

INTRODUCCIÓN

La biotita es un mineral ampliamente distribuido en terrenos metamórficos, y muchos estudios que han ayudado al entendimiento de la petrogénesis de rocas metamórficas con frecuencia modelan equilibrios que involucran la biotita.

El propósito de este artículo es presentar datos petrográficos y de química mineral acerca de la biotita que ocurre en las rocas metamórficas de la Formación Silgará que afloran en la región suroccidental del Macizo de Santander, con el fin de establecer el significado petrológico de este mineral con respecto al grado de metamorfismo. El comportamiento químico de la biotita durante el metamorfismo es de gran importancia, ya que este mineral participa en muchas reacciones que ocurren en rocas metapelíticas entre la facies de esquistos verdes y la facies de anfibolita, y ha sido ampliamente utilizado en muchos geotermómetros y geobarómetros. Estudios recientes (p.e., Schäfer et al., 1998; Ríos, 1999; Ríos and Takasu, 1999; García y Ríos, 1999), han realizado un análisis de la composición química de las fases minerales presentes en las rocas metamórficas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander. Ríos (1999), considera que la composición química de las rocas metamórficas ejerce un fuerte control y obscurece los cambios químicos producidos por la presión y la temperatura. Por otra parte, García y Campos (2001), discuten acerca de la composición química, los patrones de absorción atómica y de difracción de rayos X, de la biotita en la región central del Macizo de Santander con respecto al grado de metamorfismo.

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La preparación de secciones delgadas, así como su estudio mineralógico y petrográfico, se llevaron a cabo, respectivamente, en los laboratorios de preparación de muestras y de microscopía de luz transmitida del Departamento de Geociencias de la Universidad de Shimane (Japón). Los análisis de microsonda electrónica se realizaron en el Research Center for Coastal Lagoon Environments de la

Universidad de Shimane, usando un analizador JEOL JXA 8800M bajo las siguientes condiciones: voltaje de aceleración de 15 kV y corriente de prueba de 2.0×10^{-8} Å. La composición química de la biotita en las rocas metapelíticas y máficas de la Formación Silgará en el área de estudio fue determinada a partir de múltiples puntos de análisis. Para este mineral, todo el Fe ha sido asumido como Fe^{2+} y la normalización fue llevada a cabo con base en 22 oxígenos. La adquisición y reducción de los datos analíticos fue llevada a cabo a partir del programa ZAF. Como estándares fueron utilizados minerales naturales y sintéticos.

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El Macizo de Santander forma parte de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos (FIGURA 1). El área de estudio comprende la región suroccidental del Macizo de Santander. La geología regional del Macizo de Santander ha sido estudiada en detalle por Ward et al. (1973). El complejo metamórfico pre-Devónico del Macizo de Santander está constituido por tres unidades en orden ascendente de nivel tectono-estratigráfico: Formación Neis de Bucaramanga, Formación Silgará y Formación Ortoneis, las cuales son cortadas por cuerpos intrusivos principalmente de edad Paleozoica a Jurásica (p.e., Goldsmith et al., 1971). Las rocas metamórficas que afloran en el macizo corresponden a neises y anfibolitas de la Formación Neis de Bucaramanga, esquistos, cuarcitas y mármoles de la Formación Silgará, y neises micáceos y anfibolitas de la Formación Ortoneis.

No obstante, en el área de estudio las rocas metamórficas de interés corresponden a aquellas de la Formación Silgará, la cual generalmente tiene un rumbo NW-SE, buzando al SW. La principal estructura de carácter regional es la Falla de Bucaramanga de dirección NW que pone en contacto a esta unidad metamórfica con rocas de la Formación Neis de Bucaramanga. Al SW, cerca de Aratoca, la Formación Floresta del Devónico Medio probablemente suprayace a la Formación Silgará (Ward et al, 1973), la cual está muy plegada y afectada por la Falla Los Santos - Aratoca de

OCURRENCIA, COMPOSICIÓN QUÍMICA Y SIGNIFICADO GENÉTICO DE LA BIOTITA EN LAS ROCAS METAMÓRFICAS DE LA FORMACIÓN SILGARÁ EN LA REGIÓN SUROCCIDENTAL DEL MACIZO DE SANTANDER

Ríos Reyes, C. A.¹

RESUMEN

La Formación Silgará del Paleozoico Inferior es una secuencia principalmente compuesta por rocas metapelíticas e intercalaciones de rocas máficas que forma parte del basamento metamórfico que aflora en la región suroccidental del Macizo de Santander. Las rocas metamórficas de la Formación Silgará han sido afectadas por un metamorfismo de tipo Barroviense, desarrollándose una secuencia de zonas metamórficas (silimanita, estaurolita-cianita, granate, y biotita). El metamorfismo ha ocurrido bajo condiciones de temperatura alta y presión media, alcanzando la facies de anfibolita. Durante el proceso de metamorfismo prógrado de las rocas metamórficas del Macizo de Santander, la biotita ha crecido en un rango amplio de condiciones de presión y temperatura, y el cambio en su composición química tiende a reflejar el efecto de la química de la roca original antes que el grado de metamorfismo.

Palabras clave: *Macizo de Santander; Barroviense; biotita.*

ABSTRACT

The Lower Paleozoic Silgará Formation is a sequence composed mainly by metapelitic rocks and interlayered mafic rocks that form part of the metamorphic basement that crops out in the southwestern region of the Santander Massif. The Silgará Formation of metamorphic rocks have been affected by a Barrovian type metamorphism, developing a sequence of metamorphic zones (sillimanite, staurolite-kyanite, garnet, and biotite). Metamorphism has occurred under high-temperature and medium-pressure conditions, reaching the amphibolite facies. During the prograde metamorphism of the Santander Massif metamorphic rocks, the biotite has grown in a wide range of pressure and temperature conditions, and the change in its chemical composition tends to reflect the effect of the bulk-rock chemistry rather than the grade of metamorphism.

Keywords: *Santander Massif; Barrovian; biotite.*

¹Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, A.A. 678, Bucaramanga (COLOMBIA).
Correo electrónico: carios@uis.edu.co

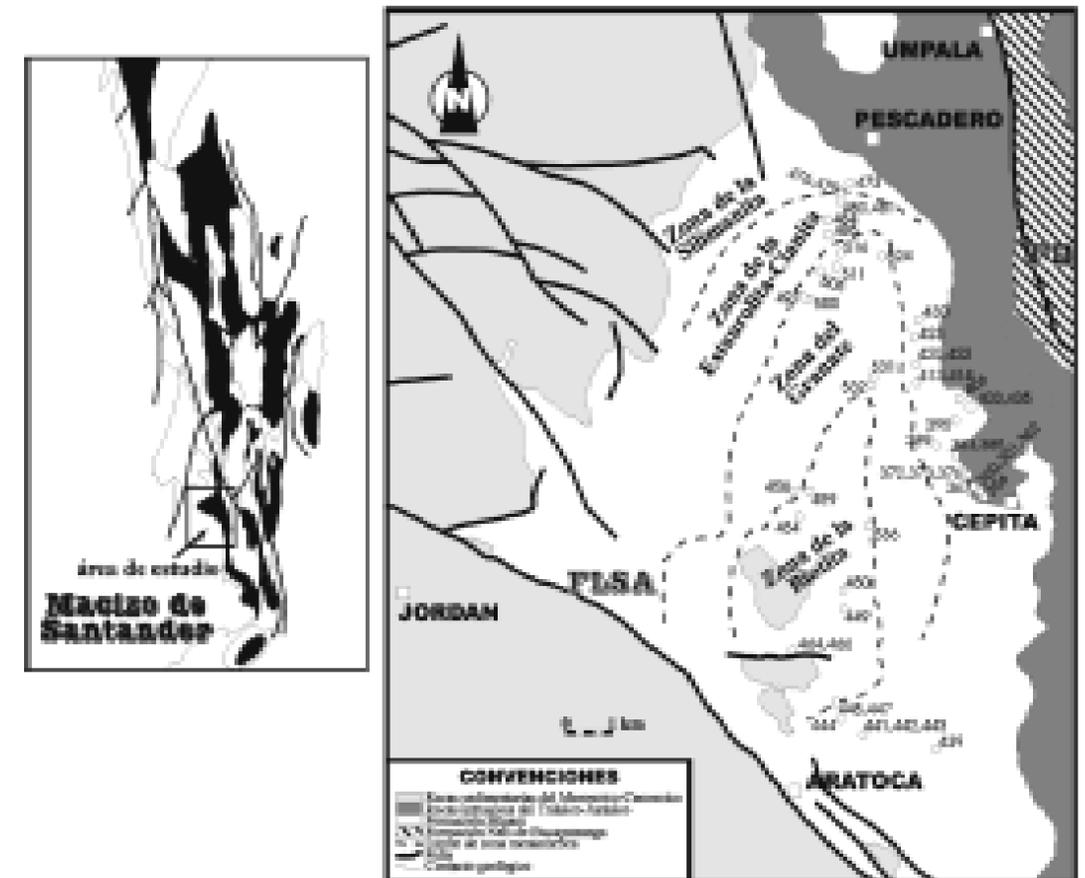


FIGURA 1. Mapa geológico generalizado del Macizo de Santander, mostrando la distribución de las rocas metamórficas de la Formación Silgará, según Goldsmith et al. (1971), y la localización y mapa geológico del área de estudio, modificado de Ward et al. (1973). La localización de las muestras con presencia de biotita se indica con puntos blancos (los números corresponden con aquellos usados en el presente estudio excepto por el prefijo PCM-. FB, Falla de Bucaramanga; FLSA, Falla Los Santos - Aratocha.

dirección NW-SE y está suprayacida inconformemente por una secuencia sedimentaria del Mesozoico. La Formación Silgará también está suprayacida inconformemente por esta secuencia al NW y SW. Rocas intrusivas de edad Triásico-Jurásico (Granito de Pescadero y Batolito de Mogotes) cortan la Formación Silgará al NE y E del área de estudio.

PETROGRAFÍA

Las rocas metamórficas de la Formación Silgará en la región suroccidental del Macizo de Santander corresponden a rocas metapelíticas y máficas. Las rocas metapelíticas comprenden esquistos pelíticos

de grano fino a muy fino y esquistos semipelíticos de grano medio a grueso, los cuales son típicamente foliados, presentan estructura esquistosa o *slaty cleavage*, y contienen con frecuencia una lineación mineral definida por la orientación preferencial de muscovita y biotita. Estas rocas se componen comúnmente de cuarzo, plagioclasa, muscovita, biotita, granate y estauroлита, con subordinadas cantidades de turmalina, apatito, circón, epidota, óxidos de Fe-Ti, y calcita. Generalmente, estas rocas contienen grafito e ilmenita. Las rocas máficas (esquistos biotítico-hornbléndicos) exhiben una estructura principalmente esquistosa, aunque en algunos casos es común observar una esquistosidad gruesa definida generalmente por la orientación

preferencial de hornblenda, biotita y epidota. Estas rocas consisten principalmente de hornblenda, biotita, plagioclasa, cuarzo, epidota, con minerales accesorios como esfena, apatito, circón, óxidos de Fe-Ti, y calcita. La fábrica principal en algunas rocas máficas es sobrecrecida post-tectónicamente por porfidoblastos de hornblenda y se caracteriza por presentar nematoblastos de hornblenda de grano medio a grueso de carácter idioblástico.

La biotita muestra un carácter subidioblástico (bordes largos rectos y extremos astillosos), es invariablemente parda o verde, y fuertemente pleocroica (x: amarillo, y: pardo, z: pardo). Este mineral comúnmente exhibe halos pleocroicos, los cuales son atribuidos a la presencia de circón u otros minerales que contienen elementos radioactivos, y ha sido reemplazada parcial o totalmente por clorita, desarrollando ya sea bordes de reacción de clorita alrededor de relictos de biotita o pseudomorfo de clorita después de biotita, dando al mineral un color pardo verdoso variable.

ZONACIÓN METAMÓRFICA

Las paragénesis minerales en las rocas metamórficas de la Formación Silgará, sugieren un rango de metamorfismo de la facies de esquistos verdes a la facies de anfibolita, y las paragénesis minerales en las rocas máficas indican que éstas han sido equilibradas bajo condiciones metamórficas de la facies epidota-anfibolita a la facies anfibolita. La Formación Silgará ha sido afectada por un metamorfismo de tipo Barroviense a través del cual una secuencia de zonas metamórficas (biotita, granate, estaurolita-cianita y silimanita) se ha desarrollado, lo cual ha permitido definir la estructura térmica regional. El grado metamórfico regional disminuye hacia el sur desde el área de Pescadero hasta el área de La Mesa de San Pedro. El metamorfismo ha ocurrido en condiciones de alta temperatura y media presión. Las rocas metamórficas han sido afectadas por un extenso metamorfismo retrógrado. La biotita se ha formado en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura. Abreviaturas minerales según Kretz (1983).

En la *zona de la biotita* las rocas pelíticas están caracterizadas por la paragénesis mineral $\text{Chl} + \text{Ms} \pm \text{Bt} + \text{Qtz} + \text{Pl}$, con ilmenita y grafito como minerales accesorios. Aquí se observa un *slaty cleavage* S_1 , así como una superficie de esquistosidad S_2 , la cual representa la foliación regional a través de todas las zonas metamórficas. Se puede distinguir dos generaciones de biotita, como pequeños cristales paralelos a S_2 y como grandes porfidoblastos orientados al azar que han sobrecrecido la fábrica principal de la roca. En la *zona del granate* la paragénesis mineral más abundante es $\text{Bt} + \text{Ms} + \text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Chl} \pm \text{Grt}$, con una cantidad subordinada de feldespato potásico, turmalina, apatito, circón, epidota, calcita, y óxidos de Fe-Ti. Se pueden reconocer tres generaciones de biotita, como pequeños cristales paralelos a S_2 , como grandes cristales con su traza de exfoliación $\{001\}$ paralela a una foliación aún más joven S_3 , la cual se dispone aproximadamente a 30° con respecto a S_2 , y como grandes porfidoblastos orientados al azar que han crecido post-tectónicamente a S_1 o S_2 . Las paragénesis más abundantes en la *zona de la estaurolita-cianita* incluyen $\text{Bt} + \text{Ms} + \text{Pl} + \text{Qtz} \pm \text{Grt} \pm \text{St} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Pl} + \text{Qtz} + \text{Grt} + \text{St} \pm \text{Ky} \pm \text{And} \pm \text{Sil}$, con menor cantidad de feldespato potásico, turmalina, apatito, circón, epidota, calcita, y óxidos de Fe-Ti. Grandes porfidoblastos de granate, estaurolita y biotita y/o muscovita han crecido post-tectónicamente a la foliación principal de la roca. Los filosilicatos e ilmenita se disponen en forma paralela a S_2 envolviendo granate. En las rocas máficas las paragénesis típicas son $\text{Hbl} \pm \text{Bt} + \text{Pl} + \text{Qtz}$ y $\text{Ep} + \text{Bt} + \text{Hbl} + \text{Pl}$, con minerales accesorios tales como apatito, circón, calcita, y óxidos de Fe-Ti. Rocas pelíticas ricas en Ca contienen la paragénesis $\text{Grt} + \text{Hbl} + \text{Pl}$. La paragénesis típica en la zona de la silimanita es $\text{Bt} + \text{Ms} + \text{Qtz} + \text{Pl} + \text{Grt} \pm \text{St} \pm \text{Sil}$, con menor cantidad de turmalina, apatito, circón, y óxidos de Fe-Ti. Los filosilicatos muestran comúnmente un arreglo irregular desarrollando una textura decusada.

QUÍMICA MINERAL

Los análisis químicos representativos de la biotita son dados en la TABLA 1. La composición química de la biotita muestra que Al^{IV} varía entre 2.267 y

Ríos, C., Takasu, A. (1999). Chemical zoning of garnet from the low-grade metamorphic rocks of the Silgará Formation, Santander Massif, Eastern Cordillera (Colombian Andes). *Geosciences Reports of Shimane University*, Vol. 18, pp. 97-107.

Robinson, P. et al. (1982). High grade Acadian regional metamorphism in south-central Massachusetts. In: NEIGC 74th Annual Meeting of the State Geological and Natural History Survey of Connecticut, Guidebook for Fieldtrips in Connecticut and South-Central Massachusetts (eds. Joesten, R.A. & Quarrier, S.S.), pp. 289-340.

Schäfer, J., Grösser, J., Rodríguez, G. (1998). Proterozoic Formación Silgará, Cordillera Oriental, Colombia: metamorphism and geochemistry of amphibolites. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, 1997 (3-6), Stuttgart, pp. 531-546.

Tornos, F., Casquet, C. (1982). Caracterización de neises glandulares del alto valle del Losoya (Sistema Central Español) en base al quimismo de las biotitas y estado estructural del feldespato potásico. *Boletín Geológico y Minero T*, Vol. XCIII-I, pp. 68-78.

Ward, D. et al. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. *Boletín Geológico*, Vol. XXI, No 1-3.

Trabajo recibido: julio 25 de 2001

Trabajo aceptado: agosto 22 de 2001

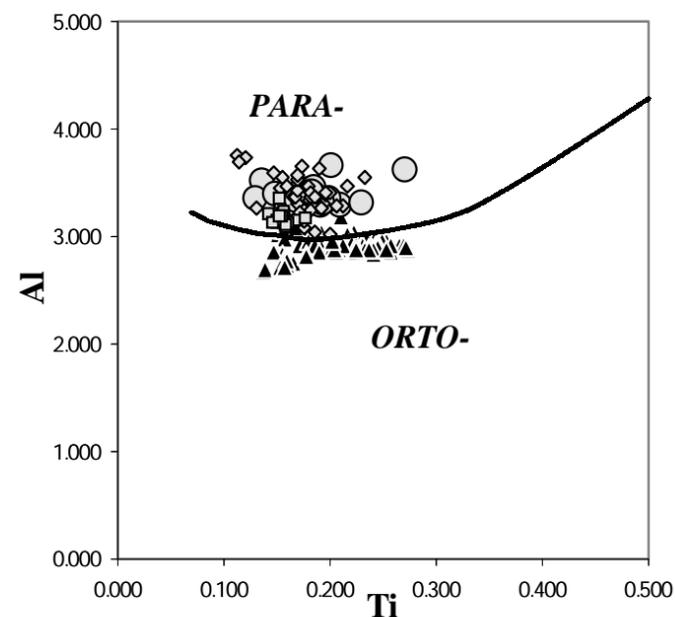


FIGURA 5. Diagrama de Guitard (1970, en Tornos y Casquet, 1982) para la discriminación de la composición química de la biotita de la Formación Silgará de origen ígneo (ORTO-) o sedimentario (PARA-) en función de Al/Ti. Rocas metapelíticas: Círculos, zona de la silimanita; Rombos, zona de la estauroлита-сianita; Cuadrados, zona del granate. Rocas máficas, triángulos negros.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos en primer lugar a la Universidad Industrial de Santander y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología "Francisco José de Caldas" COLCIENCIAS, entidades que brindaron el soporte financiero para el desarrollo del trabajo de campo a través del proyecto de investigación 1102-05-083-95 "Metamorfismo y metalogena asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental (COLOMBIA)". Parte de este trabajo fue soportado también gracias a la colaboración del Research Center for Coastal Lagoon Environments de la Universidad de Shimane, entidad con la cual estoy más que agradecido por permitirme el uso de la microsonda electrónica, durante mis estudios de Maestría.

REFERENCIAS

García, C., Campos, N. (2000). Composición química y mineralogía de las biotitas metamórficas del sector central del Macizo de Santander, Colombia. Boletín de Geología UIS, Vol. 22, N° 37, pp. 18-27.

García, C., Ríos, C. (1999). Metamorfismo y metalogena asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental (COLOMBIA). Informe final del proyecto de investigación 1102-05-083-95 Colciencias - Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, p. 191.

Goldsmith, R., Marvin, R., Mehnert, H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional Paper, 750-D, pp. D41-D49.

Indares, A., Martignole, J. (1984). Evolution of P-T conditions during a high-grade metamorphic event in the Maniwaki area. Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 21, pp. 853-863.

Kretz, R. (1983). Symbols for rock-forming minerals. American Mineralogist, Vol. 68, pp. 277-279.

Ríos, C. (1999). Chemical Compositions of the Constituent Minerals and P-T Conditions of the Low-grade Silgará Formation Metamorphic Rocks in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. Master Tesis, Shimane University, Matsue (Japan), p. 207.

TABLA 1. Análisis químicos representativos de la biotita en las rocas metamórficas de la Formación Silgará, región suroccidental del Macizo de Santander.

Litología	RP	RSP	RSP	RSP	RP	RSP	RSP	RM	RM	RM	RM	RM
Zona met.	St-Ky	St-Ky	St-Ky	St-Ky	Grt	Sil	Grt	St-Ky	St-Ky	St-Ky	St-Ky	St-Ky
Muestra	PCM-361	PCM-403	PCM-413	PCM-414	PCM-441	PCM-473	PCM-500	PCM-356	PCM-480	PCM-481	PCM-497	PCM-531
SiO ₂	32,96	33,90	35,60	36,19	35,95	35,00	35,73	37,63	37,45	37,73	37,46	36,55
TiO ₂	1,23	1,11	1,65	1,38	1,37	1,54	1,39	2,19	2,14	1,73	1,60	1,56
Al ₂ O ₃	19,10	17,57	20,20	17,00	17,63	18,27	17,30	16,55	16,11	16,21	16,28	15,85
FeO ¹	25,27	23,04	18,32	16,99	17,33	21,63	18,48	14,99	14,59	13,40	13,13	13,09
MnO	0,15	0,18	0,04	0,12	0,45	0,03	0,48	0,17	0,26	0,11	0,25	0,15
MgO	8,67	9,10	8,47	12,49	11,63	8,47	11,27	14,40	14,08	15,00	16,52	16,22
Na ₂ O	0,18	0,21	0,26	0,17	0,13	0,20	0,09	0,11	0,16	0,16	0,13	0,10
K ₂ O	8,49	9,28	9,87	9,01	10,20	10,12	10,11	7,90	10,35	10,38	10,56	10,28
Total	96,05	94,39	94,41	93,35	94,69	95,26	94,85	93,94	95,14	94,72	95,93	93,80
Cationes por 22 Oxígenos												
Si	5,130	5,339	5,442	5,550	5,489	5,420	5,480	5,611	5,609	5,631	5,533	5,523
Ti	0,144	0,131	0,190	0,159	0,157	0,179	0,160	0,246	0,241	0,194	0,178	0,177
Al	3,504	3,261	3,639	3,073	3,172	3,334	3,127	2,908	2,843	2,851	2,834	2,822
Fe ²⁺	3,289	3,034	2,342	2,179	2,213	2,801	2,370	1,869	1,827	1,672	1,622	1,654
Mn	0,020	0,024	0,005	0,016	0,058	0,004	0,062	0,021	0,033	0,014	0,031	0,019
Mg	2,012	2,137	1,930	2,856	2,647	1,956	2,577	3,201	3,144	3,337	3,638	3,654
Na	0,054	0,064	0,077	0,051	0,038	0,060	0,027	0,032	0,046	0,046	0,037	0,029
K	1,686	1,864	1,925	1,763	1,987	1,999	1,978	1,503	1,977	1,976	1,990	1,981
Total	15,839	15,854	15,550	15,647	15,761	15,753	15,781	15,391	15,720	15,721	15,863	15,859
X _{Fe}	0,62	0,59	0,55	0,43	0,46	0,59	0,48	0,37	0,37	0,33	0,31	0,31

¹Fe Total como FeO. $X_{Fe} = Fe/(Fe+Mg)$.

RP = Roca Pelítica, RSP = Roca Semipelítica, RM = Roca Máfica. Abreviaturas de minerales según Kretz (1983).

2.703, mientras que Al^{VI} varía entre 0.332 y 1.260. Este mineral presenta un contenido de Ti que varía entre 0.113 y 0.273. Según Neogi et al. (1997), en las rocas metapelíticas es posible distinguir entre una biotita prógrada y aquella retrógrada con base en el contenido de TiO₂. En las rocas metapelíticas de la Formación Silgará, la biotita retrógrada muestra un más bajo contenido de TiO₂ (0.04-0.07 % en peso) comparado con aquel de la biotita prógrada (0.98-2.42 % en peso). En algunos casos ha sido posible establecer que la biotita muestra un bajo contenido de K₂O, lo cual podría explicarse debido principalmente a la alteración parcial que ha sufrido este mineral a clorita.

La composición química de la biotita ha sido ploteada en parte del cuadrilátero flogopita-annita-eastonita-siderofilita (FIGURA 2). La relación Fe/(Fe+Mg) de la biotita en las rocas metapelíticas varía entre 0.40 y 0.67, mientras que aquella en las rocas máficas varía entre 0.29 y 0.38. En las rocas metapelíticas esta relación aumenta desde la zona del granate (X_{Fe} = 0.40-0.48) hasta la zona de la silimanita (X_{Fe} = 0.58-

0.67), lo cual está en contraposición al cambio que debería esperarse con el aumento del grado de metamorfismo.

La FIGURA 3, ilustra los diagramas Al^{IV}vsAl^{VI} and Al^{IV}vsTi para la biotita. Los datos no siguen las líneas de las sustituciones ideales Al-Tschemak y Ti-Tschemak y la mayoría de estos se localizan arriba o debajo de estas líneas. Por lo tanto, se sugiere que las sustituciones Al-Tschemak y Ti-Tschemak han ocurrido simultáneamente en este mineral.

El TiO₂ forma parte de la estructura de la biotita y tradicionalmente se ha reconocido que el contenido de Ti en este mineral está en función del grado de metamorfismo, mientras que el Al^{VI} en la biotita está más directamente relacionado con la química de la roca (Indares and Martignole, 1984).

Según Robinson et al. (1982), la biotita con baja relación Fe/(Fe+Mg) tiene el más bajo contenido de Ti para un grado de metamorfismo dado, como se ilustra en la FIGURA 4. Aquí se puede observar que

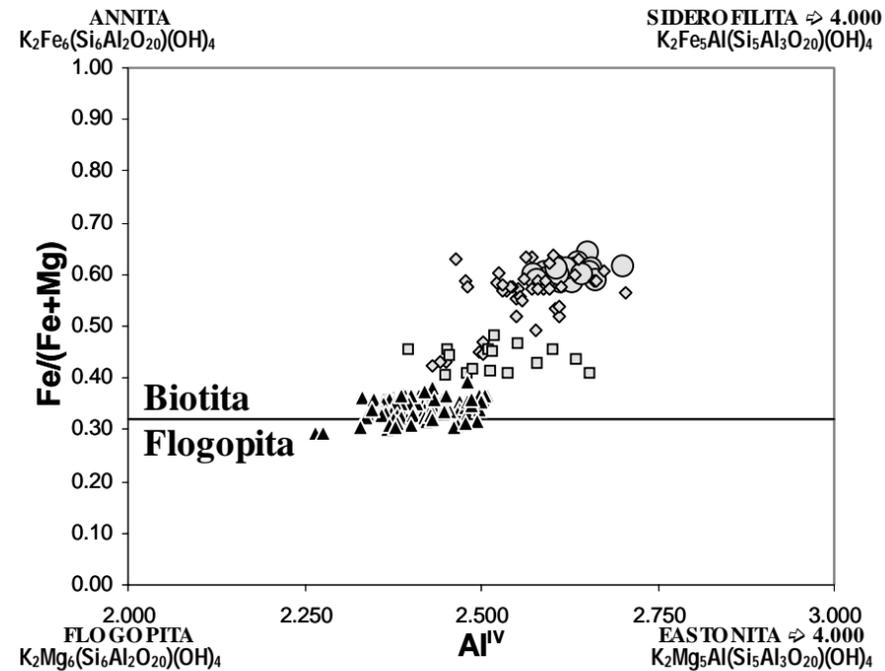


FIGURA 2. Composición química de la biotita en rocas metapelíticas y máficas de la Formación Silgará expresadas en parte del cuadrilátero flogopita-annita-eastonita-siderofilita. Rocas pelíticas: Círculos, zona de la silimanita; Rombos, zona de la estaurolicitanita; Cuadrados, zona del granate. Rocas máficas, triángulos negros.

la mayoría de los datos correspondientes a las rocas metapelíticas comprenden los rangos composicionales de cianita-estaurocita y silimanita-estaurocita, con datos de la zona de la silimanita en el campo Ky-St y aquellos de la zona del granate en el campo Sil-St, lo cual no debería esperarse con el aumento del grado de metamorfismo.

La composición química de la biotita exhibe muy poca variación dentro de un espécimen. La interpretación del intercambio Fe-Mg que puede darse en la interfase granate-biotita se hace difícil ya que no se observa una variación entre la biotita de la matriz y aquella que está en contacto con granate. Numerosos trabajos indican que el contenido de Ti en la biotita en rocas metapelíticas aumenta con la temperatura, alojándose en la posición octaédrica a expensas del $Al^{VI}+Fe^{2+}+Mg$, lo cual, según Tornos y Casquet, (1982), es independiente de la composición del protolito y refleja la tendencia al fraccionamiento progresivo del Ti en la biotita con respecto a otros

minerales ferromagnesianos, tales como el granate rico en almandino (como en el caso de las rocas metapelíticas de la Formación Silgará).

De acuerdo con el diagrama de Guithard (1970) en Tornos y Casquet (1982), como se ilustra en la FIGURA 5, se aprecia una separación entre las biotitas de origen ígneo "ORTO-" y aquellas de origen sedimentario "PARA-" con base en la relación Al/Ti, lo cual confirma el origen ígneo que tienen las rocas máficas que ocurren dentro de la Formación Silgará.

En las rocas metamórficas de la Formación Silgará la biotita no muestra un patrón químico sistemático, aunque hay alguna tendencia en las rocas metapelíticas, y, por lo tanto, este patrón tiende a reflejar el efecto de la composición química de la roca original antes que el grado de metamorfismo.

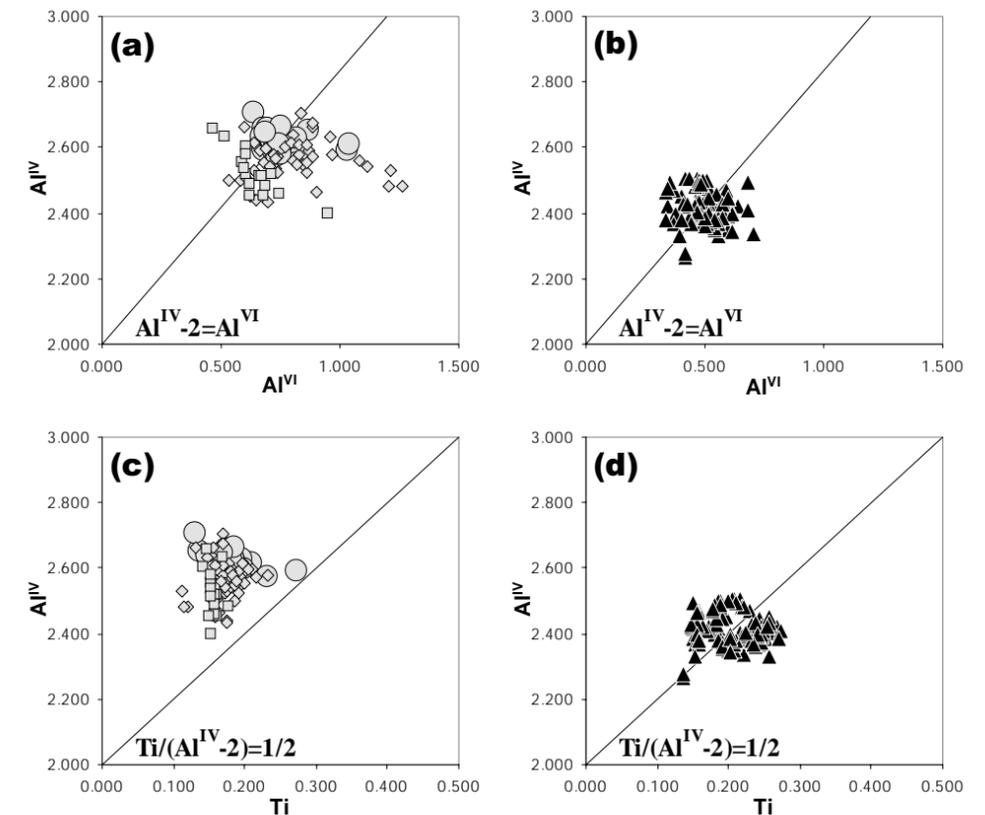


FIGURA 3. Composición química de la biotita en rocas metapelíticas y máficas de la Formación Silgará expresada en los diagramas Al^{IV} vs Al^{VI} y Al^{IV} vs Ti. Las líneas indican las sustituciones (a,b) Al-Tschermak y (c,d) Ti-Tschermak ideales. Rocas metapelíticas: Círculos, zona de la silimanita; Rombos, zona de la estaurocita-cianita; Cuadrados, zona del granate. Rocas máficas, triángulos negros.

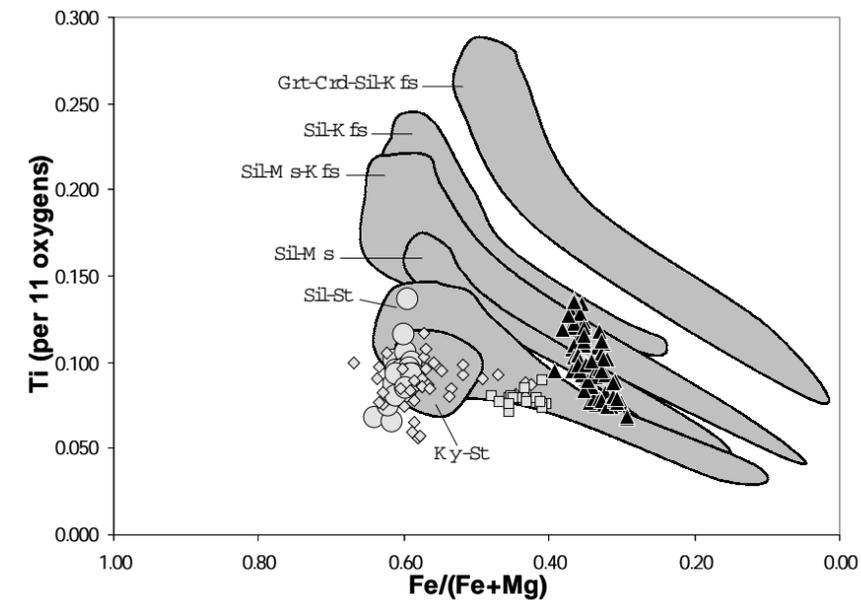


FIGURA 4. Ti (en base a 11 oxígenos) en función de la relación Fe/(Fe+Mg) para la biotita en rocas metapelíticas y máficas de la Formación Silgará. Los campos sombreados representan los rangos composicionales de la biotita en diferentes grados de metamorfismo (según Robinson et al., 1982). Rocas metapelíticas: Círculos, zona de la silimanita; Rombos, zona de la estaurocita-cianita; Cuadrados, zona del granate. Rocas máficas, triángulos negros.