



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Estudio Geológico y Metalogenético del Basamento Precámbrico del Sáhara Occidental

Saleh Lehib Nayem

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

8.3. EL DOMINIO DE LOS MAURITÁNIDES: GEOQUÍMICA MINERAL

8.3.1. INTRODUCCION

En los Mauritánides aflora una gran diversidad de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, formadas en contextos geológicos muy variados y afectados por diversos grados metamórficos. Por consiguiente, las paragénesis minerales son muy variadas y la geoquímica mineral puede ser muy compleja, incluso en la misma roca para un mismo mineral dado. Realizar un estudio completo de estas asociaciones en un contexto geográficamente enorme no puede ser abordado en este trabajo.

Por ello, en este trabajo se presentan solamente algunos resultados muy preliminares realizados sobre algunos de los grupos minerales en que pueden darse cambios composicionales que tengan implicaciones petrológicas metalogenéticas, pero sobretodo para las rocas alcalinas y las carbonatitas, pues son las que presentan mayor potencial económico, principalmente para elementos raros.

Se han analizado las composiciones químicas mediante microsonda electrónica de aquellos minerales que forman parte de series y que, en consecuencia, su composición es el reflejo de las condiciones de cristalización.

8.3.2. GRANITOS

Como se recordará, los granitos presentan como componentes esenciales

cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa; a veces presentan como minerales accesorios piroxenos, anfíboles y micas de tendencias muy diversas. En algunos casos, se ha identificado también la composición de algunos minerales de elementos raros.

8.3.2.1. Feldespatos

La composición de los feldespatos depende del tipo de granitoide analizado. En los granitos alcalinos los dos feldespatos presentes, en caso de que haya más de uno, son alcalinos, de manera que aparece microclina y albita, ambos de composiciones bien definidas, con escasa presencia de soluciones sólidas de uno en el otro. Así, en Derraman la microclina se acerca a Or_{98} ; la albita de estas rocas presenta además composiciones pobres en Ca (del orden de Ab_{92}). En el granito alcalino de Schreibat las composiciones son algo más extremas, con microclina próxima asimismo a Or_{98} y albita cercana a Ab_{98} , mientras que en Lefhuda la composición de la albita sobrepasa el 99% en componente molecular de feldespato sódico.

Cabe destacar, además, el elevado componente de celsiana en algunas microclinas de Schreibat, donde puede alcanzar el 1,65% (equivalente a 0,87% en peso BaO), aunque se ven regularmente contenidos de 0,5-1% en la mayor parte de las microclinas de los Mauritánides que se han analizado. En cambio, el contenido de Rb y Sr es casi nulo. En las

albitas analizadas no se han localizado cantidades significativas de LILE.

Los feldespatos de los granitos calcoalcalinos dan composiciones más diversas; la plagioclasa es ya más rica en Ca, de manera que en el caso de los granitos de Doloo Esder se obtienen composiciones dentro del dominio de la oligoclasa. Los feldespatos de estos granitoides no presentan contenidos apreciables de LILE.

8.3.2.2. Piroxenos

Por el momento se dispone solamente de análisis de los piroxenos de Schreibat. Como puede verse en los diagramas de clasificación de Mormoto et al. (1988), estos piroxenos presentan composiciones a caballo entre las alcalinas y calcoalcalinas (fig. 8.3.1), en el intervalo entre la augita y la augita egirínica, de modo que estos intrusivos no son muy appaíticos.

8.3.2.3. Anfíboles

Se han analizado algunos anfíboles de tonalidades más verdosas, de los que se sospechaba una composición hastingsita, y algunos azulados, tanto en algunos granitos alcalinos como calcoalcalinos.

Como cabe esperar, las composiciones de los anfíboles de los granitos de los Mauritánides son muy variadas, como podía esperarse, resultando anfíboles cálcicos y sódico-cálcicos, lo cual indica grados de alcalinidad muy diversos en estas rocas, lo que precisa un estudio mucho más sistemático y detallado. Así, en los granitos alcalinos de Derraman el anfíbol es ferrowinchita, mientras que en Lefhuda y Tleha es hastingsita (fig. 8.3.2). En el caso de Tleha sería una potasiohastingsita.

En cambio, los anfíboles del granito de Doloo Esder son de tendencia más edenítica, aunque sus composiciones se sitúan a caballo entre los dominios de las series de la hastingsita-magnesiohastingsita y de las series de la edenita-ferroedenita (fig. 8.3.2).

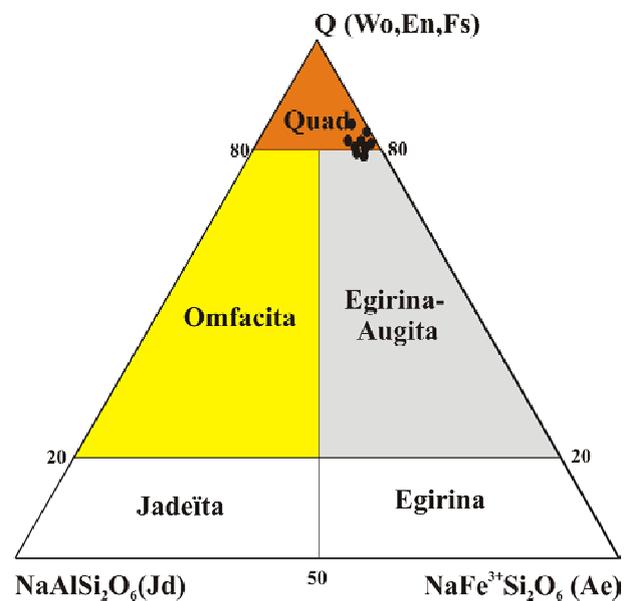
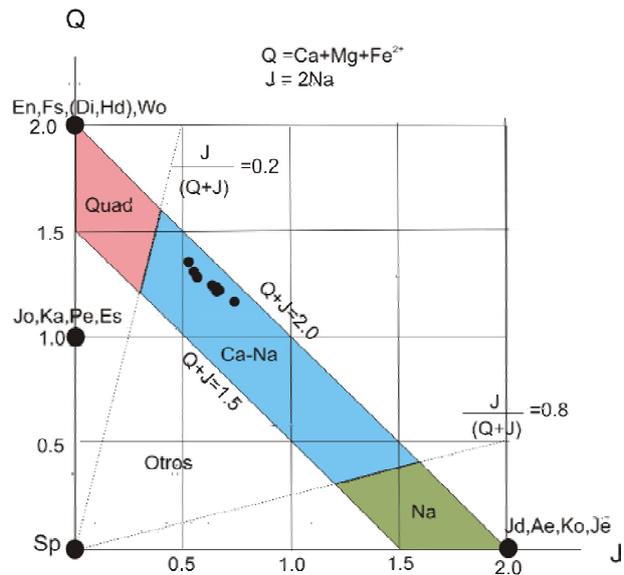
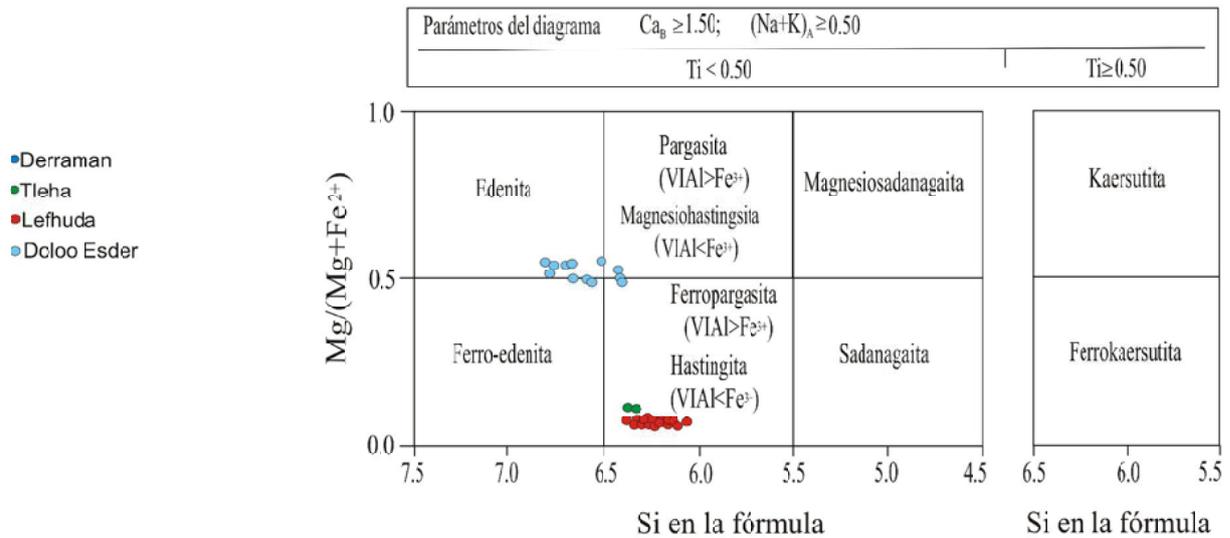


Figura 8.3.1. (Arriba). Representación de los análisis químicos de los piroxenos alcalinos de Schreibat en el diagrama preliminar de clasificación de los piroxenos de Morimoto et al. (1988). (Abajo). Representación de los mismos análisis en el diagrama de los piroxenos alcalinos y calcoalcalinos de Morimoto et al. (1988).

Figure 8.3.1 (Top). Representation of the chemical analyses of the pyroxene crystals of the Schreibat alkaline granites in the diagram for preliminary classification after Morimoto et al. (1988). (Bottom). Representation of the same analyses in the diagram for calcic and sodicocalcic pyroxenes by Morimoto et al. (1988).

ANFÍBOLES CÁLCICOS



ANFÍBOLES SÓDICO-CÁLCICOS

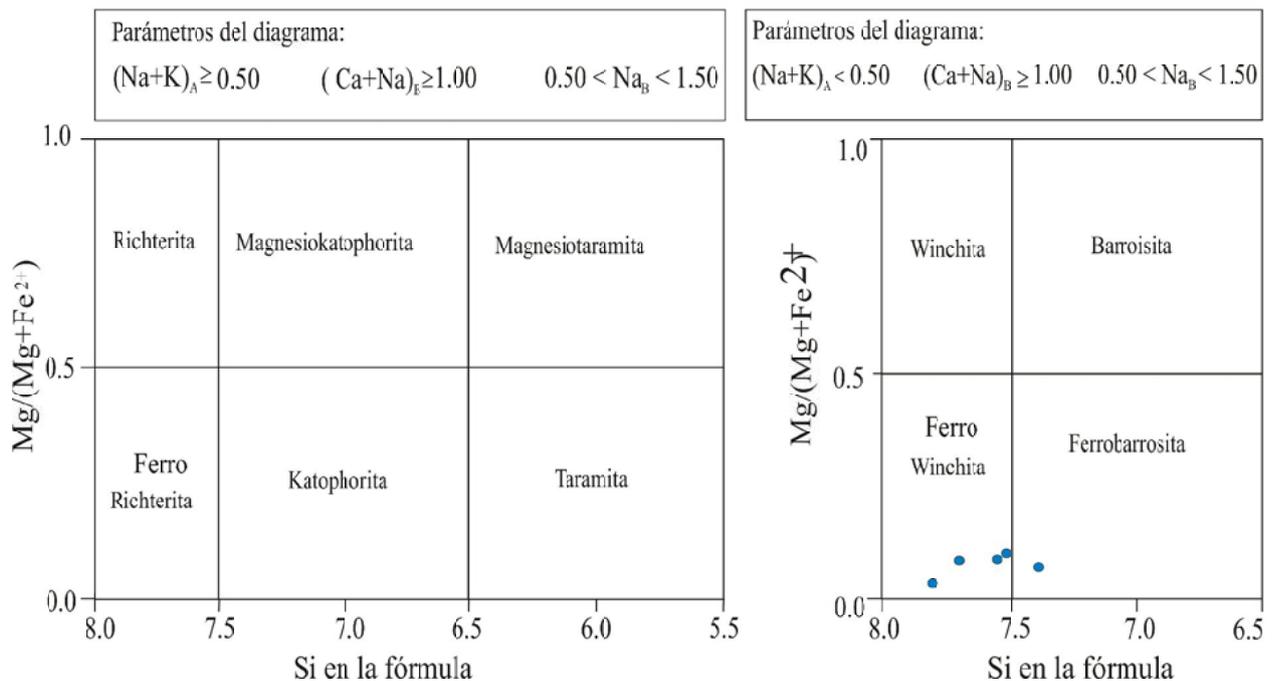


Figura 8.3.2. (Arriba). Representación de los análisis químicos de los cristales de anfíbol de granitoides de los Mauritánides en el diagrama de anfiboles cálcicos (parámetros superiores) de Leake et al. (1997). (Abajo). Idem para anfiboles sódico-cálcicos (parámetros superiores) de Leake et al. (1997). Tleha, Lefhuda y Derramán son granitos alcalinos; Doloo Esder, es un granito calcoalcalino.

Figure 8.3.2. (Top). Representation of the chemical analyses of the amphibole crystals of alkaline granophyres in the diagram for calcic amphiboles (upper parameters) after Leake et al. (1997). (Bottom). Idem for the sodic-calcic amphiboles (upper parameters) after Leake et al. (1997). Tleha, Lefhuda and Derramán are alkaline granites; Doloo Esder is a calcoalcaline granite.

8.3.2.4. Titanita

La titanita es un mineral accesorio raro en los granitoides de los Mauritánides, y en algunos casos podría ser que su presencia fuera secundaria (por alteración de ferromagnesianos) o producida por una contaminación local del granito cuando asimila rocas encajantes ricas en calcio o posiblemente también titanio.

Los cristales de titanita no parecen zonados; tampoco parecen presentar Th, U o REE, al menos en cantidades detectables con la microsonda en un análisis rutinario.

8.3.2.5. Biotita

Aunque no existe una clasificación reciente universalmente aceptada para la clasificación de las micas, se han propuesto algunos diagramas, basados en el aluminio total y las proporciones entre Fe y Mg (fig. 8.3.3). De acuerdo con este diagrama, las micas del granito alcalino de Derraman, por ejemplo, son muy ricas en hierro (como corresponde con sus coloraciones verdosas muy oscuras y su intenso pleocroísmo en microscopía de luz transmitida) y se representarían en el campo de la annita, dentro del clásico campo de las biotitas.

Estas micas son pobres en aluminio, presentan moderados contenidos en titanio (alrededor de un 2% en peso de TiO₂) y pueden estar relativamente enriquecidas en bario (hasta 0.34% en peso de BaO). En cambio, su contenido en Na es en todo caso bajo.

La composición química de las biotitas ha sido a veces utilizada como un discriminador del tipo de granitoide en el cual cristalizan (Nachit et al., 1985). Según estos autores, las micas de las rocas ígneas alcalinas o peralcalinas son pobres en aluminio total y magnesio ricas en hierro comparadas con las de los ambientes calcoalcalinos o peraluminicos. En el caso de las micas del granito alcalino de Derramán, su composición sería efectivamente característica de la de las rocas alcalinas (fig. 8.3.4).

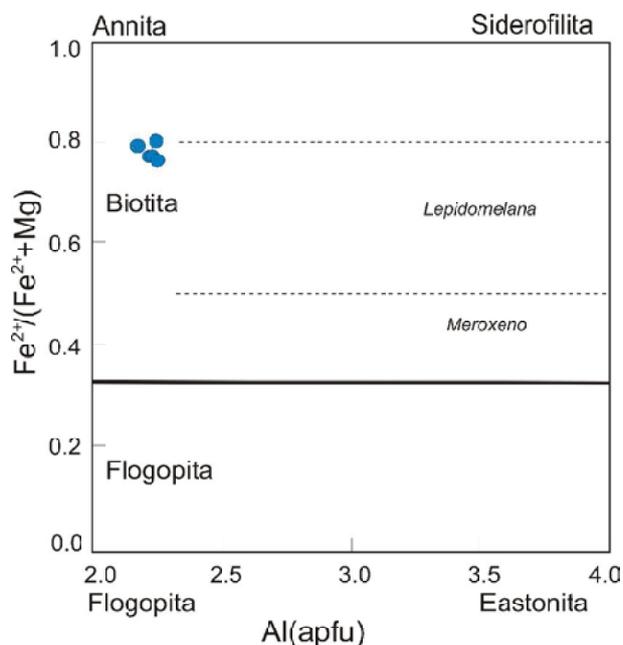


Figura 8.3.3. Representación de los análisis químicos de biotita de Derraman en el diagrama Fe/(Mg+Fe)-Al para clasificación de Lalonde y Bernard (1993), modificado.

Figure 8.3.4. Representation of the chemical analyses of biotite from Derraman in the Fe/(Mg+Fe)-Al diagram used for discrimination of granitoids (Lalonde and Bernard, 1993, modified).

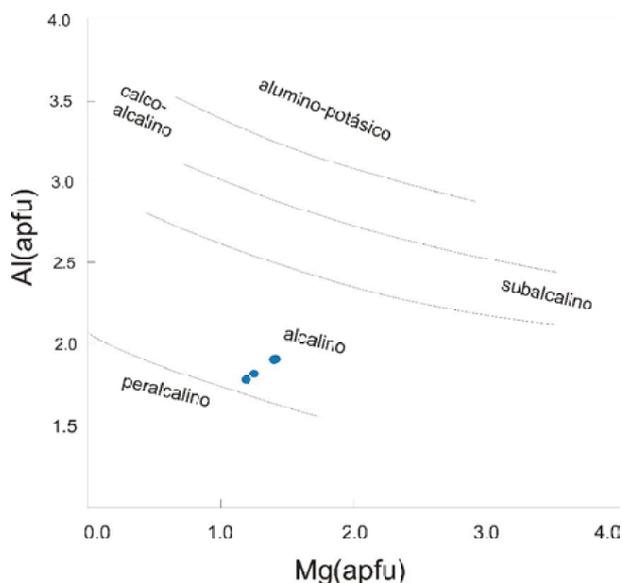


Figura 8.3.4. Representación de los análisis químicos de biotita de Derraman en el diagrama Mg-Al para discriminación de granitoides de Nachit et al. (1985).

Figure 8.3.4. Representation of the chemical analyses of biotite from Derraman in the Mg-Al diagram used for discrimination of granitoids after Nachit et al. (1985).

8.3.2.6. Allanita

Los minerales del grupo de la allanita son comunes en los granitos alcalinos de la zona estudiada, en los que puede aparecer en proporciones superiores al 2% modal, y donde pueden estar asociados con otros silicatos con REE, como la perrierita; acostumbra a estar envuelta por epidota.

Los minerales del grupo de la allanita presentan una gran complejidad composicional, mucho mayor de lo que era previsible ateniendo a su estructura, y sólo recientemente se ha sistematizado su clasificación (Ercit, 2002; Gieré y Sorensen, 2004). En este mineral es especialmente importante valorar su contenido en REE, Th y U.

Por su composición química, la allanita de Gleibat Tleha corresponde en realidad a ferriallanita-(Ce), enriquecida en LREE (hasta 14,73% en peso de Ce₂O₃, 8,32 % en peso de La₂O₃ y 3,52% en peso de Nd₂O₃; las otras REE rozan el límite de detección) respecto a las HREE. El contenido máximo de MnO no supera el 1,26% en peso, alejando a estos minerales del grupo de composiciones del subgrupo de la androsita; por otra parte, la proporción de MgO no supera tampoco el 1% en peso, alejando por tanto a estos minerales del subgrupo de la dollaseíta.

Finalmente, los contenidos de Th son bajos (menos de 1% en peso de ThO₂) y los de U están por debajo del límite de detección del equipo (menos del 0,1 % en peso de UO₂). Paradójicamente, estas proporciones bajas de elementos radioactivos pueden ser un elemento interesante desde el punto de vista económico, puesto que elevadas proporciones de estos elementos en una mena de REE acostumbran ser penalizantes de cara al proceso de explotación y comercialización.

Similares composiciones en lo que respecta a los elementos mayoritarios y minoritarios se dan en los minerales del grupo de la allanita en los intrusivos alcalinos de Derraman y de Lefhuda. Estos minerales pueden clasificarse asimismo como ferriallanitas, si bien sus composiciones no son tan ricas en hierro y se desplazan ligeramente hacia el campo de la allanita s.s.

8.3.2.7. Pirocloro

Los minerales del supergrupo del pirocloro son muy comunes en los granitos alcalinos de la zona de los Mauritánides, lo cual puede ser interesante desde el punto de vista metalogenético. No obstante, la composición de este grupo (o supergrupo) es también muy compleja. La fórmula general del supergrupo es $A_{2-m}B_2X_{6-w}Z_{1-n}$. En esta fórmula A es un catión de coordinación 8 (Na, Ca, Sr, Pb²⁺, Sn²⁺, Sb³⁺, Y, U, Ag, Mn, Ba, Fe²⁺, Bi³⁺, REE, Sc o Th), aunque puede tener vacantes o H₂O; B es octaédrica, y contiene HFSE (Ta, Nb, Ti, Sb⁵⁺, W, V⁵⁺, Sn⁴⁺, Zr, Hf, Fe³⁺, Mg, Al y Si; X es generalmente O, pero puede haber OH y F; Z puede ser O, OH, F, Cl, H₂O, K, Cs, Rb o estar vacante (Atencio et al., 2010; Christy y Atencio, 2013).

El pirocloro de Tleha es rico en Nb (hasta 61,14% Nb₂O₅), con contenidos moderados en Ti (hasta 7,4% peso de TiO₂) y de Ta (hasta 5,51% en peso T₂O₅), pudiendo clasificarse como pirocloro s.s. (fig. 8.3.5; tabla 8.3.1).

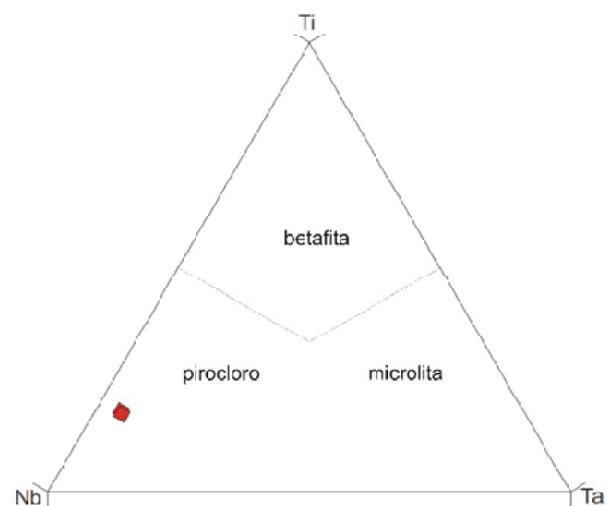


Figura 8.3.5. Representación de los análisis químicos de pirocloro de Gleibat Tleha en el diagrama Nb-Ti-Ta apfu para clasificación del supergrupo (Atencio et al., 2010).

Figure 8.3.5. Representation of the chemical analyses of the Gleibat Tleha pyrochlore in the diagram Nb-Ti-Ta apfu proposed for the classification of the pyrochlore supergroup (Atencio et al., 2010).

Tabla 8.3.1. Composición química de los minerales del grupo del pirocloro de Gleibat Tleha y fórmula estructural basada en 2 cationes en B.

Tabla 8.3.1. Chemical composition of the pyrochlore group minerals from Gleibat Tleha and their structural formula based on 2 cations in B.

	1	2		1	2
Nb ₂ O ₅	53,32	61,14	Nb	1,57	1,60
Ta ₂ O ₅	5,51	5,16	Ta	0,10	0,08
SiO ₂	0,00	0,00	Si	0,00	0,00
TiO ₂	6,82	7,40	Ti	0,33	0,32
ThO ₂	0,38	0,38	Th	0,01	0,00
La ₂ O ₃	0,00	0,14	La	0,00	0,00
Ce ₂ O ₃	0,09	0,24	Ce	0,00	0,01
CaO	19,86	7,18	Ca	1,38	0,44
Na ₂ O	3,53	0,24	Na	0,45	0,03
K ₂ O	0,02	0,34	K	0,00	0,03
Al ₂ O ₃	0,00	0,00	Al	0,00	0,00
MnO	0,06	0,18	Mn	0,00	0,01
FeO	0,37	0,40	Fe	0,02	0,02
ZrO ₂	0,03	0,03	Zr	0,00	0,00
Pr ₂ O ₃	0,01	0,08	Pr	0,00	0,00
Nd ₂ O ₃	0,02	0,03	Nd	0,00	0,00
Sm ₂ O ₃	0,03	0,00	Sm	0,00	0,00
U ₃ O ₈	4,44	5,22	U	0,06	0,06
F	3,11	0,51	F	0,64	0,09
H ₂ O	3,24	8,16	H	0,36	0,91
Total	100,84	96,83			
F=O	1,31	1,31	Cat Y	2,00	2,00
TOTAL	99,53	95,52	Cat X	1,93	0,61
			vac X	0,07	1,39

Los minerales del grupo del pirocloro son la principal fuente de Nb en la actualidad, además de tener un elevado potencial para la extracción de muchos otros elementos raros, en particular, Ta. La proporción de Ta en los pirocloros de los granitos alcalinos de Tleha es

relativamente alta cuando se compara con la que presentan los pirocloros de las carbonatitas, el yacimiento clásico de pirocloro (por ejemplo, Lottermoser y England, 1988; Knudsen, 1989; Hogarth, 1989; Hogarth y Horne, 1989; Williams et al., 1997;

Chakhmouradian y Mitchell, 1998; Wall et al., 1999; Hogarth et al., 2000; Zurevinski y Mitchell, 2004; Lee et al., 2006; Viladkar y Bismayer, 2010; Bambi et al., 2012; Zaitsev et al., 2012, 2014), o en las rocas alcalinas (Wall et al., 1999; Chakhmouradian y Mitchell, 2002).

Otras diferencias con el pirocloro de las carbonatitas o de kimberlitas es el contener proporciones de ZrO_2 muy bajas (incluso por debajo del límite de detección); además, las proporciones de REE son muy bajas o inexistentes. No se ha localizado.

Los minerales del grupo del pirocloro pueden contener cantidades importantes de Th y U (por ejemplo, Viladkar y Ghose, 2002), tanto que han sido postulados para almacenar residuos radioactivos (Lumpkin y Ewing, 1985), y, en el caso que nos ocupa, presentan una proporción de U muy elevada (hasta 5,22% de U_3O_8 , tabla 8.3.1), aunque la de Th es muy baja (en el orden de 0,38 % en peso de ThO_2).

Las variaciones en el contenido de HFSE pueden estar relacionadas con la proporción de F y Na en el pirocloro, como acontece en las secuencias evolutivas del pirocloro en

Angola (Bambi et al., 2012). No obstante, cabe recordar que la composición del pirocloro varía según sea el estadio en que se formaron sus cristales (magmático o hidrotermal; Lumpkin y Ewing, 1995; Lumpkin y Mariano, 1996; Nasraoui y Bilal, 2000; Rocha et al, 2001, Bambi et al., 2013); por el momento no disponemos de información acerca de variaciones sistemáticas relacionadas con las texturas en la zona de Gleibat Tleha u otros granitos alcalinos de los Mauritánides.

El contenido en F es muy variable en el pirocloro de Gleibat Tleha, con valores altos (hasta 3.11 % en peso, tabla 8.3.1) a valores del orden de 0,51% en peso. Probablemente los más ricos corresponden a pirocloro primario y los más pobres a pirocloro secundario. El magma que engendró estos granitos alcalinos debía ser rico en F, puesto que en buena parte de los granitoides alcalinos de los Mauritánides se ha visto cantidades de fluorita como mineral accesorio, a veces importantes. De hecho, Jago y Gittins (1993) indican que el magma ha de estar saturado en F para que pueda formarse pirocloro.

