander (UIS).



Fuente: Fotografía tomada por el autor

Microscopía óptica y electrónica

Con el propósito de estudiar los rasgos mineralógicos y petrográficos en las láminas pulidas de rocas y la petrografía de estas mismas, teniendo en cuenta las asociaciones mineralógicas. La elaboración de secciones delgadas para estudios mineralógico-petrográficos fue realizada en el laboratorio de preparación de muestras de la escuela de Geología. El estudio petrográfico de las secciones delgadas obtenidas y toma de fotografías, se realizaron utilizando un microscopio de luz transmitida marca: NIKON (Figura 2), modelo: Eclipse-50i, incorporado con Cámara Digital modelo: DS-L1, localizado en el laboratorio de Microscopia de la Escuela de Geología de la UIS (sede principal).

FIGURA 2. Microscopio de luz transmitida Nikon Eclipse-50i con cámara fotográfica DS-L1. Laboratorio de Microscopía Óptica. Escuela de Geología. UIS



Fuente: Fotografía tomada por el autor

Análisis de Difracción de Rayos X (DRX).

Con el propósito de identificar y cuantificar las facies minerales presentes en rocas de estudio. La preparación de dichas muestras se realizó en las instalaciones del laboratorio de arcillas en la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander, posteriormente se trasladaron al Laboratorio de Difracción de Rayos X de la escuela de química, UIS, donde se les realizó el siguiente procedimiento: Primero se toman unos 30g de muestra, los cuales son secados en un horno a 50°C aproximadamente, el secado de la muestra puede tomar unas 24h. Una vez está seca la muestra, ésta se tritura manualmente en un mortero hasta alcanzar un tamaño de partícula de grava. Ahora la muestra pasa a un mortero mecánico donde alcanza un tamaño de partícula de arcilla cuyo polvo obtenido es al que se le realizaron los análisis.

Dichos análisis se hacen utilizando un difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB (Figura 3). Las especificaciones técnicas del equipo de trabajo se presentan en la tabla 1.

Los análisis son desarrollados sobre muestras de polvo desorientado, evitando así el ángulo preferencial. El espécimen seleccionado de la muestra es montado sobre un porta muestra de aluminio mediante la técnica de llenado lateral y posteriormente analizadas cualitativamente las fases presentes mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

TABLA 1. Especificaciones técnicas del difractómetro de polvo marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB, utilizado en el análisis de DRX.

Voltaje	40(kV)
Corriente	20(mA)
Rendijas (Slits) DS	1.0°
RS	0.3mm
SS	1.0°
Muestreo	0.02° 2theta
Rango de Medición	2-70° 2theta
Radiación	CuKa1
Monocromador	Grafito
Identificación de fases	
Tipo de barrido	continúo
Velocidad de Barrido	1.2° / min

FIGURA 3. Aspecto del difractómetro marca RIGAKU modelo D/MAX IIIB. Laboratorio de Difracción de Rayos X. Escuela de Química, UIS.



Fuente: Fotografía tomada por el autor

Fluorescencia de Rayos X.

Se enviaron 7 muestras de roca al laboratorio ALS Chemex ubicada en la ciudad de Bogotá, con el fin de identificar los elementos mayores, menores y trazas de las muestras a analizar. El fundamento de la Fluorescencia de rayos-X radica en la existencia de un sistema atómico con distintos niveles de energía y las posibles transiciones electrónicas entre ellos. La base de la técnica analítica de la Fluorescencia de rayos-X por dispersión en longitud de onda (**WDFRX**) es la medida de la energía de la radiación emitida en éstas transiciones energéticas y es conocida como fluorescencia de rayos-X. El fenómeno de fluorescencia de rayos-X se puede describir en dos etapas:

Excitación:

Si se considera un sistema en su estado fundamental, es decir de menor energía, al aplicarse una energía de una magnitud suficiente, ésta puede ser absorbida por el sistema, pasando éste a un estado de mayor energía o estado excitado debido a la salida de electrones del átomo. A la excitación producida por rayos X que provienen del tubo de rayos-X, se le llama radiación primaria o fotones de rayos-X primarios.

Emisión:

Los estados excitados son inestables, y el átomo tiende a volver a su estado fundamental, para lo cual se producen saltos de electrones desde los niveles más externos hacia los niveles más internos, para ocupar los huecos producidos. Este proceso produce desprendimiento de energía en forma de radiación de rayos-X secundaria llamada fluorescencia de rayos-X, Beckhoff, B, (2006).

Para la detección de óxidos mayores se realizó fusión con borato de litio con finalización por fluorescencia de rayos X. Para la detección de múltiples elementos, se realizaron análisis por espectroscopia óptica para detección de nivel de trazas y por espectroscopia de masas para nivel de ultra trazas, ambos con digestión con agua regia o cuatro ácidos. Los sobre límites en grado mena se

realizan también con la digestión correspondiente y finalización con absorción atómica.

Química Mineral

La técnica por microsonda electrónica de barrido (**EPMA**) es no destructiva y aporta información cualitativa y cuantitativa en análisis elemental para volúmenes micrométricos en la superficie de los materiales, con sensibilidades del orden de los ppm. La técnica permite obtener de forma simultánea imágenes de rayos X (WDS y EDS), SEM y BSE, además de microscopía óptica.

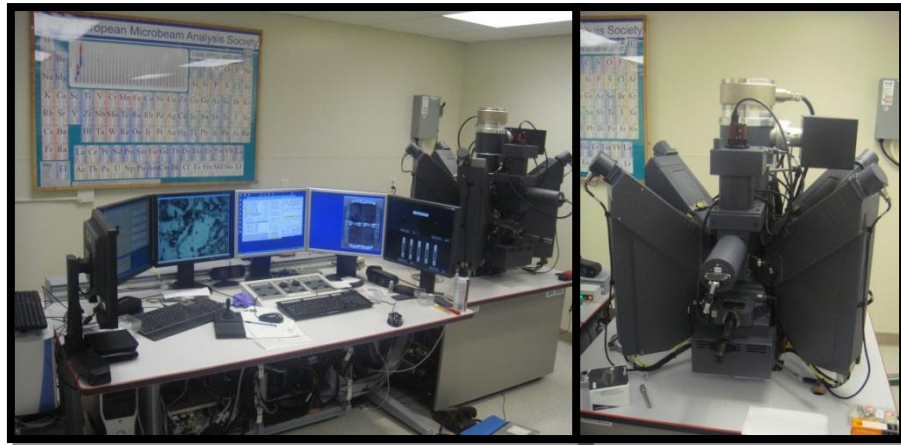
Para la análisis de química mineral, se utilizó una microsonda marca CAMECA SX-100 de la Universidad de California (sede Santa Bárbara-USA). Las condiciones bajo las cuales se realizaron los análisis de química mineral fueron las siguientes: dotada con cinco espectrómetros, un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) y detectores SE, BSE, ABS y cátodo luminiscencia. El equipo esta automatizado basado en el software EPMA v.8.47 para la sonda. La resolución espacial para el análisis cuantitativo fue del orden de 1 a 3 micras y la resolución espacial para las imágenes de electrones secundarios y retrodispersados fue de aproximadamente 100 a 200 nm (ver FIGURA 4).

El equipo fue calibrado y puesto en operación para los análisis aquí presentados, bajo las siguientes condiciones: un voltaje de aceleración de 20 kV, un haz de luz de 300 nA con un diámetro de 5 μ m. Los estándares usados y límites de detección fueron los siguientes:

TABLA 2. Estándares para análisis de silicatos, utilizados durante los análisis de QM.

Estándares para el analisis de silicatos	
Albita para Na K α	0,035278
Diopsido para Mg K α	0,02254
Ortoclasa para K	0,0224
Cromita para Cr K α	0,27565
MnO Sintetico para Mn K α	0,101869
Magnetita para Fe K α	0,150576
Anortita (Grass Valley) para Al K α	0,010199
Ortoclasa para Si K α	0,047875
Diopsido para Ca K α	0,020242
TiO ₂ sintetico para Ti K α	0,025333

FIGURA 4. Microsonda electrónica CAMECA SX-100.

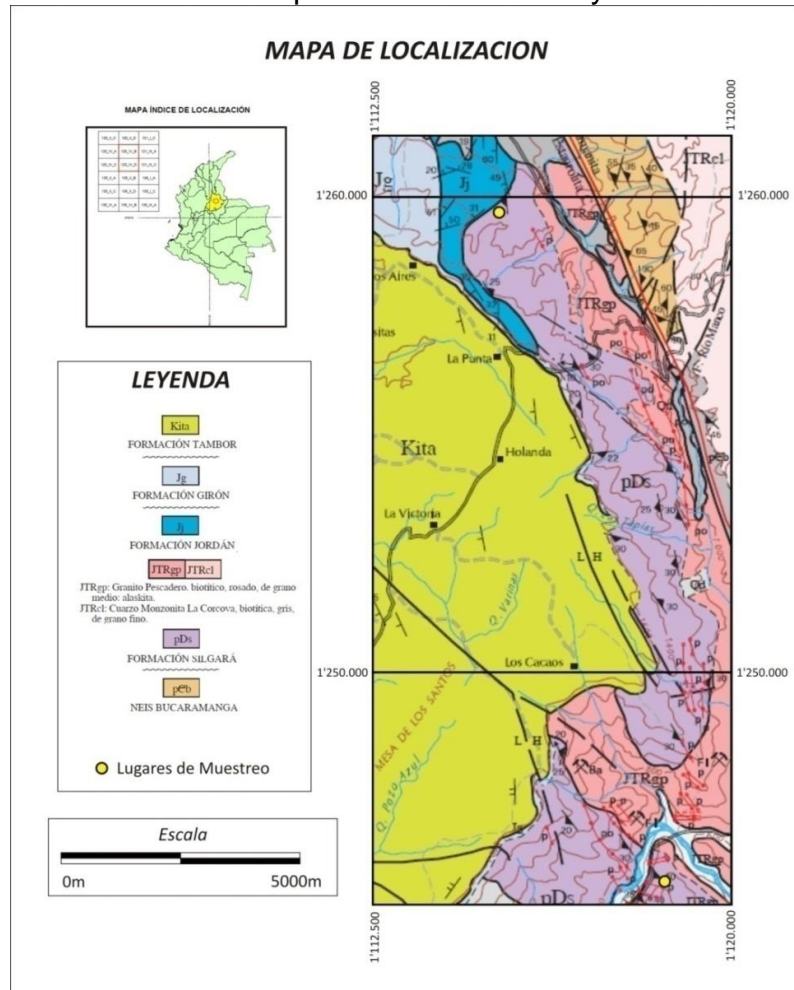


3 GENERALIDADES DEL AREA DE ESTUDIO.

3.1 Localización

Los municipios de Piedecuesta y Aratoca (áreas en las cuales se desarrolló el presente estudio) se encuentran ubicadas hacia la parte centro-oriental del departamento de Santander (Ver Figura 5), sobre el Macizo de Santander.

FIGURA 5. Localización de los cuerpos ígneos subvolcánicos estudiados, reconocidos en áreas de los municipios de Piedecuesta y Aratoca.



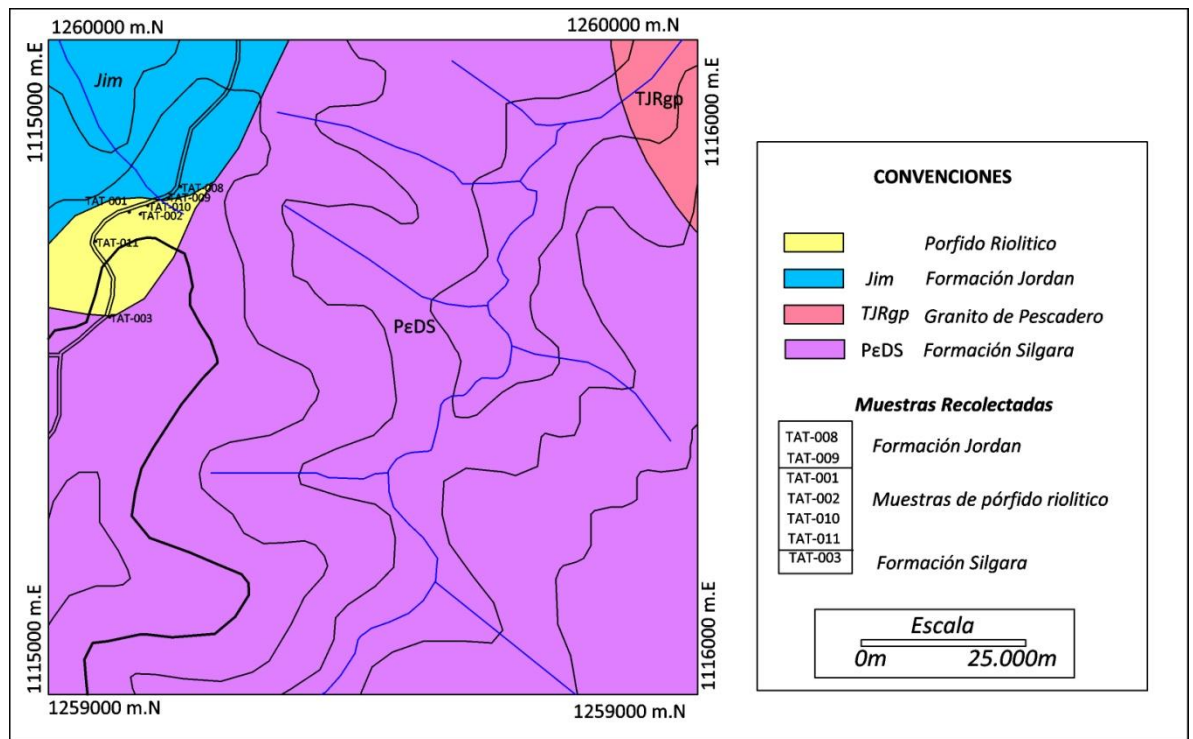
Fuente: Tomado de cuadrángulo H-12 Bucaramanga, Ingeominas.

Para el desarrollo de este estudio, se muestrearon dos sectores; el primero corresponde al municipio de Piedecuesta en la vía que comunica al municipio de Los Santos y el segundo se ubica a 1 km. del peaje Pescadero, vía Bucaramanga - San Gil, en el municipio de Aratoaca.

La sección ubicada en Piedecuesta se inicio en las coordenadas 1°115.188 m.E. y 1°259.770 m.N., y finalizo en las coordenadas 1°115.081 m.E. y 1°259.575 m.N. (Figura 6).

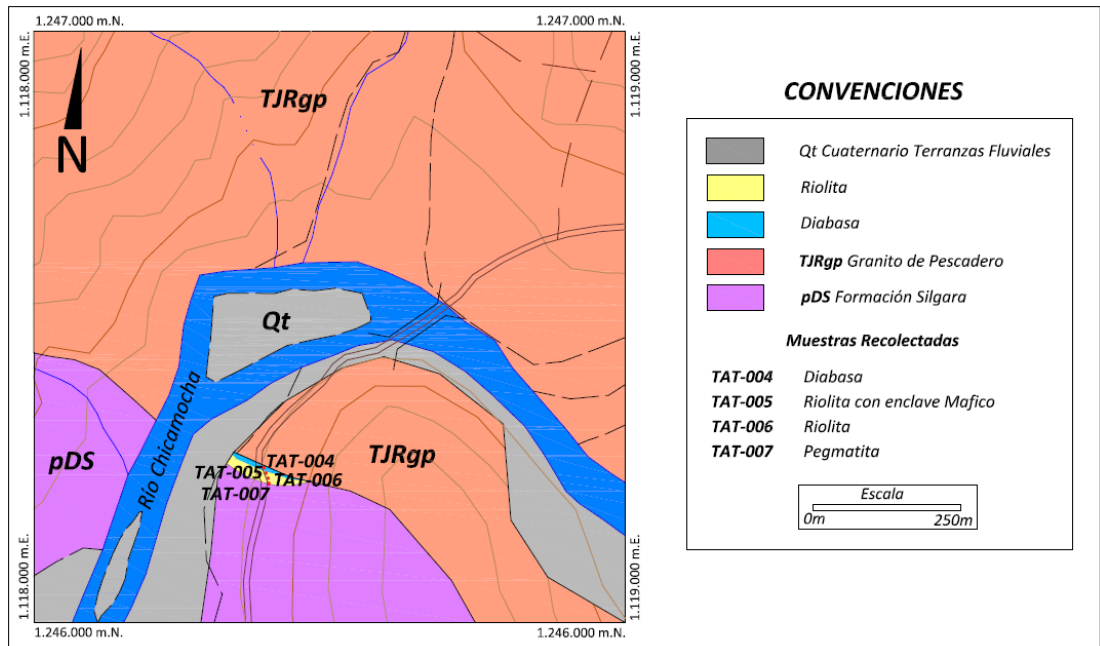
La sección ubicada en Aratoaca se inicio en las coordenadas 1°118.387 m.E. y 1°245.663 m.N. y finalizo en las coordenadas 1°118.378 m.E. y 1°245.639 m.N. (Figura 7).

FIGURA 6. Localización de las muestras colectadas en la sección de Piedecuesta (Vía los Santos).



Fuente: Adaptado del cuadrángulo H-12 Bucaramanga

FIGURA 7. Localización de las muestras colectadas en la sección de Aratoca (a 1 Km. del peaje Pescadero, vía Bucaramanga – San Gil).



Fuente: Adaptado del cuadrángulo H-12 Bucaramanga

3.2 Aspectos Geográficos y Fisiográficos

Santander es uno de los departamentos más montañosos del país y gran parte de su territorio corresponde a la Cordillera Oriental, donde el relieve es escarpado a moderado; sin embargo, en su extremo occidental posee una amplia zona baja y plana. Geográficamente el área se localiza sobre la Cordillera Oriental. Morfológicamente toda el área es montañosa y se caracteriza por relieve moderado a fuerte en general, con drenaje subparalelo y subdendrítico de densidad media, y desarrollo de valles juveniles.

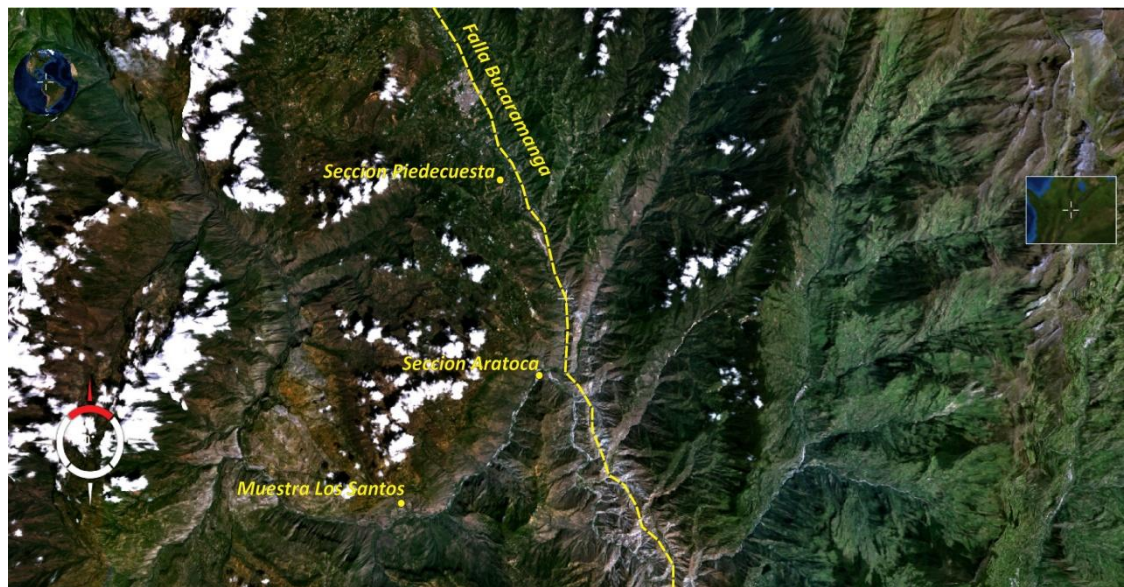
En función de los diferentes relieves y las características climáticas que tiene la región pueden distinguirse zonas de climas calidos, templados, hasta lugares con alturas mayores a los 3.000 msnm destacándose así también zonas de paramos;

pero los sectores muestreados se mantuvieron en el rango de elevación de 600 y 1250 metros sobre el nivel del mar.

3.3 *Infraestructura vial y urbana*

Existe una red vial en la zona de estudio que une a los municipios presentes en la región, la cual se ve bastante afectada en épocas de lluvias que provocan deslizamientos y deterioro generalizado, pero que en general se encuentra en buen estado.

FIGURA 8. Imagen Landsat donde se encuentran localizados los sectores de muestreo durante el desarrollo de la investigación.



Fuente: Tomado del software NASA World Wind.

4 ANTECEDENTES

Con el propósito de contextualizar la geología del área de estudio, a continuación se resumen aquellos aspectos geológicos relacionados con la geología regional y local, tanto en sus aspectos estratigráficos, como de geología estructural, realizados en el marco de estudios geológicos anteriores.

4.1 Estratigrafía

En el Macizo de Santander, en el cual se localiza el área de estudio, afloran rocas metamórficas del Pre-Devónico, agrupadas dentro de las formación Neis de Bucaramanga, Esquistos del Silgará. Las rocas ígneas han sido agrupadas dentro de las siguientes unidades: Diques félsicos y máficos. Las rocas sedimentarias de edad Cretácica han sido agrupadas dentro de las formación Jordán, Ward *et al.* 1973.

Por su importancia con el presente estudio, a continuación se relacionará la información disponible en la bibliografía, sobre las rocas subvolcánicas reconocidas y descritas en trabajos previos, y sus rocas hospedadoras: las formaciones metamórficas Silgará, Granito de Pescadero y Formación Jordán.

Formación Silgara (pDS):

Nombre propuesto por Ward *et al.* (1973) para referirse a una secuencia de rocas clásticas metamorfizadas de estratificación delgada, compuesta por filitas, cuarcitas, esquistos, metareniscas y menores cantidades de pizarra y filita calcárea, cuya sección tipo se localiza en la Quebrada Silgara, afluente del Río

Salamanca, al occidente de Cáchira. Las relaciones estratigráficas, las diferencias composicionales y algunos datos estructurales, por lo menos sugieren que La Formación Silgara suprayece al complejo Bucaramanga e infrayace discordantemente a las formaciones El Tibet y Floresta del Devoniano. La Formación Silgara se le han asignado tentativamente una edad del Cambriano al Ordovícico (Ward, et al. 1973), equivalente en parte al Grupo Quetame (Campbell, 1965), al Grupo Güejar (Trumpy, 1943) y posiblemente es comparable con la Serie de Perijá (Raddelli, 1962; Forero, 1969, 1970; Tschanz *et al.*, 1969).

Granito de Pescadero (T3J1Rgp)

Aflora en los alrededores de Umpalá, Municipio de Piedecuesta, siendo un granito leucocrático rosado naranja, de grano fino, equigranular, ligeramente porfirítico, Constituyendo un plutón alargado de forma irregular, al oeste de la Falla de Bucaramanga. Al Oeste se encuentra intruyendo meta sedimentos de la Formación Silgara, siendo considerado en esta área como parte del Batolito de Mogotes.

El granito de Pescadero se encuentra cubierto inconfortablemente por la Formación Jordán del Jurasico. Los diques de riolita que cortan el Jordán al sur de la población de los Santos son aparentemente más jóvenes. Hacia el norte el granito de pescadero pasa a pórfido riolítico expuesto a lo largo de la carretera de Piedecuesta. Esta roca que es semejante a los diques dentro de la masa principal, los cuales no se han cartografiado separadamente.

Una zona de contacto, en la cual numerosos diques de pegmatita y aplita del Pescadero cortan la Formación Silgara, esta bien expuesto a lo largo de la carretera Bucaramanga- Bogotá, 1.4 km al sur del puente sobre el río Chicamocha en Pescadero.

Los diques del granito de Pescadero se constituyen de pegmatita, aplita, riolita porfirítica y riodacítica. La riolita porfirítica tiene fenocristales de albita u oligoclasa sódica y fenocristales menos abundantes de cuarzo, ortoclasa, clorita (aparentemente derivada de la biotita). La matriz es microcristalina, con feldespato potásico. Algunas muestras de riodacita tienen una textura de fieltro con pequeños feldespatos euhedrales. Las texturas son similares a las de la riolita porfirítica al sur de Piedecuesta.

Una determinación radio métrica K/Ar en biotita de la roca biotítica del granito de Pescadero, dio una edad de 193 ± 6 m.a. Esta comprendida entre las edades obtenidas de la biotita del Batolito de Santa Bárbara, coloca al Pescadero y por extrapolación a la cuarzomonzonita del Batolito de Mogotes, en el mismo grupo. Ellos son, por lo menos casi contemporáneos, si no de edad idéntica.

Rocas de dique:

Los diques félsicos, máficos y lamprófiros, son comunes en los batolitos y plutones del Macizo de Santander y en las rocas adyacentes. La mayor parte parecen estar genéticamente relacionados a las rocas de los batolitos y plutones mayores, ya que presentan semejanzas mineralógicas y texturales con ellos. Los diques de aplita, pegmatita y pórfido félsico, semejantes en composición a la roca encajante, son comunes en la cuarzomonzonita y rocas graníticas lo mismo que los diques lamprófiros. Los diques de tonalita, diorita de grano fino o de pórfido andesítico predominan en rocas granodioríticas y tonalíticas. Diques de un pórfido dacítico distintivo, basalto y diabasa tienen ocurrencias mas restringidas o no parecen estar relacionados a la serie batolítica. Algunos de estos diques son mostrados en los mapas geológicos, pero la mayoría por son pequeños y se han omitido en trabajos de geología muestran en los mapas geológicos, pero la mayoría son demasiado pequeños para ser mostrados y se han omitido en trabajos de geología regional anteriormente realizados. A continuación se describen las

ocurrencias más comunes de estos cuerpos litológicos cartografiados o reportados por autores anteriores.

Diques Félsicos:

Los diques félsicos, van de pórfido riolítico a riodacítico. Las riolitas son blancas a rosado pálido, gris claro o negro grisáceo a verde grisáceo, donde son afaníticas; presentan fenocristales de albita a oligoclasa, cuarzo redondeado y menos comúnmente ortoclasa, están colocados en una matriz criptocristalina, esferulítica o granular, compuesta de cuarzo y feldespato, además de material semiopaco no definido. Unas pocas escamas de biotita se hallan normalmente, así como también óxido de hierro y productos de alteración. En los pórfidos riodacíticos los fenocristales son predominantemente oligoclasa, con algún cuarzo y poca ortoclasa. La matriz es similar a las riolitas, pero es generalmente microaplítica en vez de criptocristalina o esferulítica. Los diques riodacíticos son particularmente prominentes en la cuarzomonzonita de Santa Bárbara al sureste de Berlín, pero también ocurren en áreas menos bien expuestas de esta y de otros batolitos y plutones cuarzomonzoníticos. Los diques félsicos son comunes cerca de Pescadero y Aratoca, pero solo unos pocos de los cercanos a la primera localidad, pudieron ser mostrados en el mapa geológico H-12 (Ward *et al.* 1973).

Pórfido Dacítico:

Los diques de pórfido dacítico son comunes en el distrito de California. Estas son las rocas ígneas en la zona que cortan las rocas del Cretáceo. Al este y sureste de Cachiri estos diques cortan la Formación Girón, del Jurásico y la suprayacente Formación Tambor, del Cretáceo Inferior.

El pórfido dacítico es gris, de grano fino afanítico, con fenocristales prominentes euhedrales de plagioclasa hasta de 2 cm. de largo y escasos fenocristales más pequeños de cuarzo redondeado y anfíbol. La plagioclasa es andesina zonada y complejamente maclada u oligoclasa cálcica. Los minerales máficos están

generalmente alterados, pero alguna clorita es pseudomorfa de la hornblenda (Ward *et al.* 1973).

Diques Basálticos y Diabásicos:

Se encuentran principalmente a lo largo del frente de Bucaramanga, a cada lado de la falla del mismo nombre, de color negro a verde gris intenso, afaníticos hasta de grano fino. Cortan paraneis de alto grado al norte de Bucaramanga y rocas del Batolito de Rionegro al norte de la población; ocurre en el área de la riolita intrusiva al este de la Falla de Bucaramanga, en la parte norte del cuadrángulo H-12 y cortan la Formación Jordán como diques y silos cerca de Río Negro y la Mesa de Los Santos. Diques similares están ampliamente esparcidos, en los batolitos de Mogotes y Rionegro (Ward *et al.* 1973).

Edad de los Diques:

La edad de los diques de riolitas, riolacitas y diques máficos son probablemente contemporáneos con las rocas de los batolitos mayores y por lo tanto, corresponden al Jura – Triásico (Ward *et al.*, 1973). El pórfido dacítico del área de California es posterior al Cretáceo Inferior y puede correlacionarse con un pórfido localizado hacia el área de Ocaña que ha sido datado como de 127 ± 3 m.a. Otros diques félsicos asignados al Triásico podrían ser también del Cretáceo Inferior.

Formación Jordán (J1j):

La Formación Jordán fue primeramente reconocida por Cediél (1968) en su estudio de la Formación Girón del área de Bucaramanga. La sección tipo esta a 1 Km. al oeste del pueblo Jordán, sobre la pendiente norte del Cañón del río Chicamocha (Plancha 135-II-B, D-3 y E-3). El Jordán incluye dos facies (Cediél, 1968), separada por una zona transicional de aproximadamente 10m que no indica interrupción en la depositación, constituida en la facies superior (200 m) por limolitas color marrón y arenisca de grano fino, con espesores de 30 – 80 cm. En

la facies inferior (± 100 m), por areniscas de grano grueso, con estratificación cruzada.

El ambiente de depósito es continental vulcanoclástico (Ward *et al.*, 1973). La Formación Jordán infrayece en discontinuidad estratigráfica a las formaciones Girón y Los Santos, suprayace concordantemente a las Formación Bocas. Por sus relaciones estratigráficas, se considera de edad Jurásico Inferior y medio.

4.2 Aspectos Generales sobre la Geología Estructural:

En el Macizo de Santander predomina un sistema de fallamiento en bloques, de rumbo Norte- Sur a Noreste y un sector de pliegue anticlinales y sinclinales estrechos, ubicados en el extremo más oriental del departamento. El Macizo de Santander ocupa casi la mitad del área del cuadrángulo I – 13 y está constituido por rocas ígneas, formando batolitos, plutones y stocks y por rocas metamórficas agrupadas en tres formaciones: Neiss de Bucaramanga, Silgara y Floresta Metamorfoseado.

Las fallas de más importancia, por su relación con el presente estudio, son la Falla de Bucaramanga-Santa Marta y Mesa de Los Santos, las cuales se describen a continuación.

Falla de Bucaramanga – Santa Marta:

Es el rasgo estructural más evidente y de gran extensión que cruza la región centro-oriental del Departamento de Santander, en dirección aproximada N20°W y cuyo trazo rectilíneo se expresa claramente en imágenes de satélites y fotografías aéreas. Es considerada un sistema de fallas de rumbo (Campbell, 1965; Leon, 1991; Vargas y Niño, 1992; Clavijo, *et al.*, 1993; Clavijo, 1994), con movimiento sinistral, cuyo desplazamiento es calculado por Campbell (1965) y Tschanz, *et al.*

(1969, 1974) en unos 100 a 110 km; tiene una componente vertical importante, según Julivert (1958, 1961), Ward, et al. (1973), París y Sarria (1988), Royero (1994), que hace que esta falla se comporte en algunos sectores como inversa y en su extremo meridional aún de cabalgamiento (Boinet, 1985; Ulloa, 1990, Comunicación verbal).

Sistema de Fallas de La Mesa de Los Santos:

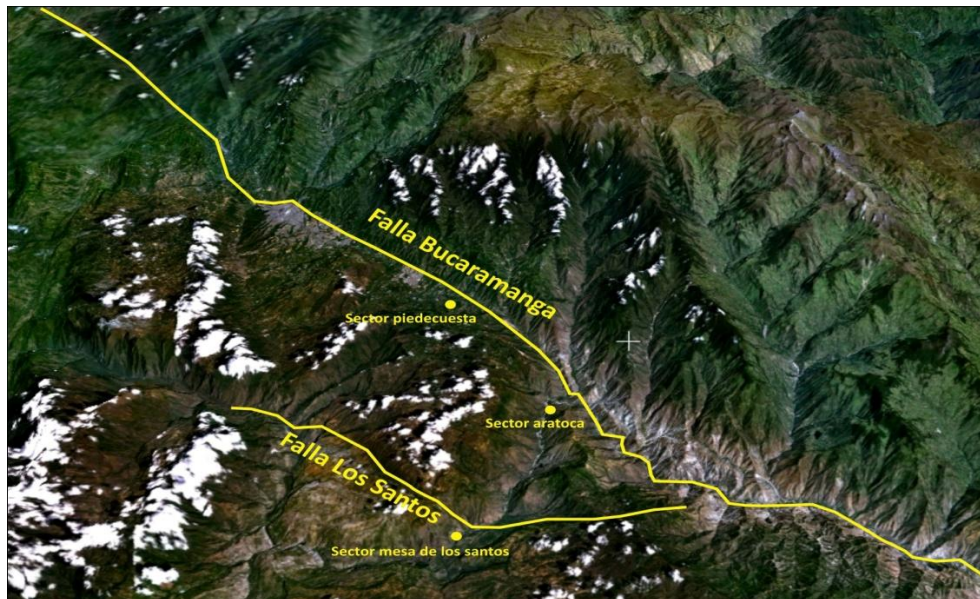
La zona de la Mesa de Los Santos se localiza al oeste de la cordillera Oriental y comprende en totalidad el Municipio de la Mesa de Los Santos y cubriendo adicionalmente parte de los municipios de Piedecuesta y Girón localizadas respectivamente al NNE y NW de la zona. La Mesa de Los Santos presenta tres sistemas de fallas, los cuales presentan características geométricas y cinemáticas particulares de cada sistema. Las fallas principales del sistema longitudinal presentan dirección predominante NW, las fallas del sistema transversal muestran predominio de dirección NE y las fallas del sistema menor tienen dirección E (Figura 9).

5 RESULTADOS

5.1 Interpretación Visual de Imágenes Satelitales y Aéreas

A partir de la interpretación preliminar de imágenes satelitales se puede observar que el patrón de drenaje se divide principalmente en dos áreas; un patrón al costado oriental de la Falla de Bucaramanga de tipo dendrítico el cual se origina a partir de los cambios abruptos en las pendientes, en respuesta de las unidades litológicas allí presentes, que corresponden a rocas ígneas y metamórficas. Otro patrón al costado occidental de la Falla de Bucaramanga que esta compuesto por un drenaje mas dendrítico hacia el área de la falla y que varia hacia el oeste a un patrón subparalelo, esto se debe a los cambios litológicos allí presentes que se ven reflejados en el cambio de pendientes de mas fuertes sobre la falla a más suaves sobre el costado occidental donde hay mayor predominancia de rocas sedimentarias (Figura 9).

FIGURA 9. Imagen satelital de los sectores de estudio y las principales fallas presentes.



Fuente: Tomado del Software NASA World Wind

También en la imagen satelital se pueden diferenciar diversas zonas geomorfológicas definidas por la litología y variaciones estructurales sobre el terreno, como también por la acción de afluentes hidrológicos, como ríos y quebradas. Hacia la parte oriental de la Falla de Bucaramanga se distingue una zona de pendientes abruptas, escarpes y valles, delimitada por la presencia de facetas triangulares, originadas por la erosión del bloque yacente de la falla inversa de Bucaramanga. Este es un factor morfológico clave para la interpretación geológica de la litología sobre el terreno.

También se observa hacia la parte occidental de las facetas triangulares generadas por la falla, un área de meseta que corresponde a la Mesa de los Santos típica de rocas sedimentarias, la cual se encuentra junto río Chicamocha y a su vez este río forma un valle profundo correspondiente al Cañón del Chicamocha. De esta manera a partir de la interpretación de imágenes satelitales se logra definir los principales rasgos geomorfológicos presentes a una escala ligeramente regional del área involucrada en el muestreo.

5.2 Aspectos geológicos generales de las rocas ígneas subvolcánicas objeto de estudio

Se tienen dos sectores objeto de estudio, de los cuales se puede decir que para el sector de Aratoca el cuerpo en estudio se encuentra intruyendo la Formación Silgara y para el sector de Piedecuesta (vía Los Santos) el cuerpo en estudio se encuentra intruyendo la Formación Jordán y la Formación Silgara.

La diferenciación de todas las muestras colectadas se da principalmente por factores texturales que envuelven procesos de cristalización, dándose texturas asociadas a enfriamientos más rápidos y más lentos dentro de las rocas colectadas y también respecto a las rocas con las que estas se encuentran asociadas espacialmente. Cada variación por pequeña que sea en cada uno de los ejemplares se encuentra asociado a largos procesos petrogenéticos que

tuvieron lugar en determinada posición de la corteza terrestre, y también a eventos tectónicos globales dentro de la historia geológica regional (Figura 4).

TABLA 3. Muestras colectadas en las cuales se relaciona su ubicación, tipo de roca y el tipo de análisis que se llevo a cabo para cada una de ellas.

<i>Muestra</i>	<i>de Muestra</i>	<i>Tipo de roca</i>	<i>Coordenadas</i>		<i>Seccion Delgada</i>	<i>DRX</i>	<i>FRX</i>	<i>ICPMS</i>	<i>Quimica Mineral</i>
			<i>E</i>	<i>N</i>					
TAT-008	Sector Piedecuesta	Arenisca	1115188	1259770					
TAT-009		Arenisca	1115172	1259755		x			
TAT-010		Riolita	1115139	1259744	x	x	x	x	
TAT-001		Riolita	1115081	1259735	x	x	x	x	
TAT-002		Riolita	1115127	1115127			x	x	
TAT-011		Riolita	1115059	1259689	x	x	x	x	
TAT-003		Esquisto	1115081	1259575		x			
TAT-004	Sector Aratoca	Diabasa	1118387	1245663	x	x	x	x	
TAT-005		Diabasa	1118381	1245652	x		x	x	
TAT-006		Riolita	1118383	1245643	x	x	x	x	x
TAT-007		Pegmatita	1118378	1245639		x			
GR-135-209-001	Mesa de Los Santos	Diabasa	1108459	1237815	x	x			

A Continuación se presenta una descripción geológica general sobre la distribución espacial de las rocas subvolcánicas estudiadas y sobre sus rasgos macroscópicos más relevantes, según cada área muestreada.

- **Aspectos geológicos generales del sector Piedecuesta (Vía los Santos):**

Sobre la vía que conduce a los Santos se levanto una sección de 169 metros, en la cual se colectaron 7 muestras; 2 de estas a areniscas de la Formación Jordán, 4 muestras corresponden al cuerpo objeto de estudio el cual se asocia a un pórfido riolítico y una muestra de esquistos de la Formación Silgara.

Dentro del pórfido riolítico se observa una zona de alteración que se encuentra delimitada dentro del intrusivo, presentando alteraciones supergénicas. La

alteración de feldespato potásico es intensa en toda la muestra, estando principalmente asociada a las fracturas de las rocas (Figura 12).

Las muestras TAT-008 y la TAT-009 corresponden a la Formación Jordán compuestas por bloques masivos de arenisca de grano medio a grueso, de color amarillo y rojizo, constituida por cuarzo y plagioclasa alterada, y con óxidos debido a alteraciones supergénicas (Figura 10). Se aprecian pequeñas vetillas de cuarzo en algunas secciones del afloramiento. Debido al grado de alteración de las areniscas estas se disgregan con facilidad, esto es posible debido a la alteración de las plagioclasas que se encuentra dentro ella, esta Formación se encuentra en contacto con el cuerpo intrusivo porfirítico.

FIGURA 10. Aspecto de las rocas de la Formación Jordán (las cuales hospedan las rocas ígneas subvolcánicas en el sector de los Santos), presentan variedades tipo areniscas de grano medio a grueso, con alteraciones como oxidación y alteración de las plagioclasas.



Las muestras TAT-010, TAT-001, TAT-002 y TAT-011, corresponden al pórfido riolítico el cual está compuesto principalmente de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico en mayor proporción, encontrándose estos dos últimos alterados, se observa una matriz de feldespato potásico alterada de color morado claro, pero

además dentro de esta matriz encontramos cuarzo bipiramidal de 3 a 4mm de diámetro, ahumados a oscuros. El feldespato potásico se altera a sericita, se observan cristales de biotita conservados. Se observa lixiviación de algunos fenocristales que se encontraban dentro de las matriz microcristalina. En la muestra TAT-002 se tomo de una sección de la roca donde se aprecia una mayor alteración supergénica, la oxidación allí presente es mucho mayor a el resto de la roca aflorante y llama la atención que se encuentre restringido a este pequeño sector (Figura 11).

FIGURA 11. Aspecto de las rocas porfíricas riolíticas aflorantes en el sector Piedecuesta, a) Pórfido riolítico de color morado grisáceo y b) Imagen del pórfido en la sección que se encuentra mayormente oxidada.



a)



b)

La muestra TAT-003 corresponde a la Formación Silgara, constituida por un esquistos cuarzo-micáceo, con feldespato y plagioclasa alterados, y con un alto grado de oxidación. Esta se encuentra en contacto con el pórfido riolítico (Figura 12).

FIGURA 12. Imágenes de la Formación Silgara aflorando en el área del sector de Piedecuesta. a) Esquistos micáceos, apreciando el grado de oxidación y b) se observa el contacto entre el pórfido riolítico y la Formación Silgara.



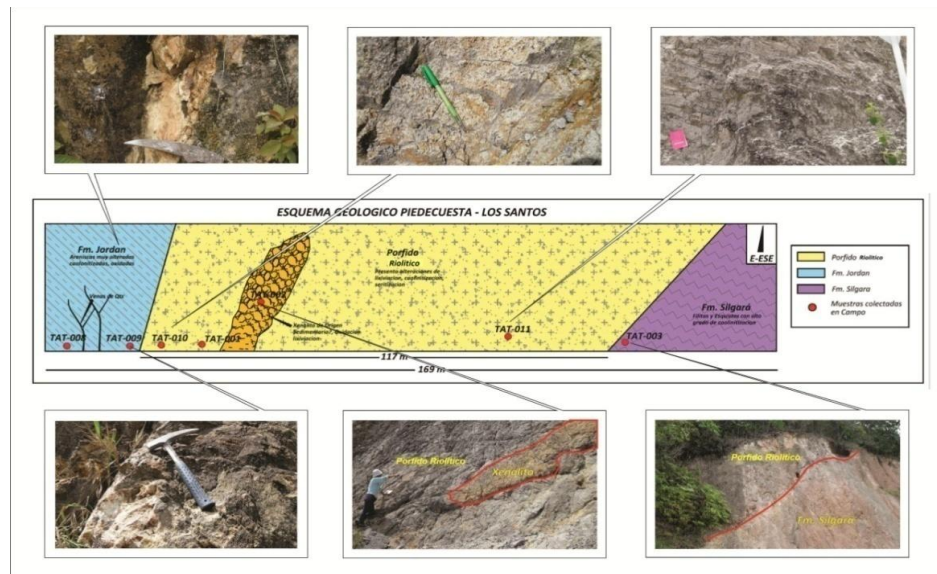
a)



b)

Fuente: Fotografías tomadas por el autor

FIGURA 13. Esquema geológico ilustrativo de la sección de Piedecuesta, en el cual se indican las litologías reconocidas y la localización de las correspondientes muestras.



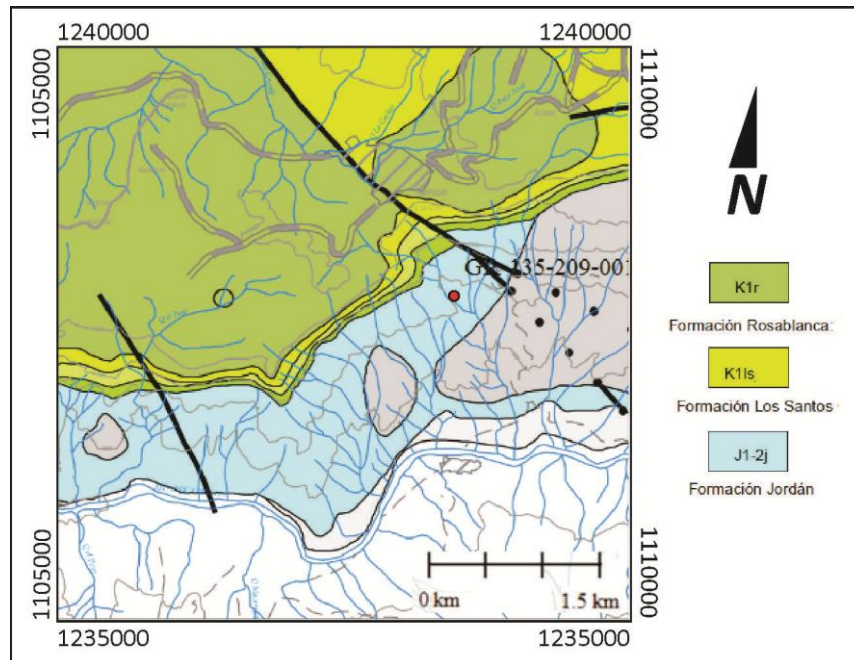
Fuente: Esquema realizado por el autor.

- **Aspectos geológicos generales del sector de Los Santos:**

En el área del Municipio de Los Santos con coordenadas 1°108.459 m.E. y 1°237.815 m.N. aparece un dique de composición diabásica intruyendo a la Formación Jordán, en una zona de escarpe profundo con escasa vegetación, clima seco y poco húmedo, cerca de un depósito cuaternario; referenciado según proyecto realizado por tesis de la Universidad Industrial de Santander bajo el nombre de Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector noreste de Curiti y borde occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander en el año de 2007 (Figura 14).

Este dique diabásico se tuvo en cuenta en este trabajo de investigación para determinar si composicionalmente es similar al dique de diabásico que intruye la Formación Silgara, en la sección de Aratoca.

FIGURA 14. Esquema geológico, en el cual se indica la relación del dique de diabasa, respecto a la roca encajante (Formación Jordán).



Fuente: Ingeominas-UIS (2007).

FIGURA 15. Aspecto del cuerpo ígneo de composición diabásica, de coloración verdosa el cual intruye la Formación Jordán, ubicado a la margen derecha del río Chicamocha a la altura del Municipio de Jordán Sube.



Fuente: Ingeominas-UIS (2007).

- ***Aspectos geológicos generales del sector Aratoca (a 1 Km. del peaje Pescadero, vía Bucaramanga – San Gil).***

Sobre la vía que conduce a San Gil se recolectaron 4 muestras las cuales hacen parte del los cuerpos que intruyen la Formación Silgara, siendo estas: dos diabasas, una riolita, y por ultimo una pegmatita, (Figura 18).

Se colecto la muestra TAT- 004 corresponde a un dique diabásico que se encuentra cortando la foliación principal de la Formación Silgara.

FIGURA 16. Imágenes del afloramiento, donde se observa el dique diabásico (cortando de manera perpendicular los planos de foliación regional) de la Formación Silgara.



Fuente: Fotografía tomada y modificada por el autor.

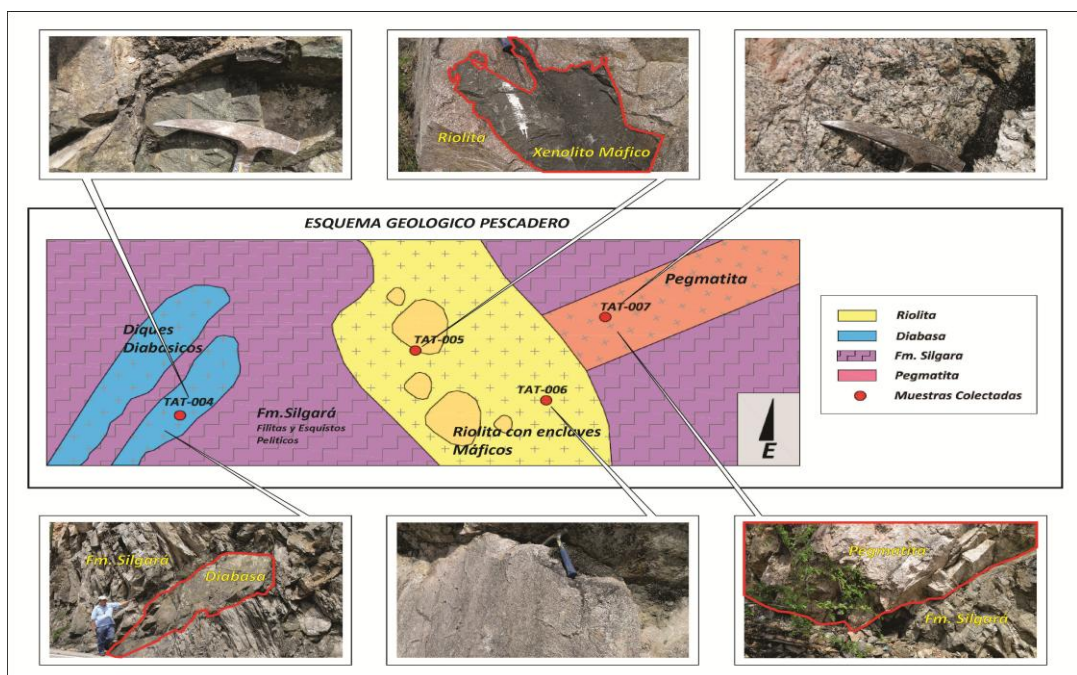
La muestra TAT-005 corresponde a un xenolito de diabásico dentro de una riolita, de la cual se tomo la muestra TAT-006 siendo esta una roca con textura porfirítica, con pórfidos de cuarzo y plagioclasa en una matriz afanítica de feldespato potásico, de color rosado a violáceo.

FIGURA 17. Imagen del xenolito máfico dentro de la riolita, en el sector de Aratoca.



Fuente: Fotografía tomada y modificada por el autor.

FIGURA 18. Esquema geológico ilustrativo de la sección de Aratoca, en el cual se indican los cuerpos objeto de estudio y la localización de las muestras tomadas.



Fuente: Fotografía tomada y modificada por el autor.

En total fueron 11 muestras las que se colectaron, en las cuales para cada una de ellas se elaboraran los análisis químicos que sean más apropiados por llevar a cabo y que nos de resultados los cuales se pueda comparar un sector de muestreo con respecto al otro, para así verificar si existe alguna correspondencia tanto petrográfica, como geoquímicamente y proponer si hay alguna equivalencia litológica entre estas.

6 DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA DE LAS ROCAS RIODACITICAS Y DIQUES DIABASICOS DE LOS SECTORES OBJETO DE ESTUDIO.

Se realizo el análisis petrográfico de siete secciones delgadas, siendo estas las muestras más representativas de los sectores de estudio, con el fin de determinar su composición modal y rasgos texturales presentes en estas.

Con el análisis petrográfico se pudo concluir que las muestras colectadas en el sector de Piedecuesta corresponden a una riolita. Para el sector de Aratoca nos encontramos con dos litologías que correspondiendo a una riolita y a dos diabasas. En el sector de Los Santos nos encontramos con una diabasa la cual se clasifica petrográficamente como un basalto.

TABLA 4. Relación de las muestras colectadas con sección delgada.

MUESTRA	TIPO DE ROCA
TAT-001	Riolita Porfirítica
TAT-010	Riolita Porfirítica
TAT-011	Riolita Porfirítica
TAT-004	Diabasa
TAT-005	Diabasa
TAT-006	Riolita Porfirítica
GR-135-209-001	Diabasa

6.1.1 Descripción microscópica de las muestras objeto de estudio

A continuación se relacionan las secciones realizadas con el objeto de conocer su composición mineralógica, teniendo en cuenta los aspectos texturales principales, facies minerales, tamaño de los cristales y relaciones mineralógicas temporales; con el fin de identificar eventos y procesos de formación de las rocas. Sin embargo, previo a la descripción microscópica de las láminas delgadas de las

rocas ígneas que se estudiarán (por sectores), se presentará unas breves consideraciones previas, en aras de aclarar algunos conceptos que serán utilizados a lo largo de éste apartado sobre la descripción petrográfica de las rocas subvolcánicas.

- ***Consideraciones Preliminares sobre Microtexturas Ígneas:***

Las rocas volcánicas se forman por solidificación del magma en la superficie y la corteza terrestre. Dado que el enfriamiento es mucho más rápido que en el caso de rocas plutónicas, los iones de minerales no alcanzan a organizarse en cristales grandes. La clasificación de los muchos diferentes tipos de rocas ígneas nos provee información sobre las condiciones bajo las cuales se formaron. Además de estos existen dos variables las cuales son utilizadas para la clasificación de rocas ígneas; como lo son el tamaño de la partícula que depende de su historia de enfriamiento y la composición mineral de la roca.

Texturas:

Las texturas de las rocas ígneas se usan para describir el aspecto general de la misma en función del tamaño, forma y ordenamiento de los cristales que la componen. El hecho que las rocas asciendan a la superficie de la tierra ya sea por procesos tectónicos o erosión, implica que las texturas que tienen estas rocas han sido transportadas mecánicamente a un medio diferente al de su ambiente petrogenético inicial, excepto en el caso de las rocas volcánicas, ya que estas son puestas directamente en la superficie.

Las texturas nos permiten determinar y conocer el estado en el cual fueron puestas en la superficie, y de esta manera posicionarlas en un evento tectónico. Teniendo en cuenta que los rasgos texturales, pueden ser cambiados bajo condiciones y factores superficiales como lo son temperatura, fluidos y deformación. La acción de éstos, solos o combinados ocasionan los reajustes texturales que llevan a un reequilibrio de la roca.

Hay mecanismos fundamentales que gobiernan la aparición o desaparición de los minerales, los cuales son los constituyentes de estas texturas. La *nucleación homogénea* es efectiva en condiciones de sobreenfriamiento del magma y sobresaturación de soluciones antes de que ocurra la cristalización. La razón de esto es que se debe formar un núcleo antes de que el cristal comience a crecer.

El sobreenfriamiento de un sistema tiene el efecto de almacenar energía, que es rápidamente liberada como calor latente de cristalización, después de la formación de los núcleos estables y el consiguiente crecimiento del cristal. Si el sobreenfriamiento de un fundido es extremo, los gérmenes iónicos o moleculares son incapaces de difundirse para formar núcleos y los componentes químicos solidifican como vidrio. La importancia de la sobresaturación en el proceso de nucleación homogénea radica en que cuando la fase gaseosa no está saturada, la variación de la energía libre total del sistema es siempre positiva y cuando la fase es, por el contrario, saturada o sobresaturada esta variación tiende a ser negativa en el momento en que el radio alcanza valores críticos.

La *Nucleación heterogénea* corresponde a la nucleación desde fases líquidas a sólidas con un enfriamiento ligeramente por debajo de la temperatura de fusión y que los cristales aparecen en forma discontinua sobre impurezas, en la pared del recipiente que la contiene, sobre cristales preexistentes.

La tasa de nucleación se define como el número de núcleos formados por unidad de volumen en un determinado sistema. Cuando el magma es enfriado a una temperatura en la que solo se forman unos pocos núcleos estables y mantiene cercano a esa temperatura, se mantiene la cristalización de esos núcleos, y todos los materiales disponibles se difundirán hacia esos centros de crecimiento. La roca resultante contendrá unos pocos cristales relativamente grandes. El crecimiento de estos núcleos dará como resultado muchos cristales y una roca de grano más fino. Además de esto si hay una intrusión cercana a la superficie, donde la pérdida de calor es acelerada enormemente, la tasa de nucleación se incrementa drásticamente y se forman los pequeños cristales de la matriz. Esto es una

cristalización en dos etapas causada por un enfriamiento en dos estadios, primero lento y luego rápido; como por ejemplo traquitas y dacitas. Como también pueden reconocerse cristalización en tres etapas.

Existen cuatro parámetros texturales, con los cuales se puede determinar los procesos que llevaron a la consolidación del magma.

- *Grado de cristalinidad*
- *Tamaño de los granos*
- *Relación de los tamaños de grano*
- *Forma de los cristales*

También es importante para cada una de las muestras mantenerla ligada a las observaciones que se realizaron en campo, su distribución espacial y contacto con las litologías allí presentes.

6.1.2 Descripción microscópica de las rocas colectadas en el Sector de Piedecuesta

Para el sector de Piedecuesta se tuvieron en cuenta tres muestras para la elaboración de secciones delgadas, específicamente del pórfido objeto de estudio.

TABLA 5. Muestras colectadas en sector de Piedecuesta con sección delgada.

MUESTRA	TIPO DE ROCA
TAT-001	Riolita Porfírica
TAT-010	Riolita Porfírica
TAT-011	Riolita Porfírica

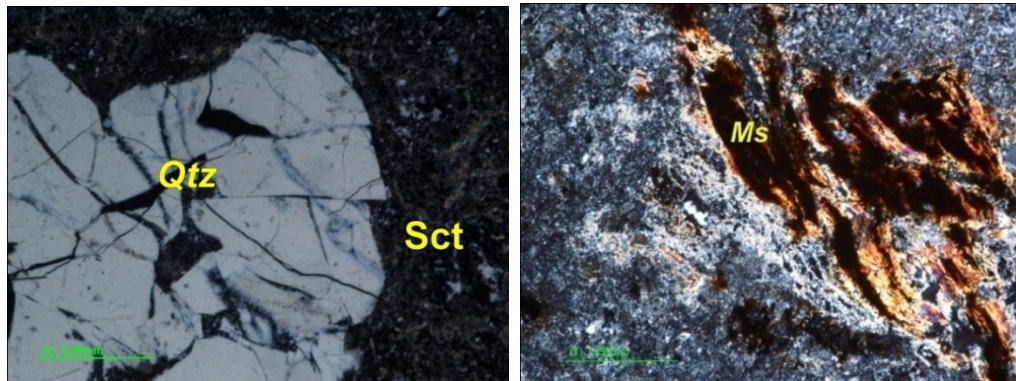
Riolitas Porfíricas:

Teniendo en cuenta que estas muestras pertenecen a la misma roca pero recogidas espacialmente en diferentes sectores del afloramiento. Se puede decir que estas rocas exhiben una textura porfírica, los cuarzos se presentan como fenocristales y también haciendo parte de la matriz con una textura plumosa en algunos sectores, siendo el cuarzo es el principal constituyente de la sección, los fenocristales presentan una textura engolfada, con tamaños de 1mm a 1.5mm, también se presentan como agregados cristalinos de forma anhedral a subhedral, mostrando bordes irregulares además de esto se observan fracturados (Figura 19a).

Las plagioclasas y feldespatos no se alcanzan a reconocer en estas secciones debido se encuentran muy alteradas y la sericita la cual se encuentra como segundo principal constituyente se asocia a la alteración de estos, presentándose en una matriz afanítica hipocristalina.

La moscovita se presenta en cristales tabulares delgados fibrosos, exfoliación en una dirección, birrefringencia de orden superior, se muestran muy oxidadas en algunos sectores de la sección (Figura 19.b). Las muestras presentan un 30% de fenocristales de cuarzo y un 70% corresponde a la matriz, la cual se encuentra constituida por sericita y como minerales accesorios encontramos la esfena y el circón. Además de esto en el análisis de DRX se reporta un porcentaje mínimo de Illita el cual no fue visualizado en la descripción de lámina delgada.

FIGURA 19. a) Fenocristales de cuarzo (Qtz), en una matriz afanítica con textura de engolfamiento. b) Se observan cristales de moscovita (Ms) oxidada, embebidos en una matriz afanítica compuesta por sericita. Microfotografías tomadas con objetivo 5x. a),b) Luz plana no analizada.



a)

b)

TABLA 6. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en las rocas riolíticas del sector del Piedecuesta (TAT-001, TAT-010, TAT-011).

<i>Muestra</i>	<i>Minerales</i>	<i>Etapa Magmática</i>	<i>Etapa Hidrotermal</i>	<i>Etapa Supergénica</i>
TAT-001, TAT-010, TAT-011	Cuarzo	X		
	Hematita			X
	Muscovita	X		
	Circón	X		
	Esfena	X		
	Sericita			X

6.2 Descripción microscópica de las rocas colectadas en el Sector Aratoca

TABLA 7. Relación de las muestras colectadas en el sector de Aratoca

MUESTRA	TIPO DE ROCA
TAT-004	Diabasa
TAT-005	Diabasa
TAT-006	Riolita

En el sector de Aratoca se tuvieron en cuenta tres muestras de roca, a las cuales se les realizó secciones delgadas.

Muestra TAT-004

Esta muestra corresponde a un diabasa que intruye la Formación Silgara, exhibiendo una textura microporfirítica e intergranular con una matriz afanítica e inequigranular. Constituida por plagioclasa, actinolita, como minerales de alteración se tienen la clorita y la epidota.

Los cristales de plagioclasa se presentan de forma tabular, con birrefringencia de primer orden, de relieve bajo, alterándose a calcita (Figura 20). Los anfíboles presentan menor tamaño que las plagioclasas, estando compuestos por actinolita y hornblenda. La actinolita se presenta como agregados columnares, de relieve alto, birrefringencia alta, se encuentra siempre asociado a la clorita. La hornblenda como cristales prismáticos, con relieve alto, de color verde-pardo, asociados a la epidota. La vermiculita (biotita) se presenta como cristales de forma euhedrica, de color pardo amarillento, relieve moderado, se encuentra como mineral individual así como alterándose a clorita. Además de esto la clorita presenta bordes de

reacción de epidota, estando esta como agregados granulares con alto relieve, birrefringencia fuerte (Figura 21). La calcita se presenta como producto de alteración y a su vez individual mostrándose como venillas atravesando la sección, con macla polisintética (Figura 22). El cuarzo se presenta puntualmente en algunos sectores y asociado a la vena de calcita.

FIGURA 20. Aspecto de cristales de plagioclasa (Pl) alterándose a calcita, en una matriz afanítica con textura microcristalina. Microfotografías tomadas con objetivo 5x. Luz plana no analizada.

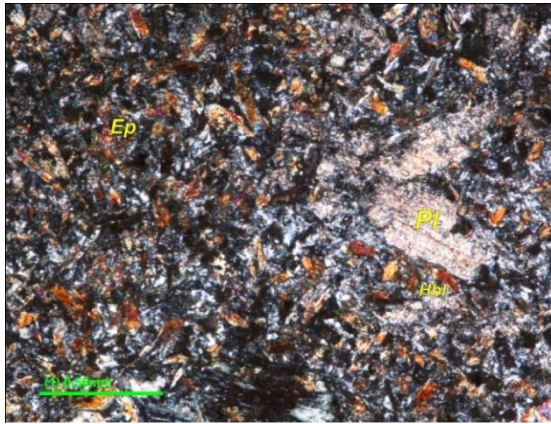
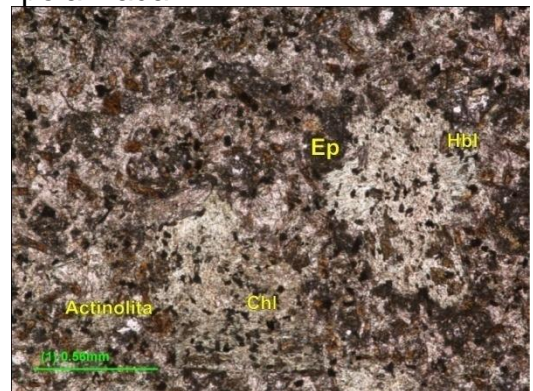


FIGURA 21. a) Aspecto de cristales de clorita (Chl), presentando bordes de reacción de epidota (Ep), como también haciendo parte de la matriz; además de esto cristales de hornblenda (Hbl) y actinolita. Microfotografías tomadas con objetivo 5x a) Luz no plana analizada y b). Luz polarizada.



a)



b)

FIGURA 22. Aspecto de la Vena de calcita, cortando las rocas de composición microgabro (diabasa). Microfotografía tomada con objetivo 5x. Luz no plana analizada.



La matriz de la roca presenta la misma composición de plagioclasa (25%), actinolita (10%), hornblenda (14%), vermiculita (biotita) (8%), minerales de alteración como calcita (5%), clinocloro (14%), epidota (15%), cuarzo (14%).

TABLA 8. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en la roca diabásica del sector de Aratoca (TAT-004).

Muestra	Minerales	Etapa Magmática	Etapa Hidrotermal	Etapa Supergénica
TAT-004	Cuarzo	X		
	Epidota			X
	Hornblenda	X		
	Plagioclasa	X		X
	Ortoclasa	X		
	Clinocloro		X	
	Vermiculita		X	
	Calcita			X
	Actinolita		X	

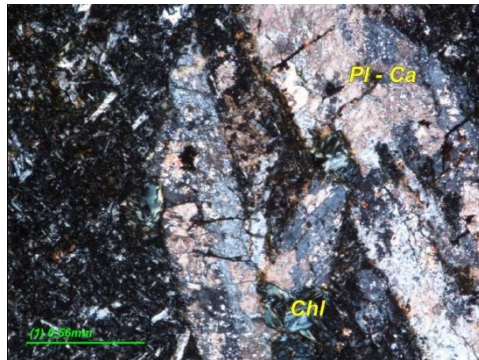
Muestra TAT-005

Esta roca exhibe una textura porfídica, inequigranular, con porcentaje de los fenocristales variables. Los fenocristales de mayor porcentaje corresponden a las plagioclasas, con formas tabulares maclado tipo carlsbad y albita, estas se encuentran alterándose a calcita, con relieve bajo, presentan zonación (Figura 23), estas zonaciones manifiestan un desequilibrio feldespato-solución cuyo origen debe buscarse en la cinética de los mecanismos de difusión en el líquido y en los cristales. Se supone que durante la cristalización magmática los cristales de plagioclasa dejan con frecuencia de mantener el equilibrio con el magma en el cual están sumergidos y además que los cristales están sometidos con frecuencia a presiones de agua oscilantes. Si el enfriamiento del magma es lento la desviación del equilibrio es mínima y los cristales serían homogéneos, cuando el enfriamiento es más rápido, el reajuste entre los cristales y el fundido es incompleto y los cristales son zonados (López et al 2006).

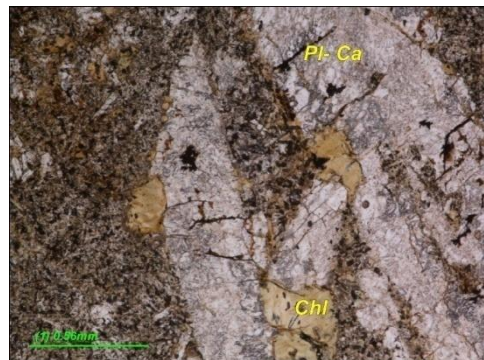
Los cristales de sanidina presentan formas tabulares, macla tipo carlsbad, la ortoclasa presenta cristales subhedricos, el clinocloro de hábito acicular, pleocroico, asociado a la calcita, relieve moderado, la calcita de forma anhedral a tabular, de birrefringencia alta, relieve moderado, se presenta también a manera de venitas con maclado polisintético (Figura 23.e,f). El cuarzo de forma anhedral, presentándose en la vena de calcita y disperso en la placa. En la DRX se hace presencia de microclina, la cual no fue visible en sección delgada.

La matriz de la roca está compuesta en su mayoría por plagioclasa (55%), Sanidina (15%), clinocloro (15%), calcita (5%), ortoclasa (5%), cuarzo (4%), otros minerales presentes en la roca son el circón, como accesorio.

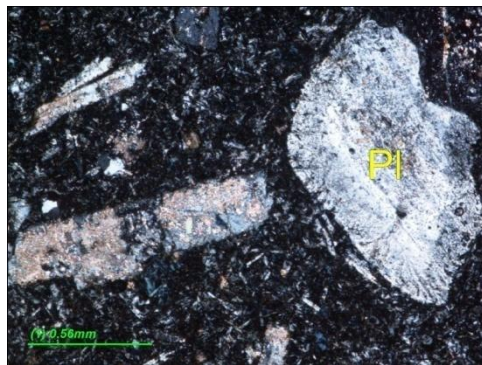
FIGURA 23. a) Aspecto cristales de clinocloro, asociados a plagioclasa cálcica, alterándose a calcita, c) cristales de plagioclasa (Pl) con zonación, e) vena de calcita con maclado polisintético. a),c),e) Luz no plana analizada, y b),d),f) Luz polarizada.



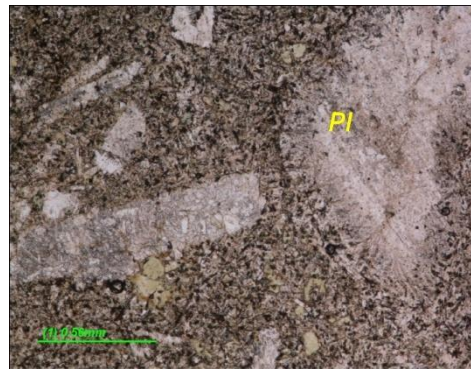
a)



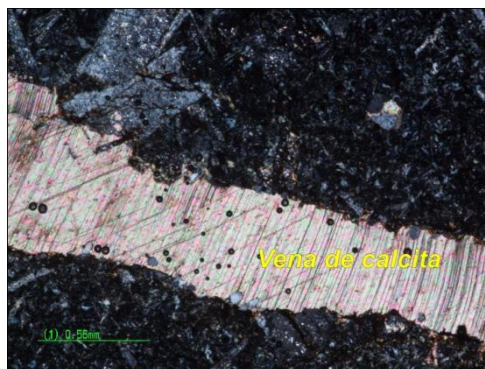
b)



c)



d)



e)



f)

TABLA 9. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en la roca diabásica del sector de Aratocha TAT-005. (Diabasa).

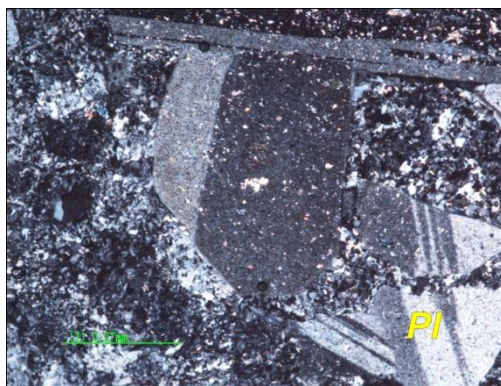
Muestra	Minerales	Etapa Magmática	Etapa Hidrotermal	Etapa Supergénica
TAT-005	Plagioclasa	X		
	Sanidina	X		
	Clinocloro		X	
	Calcita			X
	Ortoclase	X		
	Cuarzo	X		
	Circón	X		

Muestra TAT-006

La roca presenta principalmente una textura esferulítica, indicando un alto grado de sobreenfriamiento, estas esferulitas se componen principalmente de ortoclase, con un relieve bajo, birrefringencia de primer orden, encontrándose principalmente en la matriz. Los cristales de plagioclasa se presentan a manera de fenocristales con una textura hipidiomórfica y glomeroporfirítica, además de esto estas plagioclasas presentan una textura antipertítica, también variando en su tamaño de 0.19mm a 1.6 mm, con maclas tipo albita, relieve bajo, algunas de las plagioclasas se encuentran alterándose a calcita (Figura 24). El cuarzo se presenta en cristales subhedros a euhedros que muestran texturas de engolfamiento y ocelar, bordes de reacción, relieve bajo, birrefringencia de primer orden, con tamaños de 1.9 mm (Figura 24.a). La biotita, de tonos pardos, se encuentra en tablas cortas, parcialmente transformada en clorita, con extinción paralela, birrefringencia alta. Como minerales de alteración encontramos la clorita y minerales accesorios circón y esfena (Figura 24.d). Los minerales como microclina, clinocristilo y calcita fueron evidenciados en el análisis de DRX pero en la petrografía realizada no se visualizaron.

La matriz de la roca se compone principalmente de ortoclasa en forma de esferulitas (25%), plagioclasa (26%), cuarzo (20%), clorita (10%), biotita (5%), minerales accesorios esfena (2%), circón (2%).

FIGURA 24. a),b) Aspecto de las relaciones entre los cristales de plagioclasa (Pl), embebidos en una matriz esferulítica, con maclas tipo albita. c) Cristal de cuarzo con engolfamiento, estando rodeado por cristales de ortoclasa (textura ocelar). d) Esfena, mineral accesorio. Microfotografías tomadas con objetivo 5x. Luz no plana analizada.



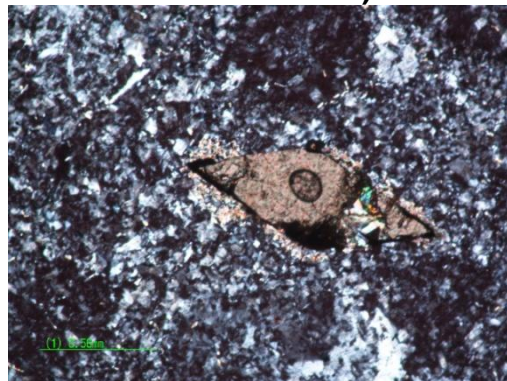
a)



b)



c)



d)

TABLA 10. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en la roca riolítica del sector de Aratocha TAT-006. (Riolita)

Muestra	Minerales	Etapa Magmática	Etapa Hidrotermal	Etapa Supergénica
TAT-006	Plagioclasa	X		
	Sanidina	X		
	Clorita		X	
	Ortoclasa	X		
	Cuarzo	X		
	Circón	X		
	Esfena	X		
	Biotita	X		

6.3 Descripción microscópica de la muestra colectada en el Sector de los Santos

Muestra GR-135-209-001

Esta roca presenta principalmente una textura interrumpida e intergranular, constituida por plagioclasas, de cristales tabulares euhedrales de bajo relieve, asociadas a la clorita, macla tipo albita y carlsbad. El clinocloro hace parte de la matriz microcristalina. La calcita de forma anhedral, con maclas polisintéticas, birrefringencia del orden superior (Figura 25).

La matriz de la roca se compone principalmente de plagioclasas tipo albita (55%), Cuarzo (5%) y como minerales de alteración Clorita (20%), Calcita (10%).

FIGURA 25. a) Aspecto de cristales de plagioclasa (Pl), con textura interrumpida, c) Cristal de calcita con maclado polisintético, además de esto se observan cristales de plagioclasa (Pl) en una matriz compuesta principalmente por clinocloro. a),c) Luz no plana analizada y b),d) Luz polarizada.

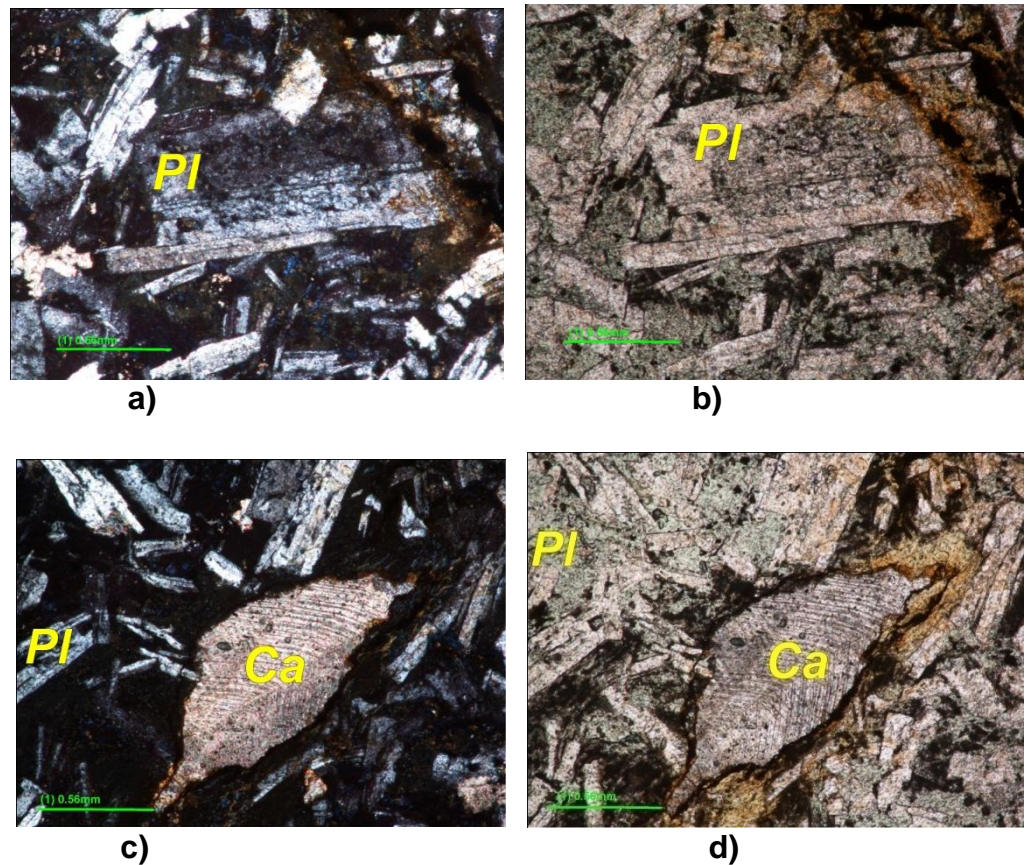


TABLA 11. Clasificación de los minerales formadores de las rocas según su etapa magmática, hidrotermal y Supergénica, en la roca diabásica del sector de los Santos de la muestra GR-135-209-001. (Diabasa)

Muestra	Minerales	Etapa Magmática	Etapa Hidrotermal	Etapa Supergénica
GR-135-209-001	Cuarzo	X		
	Plagioclasa	X		
	Clorita		X	
	Calcita			X
	Clinocloro		X	

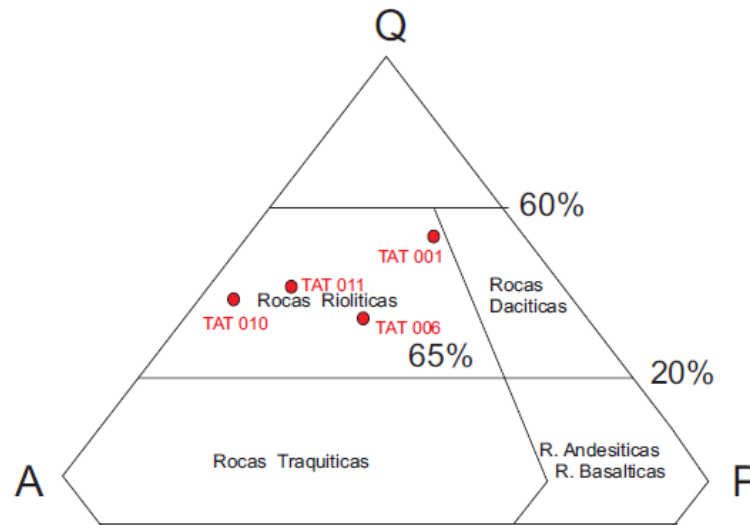
7 CLASIFICACION MODAL DE LAS ROCAS SUBVOLCANICAS

Para la descripción modal de las rocas objeto de estudio se tuvo en cuenta la clasificación Streckeisen, en la cual se describen las rocas volcánicas y plutónicas, indicando que tienen un equivalente volcánico para cada una de las rocas plutónicas, excepto para aquellas rocas de tipo ultramáfico y anortosíticas, debido a que estas normalmente están formadas por acumulación de cristales, ya que fundidos de estas características como tal, no han debido existir; pero para nuestro estudio tendremos en cuenta solamente la descripción de rocas volcánicas, ya que nos encontramos con rocas basálticas y riolíticas.

Según Streckeisen (1979) las rocas diabásicas consisten principalmente de plagioclasas, ortopiroxeno, clinopiroxeno, anfíboles y las rocas riolíticas se componen de cuarzo, plagioclasa, feldespatos alcalinos y biotita (en general poco máficos). La Riolita tiene una textura micro-criptocristalina, algunas veces con textura porfídica, con fenocristales de cuarzo o feldespato alcalino en una matriz microlítica.

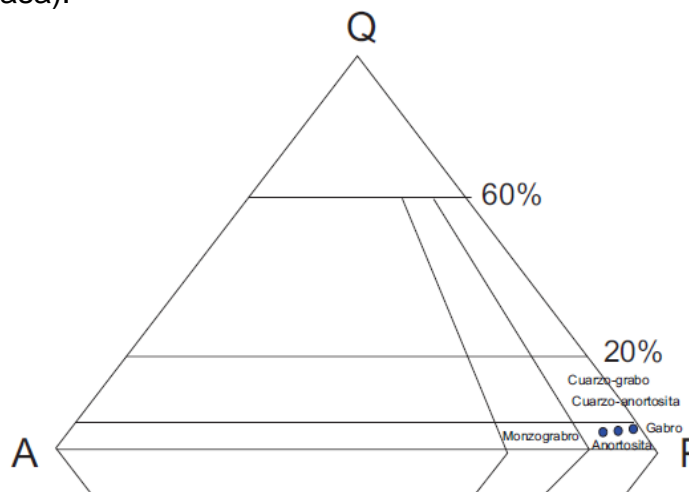
Según lo anteriormente descrito clasificamos las rocas objeto de estudio, con el diagrama de clasificación de Streckeisen (1979), dándonos como resultado rocas basálticas y riolíticas (Figura 26 y 27).

FIGURA 26. Diagrama de clasificación modal de las rocas subvolcánicas según el contenido mineralógico modal, en donde se denominan las muestras colectadas como riolitas.



Fuente: Esquema apoyado en la clasificación de Streckeisen (1979), recomendado por IUGS (1989).

FIGURA 27. Diagrama de clasificación modal de las rocas subvolcánicas según el contenido mineralógico modal, en donde se denominan las muestras colectadas como gabros (diabasa).



Fuente: Esquema apoyado en la clasificación de Streckeisen (1979), recomendado por IUGS (1989).

8 IDENTIFICACION DE FASES MINERALES MEDIANTE DIFRACCION DE RAYOS X

A continuación se presentan los resultados de los análisis de Difracción de Rayos X (DRX) realizados en las muestras colectadas en campo, los cuales se llevaron a cabo fundamentalmente para identificar y cuantificar las fases minerales presentes en cada una de las muestras analizadas. En el análisis de DRX se tuvieron en cuenta 9 muestras que serán descritas a continuación.

8.1 Rocas Sector Piedecuesta

Para este sector se tuvieron en cuenta 5 muestras de las cuales 2 pertenecen a los contactos del cuerpo riolítico (TAT-003), (TAT-008) y tres muestras a este, siendo (TAT-001), (TAT-010) y (TAT-011) (Figura 12).

Rocas de contacto del cuerpo riolítico:

Esquisto (Formación Silgara):

Entre las fases mineralógicas analizadas encontramos de mayor a menor proporción las siguientes: cuarzo, caolinita, moscovita y anatasa, (tabla 12 y figura 28).

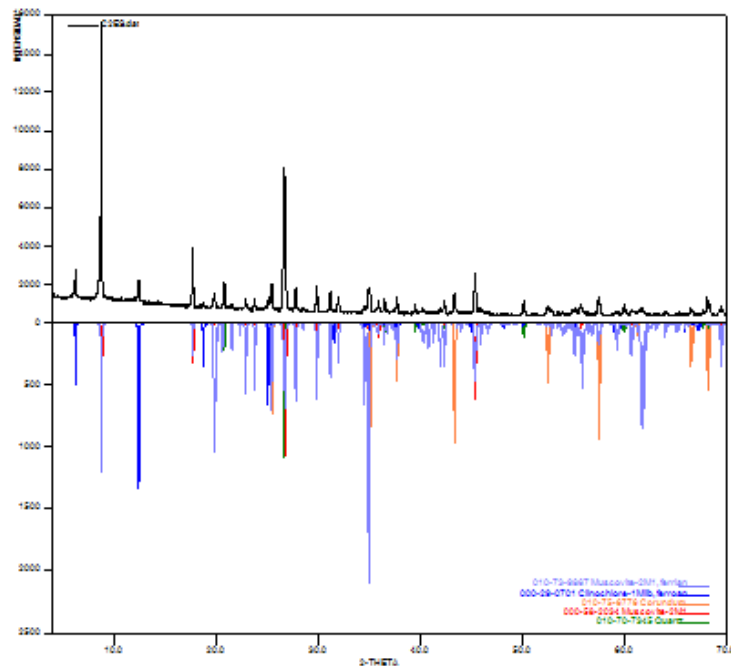
TABLA 12. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de arenisca mostrando las fases minerales presentes.

TAT-003 (C2EO)

FASES MINERALES	FORMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	Si O ₂	41.5 %
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	25.2 %
Anatasa	Ti O ₂	4.5 %
Moscovita	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	22.7 %
Hematita	Fe ₂ O ₃	N.C
Calcita	Ca CO ₃	N.C
Moscovita Férrica	K (Al, Fe) ₂ Al Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	N.C

N.C: no cuantificada

FIGURA 28. Difractograma para la muestra TAT-003, esquisto perteneciente a la Formación Silgara, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales como cuarzo, caolinita, anatasa y moscovita.



Arenisca (Formación Jordán):

Entre las fases mineralógicas analizadas encontramos de mayor a menor proporción las siguientes: moscovita férrica, cuarzo, y clinocloro, (Tabla 13 y Figura 29).

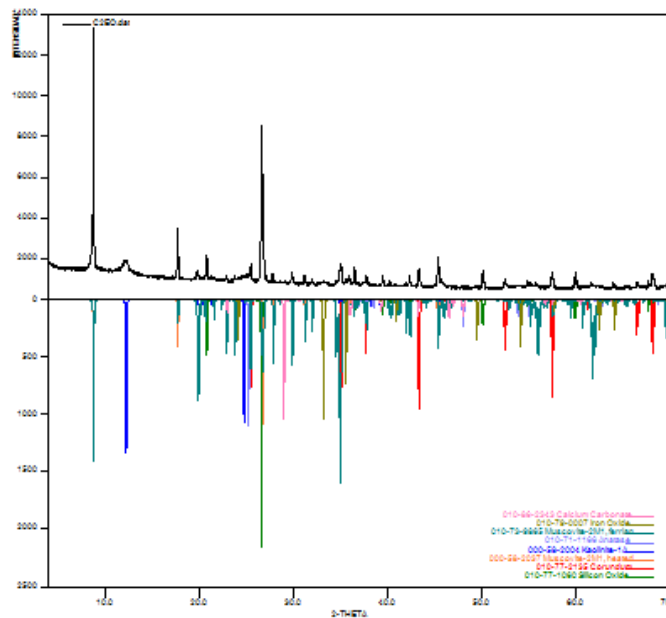
TABLA 13. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de esquistos, mostrando las fases minerales presentes.

TAT- 008 (C2EO)

FASES MINERALES	FORMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	Si O ₂	21.4 %
Moscovita	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	N.C
Moscovita Férrica	K (Al, Fe) ₂ Al Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	60.8 %
Clinocloro	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	9.8 %

N.C: no cuantificada

FIGURA 29. Difractograma para la muestra TAT-003, arenisca perteneciente a la Formación Jordán, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales como cuarzo, moscovita férrica y clinocloro.



Rocas riolíticas

Para este sector se tienen en cuenta tres muestras pertenecientes al mismo cuerpo, pero distribuidas dentro del mismo, siendo TAT-001, TAT-010, TAT-011, las cuales presentan similitudes composicionales (Figura 12). Entre las fases mineralógicas analizadas encontramos de mayor a menor proporción las siguientes: cuarzo, moscovita férrica, sericita y Hematita. (Tabla 14).

TABLA 14. Fases minerales presentes en las rocas riolíticas TAT-001, TAT-010, TAT-011. El rango de los porcentajes reportados (cálculos semicuantitativos), son tomados de los valores mínimos y máximos de los análisis de DRX.

FASES MINERALES	FORMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	Si O_2	41.3- 43.4 %
Anatasa	Ti O_2	N.C
Sericita	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	13.7-17.4 %
Hematita	$\text{Fe}_2 \text{O}_3$	0.8 -1.1 %
Moscovita Férrica	$\text{K} (\text{Al, Fe})_2 \text{Al Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	37.2- 45.2 %
Illita	$(\text{K, H}_{30}) \text{Al}_2 (\text{Si}_3 \text{Al}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot x \text{H}_2\text{O}$	0-9.7%

N.C: no cuantificada

FIGURA 30. Difractograma para la muestra TAT-001, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales como cuarzo, moscovita férrica e illita.

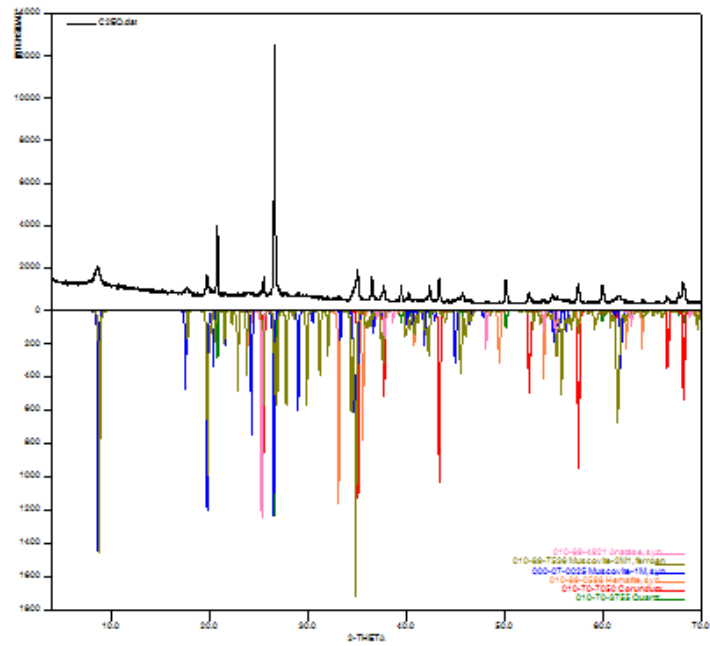


FIGURA 31. Difractograma para la muestra TAT-010, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales de la tabla 14.

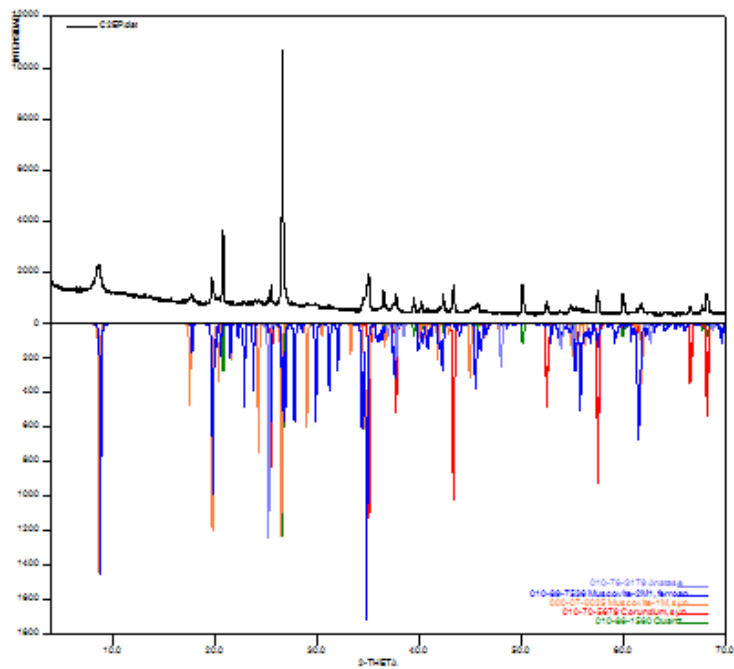
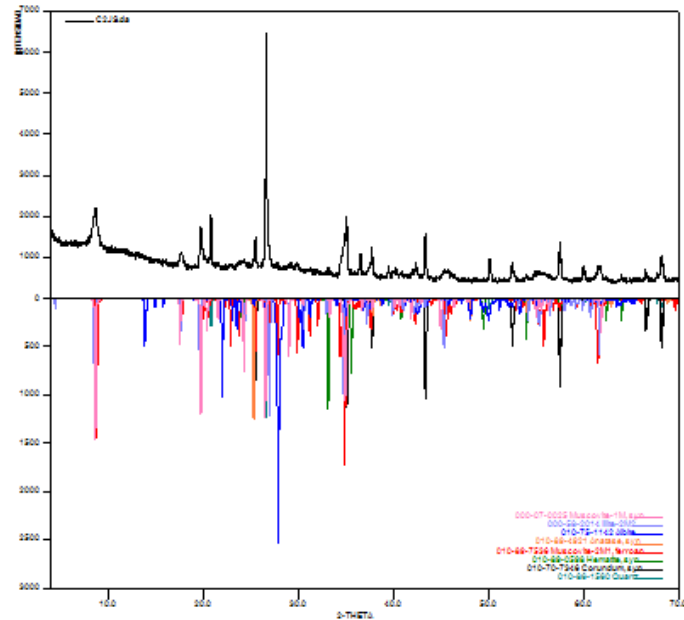


FIGURA 32. Difractograma para la muestra TAT-011, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales de la tabla 14.



Rocas Sector Aratocha

Para este sector se tienen en cuenta tres muestras de las cuales dos pertenecen a un basalto y una a una riolita, TAT-004, TAT-005, TAT-006 (Figura 18).

Para la muestra TAT-004, las fases mineralógicas analizadas se encuentran de mayor a menor proporción las siguientes: clinocloro, magnesio hornblenda férrica, albita, cuarzo y vermiculita. (Tabla 15 y Figura 33).

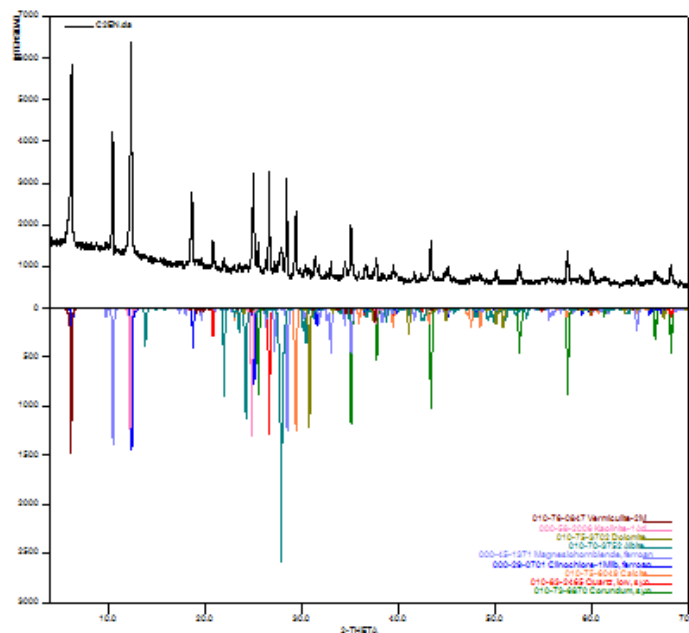
TABLA 15. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de TAT-004, mostrando las fases minerales presentes.

TAT-004 (C2EQ)

FASES MINERALES	FORMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	Si O ₂	10.4 %
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	N.C
Vermiculita	Mg _{3.41} Si _{2.86} Al _{1.14} O ₁₀ (OH) ₂ (H ₂ O) _{3.72}	2.9 %
Dolomita	Ca Mg (CO ₃) ₂	N.C
Albita	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	12.6 %
Magnesio hornblenda Férrica	Ca ₂ (Mg, Fe) ₄ Al (Si ₇ Al) O ₂₂ (OH, F) ₂	13.9 %
Calcita	Ca CO ₃	4.8 %
Clinocloro	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	33.1 %

N.C: no cuantificada

FIGURA 33. Difractograma para la muestra TAT-004, en el cual se relacionan fundamentalmente la presencia de minerales como cuarzo, vermiculita, albita, magnesio hornblenda férrica, calcita y clinocloro.



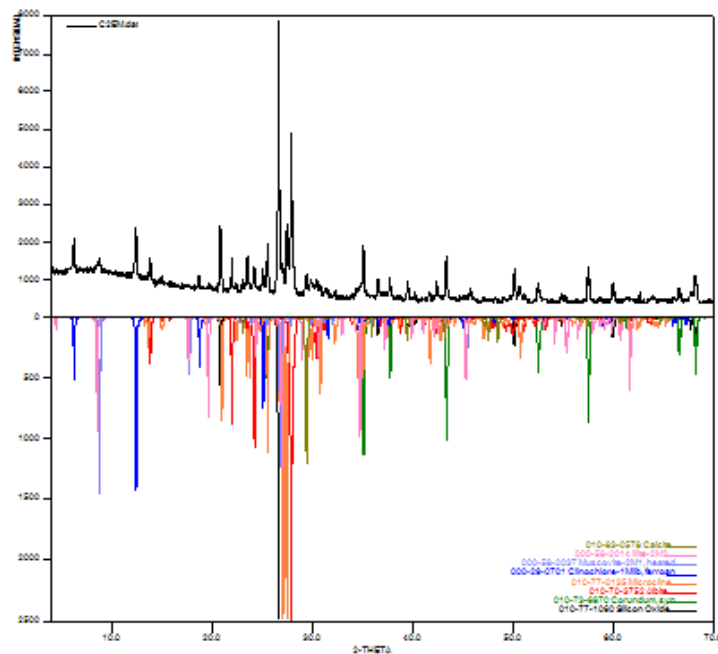
Para la muestra TAT-005, las fases mineralógicas analizadas se encuentra de mayor a menor proporción las siguientes: albita, microclina, cuarzo, moscovita, clinocloro y calcita. (Tabla 16 y figura 34).

TABLA 16. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de TAT-005, mostrando las fases minerales presentes.

TAT-005 (C2EQ)

FASES MINERALES	FORMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	Si O ₂	20.1 %)
Microclina	K (Si _{0.75} Al _{0.25}) ₄ O ₈	30.1 %
Clinocloro	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	4.5 %
Moscovita	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	6.3 %
Illita	(K, H ₃₀) Al ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (OH) ₂ · X H ₂ O	N.C
Calcita	Ca CO ₃	3.0 %
Albita	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	30.8 %)

FIGURA 34. Difractograma para la muestra TAT-005, en el cual se relacionan los minerales de la tabla 16.



Para la muestra TAT-006, las fases mineralógicas analizadas se encuentra de mayor a menor proporción las siguientes: albita, cuarzo, microclina, crisotilo, moscovita, clinocloro y calcita. (Tabla 17 y figura 35).

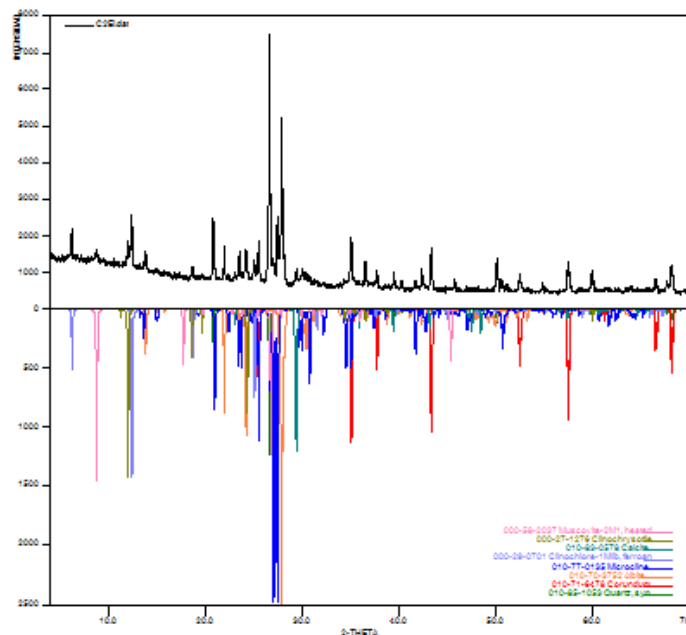
TABLA 17. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de TAT-006, mostrando las fases minerales presentes.

TAT-006 (C2EQ)

FASES MINERALES	FORMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	Si O ₂	21.6 %
Albita	(Na _{0.98} Ca _{0.02})(Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	36.2 %
Microclina	K (Si _{0.75} Al _{0.25}) ₄ O ₈	18.9 %
Moscovita	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	5.9 %
Clinocloro	(Mg, Fe) ₆ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	3.6 %
Clinocrisotilo	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	8.4 %
Calcita	Ca CO ₃	2.7 %

N.C: no cuantificada

FIGURA 35. Difractograma para la muestra TAT-006, en el cual se relacionan los minerales de la tabla 17.



Rocas Sector Jordán

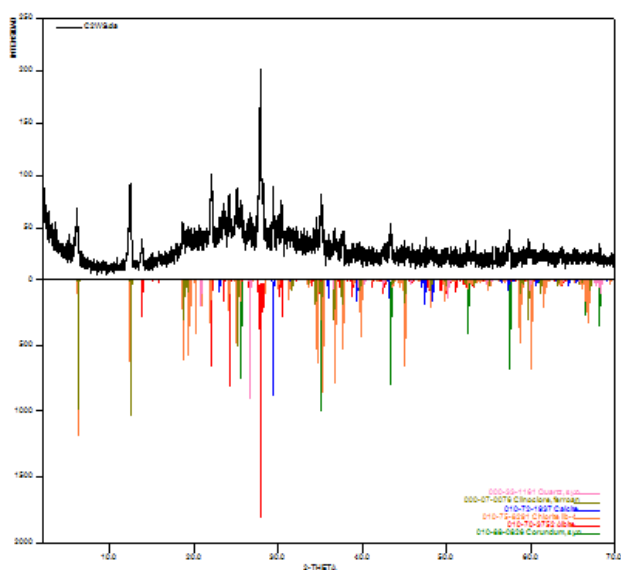
Para la muestra GR-135-209-001, entre las fases mineralógicas analizadas encontramos de mayor a menor proporción las siguientes: albita, clorita, clinocloro férrico, calcita y cuarzo. (Tabla 18 y figura 36).

TABLA 18. Resultados obtenidos de DRX en la muestra de GR-135-209-001, mostrando las fases minerales presentes.

GR-135-209-001 (C2EQ)

FASES MINERALES	FORMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	Si O ₂	2.8 %
Albita	(Na _{0.98} Ca _{0.02}) (Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	37.2 %
Clorita	(Mg _{11.06} Fe _{0.94}) ((Si _{5.22} Al _{2.78}) O ₂₀ (OH) ₁₆)	23.7 %
Calcita	Ca CO ₃	4.6 %
Clinocloro Férrico	(Mg _{2.8} Fe _{1.7} Al _{1.2}) (Si _{2.8} Al _{1.2}) O ₁₀ (OH) ₈	8.2 %

FIGURA 36. Difractograma para la muestra GR-135-209-001, en el cual se relacionan los minerales de la tabla 18.



9 ESTUDIO GEOQUÍMICO DE ELEMENTOS MAYORES, MENORES Y TRAZAS EN ROCA TOTAL

En este apartado se muestran algunas características geoquímicas presentes en algunas de las muestras objeto de estudio; con el fin de identificar las series y el contexto tectónico en el cual se formaron estas. Se realizaron análisis de fluorescencia de rayos X, elementos mayores, menores y traza (MMT), espectroscopia de masas (ICPMS), análisis de tierras raras y contenido de hierro ferroso. Estos análisis se llevaron a cabo por ALS Laboratory Group, ubicado en Funza, Cundinamarca, los cuales se relaciona en el anexo 3. Para el análisis e interpretación de los datos geoquímicos se utilizó el software MINPET.

9.1 Análisis geoquímicos de óxidos mayores

Son elementos mayores, todos aquellos que en un análisis químico de una roca, aparecen en un porcentaje mayor al 10 % en peso. Los elementos y compuestos más abundantes en rocas ígneas, son: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O y P_2O_5 . Las muestras se clasificaron según la concentración absoluta de sílice, saturación de alúmina, clasificación TAS (Total-álcalis-sílice), estos diagramas representan la proporción de SiO_2 contra la proporción de $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, minerales normativos y series magmáticas. Además de esto se utilizó el diagrama AFM (álcalis+ hierro total + óxido de magnesio).

Los análisis geoquímicos se le realizaron a 6 muestras, tomando las más representativas de los sectores objeto de estudio Tabla 19.

TABLA 19. Relación de las muestras a las cuales se les realizo análisis geoquímicos.

TAT-001	Riolita
TAT-010	Riolita
TAT-011	Riolita
TAT-004	Diabasa
TAT-005	Diabasa
TAT-006	Riolita

TABLA 20. Resultados de Fluorescencia de rayos x, expresados en % en peso. Hierro total expresado como Fe₂O₃.

COMPUESTO	Muestras Sector Piedecuesta				Muestras Sector Aratoca		
	TAT-001	TAT-002	TAT-010	TAT-011	TAT-004	TAT-005	TAT-006
	Riolita	Riolita	Riolita	Riolita	Basalto	Basalto	Riolita
FeO	0,43	0,39	0,43	0,34	5,84	5,6	0,92
Al ₂ O ₃	16,15	14,95	14,35	15,2	14,5	16,6	13,7
BaO	0,043	0,064	0,043	0,078	0,033	0,019	0,136
CaO	0,03	0,03	0,04	0,04	8,44	3,99	1,31
Cr ₂ O ₃	0,003	0,005	0,006	0,001	0,081	0,016	0,006
Fe ₂ O ₃	2,98	2,27	2,32	2,63	10	8,66	1,74
K ₂ O	4,99	4,33	4,19	4,67	0,913	1,445	4,99
MgO	0,87	0,63	0,61	0,89	10,8	5,76	0,5
MnO	0,031	0,138	0,037	0,124	0,351	0,472	0,081
Na ₂ O	0,005	<0,001	0,012	<0,001	1,525	3,8	3,62
P ₂ O ₅	0,012	0,088	0,071	0,083	0,238	0,162	0,071
SiO ₂	71,1	74,7	76,5	73,3	47,5	51,7	72,4
SrO	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,034	0,02	0,018
TiO ₂	0,48	0,43	0,43	0,45	1,12	1,22	0,3
LOI	2,75	2,63	2,58	2,75	5,9	5,06	1,29

9.2 Análisis de intensidad de meteorización

Nesbitt y Young (1982) proponen como medida del grado de meteorización de los materiales de los perfiles el Índice Químico de Alteración (CIA, por sus siglas en inglés, chemical index alteration), basado en la proporción molecular:

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)} \times 100$$

Donde CaO es la cantidad de CaO incorporado en la fracción de silicato de la roca. Asumiendo un comportamiento inmóvil del Al, cambios en el CIA reflejan cambios en la proporción de feldespatos y de varios minerales de arcilla desarrollados en los perfiles. Altos valores de CIA reflejan la pérdida de elementos móviles relativos a los constituyentes residuales estables durante la meteorización, y bajos valores de CIA indican la ausencia de alteración química. Las rocas y minerales frescos sin importar su composición tienen valores similares de CIA alrededor de 40-50, en tanto que muestras completamente meteorizadas tienen valores de CIA alrededor de 100 (Fedo et al., 1995).

Se realiza el cálculo de la norma CIA, con la cual se determina el grado de meteorización de las rocas que son objeto de estudio. De acuerdo a la ecuación anterior se presenta el índice de meteorización para cada muestra.

TABLA 21. Relación de índice químico de meteorización (CIA), de las rocas estudiadas.

CIA	SECTOR DE PIEDECUESTA				SECTOR ARATOCA		
	TAT-001	TAT-002	TAT-010	TAT-011	TAT-004	TAT-005	TAT-006
	<i>Riolita</i>	<i>Riolita</i>	<i>Riolita</i>	<i>Riolita</i>	<i>Basalto</i>	<i>Basalto</i>	<i>Riolita</i>
	76.26	77.41	77.18	76.34	57.13	64.25	58

Con base a los resultados de la tabla 21, se puede concluir que las rocas con mayor grado de alteración son las riolitas del sector de Piedecuesta, en comparación con las rocas del sector de Aratoca, y también debido a la composición mineralógica que presentan las riolitas.

9.3 Composición Normativa

La norma CIPW (propuesta por W. Cross, J.P. Iddings, L.V. Pirsson y H.S. Washington) la cual se utiliza para calcular la composición mineral de las rocas

como si el magma fuera anhídrido (agua es tratada como una fase aparte) y a baja presión. La norma CIPW convierte la composición química de una roca ígnea en una roca con composición química ideal. Esto frecuentemente revela similitudes en rocas que tienen distintas modas (asociación mineral observada).

Con base en los datos de la tabla 19, se realizan clasificaciones normativas en las que, a partir de los porcentajes en peso de los óxidos y siguiendo unas determinadas reglas (CIPW), se establece una composición mineralógica ideal, mediante la cual se clasifica la roca, (Tabla 22).

TABLA 22. Composición Normativa de las muestras analizadas en los sectores de Piedecuesta y Aratoca.

	SECTOR PIEDECUESTA				SECTOR ARATOCA		
	TAT-001	TAT-002	TAT-010	TAT-011	TAT-004	TAT-005	TAT-006
<i>Quartz</i>	52,17	58,56	60,2	55,5	3,22	6,52	29
<i>Orthoclase</i>	30,37	26,12	25,01	28,23	5,33	8,59	29,59
<i>Plagioclase*</i>	0,11	0,42	0,16	0,34	42,4	51,19	36,8
<i>Diopside*</i>	0	0	0	0	7,95	0,00	0
<i>Hypersthene</i>	2,23	1,6	1,53	2,26	24,11	16,44	1,24
<i>Olivine*</i>	0	0	0	0	0	0,00	0
<i>Nepheline</i>	0	0	0	0	0	0,00	0
<i>Leucite</i>	0	0	0	0	0	0,00	0
<i>Magnetite</i>	0,098	0,47	0,26	0,2	14,32	12,63	2,36
<i>Ilmenite</i>	0,93	0,83	0,82	0,87	2,1	2,33	0,57
<i>Apatite</i>	0,028	0,2	0,16	0,19	0,54	0,38	0,16
<i>Others</i>	14,03	12,62	12,15	13,06	0	1,93	0,24
<i>LOI</i>	2,75	2,63	2,58	2,75	5,9	5,06	1,29

9.4 Concentración de sílice

Atendiendo solo el contenido de sílice, se establecen cuatro grupos de rocas ígneas:

Rocas ácidas	> 66% SiO ₂
Rocas Intermedias	66% - 52% SiO ₂
Rocas Básicas	52% - 45% SiO ₂
Rocas ultrabásicas	< 45% SiO ₂

Según lo descrito anteriormente y basándonos en la tabla 22, las riolitas se clasifican como rocas *ácidas* y las diabasas como rocas *básicas*.

9.5 Concentración de alúmina

El Al₂O₃ es el segundo mineral más abundante en la mayoría de las rocas magmáticas, por lo que es de gran utilidad en la clasificación de rocas félsicas. El índice de saturación de alúmina se define como la relación molecular Al₂O₃ / (K₂O+Na₂O+CaO), clasificando las rocas ígneas en peraluminicas, metaluminicas y peralcalinas según el contenido de alúmina.

TABLA 23. Clasificación de las rocas de acuerdo al índice de saturación de alúmina.

Índice de Saturación	Nombre	TAT-001	TAT-002	TAT-010	TAT-011	TAT-004	TAT-005	TAT-006
Al ₂ O ₃ > CaO+Na ₂ O+K ₂ O	Peraluminicas	X	X	X	X		X	
Al ₂ O ₃ < CaO+Na ₂ O+K ₂ O	Metaluminicas					X		X
Al ₂ O ₃ < Na ₂ O+K ₂ O	Peralcalinas							

En las rocas peraluminicas (Al₂O₃ > CaO+Na₂O+K₂O), el exceso de alúmina se acomoda en micas, especialmente moscovita, biotita rica en aluminio y minerales accesorios tales como cordierita, silimanita, andalucita, corindón, turmalina, topacio, granate. Según la clasificación de saturación de alúmina y según lo establecido en el capítulo de petrografía se puede concluir que las riolitas (TAT-001, TAT-002, TAT-010, TAT-011) del área del sector de Piedecuesta coinciden con estas afirmaciones. Además de esto la muestra (TAT-005) correspondiente al

xenolito basáltico siendo una roca peraluminica embebido en la riolita de la muestra (TAT-006), la cual corresponde a una muestra metaluminica y ambas perteneciendo al sector de Aratoaca, y haciendo una comparación entre estas, nos indica que estas fueron formadas en diferentes ambientes tectónicos, y de la misma manera podemos concluir que el xenolito basáltico y el dique basáltico son diferentes tanto composicionalmente como en saturación de alúmina, y además en el ambiente de formación.

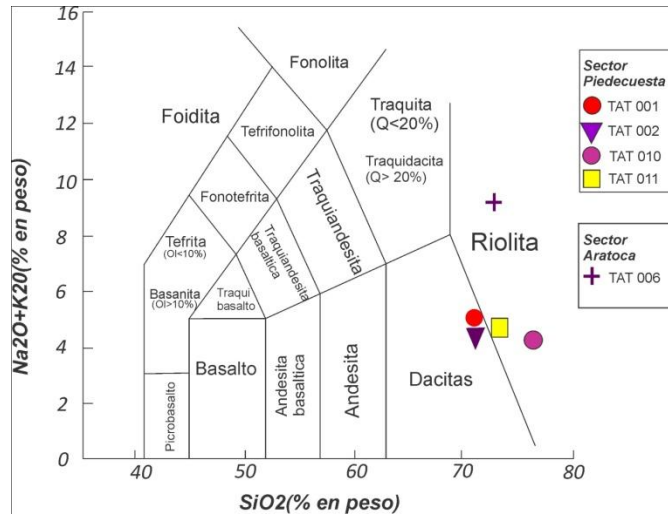
En las rocas metaluminicas ($Al_2O_3 < CaO + Na_2O + K_2O$), la deficiencia de alúmina se acomoda en la hornblenda, biotita pobre en aluminio, titanita. De acuerdo a lo anterior la muestra TAT-004 y TAT-006 correspondientes al sector de Aratoaca, coinciden con estas afirmaciones.

9.6 Clasificación TAS (Total-alkalis-silica)

Esta clasificación es utilizada para rocas volcánicas en la se enfrenta en un diagrama XY el porcentaje en peso del SiO_2 en las abscisas, frente a la suma de Na_2O y K_2O en ordenadas. De acuerdo a esta clasificación se obtienen tres tipos diferentes de rocas. Según esto podemos concluir que las muestras TAT-010, TAT-011, TAT-006 se encuentran en el rango de riolitas concordando con la petrografía realizada, además de esto las muestras TAT-001, TAT-002 clasificadas en petrografía como riolitas ocupan en el diagrama TAS el rango de dacitas; esta clasificación no es representativa debido a la perdida de alkalis que han sufrido estas rocas durante procesos de alteración hidrotermal y supergénica (Figura 37).

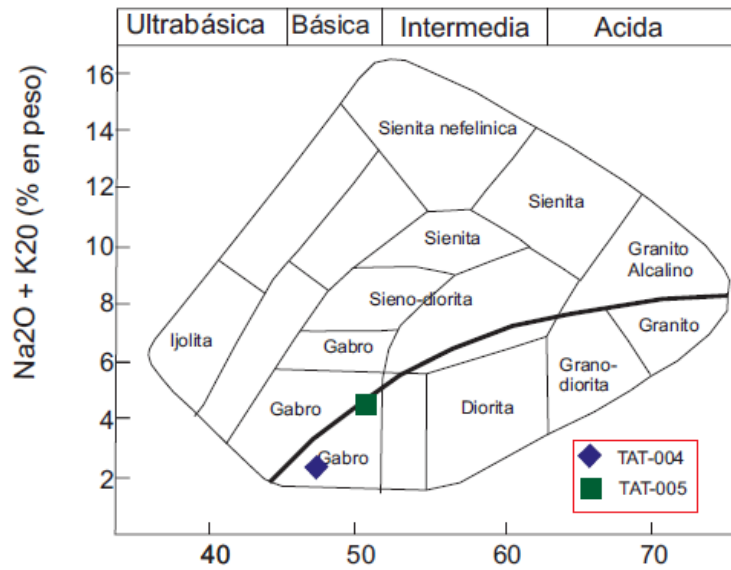
La muestra TAT-004 y la muestra TAT-005 se encuentran en el rango de las diabasas (gabro), siendo esto acorde con la clasificación petrográfica (Figura 38).

FIGURA 37. Clasificación química y nomenclatura de rocas volcánicas, usando el diagrama de proyección de los álcalis versus sílice (TAS).



Fuente: Le Maitre et al (1989).

FIGURA 38. Clasificación química y nomenclatura de rocas plutónicas, usando el diagrama de proyección de los álcalis versus sílice (TAS). La línea curva gruesa subdivide las rocas en alcalinas (parte superior) y subalcalinas (parte inferior).

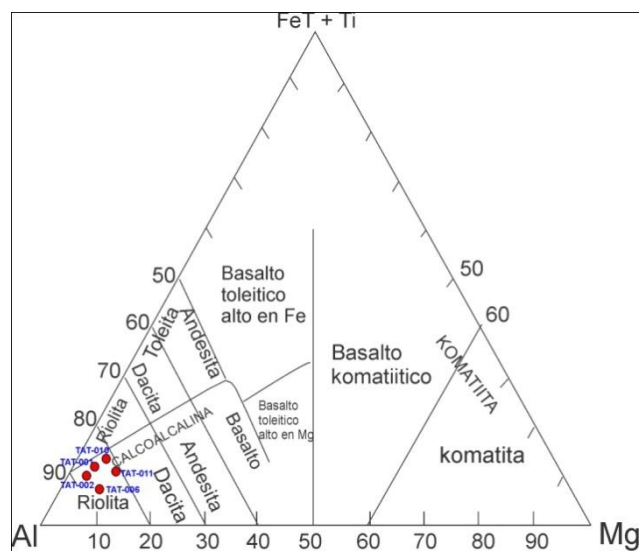


Fuente: Rollinson, 1993

9.7 Clasificación de rocas ígneas utilizando cationes

Para recalculer la composición química de la roca total (dada en % en peso), con el propósito de expresarlas en cationes, cada valor del óxido se divide por el peso molecular del óxido y se multiplica por el número de cationes en la unidad de formula. Para obtener milcationes, se multiplican las proporciones catiónicas por 1000. El porcentaje catiónico se calcula tomando como 100% la suma de las proporciones catiónicas. (Tomado de Guía de Petrología Ignea, Mantilla, 2003). De acuerdo a lo anterior se procede al recalcu de la composición química de la roca total, en el cual se hace la relación de FeT, Ti, Mg y Al, con el fin de clasificarla según su porcentaje catiónico, como resultado se obtiene dos tipos de rocas; riolitas y basaltos, correspondiendo uno de estos a un basalto toleítico rico en magnesio (Figura 39).

FIGURA 39. Clasificación de rocas volcánicas según porcentajes catiónicos de Al, (FeT + Ti) y Mg, mostrando los campos toleíticos, calcoalcalinos y komatiíticos.



Fuente: Apoyado en Rickwood, 1989.

9.8 Discriminación de series subalcalinas y alcalinas

9.8.1 Consideraciones preliminares

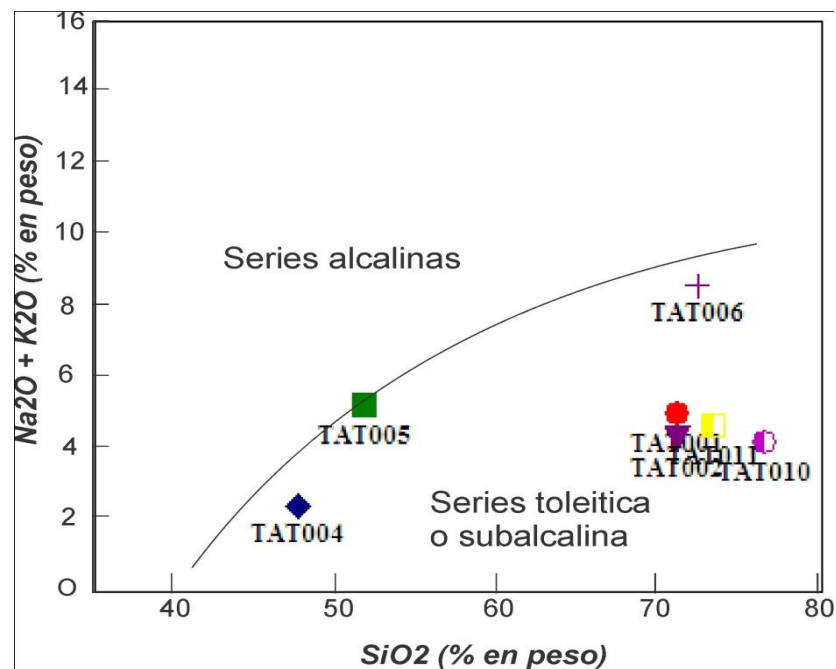
La teoría de la tectónica de placas y las investigaciones en el magmatismo actuales demuestran que algunas series de rocas tienden a aparecer en ciertos ambientes tectónicos pero no en otras, aunque no existe una correlación directa (Carmichael et al., 1974). En el marco de una placa tectónica se reconocen dos ambientes para la generación y el emplazamiento de rocas ígneas: en los márgenes de placas y en el interior de las placas. Así mismo, pueden ser establecidos ocho ambientes tectónicos donde aparecen diferentes series de magma (Condie, 1989; Philpotts, 1990; Wilson, 1989). Los márgenes de placas destructivas (convergentes) consisten en arcos de isla océano-océano y arcos continente-océano (márgenes continentales activos); los márgenes de placas constructivas (divergentes) incluyen las dorsales centro oceánicas y centros emisores en retroarcos (cuencas de retroarco), ambos en los bordes de placas. En ambientes geodinámicos de intraplaca, los hot spots oceánicos (islas oceánicas) y hot spots continentales (provincias de coladas basálticas continentales y el principio del rift continental) pertenecen a un ambiente geodinámico estable, mientras que el rift continental y el rift intramontañoso indican ambientes tectónicos tensionales.

Los magmas de las series calcoalcalinos están totalmente restringidos a ambientes geodinámicos relacionados con subducción, esto significa, que son más típicos de los arcos maduros y de los márgenes continentales activos. Los magmas toleíticos aparecen típicamente en arcos jóvenes inmaduros, o cerca de las fosas en arcos más maduros.

Para la clasificación de la serie magmática de las rocas objeto de estudio, se tiene en cuenta el diagrama de proyección de los álcalis ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ w%) versus sílice (SiO_2 w%), este diagrama se subdivide en dos; series alcalinas y series toleítica o

subalcalina, esta última presentando otras subdivisiones. Esta clasificación se realiza con el fin de determinar el ambiente de formación en el cual se dieron las rocas que están siendo analizadas. Se grafican las muestras en el diagrama (Figura 40) clasificándose todas en el rango de las series toleítica o subalcalina. Con base a estos resultados proseguimos a graficar las muestras en el diagrama que hace distinción entre las series alcalinas y subalcalinas (Figura 40).

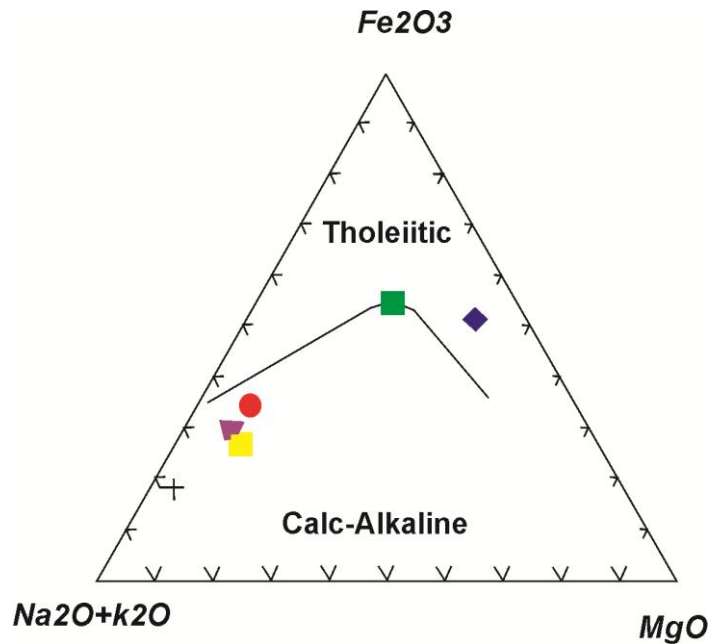
FIGURA 40. Subdivisión de las rocas ígneas en series (línea gruesa). Según Irvine y Baragar (1971), apoyado en el diagrama de proyección de los álcalis versus sílice.



Fuente: Rollinson, 1993.

Además de esto se grafican en el diagrama (Figura 41), con el fin de hacer la distinción entre las serie alcalina y toleítica, cayendo los diabasas en el rango de la serie toleítica y las riolitas en el rango de la serie calcoalcalinas.

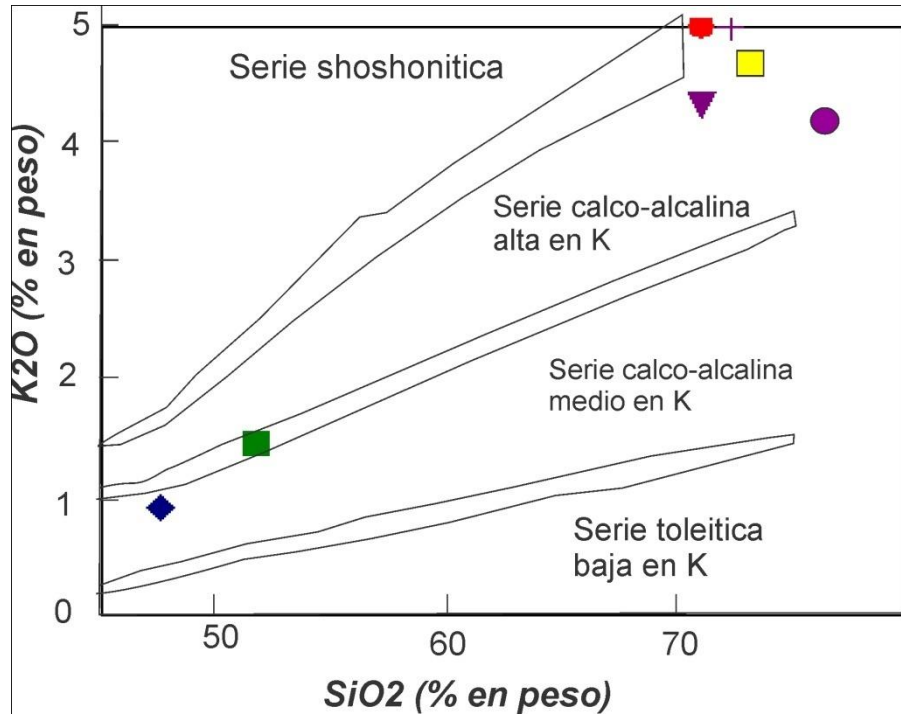
FIGURA 41. Diagrama de distinción entre la serie toleítica y calco-alcalina.



Fuente: Irvine y Baragar (1971).

En el diagrama (Figura 41) se aprecia una tendencia intermedia entre el campo calco-alcalino y toleítico. Se observa que las muestras TAT-004 Y TAT-005 presentan mayores valores de FeO, cayendo en el campo Toleítico, y las muestras TAT-001, TAT-002, TAT-010, TAT-006 presentan menores valores de FeO cayendo en el campo de la serie calcoalcalina.

FIGURA 42. Subdivisión de las rocas subalcalinas, usando el diagrama de proyección K₂O versus SiO₂. Las líneas son los campos en los cuales caen los límites entre series.

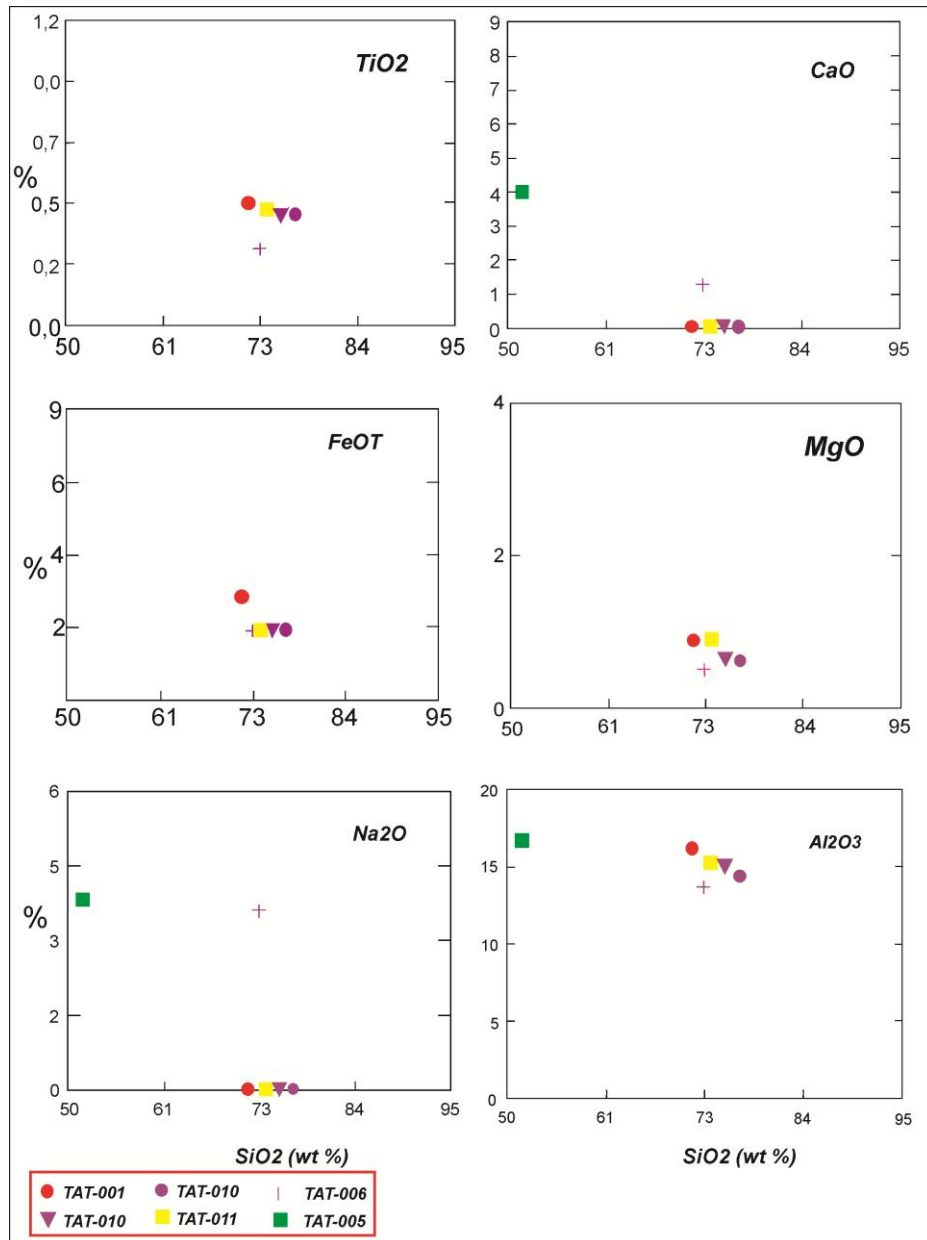


Fuente: Rickowood 1989

Las riolitas porfíricas de los sectores Piedecuesta y Aratoca caen en el campo de la serie calcoalcalina alta en potasio, permitiendo considerar el ambiente de formación de estas litologías riolíticas en un contexto de subducción de margen continental activo. Las diabasas aflorantes del sector Aratoca (tramo Piedecuesta-Panachi), son consideradas de afinidad calco-alcalina media en potasio, coincidiendo químicamente con los xenolitos presentes en las riolitas descritas previamente en éste mismo tramo. Estas características, junto a los rasgos geológicos regionales, permiten sugerir un ambiente de corteza continental adelgazada (ambiente extensivo continental de suprasubducción).

9.9 Diagramas de variación de Harker

FIGURA 43. Diagramas de variación de Harker, óxidos vs sílice, para las rocas de los sectores de Piedecuesta y Aratoca.



Fuente: Rollinson 1993.

Los diagramas Harker muestran la relación de los elementos mayoritarios con respecto al SiO₂. Se observa que el contenido de Al₂O₃, Na₂O, MgO, FeO, TiO y CaO muestran una tendencia decreciente con respecto al contenido de SiO₂, lo que indica que las rocas analizadas han presentado procesos de fraccionamiento a partir de un magma en solidificación. Una cristalización fraccionada es un proceso de evolución de una roca ígnea, la cual a partir de este va a ser la causa de la tendencia de un diagrama de variación; esta variación está normalmente indicada por la presencia de fenocristales en las rocas como es el caso de las riolitas del sector de Aratoca y del sector de Piedecuesta. Si la tendencia de estos diagramas de variación están controladas por las composiciones de los fenocristales es muy posible inferir que la roca está controlada por un fraccionamiento cristalino y se puede asociar a la génesis y el comportamiento de la temperatura de la roca durante su formación.

9.10 Diagramas Geoquímicos de Elementos Traza.

La Tabla 24 hace referencia a los datos geoquímicos reportados por el laboratorio ALS, los cuales serán normalizados respecto al condrito, según Sun and MacDonough (1989).

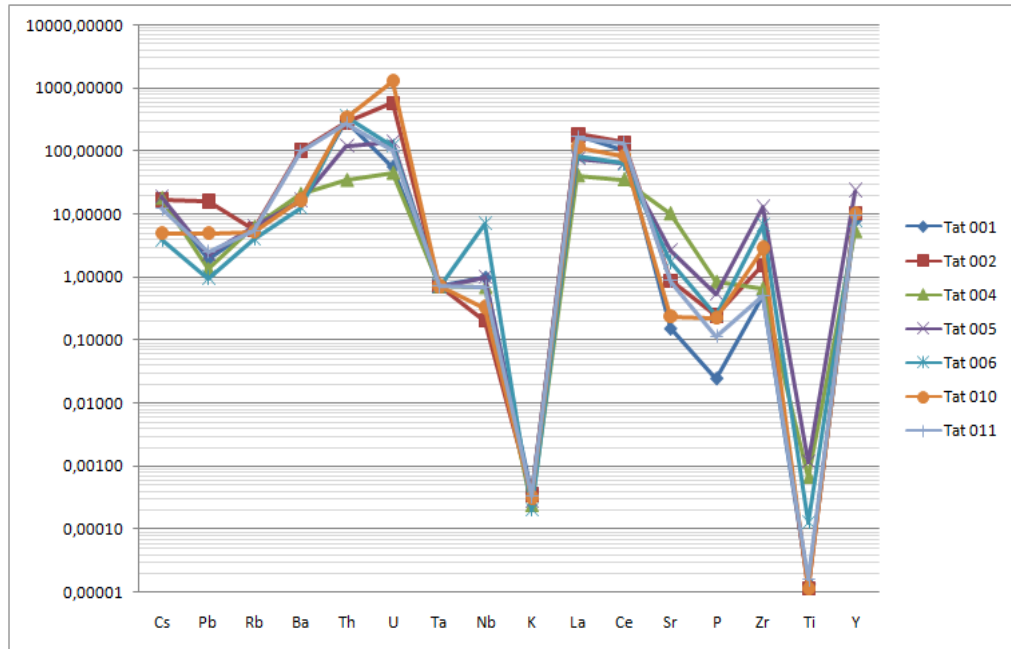
TABLA 24. Resultados análisis químicos ICP- MS expresados en ppm y % en peso.

Traza	TAT-001	TAT-002	TAT-010	TAT-011	TAT-004	TAT-005	TAT-006	Traza	TAT-001	TAT-002	TAT-010	TAT-011	TAT-004	TAT-005	TAT-006
Ag	0,01	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	<0,01	Mo	0,23	5,44	0,29	0,24	0,87	0,84	0,27
Al %	0,42	0,4	0,38	0,39	3,97	3,49	0,46	Na %	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,05	0,06	0,03
As	1,7	5,8	4,1	1,1	0,1	0,4	0,1	Nb	0,24	<0,05	0,08	0,17	0,17	0,25	1,76
Au	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	Ni	0,4	1,3	1,2	0,4	253	49,7	1,5
B	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	P	30	300	270	140	1020	670	300
Ba	40	250	40	240	50	40	30	Pb	4,7	39,9	12	6,3	3,3	5,7	2,4
Be	0,22	1,2	1,71	0,63	1,83	2,59	0,44	Rb	13,6	13,4	12,1	12,8	14,5	15,1	9,5
Bi	0,04	0,07	0,06	0,02	0,05	0,25	0,03	Re	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Ca %	<0,01	<0,01	0,01	0,01	2,49	2,33	0,74	S %	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	<0,01
Cd	<0,01	0,02	0,02	0,16	0,03	0,02	0,02	Sb	0,08	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,17	<0,05
Ce	63,1	82,7	50,9	80,8	21,8	40	39,2	Sc	1,1	1,8	1,4	1,1	6,6	21,7	2,2
Co	0,4	4,1	1,2	0,5	29	29,8	1,7	Se	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,7	<0,2
Cr	1	1	2	2	261	115	6	Sn	<0,2	0,2	<0,2	<0,2	0,5	2,2	0,9
Cs	3,13	3,21	0,93	2,31	3,36	3,57	0,74	Sr	1,1	6,3	1,7	6,3	74	19,7	12,5
Cu	2,2	11,1	6,2	3,6	3	3,4	1,2	Ta	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01
Fe %	0,97	0,83	0,86	0,78	4,53	5,74	1,06	Te	0,02	0,07	<0,01	<0,01	0,02	<0,01	<0,01
Ga	0,93	1,71	1,78	1,06	10,85	23,7	3,59	Th	8,8	8,4	9,7	8	1	3,5	10,3
Ge	0,06	0,07	0,06	0,07	0,34	0,45	0,09	Ti %	0,006	<0,005	<0,005	0,007	0,298	0,509	0,057
Hf	0,08	0,09	0,11	0,08	0,48	1,74	0,36	Tl	0,12	0,19	0,08	0,27	0,17	0,08	0,05
Hg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	U	0,45	4,66	10,2	0,83	0,36	1,13	0,98
In	<0,005	0,005	0,006	<0,005	0,13	0,136	0,008	V	5	4	4	3	86	110	11
K %	0,2	0,19	0,17	0,18	0,13	0,15	0,11	W	0,47	0,05	<0,05	0,32	0,31	2,67	0,22
La	42,5	43,6	27,5	39,9	9,7	18	19,4	Y	12,45	16,4	16	14,6	8,4	37,4	12,75
Li	0,3	0,5	1,2	0,4	145,5	168,5	14,6	Zn	2	6	11	2	256	160	26
Mg %	0,02	0,01	0,02	0,02	5,07	3,39	0,24	Zr	1,7	2,1	2,9	1,7	12,4	50	5
Mn	41	976	208	769	1930	3440	581								

TABLA 25. Elementos traza normalizados según el condrito 1, Sun and MacDonough (1989).

	Tat 001	Tat 002	Tat 004	Tat 005	Tat 006	Tat 010	Tat 011
Cs	16,64894	17,07447	17,87234	18,98936	3,93617	4,94681	12,28723
Pb	1,90283	16,15385	1,33603	2,30769	0,97166	4,85830	2,55061
Rb	5,86207	5,77586	6,25000	6,50862	4,09483	5,21552	5,51724
Ba	16,59751	103,73444	20,74689	16,59751	12,44813	16,59751	99,58506
Th	303,44828	289,65517	34,48276	120,68966	355,17241	334,48276	275,86207
U	56,25000	582,50000	45,00000	141,25000	122,50000	1275,00000	103,75000
Ta	0,71429	0,71429	0,71429	0,71429	0,71429	0,71429	0,71429
Nb	0,97561	0,20325	0,69106	1,01626	7,15447	0,32520	0,69106
K	0,00037	0,00035	0,00024	0,00028	0,00020	0,00031	0,00033
La	179,32489	183,96624	40,92827	75,94937	81,85654	116,03376	168,35443
Ce	103,10458	135,13072	35,62092	65,35948	64,05229	83,16993	132,02614
Sr	0,15152	0,86777	10,19284	2,71350	1,72176	0,23416	0,86777
P	0,02459	0,24590	0,83607	0,54918	0,24590	0,22131	0,11475
Zr	0,51680	1,55039	0,66150	12,91990	6,71835	2,84238	0,51680
Ti	0,00001	0,00001	0,00067	0,00114	0,00013	0,00001	0,00002
Y	7,92994	10,44586	5,35032	23,82166	8,12102	10,19108	9,29936

FIGURA 44. Aragnigrama expresando los elementos traza.



Fuente: Pearce (1983).

Las rocas del área de estudio muestran un enriquecimiento en los elementos incompatibles LILE tales como (K, Sr, Cs, Rb, Ba) con respecto a los elemento de HFS, indicando que las muestras presentan un patrón de arco volcánico.

9.11 Tierras Raras (REE)

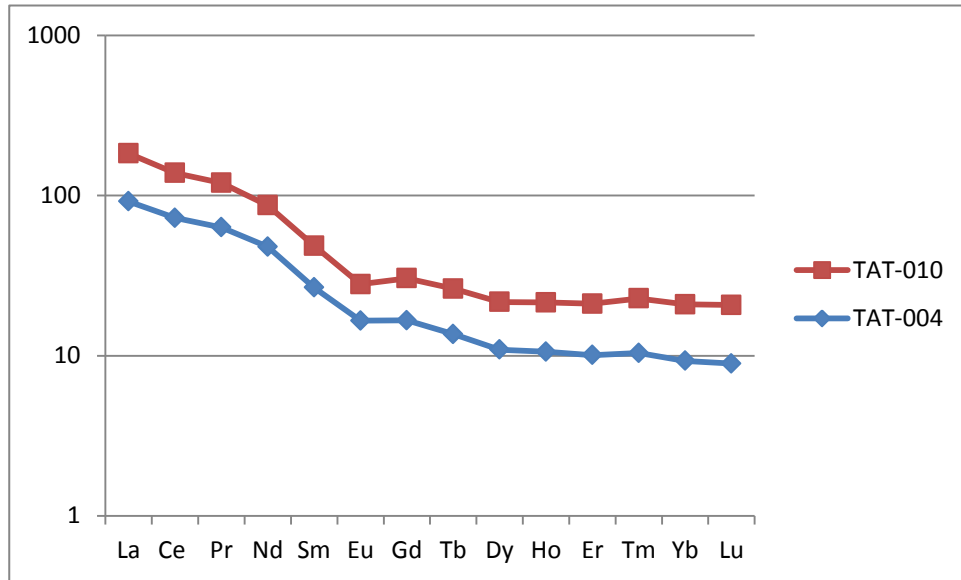
Consideraciones previas

Las tierras raras (REE) son los elementos traza mas utilizados y tienen importantes implicancias en petrología ígnea, sedimentaria y metamórfica. Las REE comprenden la serie de elementos metálicos con número atómico entre 57 y 71 (La → Lu). Además, el elemento Y con un radio iónico similar al del Ho es a

veces incluido. Las REE tienen entre sí propiedades químicas y físicas similares. Esto viene del hecho de que ellas forman iones estables de carga 3+ de similar tamaño. Las pequeñas pero significativas diferencias en el comportamiento geoquímico son debidas al constante decrecimiento observado en el tamaño iónico a medida que aumentamos el número atómico (“contracción de los lantánidos”). Estas pequeñas diferencias en tamaño y comportamiento son aprovechadas por procesos petrológicos, que conllevan al fraccionamiento de las REE. Este último es el fenómeno usado en geoquímica para estudiar la génesis de fuentes de rocas (magmas) y para descifrar los procesos petrológicos.

Las concentraciones de las REE en las rocas son usualmente normalizadas a una referencia estándar, la que comúnmente consiste en los valores de los meteoritos condriticos. Estos meteoritos han sido elegidos ya que se piensa que están relativamente no-fraccionados desde la formación del sistema solar. Sin embargo, las concentraciones de las REE en el sistema solar son muy variables debido a las diferentes estabilidades de los distintos átomos. Las REE con número atómico par son más estables y por ende más abundantes, mientras que aquellas con número atómico impar son más inestables, por lo que se forma un patrón de zig-zag en un diagrama de composición-abundancia.

FIGURA 45. Aragnigrama expresando los elementos de las tierras raras normalizados según el condrito 1.



Fuente: Sun and MacDonough (1989).

Como se puede observar en la Figura 41 las dos muestras presentan una anomalía negativa en el Eu, lo que puede indicar que existe un menor porcentaje de plagioclasa o una mayor concentración de plagioclasas albiticas. Las dos muestras presentan patrones similares, con un ligero enriquecimiento en LREE.

10 QUIMICA MINERAL

10.1 Consideraciones Previas

En los análisis de microsonda electrónica, el bombardeo de electrones sobre la muestra genera rayos X que son exhaustivamente analizados. Así, con la longitud de onda o la intensidad de las líneas en el espectro de rayos X, los elementos presentes pueden ser identificados y sus concentraciones estimadas. El uso de un haz de electrones muy finamente focalizado consigue seleccionar un área muy pequeña para ser analizada. Los electrones incidentes normalmente tienen una energía cinética de 10-30 KeV (un eV es la energía asociada con un cambio de 1 voltio en el potencial de un electrón), y penetra la muestra a una profundidad del orden de 1 μm , extendiéndose lateralmente a una distancia similar. Esto impone un límite inferior para el volumen analizado y por tanto para la resolución espacial. La mejora de la resolución mediante la reducción de la energía del electrón es generalmente impracticable ya que éstos deben poseer suficiente energía para conseguir una excitación eficiente de rayos X.

En los análisis de microsonda, el espectro de rayos X es grabado con un espectrómetro de dispersión de longitudes de onda (*wavelength-dispersive spectrometers, WDS*), o de dispersión de energía (*energy-dispersive spectrometers, EDS*). El primero utiliza un cristal difractor que actúa como un monocromador, seleccionando una longitud de onda cada vez, dependiendo del ángulo de incidencia de los rayos X. Muchos instrumentos tienen dos o más espectrómetros con cristales que cubren diferentes rangos de longitudes de onda. Los espectrómetros de energía dispersiva emplean detectores complementarios de rayos X en estado sólido y para algunos objetivos han reemplazado a los WDS. Los EDS graban el espectro completo simultáneamente, se analiza la altura del pulso electrónico para tipos de pulsos producidos en el detector de acuerdo con la energía de los rayos X.

La platina portadora de muestras aloja normalmente varias muestras y estándares. Las muestras son siempre redondas o rectangulares con dimensiones típicas del orden de 2 o 3 cm. Los patrones pueden ser montados individualmente o agrupados en soportes de tamaño normalizado. Se requiere que las muestras sean gruesas y estén pulidas, y que sean situadas en un sitio plano. Lo normal es fijar el foco del microscopio óptico acoplado y usar un fino ajuste de la platina en la dirección z para enfocar. Esto asegura que la posición de la fuente de rayos X es constante, lo cual es especialmente importante para espectrómetros de dispersión de longitudes de onda. En la actualidad, mediante ordenadores se controla la posición x e y, y los movimientos en z. Esto posibilita el análisis de un gran número de puntos sin intervención del operador, usando coordenadas previamente almacenadas.

10.2 Datos obtenidos mediante análisis de microsonda electrónica

Los resultados obtenidos consisten de una lista de porcentaje en peso de los óxidos principales que constituyen los diferentes minerales. Estos datos se presentan a continuación en forma de tablas, donde se muestran los respectivos porcentajes, tomando 4 puntos de la placa los cuales pertenecen a plagioclasas. Para la clasificación química de los feldespatos se utilizó el diagrama ternario para los óxidos de K_2O , CaO y Na_2O y el diagrama de clasificación de feldespatos disponible en el software para tratamiento de datos mineralógicos y petrológicos MINPET 2.02.

FIGURA 46.Ubicación de los puntos analizados con microsonda electrónica en la muestra TAT-006, con sus respectivos análisis.

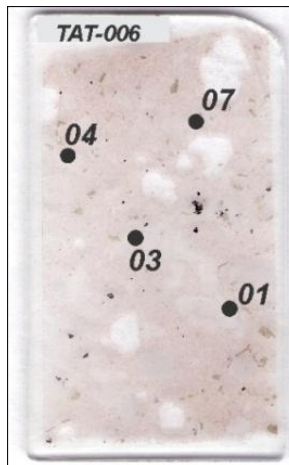


FIGURA 47. Microfotografía mostrando los sitios en los cuales se realizó análisis de química mineral a las plagioclasas, a la muestra TAT-006, análisis 01.

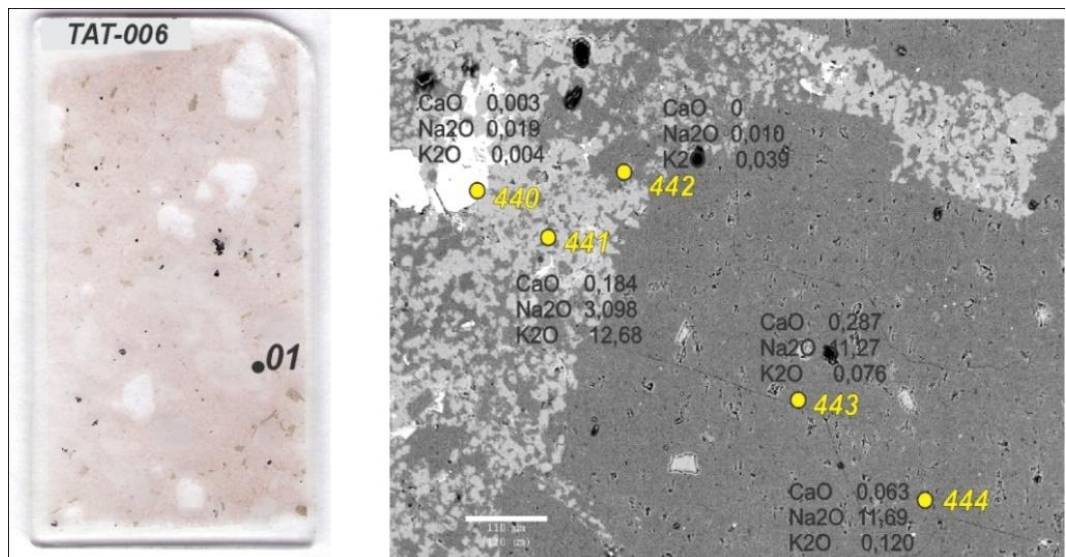
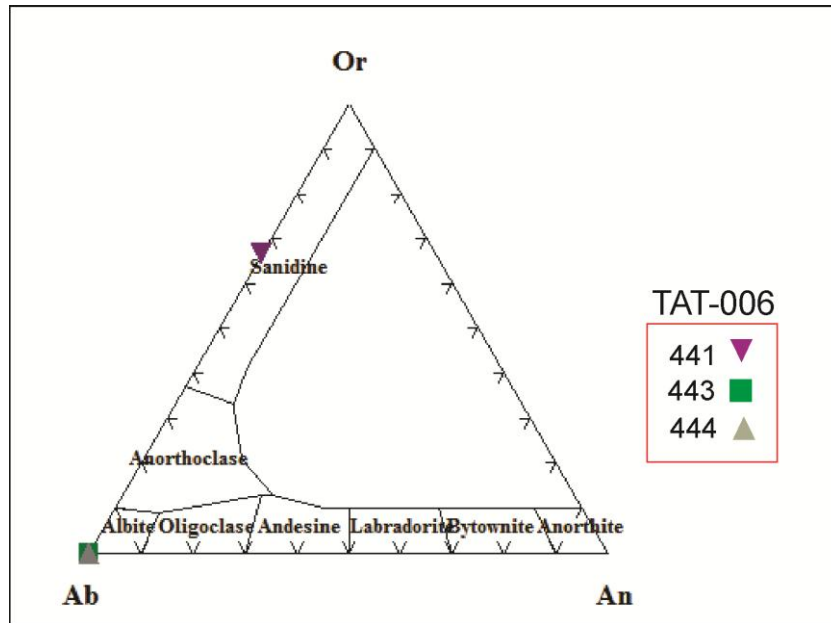


TABLA 26. Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en la Muestra TAT-006, análisis 01.

Punto	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
440	0,063067	4,05851	0,868012	85,4225	0,133074	-0,00527	0,003501	0,019726	0,00402
441	65,0134	0,019499	18,4073	0,219943	0,01246	0,011459	0,184442	3,09867	12,6856
442	96,1699	0,015308	0,160044	-0,01195	0,043041	-0,00038	-0,0025	0,01025	0,039112
443	67,9769	0,003875	18,9845	0,007118	0,015902	0,004863	0,287076	11,2731	0,072665
444	68,7755	-0,0168	19,4918	0,032042	0,003684	0,008727	0,063336	11,6998	0,120327

FIGURA 48. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 01.



Fuente: Troger 1955

En la Figura 48 se puede observar que la mayoría de datos químicos de la tabla 26 graficados caen hacia el extremo sódico clasificando las plagioclasas como albita, con una variación en su concentración en uno de los puntos,

específicamente en el punto 441 el cual se clasifica como feldespato tipo sanidina.

FIGURA 49. Microfotografía mostrando los sitios en los cuales se realizó análisis de química mineral a las plagioclasas, a la muestra TAT-006, análisis 03.

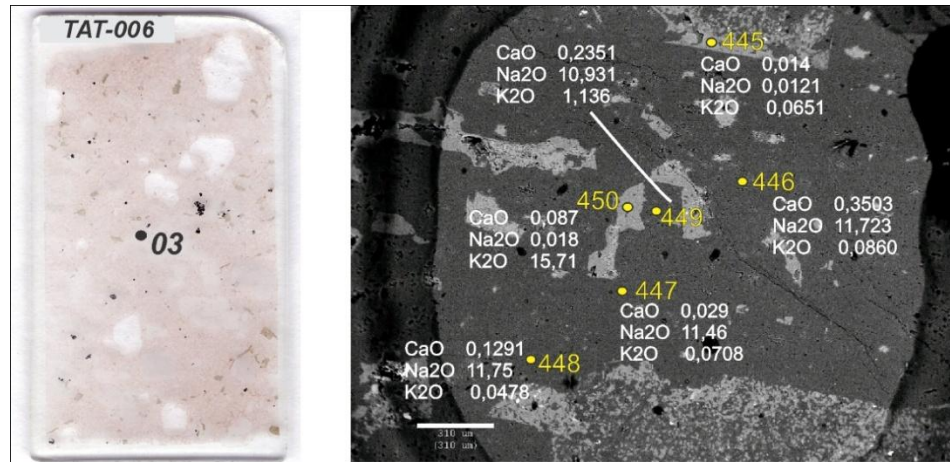
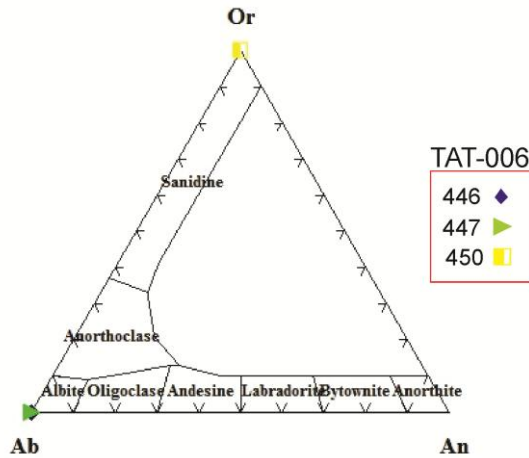


TABLA 27. Composición química en porcentaje en peso de los elementos hallados en la Muestra TAT-006, análisis 03.

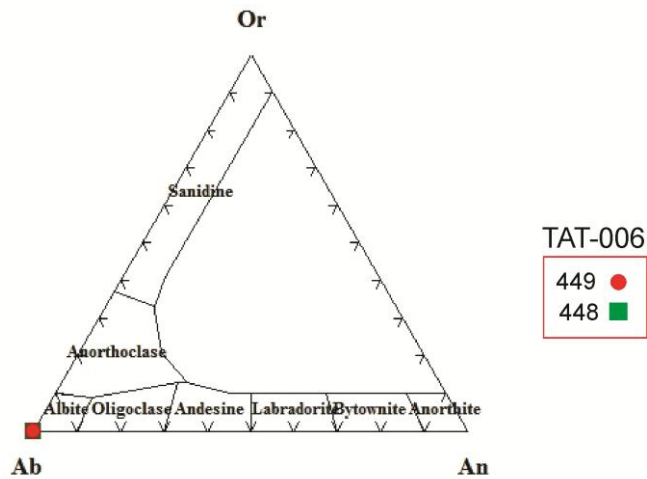
Punto	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O
445	95,7181	0,005541	0,162608	0,04065	0,029764	-0,00212	0,014012	0,012185	0,065563
446	67,4027	-0,00614	19,0834	0,03796	0,025384	-0,00534	0,350379	11,723	0,086082
447	68,6013	-0,00388	19,089	0,013054	-0,0347	-0,0041	0,293678	11,4683	0,070822
448	68,9503	-0,01325	19,4035	0,051032	-0,01157	0,006294	0,129166	11,7558	0,047854
449	67,7505	0,005816	20,8198	0,014231	0	0,020787	0,235165	10,9311	1,13622
450	60,912	0,009451	17,4221	0,031919	0,003984	-0,0021	0,087269	0,188229	15,7166

FIGURA 50. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 03.



Fuente: Troger 1955

FIGURA 51. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 03.



Fuente: Troger 1955

Se puede observar que los datos químicos de la tabla 26 graficados se ubican hacia el extremo sódico clasificando las plagioclasas como albitas, a excepción del punto 450 que se clasifica como un feldespato de tipo ortoclasa (Figuras 50 y 51) y de acuerdo a su ubicación en la figura 49, en donde se posiciona hacia el centro del cristal pudiendo concluir que estas plagioclasas presentan una textura antipertítica.

TABLA 28. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 04.

Punto	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O
451	55,417	0,030404	23,8454	0,647179	3,56833	0,603208	0,836754	6,05102	2,66405
452	69,5228	0,010987	19,9732	0,016613	-0,00643	0,006275	0,640143	11,3425	0,073715
453	68,3043	0,002261	19,9923	0,029661	0,015492	0,010523	0,407689	11,2036	0,315628
454	49,3817	0,002267	19,2794	0,067487	0,108295	0,092084	6,36091	10,7671	0,48777
455	69,1812	0,006141	19,2685	-0,03561	0,026213	0,002231	0,370611	11,5044	0,141153

FIGURA 52. Microfotografía mostrando los sitios en los cuales se realizó análisis de química mineral a las plagioclasas, a la muestra TAT-006, análisis 04.

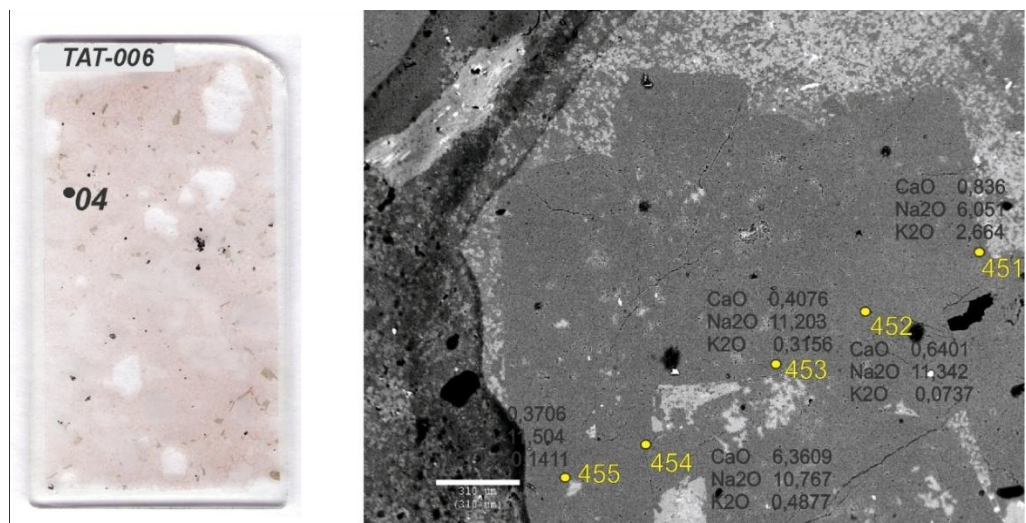
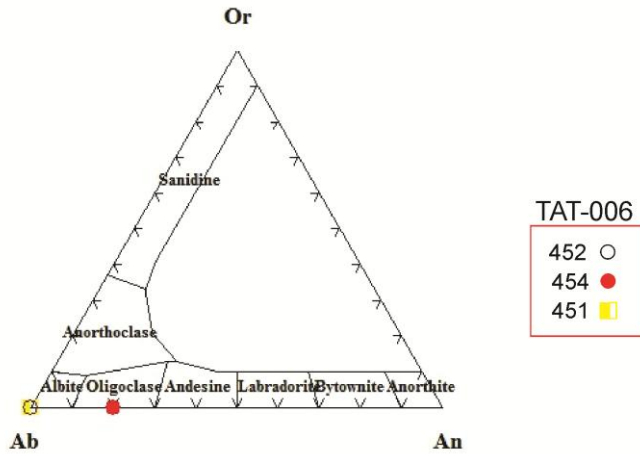
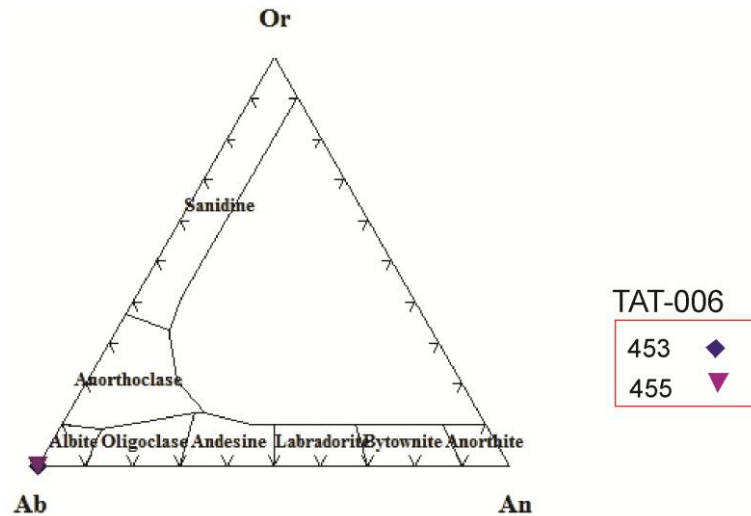


FIGURA 53. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 04.



Fuente: Troger 1955

FIGURA 54. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 04.



Fuente: Troger 1955

Se puede observar que los datos químicos de la tabla 28 graficados se ubican hacia el extremo sódico indicando que las plagioclasas son de tipo albita (Figura 53 y 54).

FIGURA 55. Microfotografía mostrando los sitios en los cuales se realizó análisis de química mineral a las plagioclasas, a la muestra TAT-006, análisis 07.

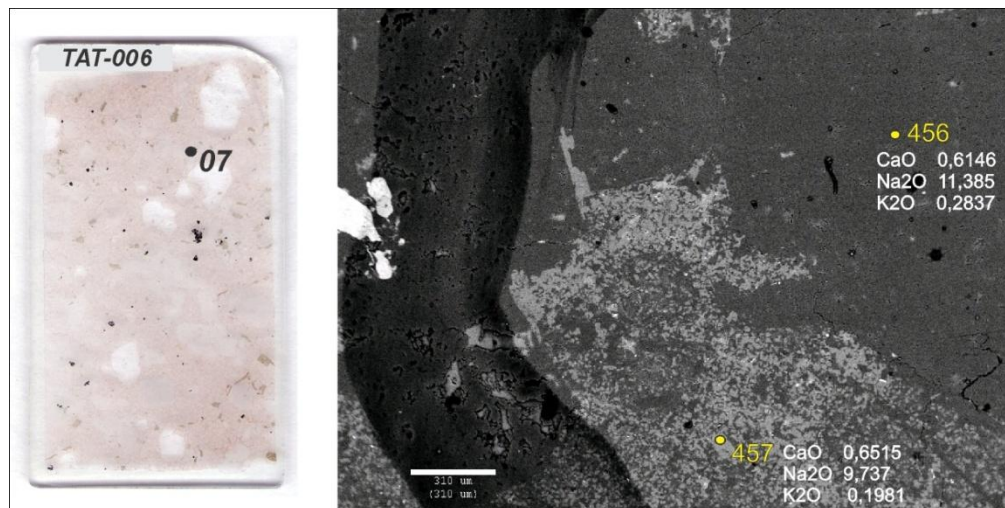
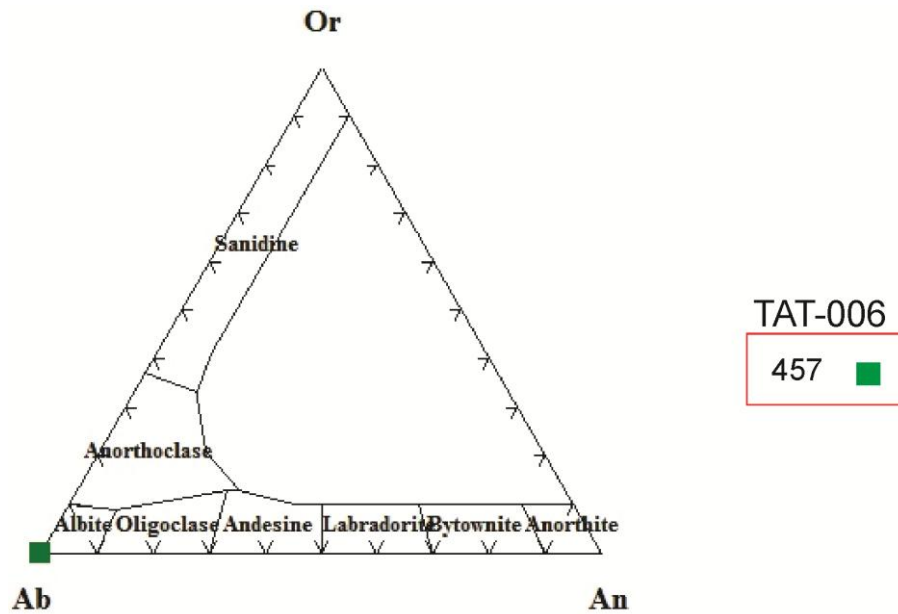


TABLA 29. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 07.

Punto	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O
456	67,8701	-0,00985	20,1067	0,015418	0,017198	0,006481	0,614633	11,3854	0,283723
457	73,7465	0,006473	18,4908	0,067719	0,011173	0,019048	0,651585	9,7397	0,19815

FIGURA 56. Distribución espacial de los cristales seleccionados para el análisis, ilustrando el tipo de plagioclasa presente en la muestra TAT-006, análisis 07.



Fuente: Troger 1955

Se puede observar que los datos químicos de la tabla 29 graficados se ubican hacia el extremo sódico, pudiendo concluir de esta manera que la plagioclasa es de tipo albita.

11 CONCLUSIONES

- Mediante la descripción petrográfica y los análisis de DRX, así como también los análisis geoquímicos se pudo caracterizar las muestras objeto de estudio de los sectores de Piedecuesta, Aratoca y Mesa de Los Santos como riolitas porfiríticas y diabasas.
- La riolita porfirítica del sector de Aratoca (tramo Pescadero-Panachi) presenta en su composición la asociación de fenocristales de plagioclasa de tipo albita, fenocristales de cuarzo con textura de engolfamiento, con una matriz afanítica compuesta por esferulitas de ortoclasa, lo que indica que esta roca tuvo dos historias de enfriamiento, una lenta en la cual se dio lugar a la formación de los fenocristales de plagioclasa y cuarzo, y una rápida en la cual se formó una matriz afanítica con una textura esferulítica, esta textura corrobora este rápido enfriamiento.
- Las riolitas porfiríticas del sector de Piedecuesta (tramo Tres Esquinas-La Punta), presentan una asociación mineral de fenocristales de cuarzo, embebidos en una matriz microcristalina de sericita, en la cual se evidencia una importante alteración supergénica, representada principalmente en la presencia de sericita, derivada de la alteración de feldespatos y plagioclasas.
- Según la clasificación TAS las rocas del sector de Piedecuesta (tramo Tres Esquinas- Panachi), se proyectan en el campo de las rocas riolíticas y dacíticas; teniendo en cuenta que estas muestras han sufrido pérdidas de

alkalis durante alteraciones supergénicas e hidrotermales, se puede decir que no es muy confiable esta proyección, por lo tanto se clasifican como riolitas.

- En el sector de Aratoca se presentan dos diabasas, uno como dique el cual se encuentra intruyendo la Formación Silgara y otro como enclave diabásico dentro de la riolita porfirítica. El dique diabásico presenta en su composición fenocristales de plagioclasa alterándose a calcita, como también cristales de actinolita asociados a clorita, hornblenda. El enclave diabásico a su vez presenta en su composición de fenocristales de plagioclasa con zonación indicando variación en las temperatura de formación de estas, como también se presentan plagioclasas alterándose a calcita, clinocloro asociados a calcitas, en una matriz intergranular porfirítica.
- En el sector de la Mesa de Los Santos la diabasa composicionalmente corresponde a fenocristales de plagioclasa con una textura interrumpida y variando en su tamaño, embebidos en una matriz afanítica de clinocloro y cristales de calcita.
- Las rocas riolíticas porfiríticas del sector de Piedecuesta, junto con la riolita porfirítica del sector Aratoca se clasifican geoquímicamente en el campo calcoalcalino alto en potasio, lo que sugiere un contexto tectónico de subducción de margen continental activo. A falta de datos geocronológicos estos rasgos permiten relacionar temporalmente éstas litologías, con eventos magmáticos del Juratrásico.

- Las rocas diabásicos del sector de Aratoca se clasifican geoquímicamente en el campo calcoalcalino medio en potasio, sugiriendo un ambiente de corteza continental adelgazada (ambiente extensivo continental de suprasubducción).
- Los diagramas multielementales de tierras raras presentan una anomalía negativa en el Eu, lo que puede indicar que existe un menor porcentaje de plagioclasa o una mayor concentración de plagioclasas albiticas, para las muestras TAT-004 (Diabasa sector Aratoca) y TAT-010 (Riolita porfirítica sector Piedecuesta)
- En la química mineral de la muestra TAT-006 del sector Aratoca (tramo Pescadero-Panachi), se clasificaron plagioclasas, las cuales dieron como resultado un alto contenido en sodio, atribuyéndolas a plagioclasas tipo albita.

12 RECOMENDACIONES

- Realizar dataciones radiométricas para determinar la edad de los cuerpos ígneos estudiados, con el fin de establecer su relación temporal en el marco de la evolución geológica del Macizo de Santander.

13 BIBLIOGRAFIA

Campbell, C.J., 1965. The Santa Marta wrench fault of Colombia and its regional setting. *Fourth Caribbean Geological Conference*. Memoir: 247-261. Trinidad.

Carmichael, I.S.E., Turner. F.J., Verhoogen, J. (1974): *Igneous Petrology*. McGraw-Hill, Nueva York, 739 pp.

Cediel, F., 1968. El Grupo Girón, *una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental*. Servicio Geológico Nacional. Boletín Geológico, 16 (1-3): 5-96. Bogotá.

Condie, K.C., (1989): *Igneous rocks-tectonics setting*.

Clavijo, J., Royero, J. Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander, Memoria Explicativa, Escala 1:100.000. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero-Ambiental y Nuclear, Ingeominas, República de Colombia. 2001.

Fedo, C.M., Wayne-Nesbitt, H., Young,G.M. (1995): *Geology* , 23 n° 10: 921-924

Forero, A., 1969. *Nuevos datos estratigráficos del Paleozoico y Mesozoico en el Norte de los Andes*. Primer Congreso Colombiano de Geología. Memoria,; 97-109. Bogotá.

Ingeominas – UIS (2007): Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector noreste de Curiti y borde occidental del Macizo de Santander.

Irvine, T. N., Baragar, W. R. A. *A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks*. Can. J. Earth Sci, 8, 523-548

McPhie, J., Doyle, M., Allon, R., (1993). *Volcanic Textures* 167pp.

Kerr, P. *Mineralogia Optica*. Traducido por Jose Huidobro. 3 ed. New York.: McGraw-Hill, 1965

López, J.P., Bellos, L.I., 2006. *Texturas y Estructuras de las Rocas Igneas: Significado Petrológico e Implicancias en las Condiciones de Formación de las Rocas*. Instituto Superior De Correlación Geológica (Insugeo).

Mantilla Figueroa, L. C. 2003. *Guía de Laboratorios de petrología Ignea*. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Pp 2-25, 74-78, 116-118.

Philpotts, A.R (1990): *Principles of igneous and metamorphic Petrology*. Prentice Hall. Nueva Jersey. 498 pp.

Melgarejo, J.C., *Atlas de asociaciones minerales en lamina delgada*.

Radelli, L., 1962. *Les formations eruptives hercyniennes de la Cordillera Oriental de Colombia (Sud Am)*. Universidad Nacional de Colombia. Geología Colombiana, (3) : 99-124. Bogotá

Rollinson, H (1993). *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*.

Trumpy, D., 1943. *Pre-Cretaceous of Colombia*. Bulletin Geological Society of America, 54 (9): 1281-1304. New York.

Tschanz, CH., *et al.*, 1969. *Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta área Colombia*. Ingeominas. Informe 1829. Preliminary report, 288 p. Bogotá.

Ward, W, *et al.*, 1973. *Geología del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona*, Departamento de Santander y Norte de Santander. Ingeominas. Boletín Geológico, 21 (1-3): 1-32. Bogotá

Wilson, M (1989): *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, Londres, 466 pp.

14 ANEXOS

ANEXOS 1. CATALOGO PETROGRAFICO

Sector Piedecuesta.

Muestra TAT-001

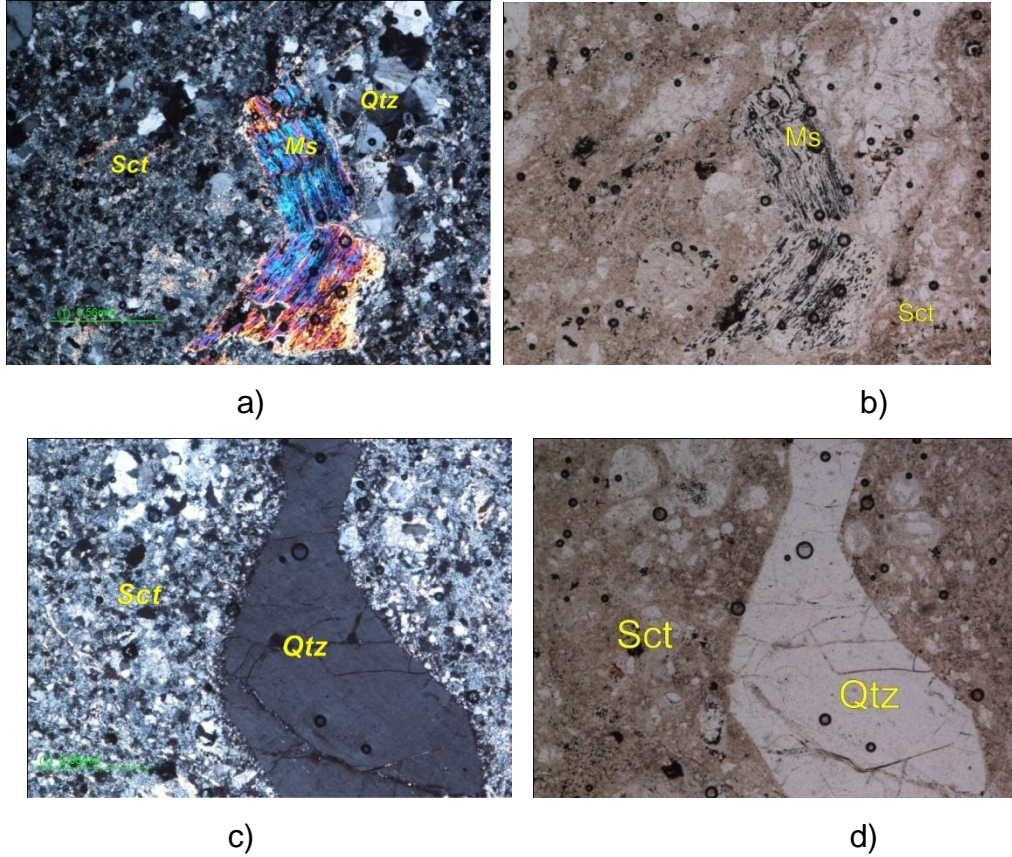


FIGURA 1. a) En la fotografías se observan cristales de moscovita (Ms), embebidos en una matriz afanítica compuesta por sericita. c) Fenocristales de cuarzo (Qtz), en una matriz afanítica con textura de engolfamiento. Microfotografías tomadas con objetivo 5x. **a)**, **c)** luz no plana analizada y **b)**, **d)**. Luz polarizada.

TABLA 1. Composición mineralógica modal de la muestra TAT-001.

Fases del mineral	Porcentaje %
Cuarzo	45%
Sericita	41%
Moscovita	10%
Circón	1%
Esfena	1%
Hematita	2%

Cuarzo: Individuos de forma irregular, presentándose en tamaños de grano fino a fenocristales, con relieve muy bajo, colores de birrefringencia de primer orden, Cuarzos policristalinos embebidos en una matriz de sericita, presentando textura de engolfamiento y plumosa (Figura 1.a) en algunos de los fenocristales presentes en la sección. También se observan cristales corroídos de cuarzo (Figura 1.c), los cuales son comunes en rocas magmáticas (en particular en lavas), donde la corrosión de caras, vértices y aristas de los cristales es frecuentemente la indicación de un procesos de reacción del reinicio del equilibrio de minerales bajo nuevas condiciones termodinámicas o físico-químicas.

Sericita: se presenta como agregado fino rodeando el cuarzo, siendo producto de alteración del feldespato potásico y plagioclasa.

Moscovita: cristales tabulares delgados fibrosos, exfoliación en una dirección, con relieve bajo, birrefringencia de colores superiores del segundo orden, se observa oxidación a parches en estas.

Circón: Se presenta como mineral accesorio, de hábito prismático corto, presenta relieve alto, birrefringencia muy fuerte del cuarto orden.

Esfena: se presenta en cristales euhédricos de sección transversal rómbica, con relieve muy alto, de birrefringencia extrema.

Hematita: se presenta en una masa a manera de parches sobre la muestra en general, principalmente sobre la moscovita.

2. Texturas y microtexturas

-*Textura de engolfamiento:* esta textura se encuentra presente en los fenocristales de cuarzo como se observa en la Figura 1.c

-*Textura microcristalina:* presente en la matriz, compuesta por sericita y cristales de cuarzo de tamaño muy fino.

-*Textura plumosa:* se observa en algunos de los cristales de cuarzo de grano medio.

-*Textura porfirítica:* se presentan en la muestra varios tamaños de cristales de cuarzo, uno conforma parte de la matriz de grano fino y otro en forma de fenocristales.

Secuencia de formación de minerales

Mineral	Etapa magmática	Alteración secundaria
Cuarzo	x	
Moscovita	x	
Sericita		x
Hematita		x
Circón	x	
Esfena	x	

Nombre de la roca: Riolita porfirítica apoyado en la clasificación de Streckeisen, 1976.

Muestra TAT-010

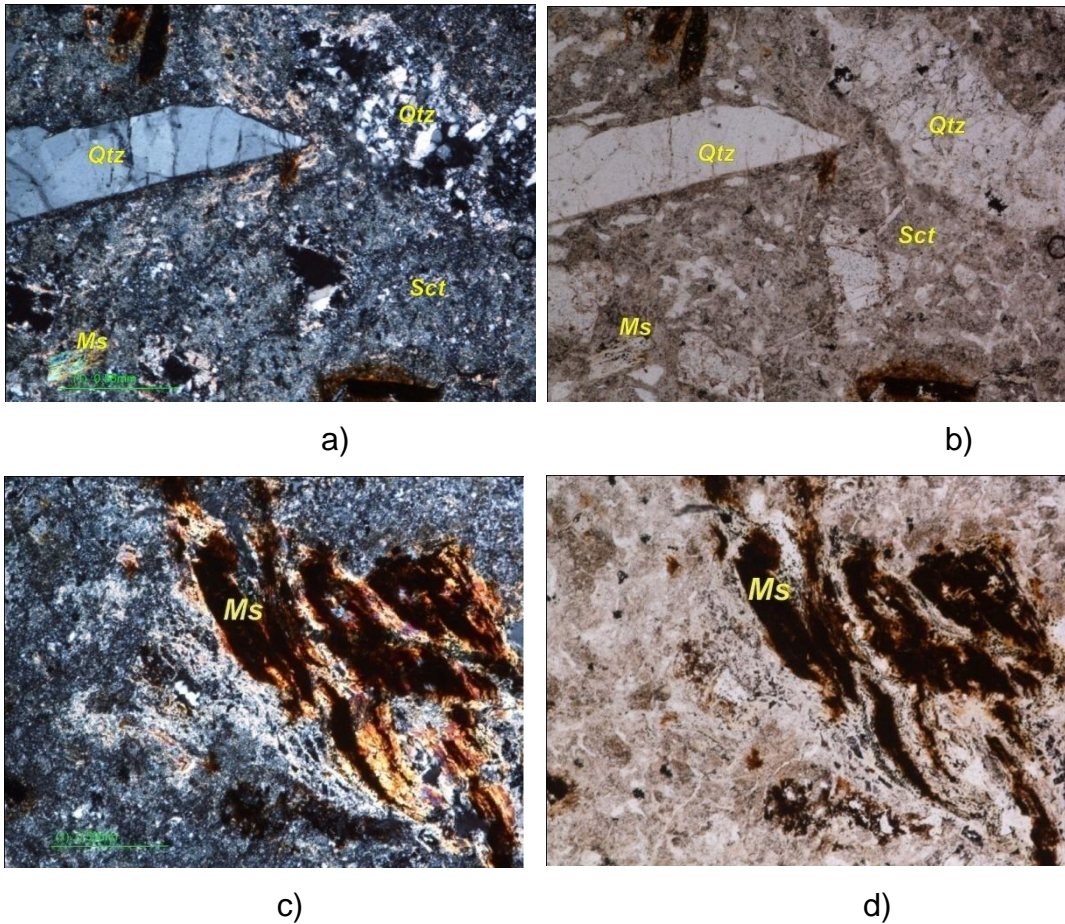


FIGURA 2. a) En la figura se observa fenocristales de cuarzo (Qtz), sericita haciendo parte de la matriz (Sct). c) Se aprecia que la moscovita (Ms) se encuentra muy oxidada. a),c) Luz no plana analizada y b),d). Luz polarizada.

TABLA 2. Composición mineralógica modal de la muestra TAT-010.

Fases del mineral	Porcentaje %
Cuarzo	47%
Sericita	32%
Moscovita	10%
Circón	1%
Hematita	10%

Cuarzo: se presenta como fenocristales con un tamaño promedio de 1 mm a 1.5 mm y haciendo parte de la matriz, de forma subhedral, de relieve bajo, colores de birrefringencia de primer orden.

Moscovita: cristales tabulares con birrefringencia de segundo orden, se observa oxidación en los cristales.

Sericita: Se presenta como agregado fino en la matriz, como producto de la alteración de feldespatos potásicos y plagioclasas.

Hematita: se presenta a manera de parches, principalmente sobre la moscovita.

Texturas y microtexturas

-Textura de engolfamiento

-Textura microcristalina

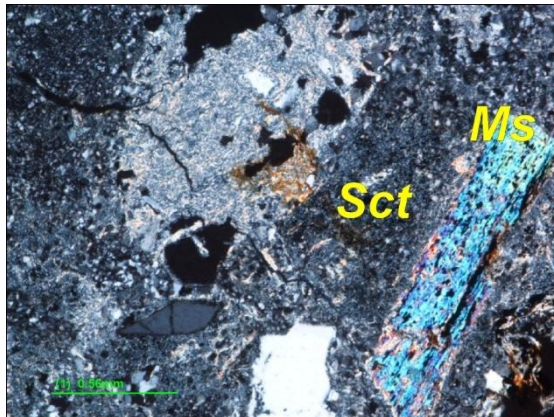
-Textura porfirítica: se presentan en la muestra dos tamaños de cristales, uno conformando parte de la matriz de grano fino y otro en forma de fenocristales, con un tamaño promedio de 1mm a 1,5 mm.

Secuencia de formación de minerales

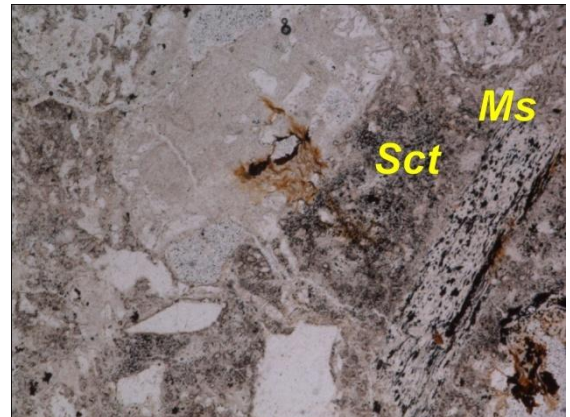
Mineral	Etapas magmáticas	Alteración secundaria
Cuarzo	x	
Moscovita	x	
Sericita		x
Hematita		x

Nombre de la roca: Riolita porfirítica apoyado en la clasificación de Streckeisen, 1976.jj

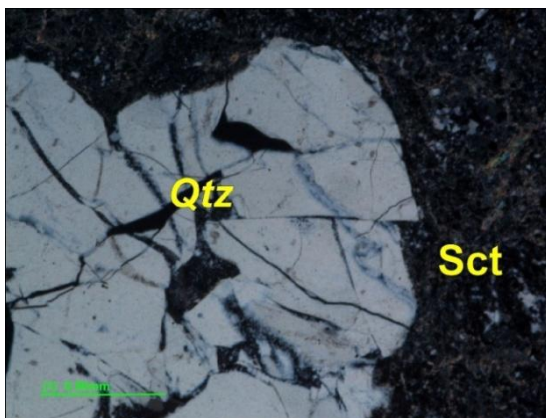
Muestra TAT-011



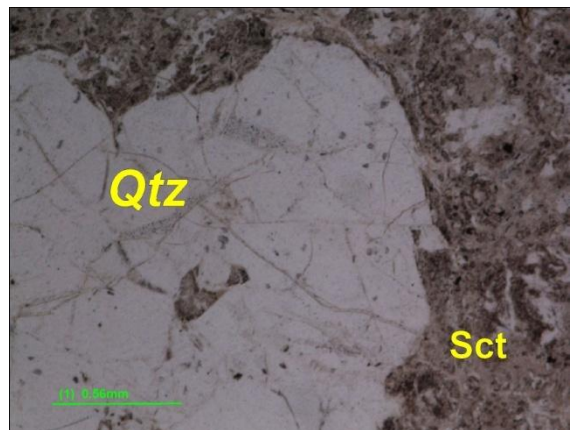
a)



b)



c)



d)

FIGURA 3. a) Se observa cristales de moscovita (Ms), sericita haciendo parte de la matriz (Sct). c) Cuarzo con bordes corroídos y fracturado. a),b) Luz no plana analizada y **c),d)** Luz polarizada.

TABLA 3. Composición mineralógica modal de la muestra TAT-011

Fases del mineral	Porcentaje %
Cuarzo	46%
Sericita	35%
Moscovita	10%
Ortoclasa	5%
Hematita	2%

Cuarzo: se presentan cristales irregulares con variación en su tamaño de grano medio a fino, este ultimo perteneciendo a la matriz; se observa muy fracturado de relieve bajo, con birrefringencia de primer orden.

Ortoclasa: Individuos de forma anhedral, con fracturas de sericitación, de relieve medio.

Moscovita: se presentan de forma tabular, con alto grado de birrefringencia, se observan oxidados.

Circón: individuos de relieve alto, con birrefringencia de orden superior, se presenta como mineral accesorio.

Hematita: se presenta a manera de parches en la placa, principalmente sobre la moscovita.

Texturas y microtexturas

-Textura de engolfamiento

-Textura microcristalina

-Textura porfirítica: se presentan en la muestra dos tamaños de cristales, uno conformando parte de la matriz de grano fino y otro en forma de fenocristales, con un tamaño promedio de 1,235 mm a 0,57 mm.

Secuencia de formación de minerales

Mineral	Etapa magmática	Alteración secundaria
Cuarzo	x	
Moscovita	x	
Sericita		x
Hematita		x

Nombre de la roca: Riolita porfirítica apoyado en la clasificación de Streckeisen, 1976).

Secciones delgadas del Sector de Aratocha

Muestra TAT-004

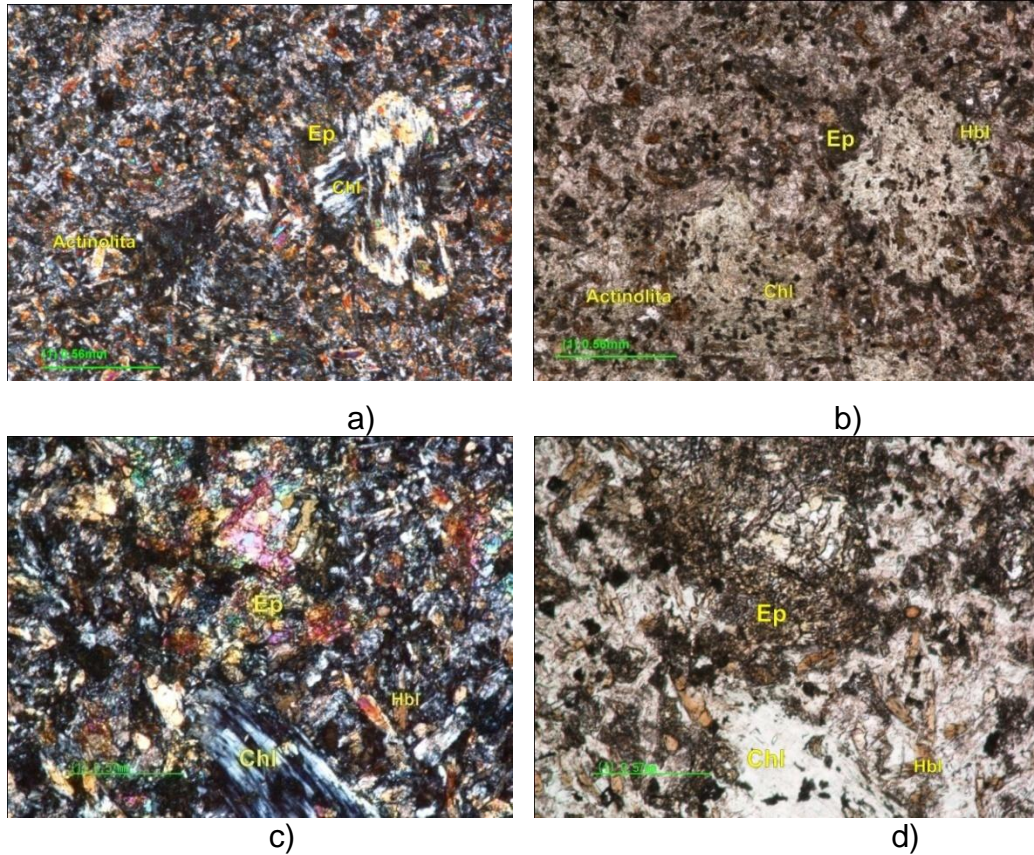


FIGURA 4. a) Se observa cristales de clorita (Chl), presentando bordes de reacción de epidota (Ep), como también haciendo parte de la matriz; además de esto cristales de hornblenda (Hbl) y actinolita. c) Cristales de clorita mostrando los bordes de reacción de epidota. a),b) Luz no plana analizada y **c),d)** Luz polarizada.

TABLA 4. Composición mineralógica modal de la muestra TAT-004.

Fases de mineral	Porcentaje %
Cuarzo	13
Epidota	15
Hornblenda	14
Plagioclasa	25
Actinolita	10
Calcita	5
Ortoclasa	2
Clinocloro	14
Biotita	2

Cuarzo: granos irregulares de relieve bajo, con birrefringencia de primer orden. Se encuentra bien distribuido en la placa.

Biotita: individuos de forma euhédrica, de color pardo amarillento, pleocroico, relieve moderado, birrefringencia fuerte, se encuentra como mineral individual, así como también alterando a clorita y este último encontrándose rodeado en algunos sectores por epidota.

Epidota: agregados granulares, con alto relieve, birrefringencia fuerte, se presenta rodeando la biotita y la clorita como mineral de alteración.

Hornblenda: cristales prismáticos de forma pseudo hexagonal, con relieve alto, de color verde – pardo en nicoles paralelos y marrón en nicoles cruzados, pleocroicos.

Plagioclasa: individuos de forma tabular, se encuentran alterados a calcita, birrefringencia de primer orden.

Actinolita: agregados columnares, de relieve alto, leve pleocroísmo, de birrefringencia alta, ocurre junto a la clorita.

Calcita: se presenta a manera de vena como también en cristales euhédricos, con un maclado polisintético, de color rosado pálido, relieve moderado, de birrefringencia de orden superior, la vena de calcita se encuentra alternada con cristales de cuarzo.

Ortoclasa: individuos de forma subhédrica birrefringencia de primer orden, relieve bajo.

Clorita: se presenta como mineral de alteración de la biotita, presentando bordes de reacción (epidota).

Circón: individuos euhedrales, de relieve alto, con birrefringencia de orden superior, se encuentra asociado al cuarzo.

Texturas y microtexturas

-*Textura Kefilitica:* tiende a ser de grano fino y por lo general de formas concéntricas, en donde se encuentra rodeando a la clorita, la cual es producto de alteración de la biotita.

-*Textura Porfirítica:* Se presentan fenocristales de plagioclasa cálcica y clorita.

- *Textura afieltrada:* microlitos dispersos al azar

-*Textura microporfirítica*

-*Textura intergranular*

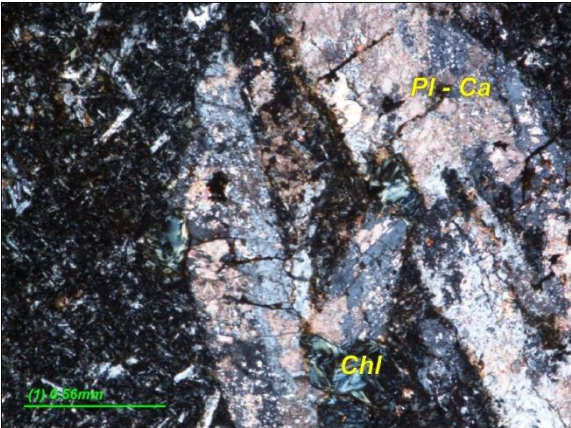
-*Textura inequigranular*

Secuencia de formación de minerales

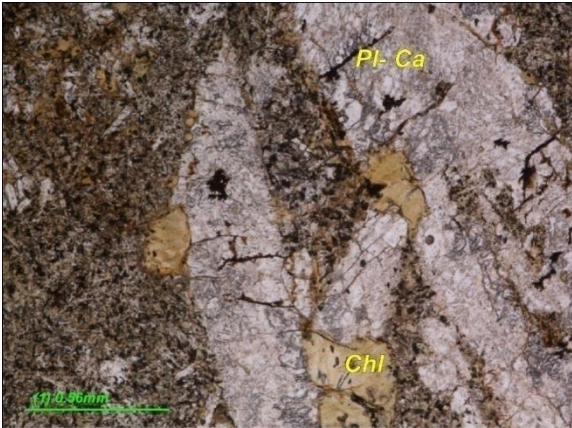
Mineral	Etapa magmática	Alteración secundaria
Actinolita	x	
Hornblenda	x	
Biotita	x	
Plagioclasa	x	
Cuarzo	x	
Clorita		x
Epidota		x
Circón	x	

Nombre de la roca: Gabro (Diabasa) apoyado en la clasificación de rocas plutónicas apoyado en la clasificación Streckeisen 1979.

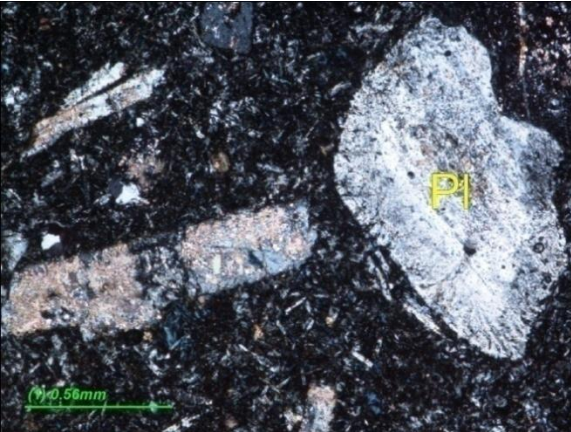
Muestra TAT-005



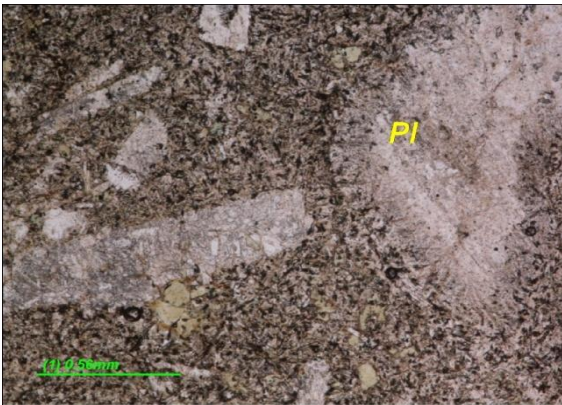
b)



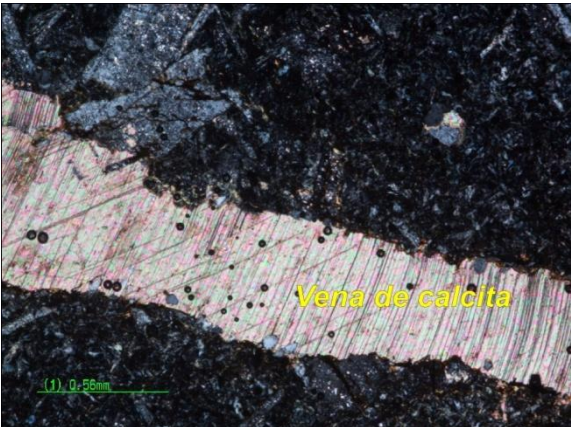
b)



c)



d)



e)



f)

FIGURA 5. a) Se aprecia cristales de clinocloro (Chl), asociados a plagioclasa cálcica, alterándose a calcita, c) cristales de plagioclasa (Pl) con zonación, e) vena de calcita con maclado polisintético. a),c),e)) Luz no plana analizada y b),d),f Luz polarizada.

TABLA 5. Composición mineralógica modal de la muestra TAT-005.

Fases del mineral	Porcentaje %
Clinocloro	15
Ortoclase	5
Cuarzo	4
Plagioclase	55
Feld-K (sanidina)	15
Calcita	5
Circón	1

Plagioclase: individuos de formas tabulares, como fenocristales, de relieve bajo, presenta una zonación, con macla tipo carlsbad, se encuentra alterándose a calcita.

Feld-K: (sanidina) se presenta de formas tabulares, como fenocristales, con macla de tipo carlsbad, su distribución en la placa es en menor proporción que la plagioclase.

Ortoclase: de forma subhédrica, con relieve bajo, birrefringencia débil.

Calcita: individuos de forma anhedral a tabulares, encontrándose en algunos sectores rodeada por clinocloro y esta rodeada por calcita, de birrefringencia alta, relieve moderado, se presenta una vena de calcita, la cual atraviesa la placa, con un maclado polisintético.

Clinocloro: de hábito acicular, pleocroíca, se encuentra asociada a la calcita en algunos sectores, también aparece sola y a su vez interactuando con la plagioclasa calcita, y haciendo parte de la matriz.

Cuarzo: individuos de forma anhedral, con relieve bajo, estando bien distribuido en la sección y además hace parte en algunos sectores de la vena de calcita.

Circón: se presenta como mineral accesorio.

Texturas y microtexturas

Textura porfirítica: fenocristales de plagioclasa embebidos en una matriz de clinocloro.

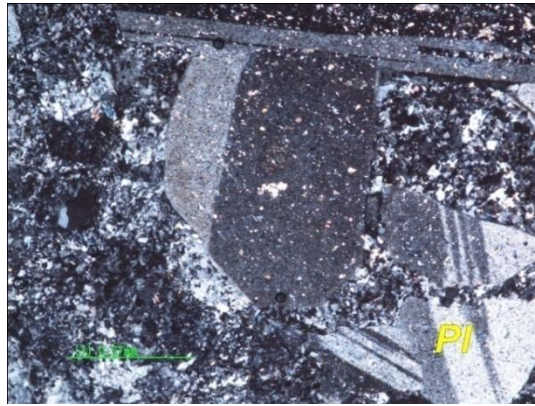
Textura intergranular

Secuencia de formación de minerales

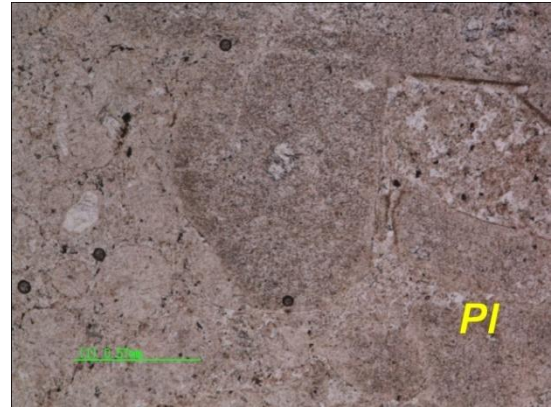
Mineral	Etapas magmática	Alteración secundaria
Plagioclasa	x	
Ortoclasa	x	
Cuarzo	x	
Circón	x	

Nombre de la roca: Grabo (Diabasa) apoyado en la clasificación de Streckeisen, 1976.

Muestra TAT-006



a)



b)



c)



d)

FIGURA 6. a) Cristales de plagioclasa (Pl), c) Cristal de cuarzo con engolfamiento, estando rodeado por cristales de ortoclasa (textura ocelar). a),c) Luz no plana analizada. y b),d) Luz polarizada

TABLA 6. Composición mineralógica modal de la muestra TAT-006.

Fases del mineral	Porcentaje %
Clorita	10
Ortoclasa	25
Biotita	5
Cuarzo	20
Plagioclasa	26
Feld-K (sanidina)	5
Circón	2
Óxidos	5
Esfena	2

Ortoclasa: se presentan de forma subhédrica y forma de esferulitas haciendo parte de la matriz y a su vez rodeando los cuarzos, de relieve bajo, birrefringencia de primer orden, los cristales de tabulares se encuentran alterando a sericita.

Biotita: se presenta de forma subhedral, pleocroica, con extinción paralela, colores de birrefringencia altos, en algunos sectores se encuentra alterándose a clorita.

Clorita: de forma anhedral, presentándose producto de alteración de la biotita.

Cuarzo: de forma subhedral, presentando un borde de ortoclasa, además de esto se encuentran engolfados, de birrefringencia de primer orden, relieve bajo, con un tamaño de 1.9 mm.

Plagioclasa: de forma tabular, con birrefringencia de primer orden, incolora en paralelos, relieve bajo, variando en su tamaño con cristales de 0,19mm a 1.14mm, con macla tipo albita, carlsbad.

Esfena: de forma euhédrica de secciones transversales rómbicas agudas, con relieve alto, birrefringencia extrema, se presenta como mineral accesorio.

Circón: se presenta en cristales diminutos de habito primástico corto, con relieve alto y birrefringencia muy fuerte, se presenta en la muestra como mineral accesorio.

Texturas y microtexturas

-*Textura glomeroporfirítica*

-*Textura de engolfamiento*

-*Textura esferulítica:* Las esferulitas son pequeños cuerpos esféricos que normalmente aparecen en rocas ígneas ricas en vidrio, sobretodo en riolitas ricas en sílice, aunque también aparecen en obsidianas. A menudo cuentan con una estructura radial provocada por el intercrecimiento de cristales de cuarzo y ortoclasa. Se piensa que estas formas ocurren cuando ocurre un crecimiento mineral muy rápido tras la nucleación.

-*Textura porfirítica:* se presentan varios tamaños de fenocristales de plagioclasa que van desde cristales con 0,19mm a 1,14mm.

-*Textura ocelar:* los cuarzos se encuentran envueltos parcialmente por ortoclasa ordenados radialmente, siendo de crecimiento posterior, (López, J.P, 2006)

Secuencia de formación de minerales

Mineral	Etapas magmática	Alteración secundaria
Plagioclasa	x	
Ortoclasa	x	
Feld-K	x	
Biotita	x	
Cuarzo	x	
Clorita		x
Óxidos		x
Circón	x	
Esfena	x	

Nombre de la roca: Riolita porfirítica apoyado en la clasificación de Streckeisen, 1976.

Sector Mesa de Los Santos

Muestra GR-135-209-001

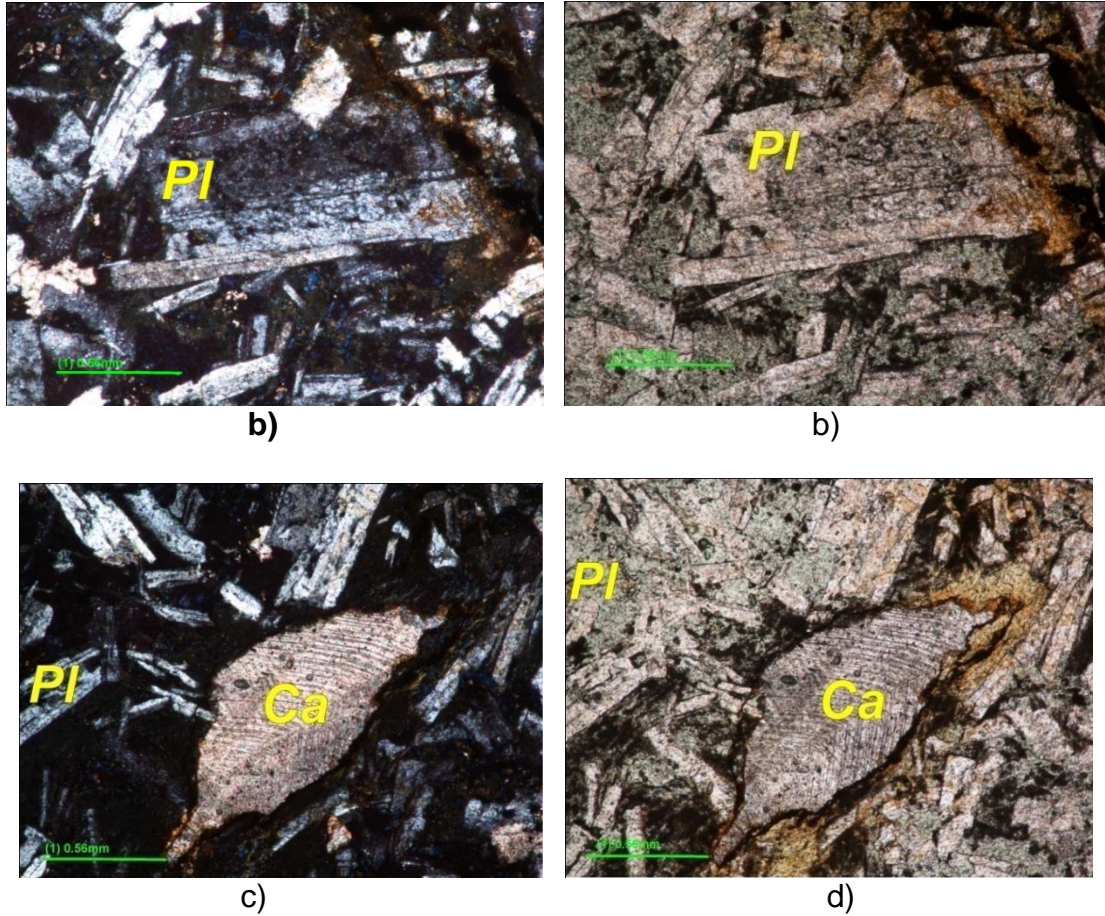


FIGURA 7. a) Cristales de plagioclasa (PI), con textura interrumpida, c) Cristal de calcita con maclado polisintético, además de esto se observan cristales de plagioclasa (PI) en una matriz compuesta principalmente por clinocloro. a),c) Luz no plana analizada y b),d) Luz polarizada.

TABLA 7. Composición mineralógica modal de la muestra GR-135-209-001.

<i>Fases del mineral</i>	<i>Porcentaje %</i>
Cuarzo	5
Plagioclasa	55
Clorita	20
Clinocloro Férrico	15
Calcita	10

Cuarzo: de forma subherdral, con relieve bajo, birrefringencia de primer orden, presentándose como pequeños cristales aislados dentro de la muestra.

Plagioclasa: cristales tabulares euhedrales, relieve bajo, birrefringencia de primer orden, los cristales variando en su tamaño, los cristales de mayor tamaño presentan una textura interrumpida.

Clorita: de relieve bajo, haciendo parte de la matriz y estando en las plagioclasas que presentan la textura interrumpida.

Clinocloro: se presenta en una matriz microcristalina de manera masiva.

Calcita: de forma anhedral, birrefringencia de orden superior, relieve moderado, encontrándose aislada dentro de la sección.

Texturas y microtexturas

Textura interrumpida

Textura intergranular: consiste en una masa de microfenocristales, donde la base es de plagioclasa de hábito elongado, sin orientación.

Secuencia de formación de minerales

Mineral	Etapa magmática	Alteración secundaria
Plagioclasa	x	
Clorita	x	
Clinocloro	x	
Cuarzo	x	
Calcita		x

Nombre de la roca: Diabasa apoyado en la clasificación de Streckeisen, 1976.

ANEXOS 2. DRX



Laboratorio de Difracción de Rayos-X

INF-056-10-5

Bucaramanga, Enero 13 de 2011

SEÑORES:
ESCUELA DE GEOLOGÍA
Atn: Dr. Luis Carlos Mantilla
Director del proyecto 7429
UIS/Presente

Cordial saludo:

Por medio de la presente estoy haciendo entrega del resultado de los análisis cuantitativos por Difracción de Rayos-X de nueve (9) muestras, identificadas como **“TAT-001, TAT-002, TAT-003 TAT-004, TAT-005, TAT-006, TAT-007 PEGMATITA, TAT-011 y TAT-008, GR-135-209-001”**.

Atentamente,

JOSÉ ANTONIO HENAO MARTÍNEZ

Director
Laboratorio de Difracción de Rayos-X
PQ 0321

Universidad Industrial de Santander, Escuela de Química, Laboratorio de Postgrado 111

Edificio Camilo Torres, Bucaramanga, PBX 6344000 Ext. 22 26, Telefax 6347166

Apartado Aéreo N° 678, Email: rayosx@uis.edu.co NIT 890. 201.213-4

METODOLOGÍA

1. Preparación y Montaje de las muestras

El espécimen seleccionado de cada muestra fue montado en un portamuestra de aluminio mediante la técnica de llenado frontal.

2. Toma de datos de difracción

Se realizó en un difractómetro de polvo marca PANalytical modelo X'PERT PRO MPD bajo las siguientes condiciones:

Voltaje	45(kV)
Corriente	40(mA)
Rendijas Soller	0.04 rad (Incidencia y Difracción)
Rendijas Fijas	1/4 y 1/8 (Incidencia) y 1/4 (Difracción)
Muestreo	0.013° 2theta
Rango de Medición	4-70° 2theta
Radiación	CuK α 1
Filtro	Ni
Detector	de estado sólido referencia PIXcel con 255 canales activos
Tipo de barrido	Continuo

3. Tipo de Análisis

Análisis Cualitativo

El análisis cualitativo de las fases presentes en la muestra se realizó mediante comparación del perfil observado con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo de las fases encontradas se realizó mediante el refinamiento por el Método de Rietveld del perfil observado habiéndole agregado a la muestra una cantidad conocida de un estándar interno (*Aluminum oxide*, -100mesh, 99%. *Corundum*, α -phase. Aldrich No. 23,474-5) correspondiente al 20%.

4. Información suministrada por el cliente

Análisis elemental: No.

Interés por alguna(s) fase(s) en particular: Identificación y cuantificación de fases cristalinas.

*Los resultados se relacionan únicamente con las muestras analizadas.

RESULTADOS

1. TAT-001 (C2EQ)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O_2	010-770-3755	Cuarzo	43.4 % (D.E = 0.2)
	Ti O_2	010-89-4921	Anatasa	N.C
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	000-07-0025	Moscovita	14.2 % (D.E = 0.2)
	$\text{Fe}_2 \text{O}_3$	010-89-0598	Hematita	0.8 % (D.E = 0.1)
	$\text{K} (\text{Al, Fe})_2 \text{Al Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	010-89-7536	Moscovita Férrica	38.0 % (D.E = 0.3)
Total Cristalino				96.4 %
Amorfos y otros				3.6 %

2. TAT-010 (C2EP)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O_2	010-770-3755	Cuarzo	41.3 % (D.E = 0.4)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	000-07-0025	Moscovita	17.4 % (D.E = 0.3)
	Ti O_2	010-76-3179	Anatasa	N.C
	$\text{K} (\text{Al, Fe})_2 \text{Al Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	010-89-7536	Moscovita Férrica	37.2 % (D.E = 0.9)
Total Cristalino				95.9 %
Amorfos y otros				4.1 %

3. TAT-003 (C2EO)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O_2	010-77-1060	Cuarzo	41.5 % (D.E = 0.3)
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	000-58-2004	Caolinita	25.2 % (D.E = 0.4)
	Ti O_2	010-71-1166	Anatasa	4.5 % (D.E = 0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	000-58-2037	Moscovita	22.7 % (D.E = 0.3)
	$\text{Fe}_2 \text{O}_3$	010-79-0007	Hematita	N.C
	Ca CO_3	010-86-2343	Calcita	N.C
	$\text{K} (\text{Al, Fe})_2 \text{Al Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	010-73-9865	Moscovita Férrica	N.C
Total Cristalino				93.9 %
Amorfos y otros				6.1 %

4. TAT-004 (C2EN)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O_2	010-83-2465	Cuarzo	10.4 % (D.E = 0.1)
	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	000-58-2006	Caolinita	N.C
	$\text{Mg}_{3.41} \text{Si}_{2.86} \text{Al}_{1.14} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 (\text{H}_2 \text{O})_{3.72}$	010-76-0847	Vermiculita	2.9 % (D.E = 0.1)
	$\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$	010-75-3702	Dolomita	N.C
	$(\text{Na}_{0.98} \text{Ca}_{0.02})(\text{Al}_{1.02} \text{Si}_{2.98} \text{O}_8)$	010-70-3762	Albita	12.6 % (D.E = 0.4)
	$\text{Ca}_2 (\text{Mg, Fe})_4 \text{Al} (\text{Si}_7 \text{Al}) \text{O}_{22} (\text{OH, F})_2$	000-45-1371	Magnesiohorn-blenda Férrica	13.9 % (D.E = 0.3)
	Ca CO_3	010-75-6049	Calcita	4.8 % (D.E = 0.2)
	$(\text{Mg, Fe})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	000-29-0701	Clinocloro	33.1 % (D.E = 0.5)
Total Cristalino				77.7 %
Amorfos y otros				22.3 %

5. TAT-005 (C2EM)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O_2	010-77-1060	Cuarzo	20.1 % (D.E = 0.1)
	$\text{K} (\text{Si}_{0.75} \text{Al}_{0.25})_4 \text{O}_8$	010-77-0135	Microclina	30.1 % (D.E = 0.3)
	$(\text{Mg, Fe})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	000-29-0701	Clinocloro	4.5 % (D.E = 0.2)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	000-58-2037	Moscovita	6.3 % (D.E = 0.4)
	$(\text{K, H}_{30}) \text{Al}_2 (\text{Si}_3 \text{Al}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot \text{X H}_2 \text{O}$	000-58-2014	Illita	N.C

	Ca CO_3	010-83-0578	Calcita	3.0 % (D.E = 0.1)
	$(\text{Na}_{0.98} \text{Ca}_{0.02})(\text{Al}_{1.02} \text{Si}_{2.98} \text{O}_8)$	010-70-3752	Albita	30.8 % (D.E = 0.3)
Total Cristalino				94.8 %
Amorfos y otros				5.2 %

6. TAT-006 (C2EL)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O_2	010-85-1053	Cuarzo	21.6 % (D.E = 0.2)
	$(\text{Na}_{0.98} \text{Ca}_{0.02})(\text{Al}_{1.02} \text{Si}_{2.98} \text{O}_8)$	010-70-3752	Albita	36.2 % (D.E = 0.3)
	$\text{K} (\text{Si}_{0.75} \text{Al}_{0.25})_4 \text{O}_8$	010-77-0135	Microclina	18.9 % (D.E = 0.2)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	000-58-2037	Moscovita	5.9 % (D.E = 0.3)
	$(\text{Mg, Fe})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	000-29-0701	Clinocloro	3.6 % (D.E = 0.2)
	$\text{Mg}_3 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$	000-27-1276	Clinocristil o	8.4 % (D.E = 0.1)
	Ca CO_3	010-83-0578	Calcita	2.7 % (D.E = 0.1)
Total Cristalino				97.3 %
Amorfos y otros				2.7 %

7. TAT-007 PEGMATITA (C2ER)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	010-87-2096	Cuarzo	64.3 % (D.E = 0.2)
	K (Al Si ₃ O ₈)	010-71-0955	Ortoclasa	4.6 % (D.E = 0.1)
	(Na _{0.98} Ca _{0.02})(Al _{1.02} Si _{2.98} O ₈)	010-70-3752	Albita	22.1 % (D.E = 0.1)
	K Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	000-58-2037	Moscovita	3.7 % (D.E = 0.1)
	Ca CO ₃	010-83-0578	Calcita	1.1 % (D.E = 0.1)
Total Cristalino				95.8 %
Amorfos y otros				4.2 %

8. TAT-011(C2JS)

	FASE	No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O ₂	010-86-1560	Cuarzo	22.6 % (D.E = 0.3)
	Fe ₂ O ₃	010-89-0598	Hematita	1.1 % (D.E = 0.1)
	Na (Al Si ₃ O ₈)	010-75-1142	Albita	N.C
	Ti O ₂	010-89-4921	Anatasa	N.C
	K (Al, Fe) ₂ Al Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	010-89-7536	Moscovita Férrica	45.2 % (D.E = 0.4)
	K Al ₂ Si ₃ Al O ₁₀ (OH) ₂	000-07-0025	Moscovita	13.7 % (D.E = 0.3)
	(K, H ₃₀) Al ₂ (Si ₃ Al) O ₁₀ (OH) ₂ · x H ₂ O	000-58-2014	Illita	9.7 % (D.E = 0.4)
Total Cristalino				92.3 %
Amorfos y otros				7.7 %

9. TAT-008 (C2ES)

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O_2	010-70-7345	Cuarzo	21.4 % (D.E = 0.1)
	$\text{K Al}_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	000-58-2034	Moscovita	N.C
	$\text{K} (\text{Al, Fe})_2 \text{Al Si}_3 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$	010-73-9867	Moscovita Férrica	60.8 % (D.E = 0.3)
	$(\text{Mg, Fe})_6 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$	000-29-0701	Clinocloro	9.8 % (D.E = 0.1)
Total Cristalino				92.0 %
Amorfos y otros				8.0%

10. GR-135-209-001 (C2WS)

FASE		No. TARJETA PDF-2	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalinos	Si O_2	000-33-1161	Cuarzo	2.8 % (D.E = 0.3)
	$(\text{Na}_{0.98} \text{Ca}_{0.02}) (\text{Al}_{1.02} \text{Si}_{2.98} \text{O}_8)$	010-70-3752	Albita	37.2 % (D.E = 1.0)
	$(\text{Mg}_{11.06} \text{Fe}_{0.94}) ((\text{Si}_{5.22} \text{Al}_{2.78}) \text{O}_{20} (\text{OH})_{16})$	010-75-8291	Clorita	23.7 % (D.E = 0.9)
	Ca CO_3	010-72-1937	Calcita	4.6 % (D.E = 0.3)
	$(\text{Mg}_{2.8} \text{Fe}_{1.7} \text{Al}_{1.2}) (\text{Si}_{2.8} \text{Al}_{1.2} \text{O}_{10} (\text{OH})_8)$	000-07-0076	Clinocloro Férrico	8.2 % (D.E = 0.7)
Total Cristalino				76.5 %
Amorfos y otros				23.5 %

Nota:

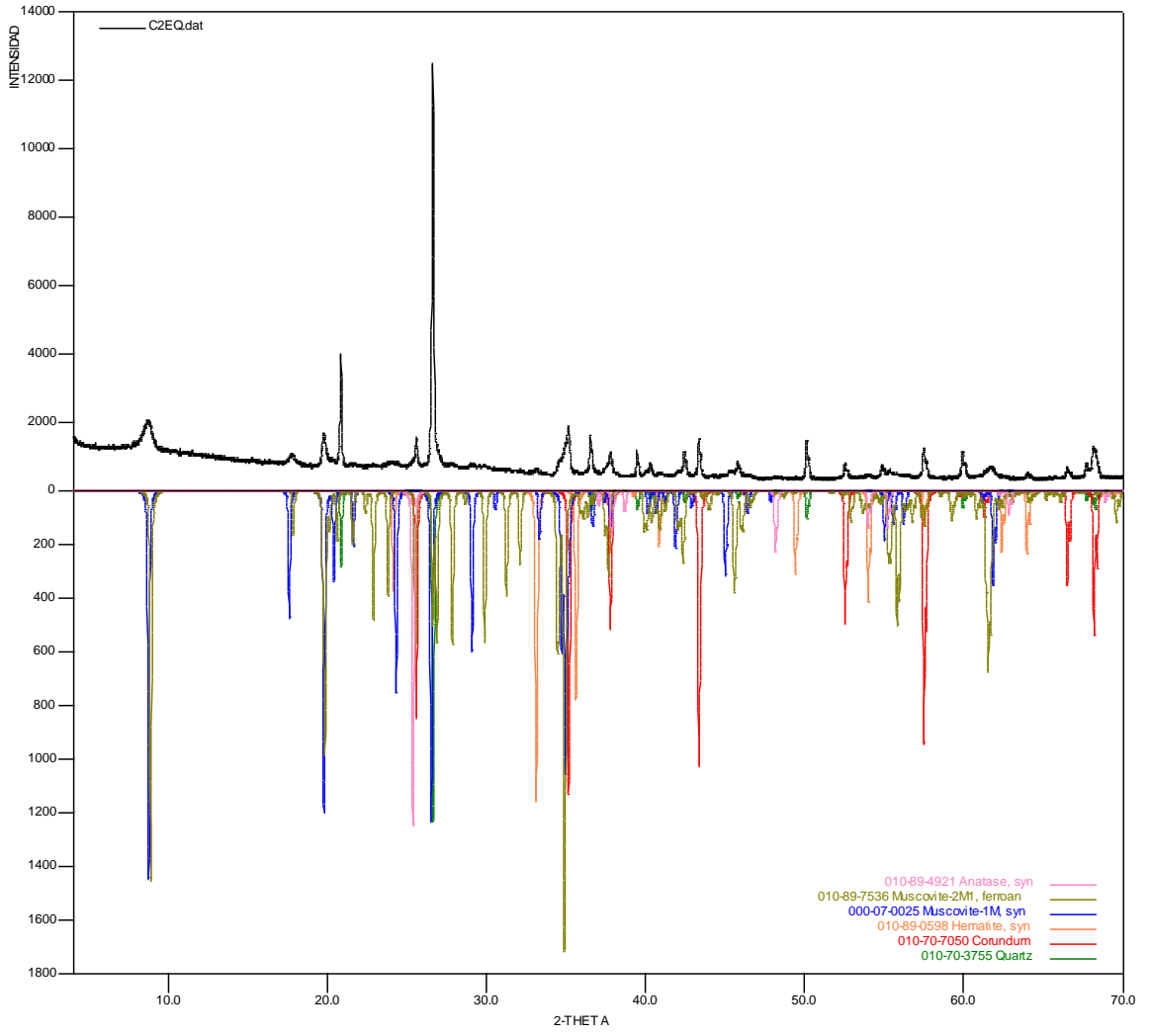
N.C = No Cuantificable (La fase es identificada pero debido a su baja proporción no es posible refinar sus datos cristalográficos necesarios para su respectiva cuantificación)

D.E = Desviación estándar

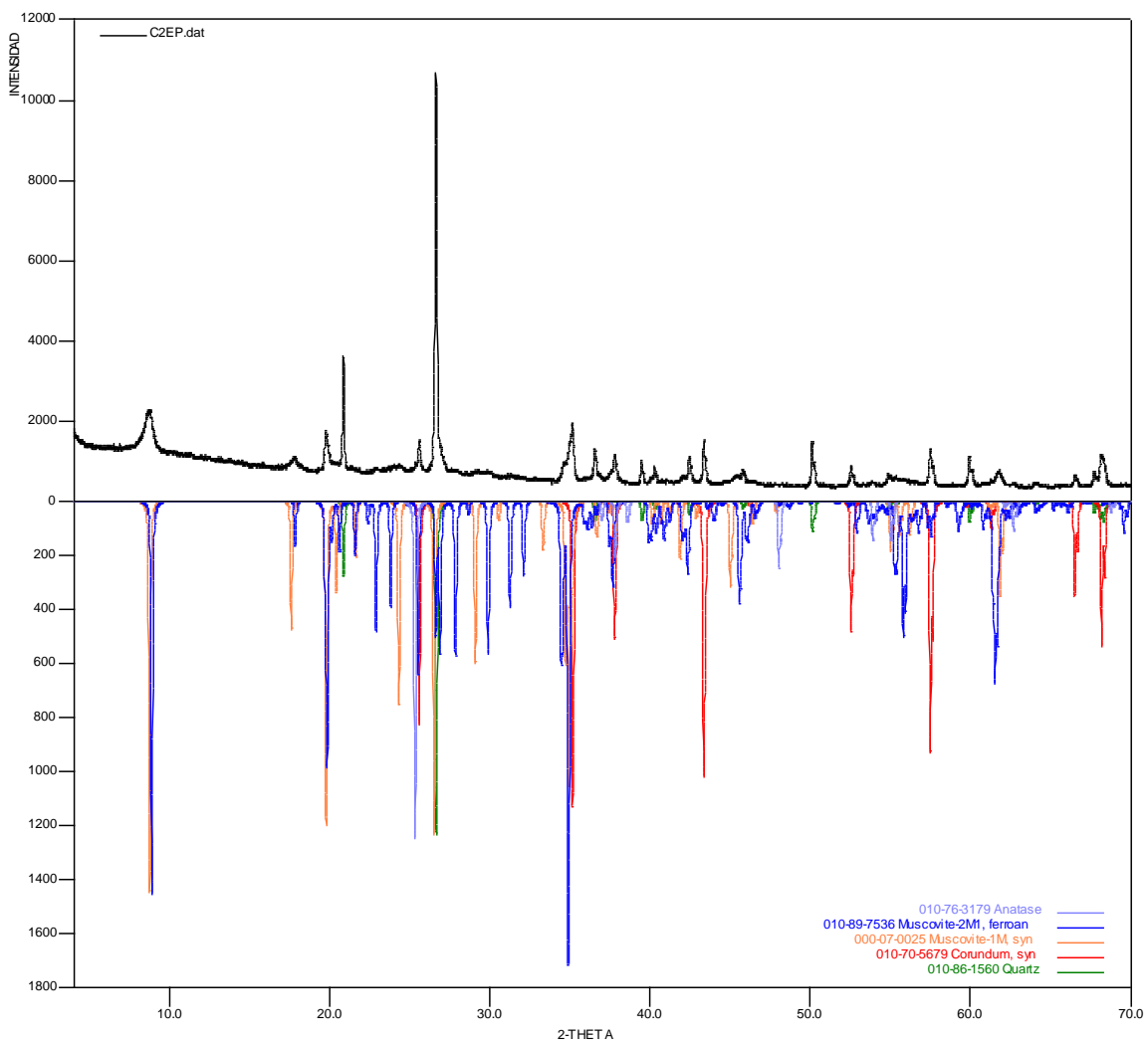
Observaciones:

- Se recomienda realizar análisis elemental para corroborar la presencia de las fases reportadas.
- En los perfiles de difracción se observa la fase de *Corundum - Aluminum Oxide* (estándar interno), el cual fue agregado a la muestra en una cantidad conocida para la respectiva cuantificación.

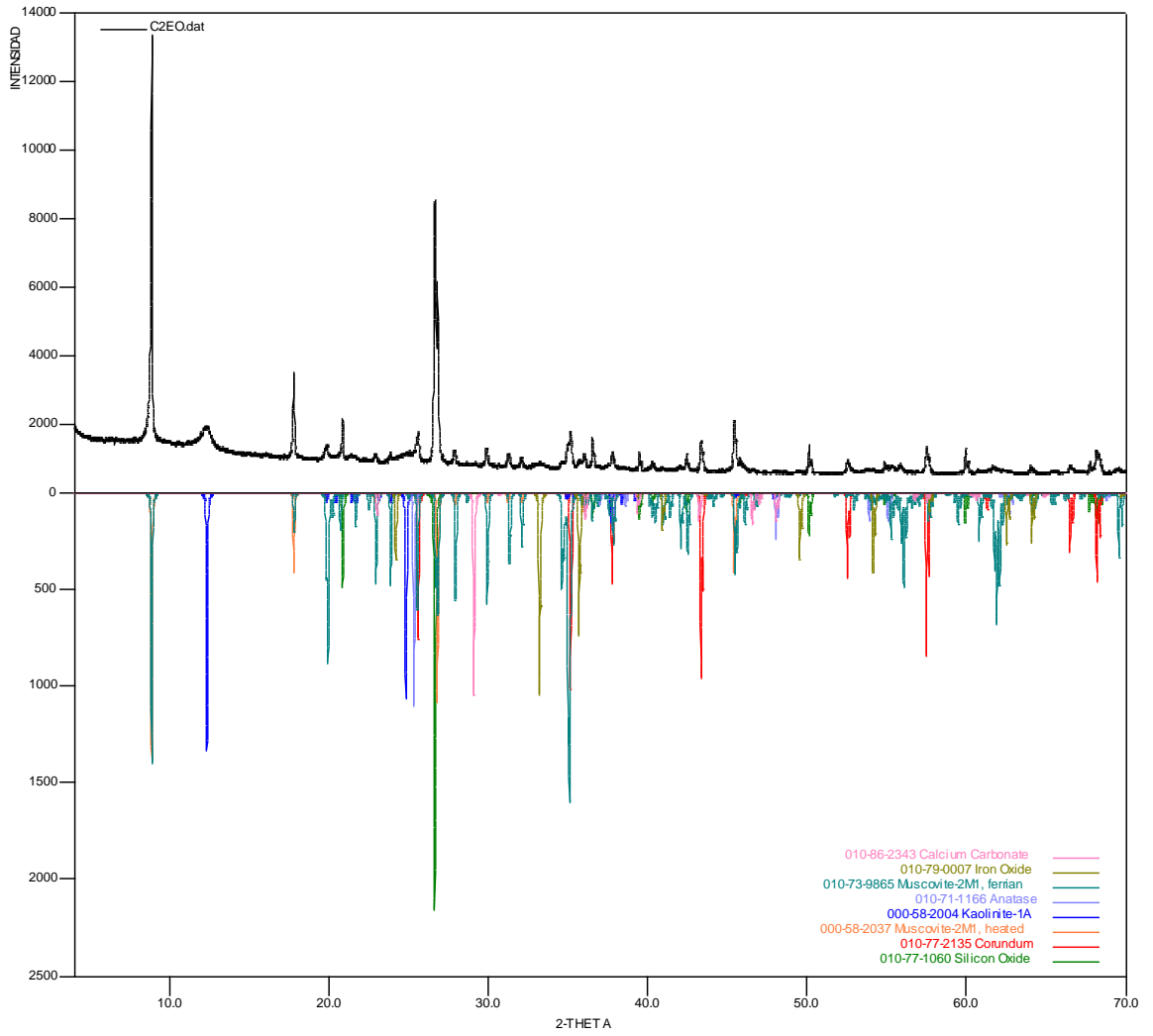
TAT-001



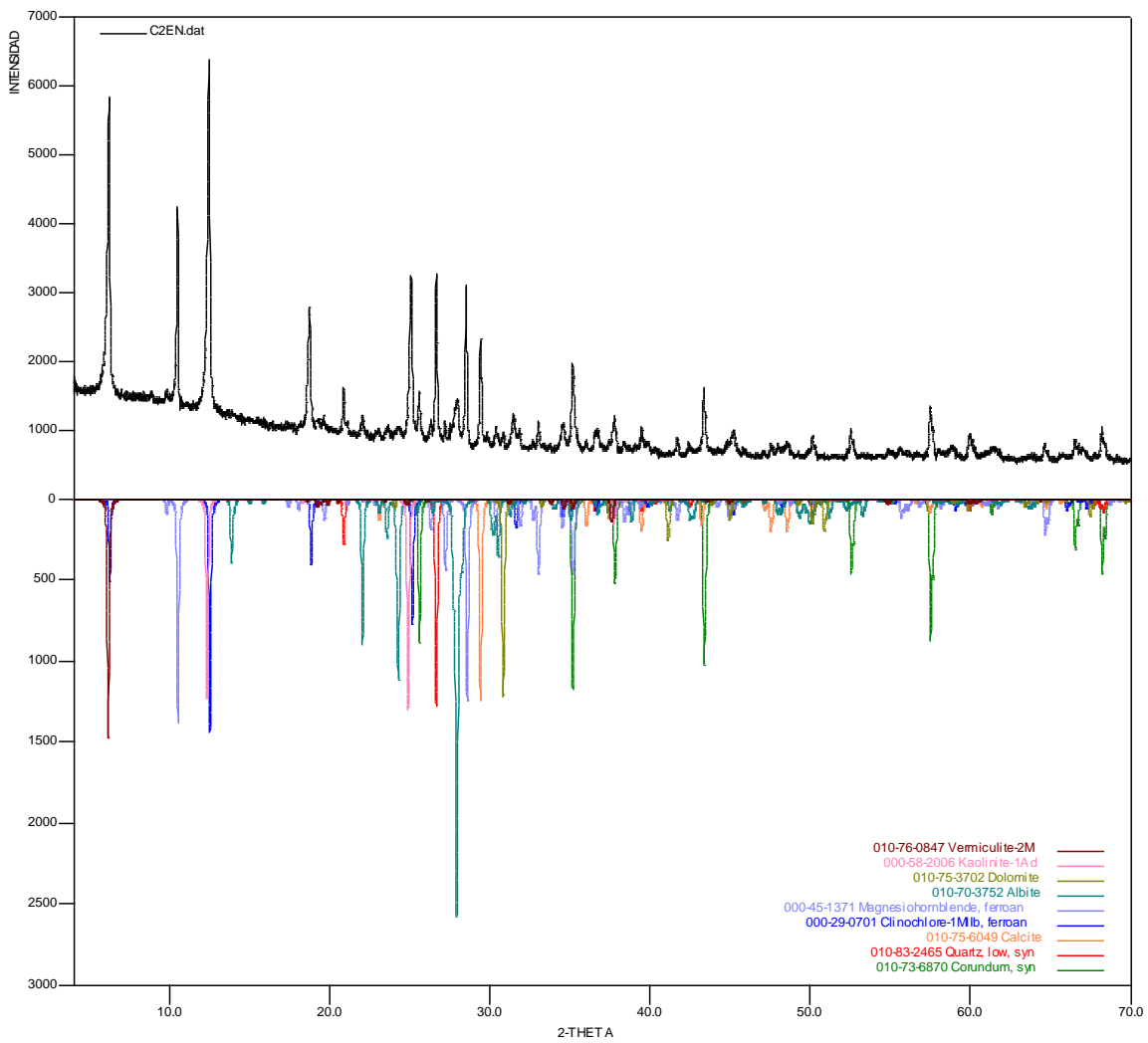
TAT-002



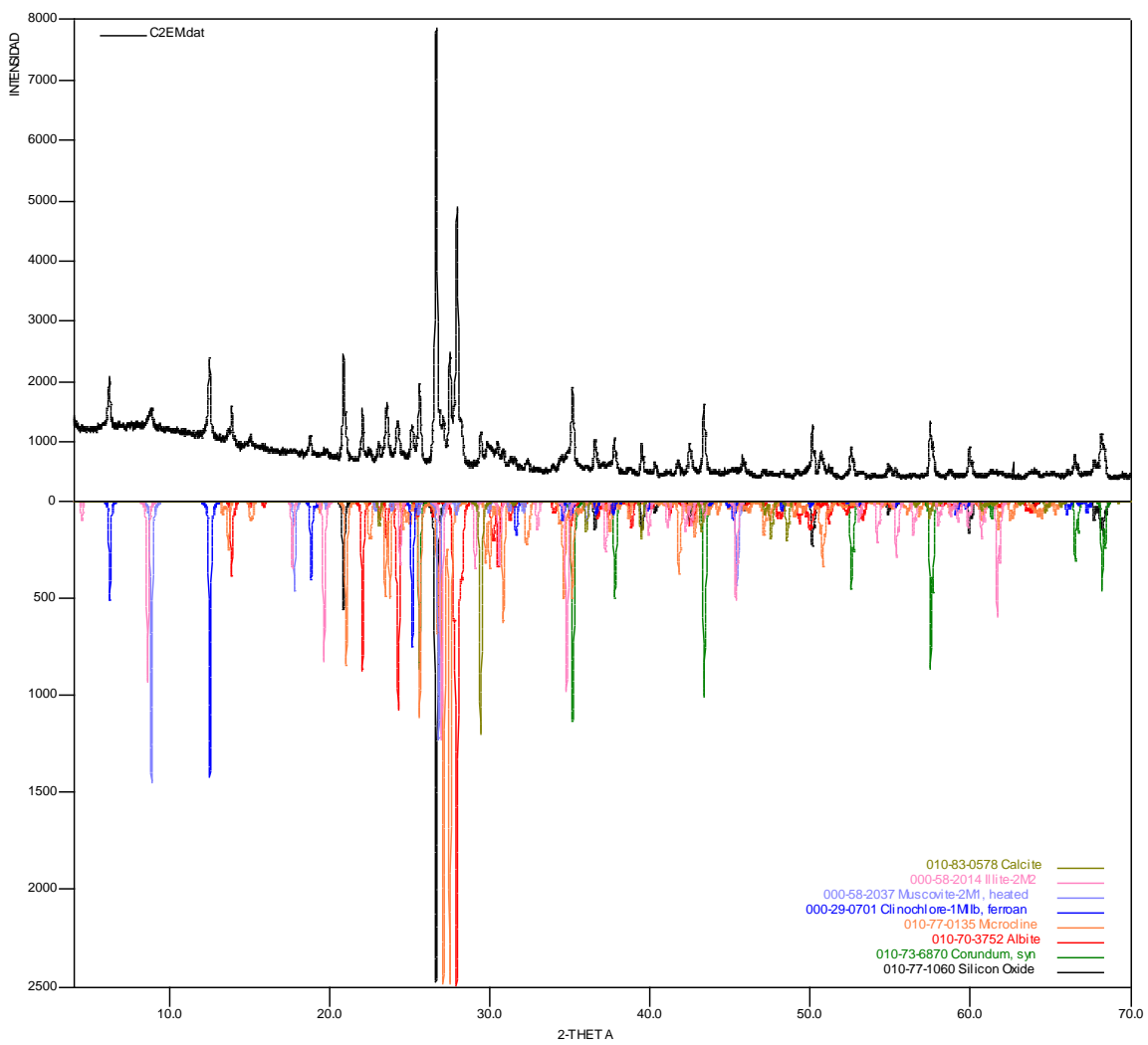
TAT-003



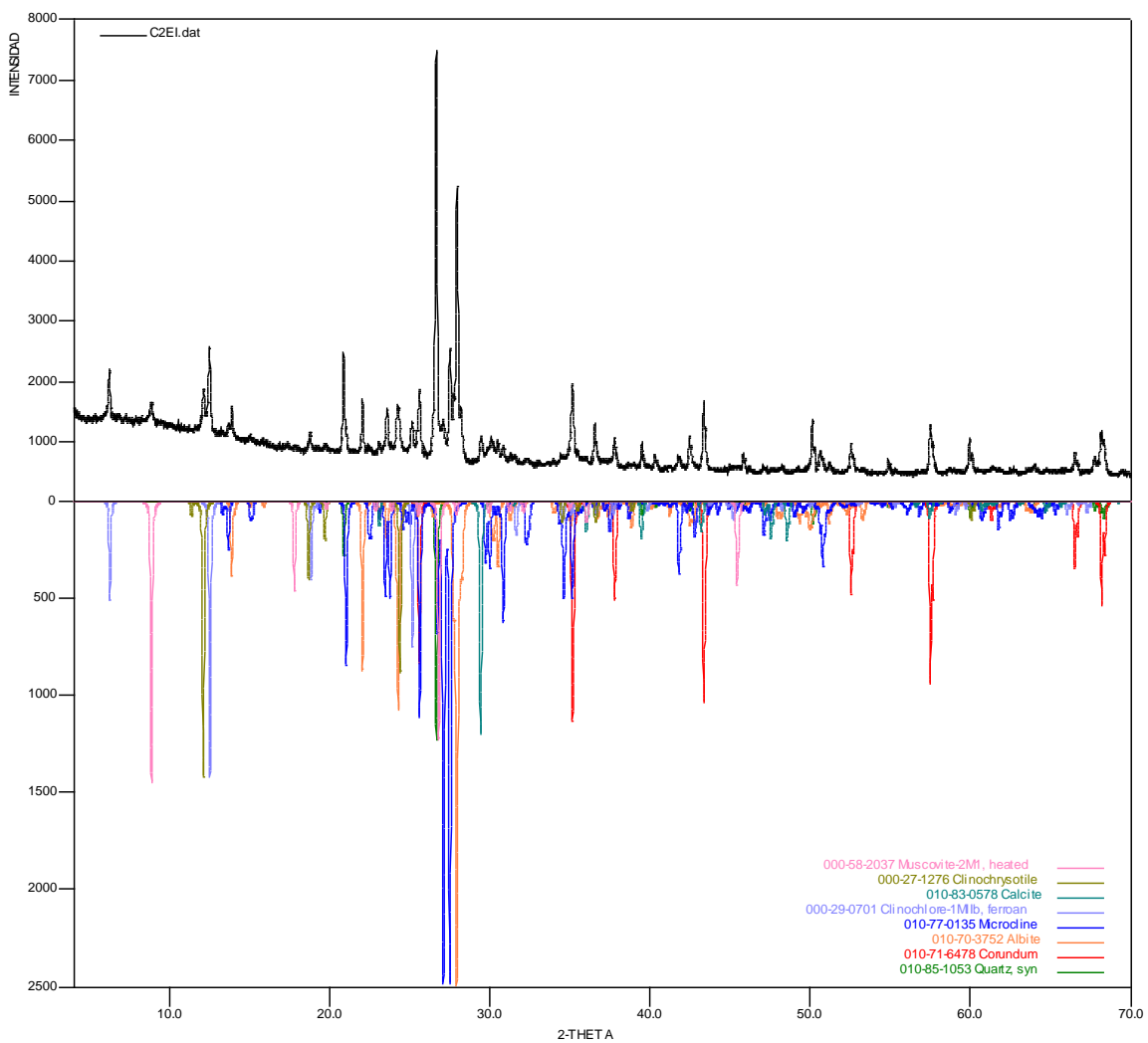
TAT-004



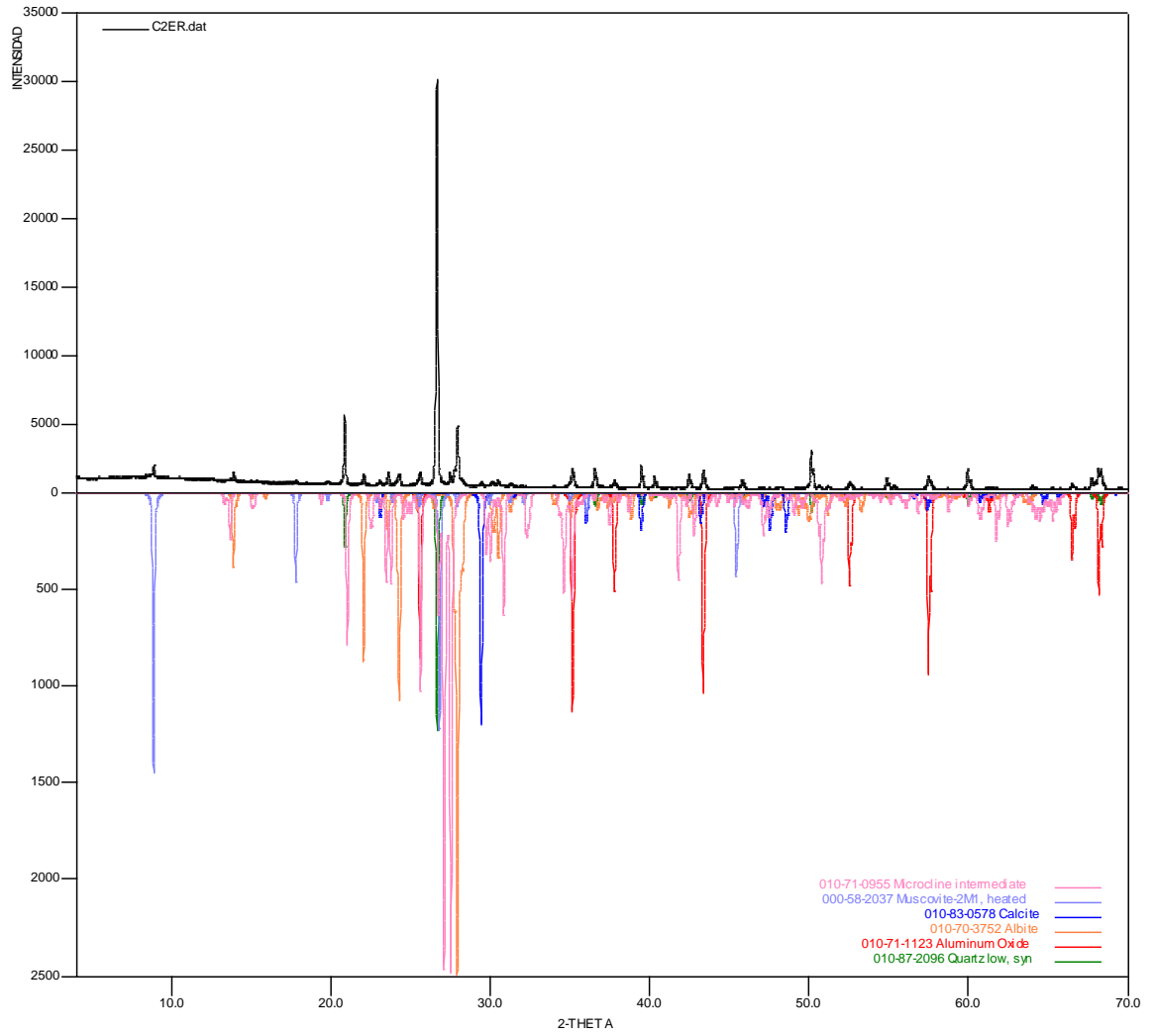
TAT-005



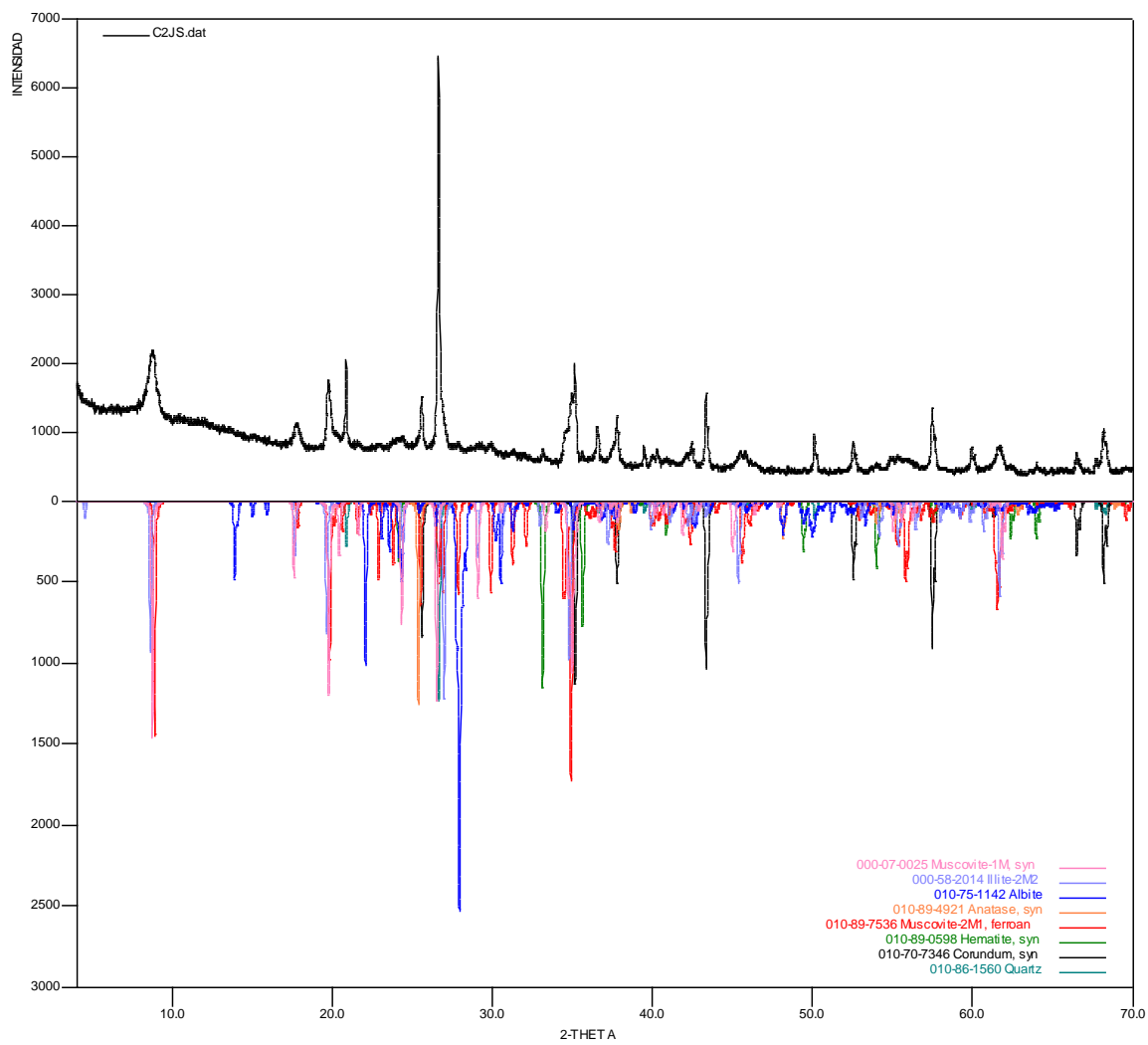
TAT-006



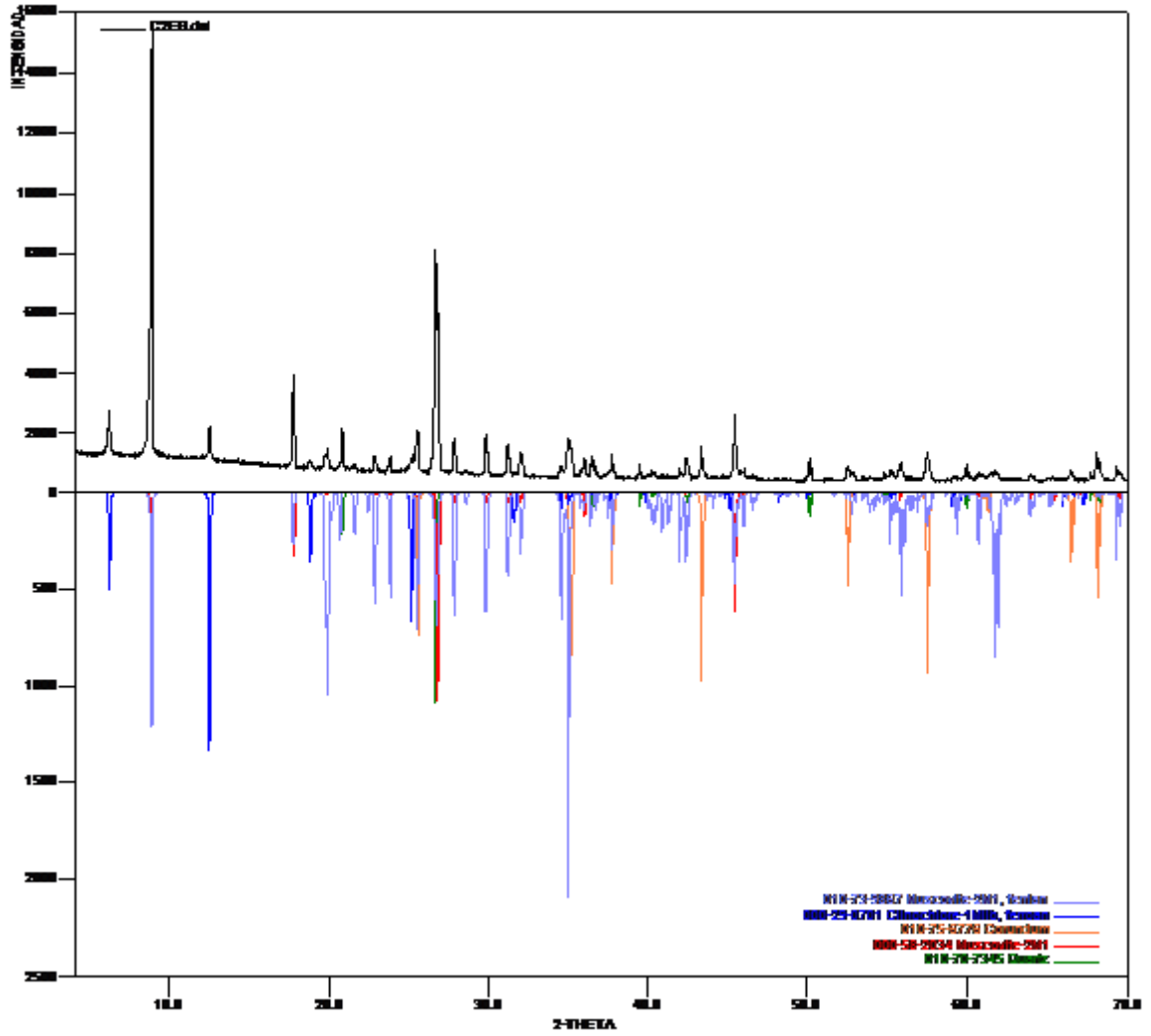
TAT-007 PEGMATITA



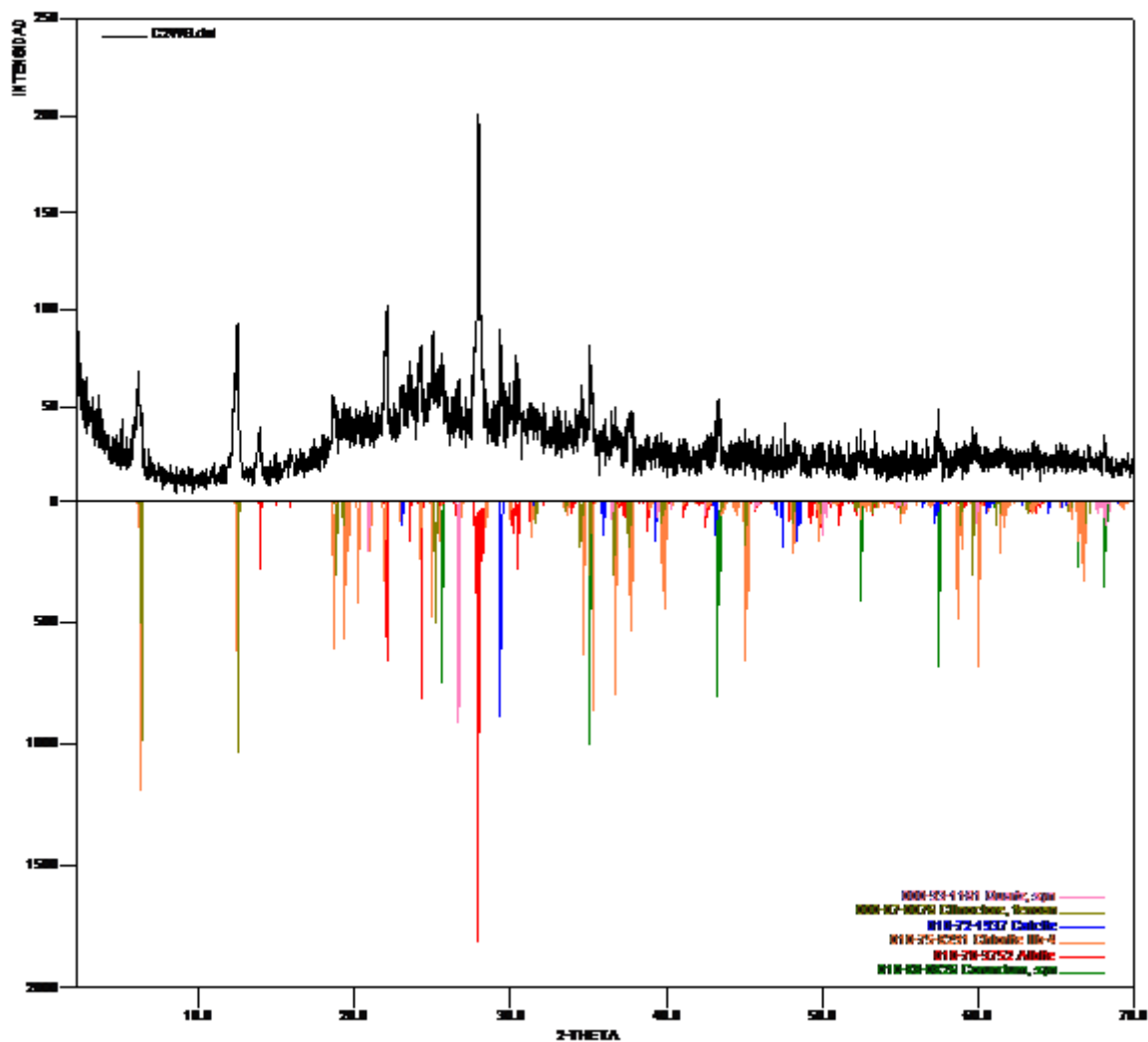
TAT-011



TAT-008



GR-135-209-001



Elaboró:

Revisó:

**Qco. José Luis Pinto C.
Pinilla A.**
Profesional Analista
PQ. 2009

Qco. MSc. Jesús Andelfo
Director Técnico
PQ. 1585

***ANEXOS 3. RESULTADOS ANALISIS DE ELEMENTOS MAYORES, MENORES
Y TRAZA***



**ALS
Minerals**

ALS Colombia Ltda.
Parque Agroindustrial Perú
Bodega No. 4 (Km 2 via Siberia)
Funza, Cundinamarca
Phone: (+)57 1 826 1635 www.alsglobal.com

To: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
CARRERA 27 CALLE 9
BUCARAMANGA NORTE DE SANTANDER

Page: 1
Finalized Date: 12- OCT- 2010
Account: VERSIS

CERTIFICATE BG10109935

Project: MACIZO DE SANTANDER
P.O. No.:
This report is for 7 Rock samples submitted to our lab in Bogota, Colombia on 1-OCT-2010.
The following have access to data associated with this certificate:
NHORA MANCILLA AURA TRASLAVIÑA

SAMPLE PREPARATION

ALS CODE	DESCRIPTION
WEI- 21	Received Sample Weight
LOG- 22	Sample login - Rcd w/o BarCode
CRU- QC	Crushing QC Test
PUL- QC	Pulverizing QC Test
CRU- 31	Fine crushing - 70% <2mm
SPL- 21	Split sample - riffle splitter
PUL- 31	Pulverize split to 85% <75 um

ANALYTICAL PROCEDURES

ALS CODE	DESCRIPTION	
Fe- VOL05	FeO (Ferrous Iron)	
ME- XRF1 2st	Whole rock by XRF- selected analytes	XRF
OA- GRA05	Loss on Ignition at 1000C	WST- SEQ
ME- MS41	51 anal. aqua regia ICPMS	

To: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ATTN: AURA TRASLAVIÑA
CARRERA 27 CALLE 9
BUCARAMANGA NORTE DE SANTANDER

This is the Final Report and supersedes any preliminary report with this certificate number. Results apply to samples as submitted. All pages of this report have been checked and approved for release.

Signature: Milder Mascaraqui
Milder Mascaraqui, Laboratory Manager, Peru



ALS Colombia Ltda.
 Parque Agroindustrial Perú
 Bodega No. 4 (Km 2 via Siberia)
 Funza, Cundinamarca
 Phone: (+57) 1 826 1635 www.alsglobal.com

To: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 CARRERA 27 CALLE 9
 BUCARAMANGA NORTE DE SANTANDER

Page: 2 - A
 Total # Pages: 2 (A - E)
 Plus Appendix Pages
 Finalized Date: 12- OCT- 2010
 Account: VERSIS

Project: MACIZO DE SANTANDER

CERTIFICATE OF ANALYSIS BG10109935

Sample Description	Method Analyte Units LOR	WEI- 21	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41
		Recvd Wt. kg	Ag ppm	Al %	As ppm	Au ppm	B ppm	Ba ppm	Be ppm	Bi ppm	Ca %	Cd ppm	Ce ppm	Co ppm	Cr ppm	Cs ppm
TAT- 001		0.31	0.01	0.42	1.7	<0.2	<10	40	0.22	0.04	<0.01	<0.01	63.1	0.4	1	3.13
TAT- 002		0.78	0.03	0.40	5.8	<0.2	<10	250	1.20	0.07	<0.01	0.02	82.7	4.1	1	3.21
TAT- 004		0.53	0.01	3.97	0.1	<0.2	<10	50	1.83	0.05	2.49	0.03	21.8	29.0	261	3.36
TAT- 005		0.36	0.19	1.98	0.8	<0.2	<10	40	1.43	0.29	1.44	0.03	38.6	14.4	56	2.02
TAT- 006		0.98	<0.01	0.46	0.1	<0.2	<10	30	0.44	0.03	0.74	0.02	39.2	1.7	6	0.74
TAT- 010		0.43	0.03	0.38	4.1	<0.2	<10	40	1.71	0.06	0.01	0.02	50.9	1.2	2	0.93
TAT- 011		0.52	0.01	0.39	1.1	<0.2	<10	240	0.63	0.02	0.01	0.16	80.8	0.5	2	2.31



ALS Colombia Ltda.
 Parque Agroindustrial Perú
 Bodega No. 4 (Km 2 via Siberia)
 Funza, Cundinamarca
 Phone: (+57) 1 826 1635 www.alsglobal.com

To: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 CARRERA 27 CALLE 9
 BUCARAMANGA NORTE DE SANTANDER

Page: 2 - B
 Total # Pages: 2 (A - E)
 Plus Appendix Pages
 Finalized Date: 12- OCT- 2010
 Account: VERSIS

Project: MACIZO DE SANTANDER

CERTIFICATE OF ANALYSIS BG10109935

Sample Description	Method Analyte Units LOR	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	ME- MS41	
		Cu ppm	Fe %	Ga ppm	Ge ppm	Hf ppm	Hg ppm	In ppm	K %	La ppm	Li ppm	Mg %	Mn ppm	Mo ppm	Na %	Nb ppm
TAT- 001		2.2	0.97	0.93	0.06	0.08	<0.01	<0.005	0.20	42.5	0.3	0.02	41	0.23	<0.01	0.24
TAT- 002		11.1	0.83	1.71	0.07	0.09	<0.01	0.005	0.19	43.6	0.5	0.01	976	5.44	<0.01	<0.05
TAT- 004		3.0	4.53	10.85	0.34	0.48	<0.01	0.130	0.13	9.7	145.5	5.07	1930	0.87	0.05	0.17
TAT- 005		6.8	3.49	13.50	0.25	0.81	0.01	0.100	0.10	18.5	91.0	1.74	1960	1.60	0.03	0.39
TAT- 006		1.2	1.06	3.59	0.09	0.36	<0.01	0.008	0.11	19.4	14.6	0.24	581	0.27	0.03	1.76
TAT- 010		6.2	0.86	1.78	0.06	0.11	<0.01	0.006	0.17	27.5	1.2	0.02	208	0.29	<0.01	0.08
TAT- 011		3.6	0.78	1.06	0.07	0.08	<0.01	<0.005	0.18	39.9	0.4	0.02	769	0.24	<0.01	0.17



ALS Colombia Ltda.
 Parque Agroindustrial Perú
 Bodega No. 4 (Km 2 via Siberia)
 Funza, Cundinamarca
 Phone: (+)57 1 826 1635 www.alsglobal.com

To: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 CARRERA 27 CALLE 9
 BUCARAMANGA NORTE DE SANTANDER

Page: 2 - C
 Total # Pages: 2 (A - E)
 Plus Appendix Pages
 Finalized Date: 12- OCT- 2010
 Account: VERSIS

Project: MACIZO DE SANTANDER

CERTIFICATE OF ANALYSIS BG10109935

Sample Description	Method Analyte Units LOR	ME-MS41 Ni ppm	ME-MS41 P ppm	ME-MS41 Pb ppm	ME-MS41 Rb ppm	ME-MS41 Re ppm	ME-MS41 S %	ME-MS41 Sb ppm	ME-MS41 Sc ppm	ME-MS41 Se ppm	ME-MS41 Sn ppm	ME-MS41 Sr ppm	ME-MS41 Ta ppm	ME-MS41 Te ppm	ME-MS41 Th ppm	ME-MS41 Ti %
TAT-001		0.4	30	4.7	13.6	<0.001	<-0.01	0.08	1.1	<-0.2	<-0.2	1.1	<-0.01	0.02	8.8	0.006
TAT-002		1.3	300	39.9	13.4	<0.001	<-0.01	<-0.05	1.8	<-0.2	0.2	6.3	<-0.01	0.07	8.4	<-0.005
TAT-004		253	1020	3.3	14.5	<0.001	0.01	<-0.05	6.6	<-0.2	0.5	74.0	<-0.01	0.02	1.0	0.298
TAT-005		24.5	480	3.3	9.1	<0.001	0.03	0.20	9.0	0.4	2.8	13.4	<-0.01	0.09	6.0	0.204
TAT-006		1.5	300	2.4	9.5	<0.001	<-0.01	<-0.05	2.2	<-0.2	0.9	12.5	<-0.01	<-0.01	10.3	0.057
TAT-010		1.2	270	12.0	12.1	<0.001	<-0.01	<-0.05	1.4	<-0.2	<-0.2	1.7	<-0.01	<-0.01	9.7	<-0.005
TAT-011		0.4	140	6.3	12.8	<0.001	<-0.01	<-0.05	1.1	<-0.2	<-0.2	6.3	<-0.01	<-0.01	8.0	0.007



ALS Colombia Ltda.
 Parque Agroindustrial Perú
 Bodega No. 4 (Km 2 via Siberia)
 Funza, Cundinamarca
 Phone: (+)57 1 826 1635 www.alsglobal.com

To: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 CARRERA 27 CALLE 9
 BUCARAMANGA NORTE DE SANTANDER

Page: 2 - D
 Total # Pages: 2 (A - E)
 Plus Appendix Pages
 Finalized Date: 12- OCT- 2010
 Account: VERSIS

Project: MACIZO DE SANTANDER

CERTIFICATE OF ANALYSIS BG10109935

Sample Description	Method Analyte Units LOR	ME-MS41 Ti ppm	ME-MS41 U ppm	ME-MS41 V ppm	ME-MS41 W ppm	ME-MS41 Y ppm	ME-MS41 Zn ppm	ME-MS41 Zr ppm	Fe-VOL05 FeO %	ME-XRF12st Al2O3 %	ME-XRF12st BaO %	ME-XRF12st CaO %	ME-XRF12st Cr2O3 %	ME-XRF12st Fe2O3 %	ME-XRF12st K2O %	ME-XRF12st MgO %
TAT-001		0.12	0.45	5	0.47	12.45	2	1.7	0.43	16.15	0.043	0.03	0.003	2.96	4.99	0.67
TAT-002		0.19	4.66	4	0.05	16.40	6	2.1	0.39	14.95	0.064	0.03	0.005	2.27	4.33	0.63
TAT-004		0.17	0.36	86	0.31	8.40	256	12.4	5.84	14.50	0.033	8.44	0.081	10.00	0.913	10.80
TAT-005		0.05	1.00	50	1.29	22.6	86	19.6	3.08	14.45	0.085	2.45	0.010	5.15	3.63	3.01
TAT-006		0.05	0.98	11	0.22	12.75	26	5.0	0.92	13.70	0.136	1.31	0.006	1.74	4.99	0.50
TAT-010		0.08	10.20	4	<-0.05	16.00	11	2.9	0.43	14.35	0.043	0.04	0.006	2.32	4.19	0.61
TAT-011		0.27	0.83	3	0.32	14.60	2	1.7	0.34	15.20	0.078	0.04	0.001	2.63	4.67	0.89



ALS Colombia Ltda.
 Parque Agroindustrial Perú
 Bodega No. 4 (Km 2 via Siberia)
 Funza, Cundinamarca
 Phone: (+)57 1 826 1635 www.alsglobal.com

To: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
 CARRERA 27 CALLE 9
 BUCARAMANGA NORTE DE SANTANDER

Page: 2 - E
 Total # Pages: 2 (A - E)
 Plus Appendix Pages
 Finalized Date: 12- OCT- 2010
 Account: VERSIS

Project: MACIZO DE SANTANDER

CERTIFICATE OF ANALYSIS BG10109935

Sample Description	Method Analyte Units LOR	ME-XRF12st MnO %	ME-XRF12st Na2O %	ME-XRF12st P2O5 %	ME-XRF12st SiO2 %	ME-XRF12st SrO %	ME-XRF12st TiO2 %	OA-GRA05 LOI %
TAT-001		0.031	0.005	0.012	71.1	<0.001	0.48	2.75
TAT-002		0.138	<0.001	0.088	74.7	<0.001	0.43	2.63
TAT-004		0.351	1.525	0.238	47.5	0.034	1.12	5.90
TAT-005		0.268	3.15	0.115	63.6	0.016	0.73	3.17
TAT-006		0.081	3.62	0.071	72.4	0.018	0.30	1.29
TAT-010		0.037	0.012	0.071	76.5	<0.001	0.43	2.58
TAT-011		0.124	<0.001	0.083	73.3	<0.001	0.45	2.75



ALS Colombia Ltda.
Parque Agroindustrial Perú
Bodega No. 4 (Km 2 via Siberia)
Funza, Cundinamarca
Phone: (+57 1 826 1635 www.alsglobal.com

To: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
CARRERA 27 CALLE 9
BUCARAMANGA NORTE DE SANTANDER

Page: Appendix 1
Total # Appendix Pages: 1
Finalized Date: 12-OCT-2010
Account: VERSIS

Project: MACIZO DE SANTANDER

CERTIFICATE OF ANALYSIS BG10109935

Method	CERTIFICATE COMMENTS
ME-MS41	Cold determinations by this method are semi-quantitative due to the small sample weight used (0.5g).

ANEXOS 4. RESULTADOS DE ANALISIS DE TIERRAS RARAS

Muestra TAT-004

BG10179586 - Finalized
 CLIENT : VERSIS - Universidad Industrial de Santander
 # of SAMPLES : 10
 DATE RECEIVED : 2010-12-01 DATE FINALIZED : 2010-12-16
 PROJECT : MACIZO DE SANTANDER
 CERTIFICATE COMMENTS :
 PO NUMBER :

	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
SAMPLE	Ag	Ba	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf
DESCRIPTION	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	<1	284	69,3	37,8	610	3,54	<5	4,16	2,51	1,44	19,2	5,08	4,1

ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
Ho	La	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0,9	33,7	0,34	<2	7,8	34	304	11	8,67	65,5	6,15	1	337	

ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
Ta	Tb	Th	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0,5	0,79	6,1	0,7	0,37	1,48	170	2	23,1	2,3	340	180

Muestra TAT-010

BG10179586 - Finalized
 CLIENT : VERSIS - Universidad Industrial de Santander
 # of SAMPLES : 10
 DATE RECEIVED : 2010-12-01 DATE FINALIZED : 2010-12-16
 PROJECT : MACIZO DE SANTANDER
 CERTIFICATE COMMENTS :
 PO NUMBER :

	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
SAMPLE	Ag	Ba	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf
DESCRIPTION	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
	<1	322	63	1,7	<10	5,13	7	4,09	2,74	0,99	17,8	4,22	5,3

ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81
Ho	La	Lu	Mo	Nb	Nd	Ni	Pb	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
0,93	33,5	0,45	<2	16,9	27,7	<5	17	7,74	181,5	5,05	2	11,5

ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	ME-MS81	
Ta	Tb	Th	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr
ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1,4	0,73	17,5	0,8	0,44	16,2	39	2	25,8	2,88	37	212