

# Composición química de la betafita, ilmenita, rutilo y rabdofano del yacimiento W-Mo «Badillo», Angulos, Argentina

Fernando G. SARDI

*INSUGEO – Miguel Lillo 205, San Miguel de Tucumán (4000). Argentina. E-mail: insugeo@unt.edu.ar*

**RESUMEN.** El yacimiento Badillo de Angulos, ubicado en el sector centro-oriental del Sistema de Famatina, consiste en lentes de cuarzo que rellenan cavidades (fisuras y fracturas) de la roca de caja, cuya mineralogía está constituida esencialmente por wolframita, scheelita y molibdenita. El yacimiento tiene relación espacial y genética con el leucogranito especializado de Potrerillos, con una importante alteración muscovítica, a veces relacionada a la mineralización. Betafita, ilmenita, rutilo y rabdofano son accesorios en la constitución mineralógica del yacimiento y todos ellos tienen tamaño microscópico. Han sido citados en algunos trabajos anteriores, pero es en éste donde se realiza un estudio composicional y mineraloquímico de detalle. La betafita, encontrada en las lentes mineralizadas de cuarzo, corresponde a un titanato-niobiato de uranio y calcio perteneciente al grupo del pirocloro, casi sin tantalio. La ilmenita proveniente de las lentes mineralizadas ha dado valores altos en manganeso, promedio de 7,14 % y 3,18 % de MnO para sendos ejemplares analizados. El rutilo asociado a biotita del Granito Potrerillos formado a causa de la alteración postmagmática registró hasta 7,31 %  $WO_3$ , mientras que en el de las lentes de cuarzo, se obtuvo hasta 7,92 % de  $Nb_2O_5$ . Estos valores son mayores a los registrados por otros autores para los mismos minerales de procedencia nacional, pero de diferente yacencia y origen. Por último, el fosfato detectado portador de tierras raras livianas y torio corresponde a rabdofano.

**Palabras clave:** *Betafita, Ilmenita manganesífera, Rutilo wolframífero, Rabdofano, Sistema de Famatina.*

**ABSTRACT.** *Chemical composition of the betafite, ilmenite, rutile and rhabdophan of the W-Mo-bearing «Badillo» deposit, Angulos, Argentina.* The «Badillo» deposit, located in the central-east sector of the Famatina System, is formed of small quartz-lenses which are cavity fillings (fissures and fractures) in a host-rock whose mineralogy is essentially wolframite, scheelite and molybdenite. The deposit is spatially and genetically related to the Potrerillos leucogranite which has an important muscovite alteration, locally related to the mineralization. Betafite, ilmenite, rutile and rhabdophane are accessory minerals in the mineralogy of the «Badillo» deposit and all are of microscopic size. Although mentioned in earlier literature, no detailed compositional and mineralo-chemical study had previously been carried out. The betafite belongs to a uranium and calcium titanate-niobiato of the pyrocloro group, with scarce tantalium. The manganese concentration in the ilmenite is high (7.14 % MnO), while the rutile associated with the biotite in the Potrerillos granite, formed during post-magmatic alteration, recorded up to 7.14 %  $WO_3$ , and the rutile in the quartz lenses up to 7.92 %  $Nb_2O_5$ . These values are than higher than reported by other authors for the same minerals in different Argentine ore-deposits. Finally, the phosphate-bearing light rare earths and thorium belong to rhabdophane.

**Key words:** *Betafite, Mn-bearing ilmenite, W-bearing rutile, Rhabdophan, Famatina System.*

## Introducción

El yacimiento Badillo está ubicado aproximadamente a 2 km al nordeste de la localidad de Angulos, en las estribaciones sur-occidentales del cerro Potrerillos que forma parte de la sierra de Paimán. Es un depósito epigenético alojado en roca granítica y contiene principalmente wolframita y scheelita (W), y molibdenita (Mo). A principios y mediados del siglo pasado se explotó en forma rudimentaria, y actualmente no reviste interés económico por el escaso volumen de mineral y bajo costo de los metales.

En este trabajo se da a conocer el resultado de los análisis químicos puntuales realizados con microsonda electrónica sobre betafita, ilmenita, rutilo y rabdofano que son algunos minerales accesorios del yacimiento provenientes de diferentes asociaciones y origen, infiriendo en parte la composición catiónica del fluido mineralizante y su evolución. A partir de ello, se ha elaborado la fórmula estructural lo más aproximada y representativa posible, definiendo las sustituciones de cationes en determinadas posiciones estructurales de los minerales. También se hacen comparaciones con otros minerales similares analizados de procedencia nacional citados por otros autores.

Es la primera vez que se realiza un estudio composicional completo y mineraloquímico sobre minerales accesorios de este yacimiento. En cuanto específicamente a betafita, esta especie tuvo su primera mención en trabajos editados de Sardi (1999a) y Sardi y Rossi (1999), y en otro inédito de Sardi (1999b), y según los datos del autor de la presente, el mineral no ha sido citado anteriormente en todo el Sistema de Famatina.

Es la primera vez que se realiza un estudio composicional completo y mineraloquímico sobre minerales accesorios de este yacimiento. En cuanto específicamente a betafita, esta especie tuvo su primera mención en trabajos editados de Sardi (1999a) y Sardi y Rossi (1999), y en otro inédito de Sardi (1999b), y según los datos del autor de la presente, el mineral no ha sido citado anteriormente en todo el Sistema de Famatina.

## Marco geológico

El Sistema de Famatina es una unidad morfoestructural de disposición submeridional ubicada geográficamente en el sector centro-sur de la provincia de Catamarca y centro-norte de la provincia de La Rioja. Durante el Ciclo Famatiniano (Aceñolaza y Toselli 1981) se desarrolla en la región un magmatismo de composición ácido, en una caja constituida por metamorfitas de bajo a muy bajo grado conocidas como Formación La Aguadita de edad precámbrica superior – cámbrica inferior (Durand y Aceñolaza 1990). Este acontecimiento ígneo tuvo un importante valor genético para muchos depósitos minerales de edad paleozoica encontrados en el Sistema de Famatina, entre ellos, el de Badillo llamado así de acuerdo a lugareños y a la bibliografía inédita recopilada.

El stock granítico de Potrerillos, de edad devónica superior (Pérez y Kawashita 1992), contiene al depósito Badillo. Es de composición granodiorítica a monzonogranítica, y entre sus minerales accesorios, se encuentran fluorita, allanita, wolframita y rutilo. Los principales fenómenos postmagmáticos consisten en muscovitización, que a veces tiene relación con la mineralización, y albitización. La primera se manifiesta reemplazando a minerales primarios del granito y en forma de venillas en los filones mineralizados, y la segunda afecta al microclino del granito (Sardi y Rossi 1999).

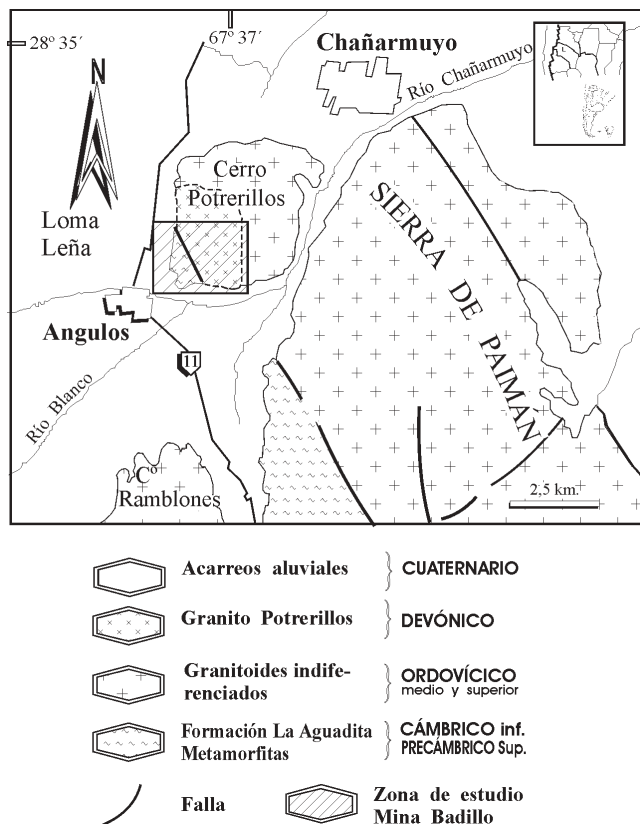
El estudio de las inclusiones fluidas realizadas sobre secciones bipulidas de cuarzo proveniente de las lentes mineralizadas señalan un líquido mineralizante mediana a altamente salino y rico en  $\text{CO}_2$ , con temperatura de homogeneización entre 279,2°C y 328,2°C (Sardi *et al.* 2000).

El yacimiento consiste en lentes cuarzosas de pocos metros de longitud que rellenan fisuras y fracturas del granito clasificado como de origen hidrotermal (Sardi 1996); sin embargo, en escombreras de la mina se encontró masas de cuarzo con mineralogía y textura típicamente pegmatítica tales como microclino, biotita, muscovita y berilo (Sardi 1996). La figura 1 muestra la ubicación y bosquejo geológico del área de estudio.

## Metodología de estudio

Con las muestras de rocas y minerales extraídas se confeccionaron secciones pulidas para su descripción mineralógica y análisis químico puntual. La numeración y procedencia de cada una es la siguiente (el número de muestra corresponde al de colección de petrología-geoquímica del INSUGEO-UNT):

- 5627: lente de cuarzo blanco mineralizado con wolframita y scheelita en la cual se ha identificado y analizado los accesorios betafita, ilmenita y rutilo;
- 5633: Granito Potrerillos en la que se analizó rutilo;
- 5935A: lente de cuarzo grisáceo mineralizado



**Figura 1:** Ubicación y mapa geológico de la zona de estudio, La Rioja (Adaptado de Sardi *et al.* 2000).

principalmente con molibdenita, en la que se analizó ilmenita y rutilo. Proviene de escombreras.

- 5935C: cuarzo gris con wolframita-molibdenita en la que aparece rabdofano. También, como la anterior, proviene de escombreras.

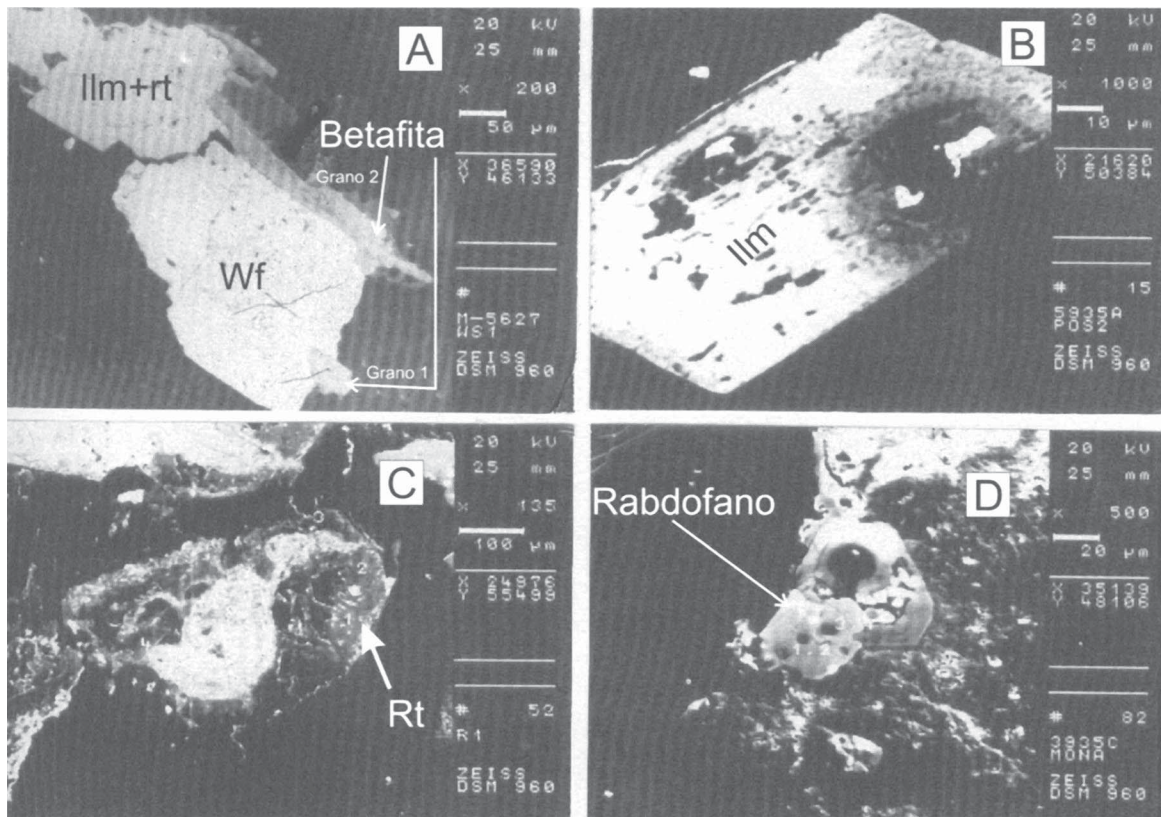
Es conveniente aclarar que la identidad de los minerales descritos en este trabajo es a base de las propiedades ópticas y análisis químico obtenido de los mismos.

Los análisis se realizaron en microsonda electrónica del IAAG (Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie, Ludwig-Maximilians Universität Muenchen) provisto de un espectrómetro WDX y montado en un SEM Zeiss 960 DSM. El voltaje de aceleración fue de 20 kV y la corriente de haz de electrones fue de 20 nA/10s. Como standards se usaron minerales naturales, y metales y aleaciones sintéticas de ASTIMAX. Con ello se ha medido % en peso de los metales. La figura 2 representa una imagen fotográfica obtenida de los minerales analizados.

## Resultados

### Betafita

En los manuales de mineralogía, originalmente esta especie es descrita como un mineral primario en pegmatitas de Madagascar, Siberia y Noruega asociada



**Figura 2:** Ilustración microscópica de los minerales analizados obtenida por el equipo usado para la medición. **a**, M5627, **b**, M5935A y **d**, M5935C (lente de cuarzo mineralizado); **c**, M5633 (Granito Potrerillos). Referencias: ilm: ilmenita; rt: rutilo; Wf: wolframita.

a minerales tales como circón, thorita, columbita, euxinita, allanita y berilo entre otros. No obstante, Ramdohr (1980) amplía el espectro para la mayoría de los miembros del grupo del pirocloro (al que pertenece la betafita) como de originarios de depósitos metasomáticos, hidrotermales, e incluso magmáticos. En el yacimiento hidrotermal de Badillo, que también cuenta con fases pegmatíticas, se lo ha encontrado en cantidades ínfimas asociado con wolframita e ilmenita (ilustración figura 2a). Se considera a la betafita del yacimiento Badillo como mineral hipogénico.

Es un mineral isométrico, octahedral (Winchell 1964), que al microscopio de luz reflejada presenta reflectividad similar a esfalerita (baja) y sus reflejos internos son siempre abundantes y coloreados (naranjas, pardo y amarillo).

Se analizaron dos granos minerales correspondientes a betafita de Badillo: uno con sección equidimensional (grano 1) y otro de disposición elongada (grano 2) (Fig. 2a). Sobre cada uno de ellos, se realizaron tres puntos analíticos ( $n_{\text{total}} = 6$ ). El cuadro 1 muestra los valores del análisis expresado en % en peso, y las proporciones moleculares correspondientes. El grano 2 es más rico en uranio y se observa mayor reemplazamiento del Ti por Nb y W con respecto al grano 1.

Se han registrado también cantidades trazas de Zn y Hf. La diferencia a 100 % se infiere que se trata princi-

palmente de  $\text{H}_2\text{O}$ , sustancia que no es medida por la microsonda utilizada en el análisis, y que actúa como anión junto al oxígeno. A fines de la construcción de la fórmula estructural de este mineral se utiliza este valor enteramente como  $\text{H}_2\text{O}$ , 17,67 % para los valores promedio (Cuadro 1).

#### *Ilmenita y rutilo*

La ilmenita tiene formas tabulares hasta unos  $300 \mu\text{m}$  de longitud por  $75 \mu\text{m}$  de ancho. Presenta un color pardo rosado, baja reflectividad, y fuerte anisotropía. El rutilo se presenta en muy pequeños cristales de no más de  $30 \mu\text{m}$  asociado a los bordes de wolframita en los filones cuarzosos mineralizados; también se lo ha encontrado incluido en biotita del Granito Potrerillos de hasta unos  $200 \mu\text{m}$  originado a causa de la alteración postmagmática. Ilustraciones de estos minerales aparecen en la figura 2b y c, mientras que el cuadro 2 indica los resultados de los análisis químicos de estos dos minerales y sus fórmulas estructurales. Los análisis puntuales en cada grano individual no mostraron diferencias sustanciales por lo que se consideran a éstos composicionalmente homogéneos. El número de mediciones ( $n$ ) para los minerales ilmenita y rutilo ha sido de 5 y 4, respectivamente.

**Cuadro 1:** Composición química de la betafita del yacimiento Badillo.

% peso	Grano 1			Grano 2			Promedio
	1*	2*	3*	1*	2*	3*	
CaO	1,76	2,33	2,98	2,64	2,40	2,48	2,43
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40	0,40	0,13	0,41	0,50	0,41	0,38
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,65	2,29	2,22	3,34	3,54	3,39	2,91
UO <sub>3</sub>	9,55	9,23	10,50	13,88	14,30	14,70	12,03
ThO <sub>2</sub>	1,76	1,72	1,67	1,86	1,78	1,90	1,78
MnO	0,40	0,47	0,59	0,75	1,03	0,86	0,68
PbO	0,27	0,57	0,46	0,60	0,77	0,98	0,61
HfO <sub>2</sub>	n,d	n,d	n,d	0,03	0,14	0,13	0,10
TiO <sub>2</sub>	21,84	18,98	18,16	13,51	14,77	16,18	17,24
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,77	2,80	3,11	3,43	3,96	3,71	3,30
WO <sub>3</sub>	10,77	10,80	11,14	13,87	13,99	13,38	12,33
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18,72	18,89	19,94	20,04	20,39	20,67	19,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,49	10,50	10,19	6,82	7,11	7,31	8,74
Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,07	0,01	0,03	0,03	0,06	n,d	0,04
total	81,45	78,99	81,12	81,21	84,74	86,10	82,33
H <sub>2</sub> O <sup>1</sup>	18,55	21,01	18,88	18,79	15,26	13,90	17,67
<b>Proporciones catiónicas en base a 2 cationes ocupantes del sitio estructural B del mineral</b>							
Ca	0,104	0,146	0,187	0,196	0,169	0,169	0,160
Ce	0,008	0,009	0,003	0,010	0,012	0,010	0,008
Y	0,078	0,071	0,069	0,123	0,124	0,115	0,095
U	0,110	0,113	0,129	0,202	0,198	0,196	0,155
Th	0,022	0,023	0,022	0,029	0,027	0,027	0,025
Mn	0,019	0,023	0,029	0,044	0,057	0,046	0,036
Pb	0,004	0,009	0,007	0,011	0,014	0,017	0,010
Hf	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,002	0,002
Σ <sup>A</sup>	0,345	0,394	0,446	0,616	0,604	0,582	0,491
Ti	0,903	0,833	0,801	0,703	0,731	0,773	0,796
Ta	0,041	0,044	0,050	0,065	0,071	0,064	0,055
W	0,154	0,163	0,169	0,249	0,238	0,220	0,196
Nb	0,466	0,498	0,529	0,627	0,606	0,594	0,549
Fe <sup>+++</sup>	0,434	0,461	0,450	0,355	0,352	0,349	0,403
Rh	0,002	0,000	0,001	0,001	0,002	0,000	0,001
Σ <sup>B</sup>	2,000	1,999	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
<b>Fórmula estructural<sup>2</sup></b>							
(Ca <sub>0,16</sub> , U <sub>0,15</sub> , Y <sub>0,09</sub> , Mn <sub>0,04</sub> , Th <sub>0,02</sub> , Pb <sub>0,01</sub> ) <sub>0,47</sub> (Ti <sub>0,80</sub> , Nb <sub>0,55</sub> , Fe <sub>0,40</sub> , W <sub>0,20</sub> , Ta <sub>0,05</sub> ) <sub>2,00</sub> (O <sub>5,17</sub> , OH <sub>3,62</sub> ) <sub>8,79</sub>							

Referencias: \* : punto de medición; n.d.: no detectado; <sup>1</sup>: calculada por diferencia; <sup>A, B</sup>: sitios estructurales del mineral; <sup>2</sup>: está construida con el promedio redondeado de sus componentes principales.

### Rabdofano

Los fosfatos encontrados en los filones de Angulos son apatito y rabdofano. Aparecen como cristales idiomórficos y subidiomórficos que pueden llegar a medir hasta unos 130 m (Fig. 2d). El mineral rabdofano analizado proviene de una muestra de lente mineralizada (5935C) cuyos resultados analíticos se expresan en el cuadro 3.

A simple vista, el análisis es un fosfato portador de tierras raras y torio que correspondería a monacita, variedad rica en cerio (Ce-monacita); sin embargo, a causa de que no fueron identificados otros cationes en el mineral, la diferencia a 100 % en el mismo se atribuye a

agua por lo que resulta un fosfato de tierras raras hidratado, y se lo clasifica en este trabajo como rabdofano.

### Discusión

#### Betafita

La expresión química de esta especie, de acuerdo a algunos autores es la siguiente:

- (U, Ca)(Nb, Ta, Ti)<sub>3</sub>O<sub>9</sub>•nH<sub>2</sub>O (Rogers and Adams 1969) considerado como un niobato-tantalato-titanato de uranio;

**Cuadro 2:** Composición química de ilmenita y rutilo.

% peso	ilmenita							rutilo					
	5935A				5627			5633			5935A	5627	Prom. <sub>1</sub>
	1*	2*	3*	Prom.	1*	2*	Prom.	1*	2*	Prom.	1*	1*	Prom. <sub>1</sub>
TiO <sub>2</sub>	51,15	50,96	50,62	50,91	52,72	53,37	53,05	91,83	88,99	90,41	83,72	84,83	84,28
SnO <sub>2</sub>	0,03	0,02	--	0,02	--	--	--	0,06	0,07	0,07	1,04	--	0,52
WO <sub>3</sub>	--	0,09	0,08	0,06	0,11	0,01	0,06	4,83	7,31	6,07	1,69	0,75	1,22
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,33	0,33	0,29	0,32	0,29	0,38	0,34	0,75	0,61	0,68	0,68	0,79	0,73
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	--	--	--	--	0,05	0,03	0,04	0,03	--	0,015	--	0,05	0,02
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,52	0,57	0,39	0,49	0,03	0,09	0,06	0,29	0,40	0,34	0,86	0,98	0,92
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,19	1,22	1,14	1,19	0,48	0,64	0,56	1,92	1,60	1,76	7,43	7,92	7,67
FeO	40,56	39,75	40,58	40,30	42,94	43,79	43,37	1,24	1,04	1,14	4,36	4,06	4,21
CaO	0,01	--	0,02	0,01	--	0,02	0,01	--	--	--	0,02	0,02	0,02
MnO	6,66	7,71	7,05	7,14	4,29	3,34	3,82	--	--	--	0,09	0,04	0,06
<b>Total</b>	100,45	100,65	100,17	100,42	100,92	101,67	101,30	100,96	100,02	100,49	99,89	99,44	99,66
<b>Números de cationes en base a 3 oxígenos para ilmenita y 2 oxígenos para rutilo</b>													
<b>Ti</b>	0,972	0,968	0,967	0,969	0,992	0,995	0,993	0,994	0,934	0,939	0,888	0,896	0,892
<b>Sn</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,003
<b>W</b>	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,017	0,026	0,022	0,006	0,003	0,004
<b>V</b>	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,008	0,007	0,008	0,007	0,008	0,008	0,009	0,008
<b>Cr</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
<b>Ta</b>	0,004	0,005	0,003	0,004	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,005	0,004
<b>Nb</b>	0,014	0,014	0,013	0,014	0,005	0,007	0,006	0,012	0,010	0,011	0,047	0,050	0,049
<b>Fe</b>	0,857	0,840	0,862	0,853	0,899	0,908	0,903	0,014	0,012	0,013	0,051	0,048	0,050
<b>Ca</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Mn</b>	0,143	0,165	0,152	0,153	0,091	0,070	0,080	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
<b>Σ<sup>cat.</sup></b>	1,997	1,999	2,004	2,000	1,995	1,989	1,992	0,997	0,992	0,995	1,012	1,011	1,012
<b>Fórmula estructural<sup>2</sup></b>													
<b>ilmenita<sub>5935A</sub>: (Fe<sub>0,85</sub>, Mn<sub>0,15</sub>) (Ti<sub>0,97</sub>, Nb<sub>0,01</sub>) O<sub>3</sub>; ilmenita<sub>5627</sub>: (Fe<sub>0,90</sub>, Mn<sub>0,08</sub>) (Ti<sub>0,99</sub>, V<sub>0,007</sub>, Nb<sub>0,006</sub>) O<sub>3</sub></b>													
<b>rutilo<sub>5633</sub>: (Ti<sub>0,94</sub>, W<sub>0,02</sub>, Fe<sub>0,01</sub>, Nb<sub>0,01</sub>) O<sub>2</sub>; rutilo<sub>5935A y 5627</sub>: (Ti<sub>0,89</sub>, Nb<sub>0,05</sub>, Fe<sub>0,05</sub>, V<sub>0,01</sub>) O<sub>2</sub></b>													

**Referencias:** \* : punto de medición; Prom.: promedio de los puntos de mediciones precedentes; <sup>1</sup>: promedio de las dos columnas precedentes; <sup>2</sup>: construida con sus componentes principales; 5935A, 5627: muestras procedentes de filones mineralizados; 5633: muestra del Granito Potrerillos.

- Para Palache *et al.* (1946), que lo han clasificado como un óxido múltiple, es  $AB_3X_9 \cdot nH_2O$  donde  
 A = U, Ca, Th, Pb, Ce, Y  
 B = Ti, Nb, Ta, Fe, Al  
 X = O, con OH.

- Ramdohr (1980), expresa como fórmula general del grupo del pirocloro al cual pertenece el mineral en cuestión, como  $X_2Y_2O_7$  con X: Ca, Ce, Y, U; Y: Ti, Nb y Ta.

-  $(Ca, U)_2 (Ti, Nb, Ta)_2 O_6 (OH)$ , del subgrupo de la betafita del grupo del Pirocloro (Anthony *et al.* 1997).

En la figura 3 se proyectan los valores del análisis en el diagrama triangular Nb-Ti-Ta de Hogarth (1977), que además de definir al mineral estudiado dentro del subgrupo betafita del grupo pirocloro, permite visualizar que los puntos sobre el diagrama se encuentran sobre el extremo Ti/Nb, casi sin Ta.

Siguiendo a este autor, la fórmula general del Grupo

Pirocloro es  $A_{2-m} B_2 O_6 (O, OH, F)_{1-n} \cdot pH_2O$ . El subgrupo betafita se define cuando la proporción atómica de los átomos B es  $2*Ti \geq Nb + Ta$  que corresponde para la muestra analizada,  $2*0.796 \geq 0.549 + 0.055$  usando valores promedio de los resultados analíticos. Los átomos A del mineral de la zona de Angulos consisten principalmente en Ca y U, por lo que la especie queda definida en este trabajo, en base a la composición química y propiedades ópticas, como *betafita*.

#### *Ilmenita y rutilo*

El miembro extremo de Mn del grupo de la ilmenita corresponde a la pirofanita,  $MnTiO_3$  (Deer *et al.* 1972). Así, el mineral incluido en las lentes de cuarzo de Angulos, M 5935A y 5627, contiene en promedio 15,18 % y 8,12 % de  $MnTiO_3$ , respectivamente. El contenido pro-

**Cuadro 3:** Composición química de rabdofoano.

% peso	1*	2*	3*	Promedio
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	27.47	27.88	28.09	27.81
Cs <sub>2</sub> O	0.004	0.004	0.004	0.004
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.09	37.64	38.11	37.61
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.44	13.43	13.48	13.11
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.99	14.35	13.96	14.10
ThO <sub>2</sub>	4.21	3.18	1.47	2.95
Total	95.20	96.48	95.11	95.60
Σ T. R.	63.52	65.42	65.55	64.83
H <sub>2</sub> O <sup>1</sup>	4.80	3.52	4.89	4.40
<b>Número de cationes en base a P = 1</b>				
P	1.000	1.000	1.000	1.000
Cs	0.000	0.000	.000	0.000
Ce	0.584	0.584	0.587	0.585
La	0.197	0.210	0.209	0.205
Nd	0.215	0.217	0.210	0.214
Th	0.041	0.031	0.014	0.029
Σ	2.037	2.042	2.020	2.033
<b>Fórmula estructural<sup>2</sup></b>				
(Ce <sub>0.59</sub> , Nd <sub>0.21</sub> , La <sub>0.20</sub> , Th <sub>0.03</sub> ) P O <sub>4</sub> · 0.7 H <sub>2</sub> O				

Referencias: \* : punto de medición; T. R.: tierras raras; <sup>1</sup>: calculada por diferencia; <sup>2</sup>: en base a los componentes principales.

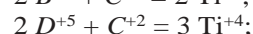
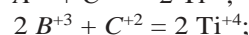
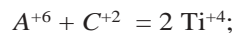
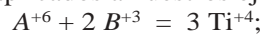
medio de MnO de los resultados analíticos indica 7,14 y 3,82 % para sendos casos analizadas, superando al valor de 3,40 % de un megacrystal de ilmenita pegmatítica de la sierra de Mazán obtenido por Fernández *et al.* (1984).

Asimismo, puede decirse que la primera de las muestras nombradas es “más impura” que la segunda, ya que hay mayor sustitución del Fe<sup>++</sup> y Ti<sup>+4</sup> en la estructura del mineral. Esto se observa en la figura 4 donde se ilustra la variación de los metales di (Fe+Mn) y penta-valentes (Nb+Ta) con respecto al contenido de Ti<sup>+4</sup> (a mayor contenido de Ti hay menor sustitución del mismo -M. 5627- por los penta-valentes Nb+Ta); las proporciones de los divalentes es considerada casi iguales. La razón de esta dispersión, sobre todo en los penta-valentes, se considera a pulsos mineralizantes diferentes los cuales habrían tenido composición algo distintas en cada caso.

Los rutilos analizados, de procedencia diferente, presentan composiciones contrastadas: el del Granito

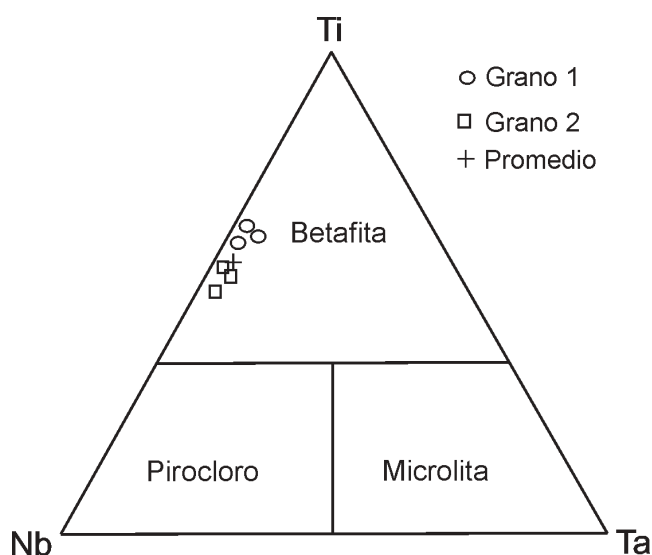
Potrerrillos es rico en W, mientras que en las lentes de cuarzo es rico en Nb lo que da lugar en este caso a una participación parcial en el mineral de ilmenorutilo. Como se dijo precedentemente, el Granito Potrerillos tiene evidencias mineralógicas y petrográficas de alteración postmagmática (Sardi y Rossi 1999), proceso que habría llevado a cabo la precipitación de rutilo wolframífero en el mismo. La concentración original de metales en este fluido acuoso tardío pudo haberse incrementado debido a la lixiviación de accesorios primarios del granito como por ejemplo biotita. Por otro lado, la formación de rutilo como consecuencia de la alteración hidrotermal de ilmenita habría implicado el lavado de hierro y manganeso esencialmente.

Teniendo en cuenta la electroneutralidad del compuesto, los mecanismos de reemplazamiento de cationes di, tri, penta y exavalentes por el tetravalente titanio en la estructura del rutilo fueron muy bien tratados por Rabbia *et al.* (1994, 1996a y b). Las ecuaciones balanceadas que corresponderían a estos procesos de sustitución acoplada, de acuerdo a estos autores y aplicados a nuestros ejemplos, serían las siguientes:



donde A = W<sup>+6</sup>; B = Cr<sup>+3</sup>, V<sup>+3</sup> (Fe<sup>+3</sup>?); C = Fe<sup>++</sup>, Mn<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>; D = Nb<sup>+5</sup>, Ta<sup>+5</sup>.

Siguiendo con las consideraciones comparativas de este trabajo, los rutilos analizados en la Argentina registran valores menores de wolframio a los obtenidos en la zona de Angulos. Pereyra (1991) calcula 8500 ppm de W en rutilos presentes en diorita circundante a rocas portadoras de scheelita en el basamento precámbrico-paleozoico de la sierra del Morro, en San Luis. Rabbia *et al.* (1996a y b) obtienen 1,72 % WO<sub>3</sub>

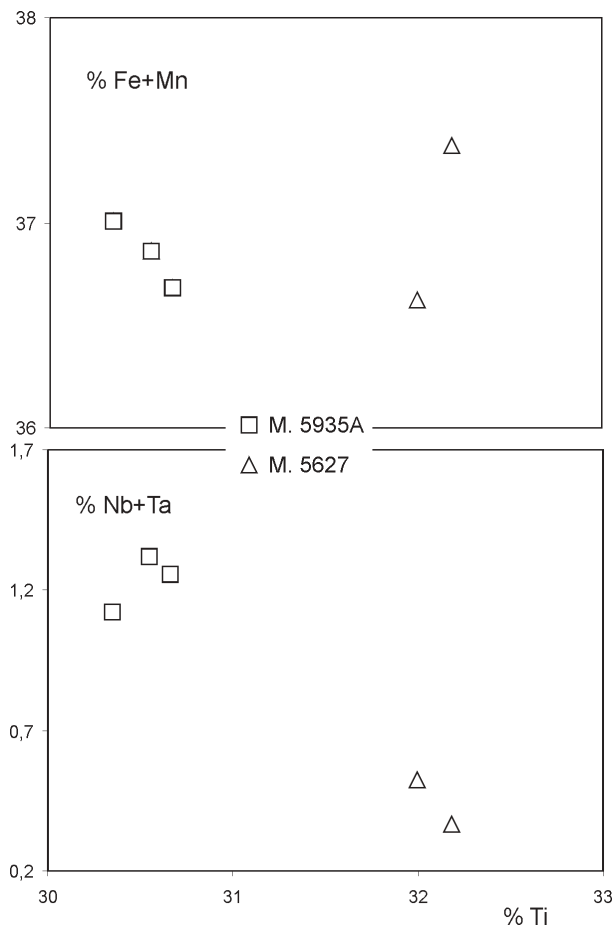


**Figura 3:** Diagrama triangular de Hogarth (1977). Se proyecta la composición de la betafita del yacimiento Badillo.

en rutilos presentes en rocas ultramáficas serpentinizadas asociadas con cromita al SE de la sierra de Córdoba cuyo origen ha intervenido una etapa magmática y posteriormente una hidrotermal, y 0,45 % de  $WO_3$  en rutilos provenientes del relleno de brechas al sur de la mina Kramer del distrito minero Tocota, en la Cordillera Frontal de San Juan cuya mena es arsenopirita. El valor más alto, que tenga conocimiento el autor de la presente, corresponde a 2,48 %  $WO_3$  en especies presentes en rocas ultramáficas del flanco oriental de la sierra de Comechingones (Córdoba) al que se le atribuye la primera cita a nivel mundial de rutilo wolframífero en ese tipo de rocas (Rabbia *et al.* 1994). El valor promedio de 6,07 %  $WO_3$  del rutilo en el Granito Potrerillos de Angulos supera al valor precedente, pero se debe tener en cuenta que el ambiente geoquímico es diferente siendo éste de mayor compatibilidad para el elemento wolframio que las citadas etapas ultramáficas.

### Rabdofano

Este mineral junto a allanita que aparece como accesorio en el Granito Potrerillos constituyen los minera-



**Figura 4:** Variación de % Fe+Mn y % Nb+Ta con respecto a % Ti en ilmenitas del yacimiento Badillo.

les netamente portadores de elementos de tierras raras (esencialmente livianas) identificados en el yacimiento Badillo, en donde la sumatoria de la concentración total de las mismas en el Granito Potrerillos fluctúa entre 275,2 y 421,8 ppm (Sardi 1999b), valores anormalmente altos con respecto al clarke de granito (referencia tomada de Krauskopf 1983).

Son escasos los datos analíticos referidos a este mineral. Se obtuvieron datos de monacitas argentinas provenientes de pegmatitas y material aluvional en Angelelli *et al.* (1983) y de cuerpos carbonatíticos en Del Blanco *et al.* (1998). Comparativamente con el ejemplar analizado aquí, se observa semejante y mayor cantidad de tierras raras totales con respecto a los resultados del primero y segundo trabajo citado, respectivamente, dando éste último contenidos más elevados en Nd, Sm y Gd y menor proporción en Ce y La en relación al mineral de Angulos.

### Conclusiones

-El análisis composicional de la betafita, encontrada por primera vez en el yacimiento Badillo de Angulos e incluso en todo el Sistema de Famatina (aunque ya había sido sólo mencionada en otros trabajos), señala una relación de  $TiO_2:Nb_2O_5$  cercano a 1 y muy pobre en  $Ta_2O_5$ . Corresponde a un titanato-niobato de uranio y calcio, con reemplazamiento de  $Fe^{+++}$ ,  $W^{+6}$  y  $Ta^{+5}$  en la posición de los primeros y de  $Y^{+++}$ ,  $Mn^{++}$ ,  $Pb^{++}$  y  $Ce^{+++}$  en la posición de los segundos, en las cadenas octaédricas características de esta especie.

-Los óxidos de hierro y titanio analizados corresponden a ilmenita y rutilo. El primero, que proviene de las lentes mineralizadas, es manganesífera con sustituciones del  $Ti^{+4}$  principalmente por  $Nb^{+5}$ , y por cantidades menores de  $W^{+6}$ ,  $V^{+++}$ ,  $Cr^{+++}$  y  $Sn^{+4}$ . Los rutilos analizados tienen procedencia diferentes, y a causa de ello, resultados disímiles. La dispersión en los resultados se atribuye a la composición cambiante del fluido responsable de la formación de este mineral con dos orígenes distintos. El rutilo del Granito Potrerillos, precipitado muy probablemente debido a la alteración postmagmática de la roca, es rico en  $WO_3$  con un valor promedio de 6,07 %; dos ejemplares del mismo mineral de las lentes de cuarzo hace lo propio el  $Nb_2O_5$  con 7,67 % en promedio.

-El fosfato hidratado portador de tierras raras livianas y torio encontrado en los filones de cuarzo del yacimiento de Angulos corresponde a rabdofano.

### Agradecimientos

El autor desea agradecer al Dr. Hubert Miller y sus colaboradores del Instituto de Geología General y Aplicada de la Ludwig-Maximilians Universität München (Alemania) donde se realizaron los análisis por micro-

sonda electrónica y a las autoridades del INSUGEO (Dres. Florencia Aceñolaza, Alejandro Toselli y Rossi de Toselli) que facilitaron la realización de esta tarea. También a los árbitros de este trabajo que con sus sugerencias mejoraron el contenido y formato del mismo.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Aceñolaza, F. y Toselli, A. 1981. Geología del Noroeste Argentino. Publicación Especial Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Tucumán, N° 1287. 212 p.
- Sardi, F. 1996. Estudio geológico y mineralógico preliminar del yacimiento wolframífero de Badillo, Sistema de Famatina, La Rioja. 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 3: 173-179. Buenos Aires.
- Angelelli, V., Brodtkorb, M., Gordillo, C. y Gay, H. 1983. Las especies minerales de la República Argentina. Servicio Minero Nacional. 528 p.
- Anthony, J., Bideaux, R., Bladh, K. and Nichols, M. 1997. Handbook of Mineralogy, volumen III: halides, hydroxides, oxides. Mineral Data Publishing, Tucson (Arizona). 628 p. Tucson.
- Deer, W., Howie, R. and Zussman, J. 1972. Rock-forming minerals. Vol. 5 Non-Silicates. Longman (London). 371 p. London.
- Del Blanco, M., Costas Ulbrich, M., Echeveste, H. y Vlach, S. 1998. Las monacitas-(Nd) con samario de los diques carbonatíticos del sector nororiental de la sierra de Cobres, Salta, Argentina. IV Reunión de Mineralogía y Metalogenia, Universidad Nacional del Sur. MINMET'98 –EDIUNS:63-69. Bahía Blanca.
- Durand, F. y Aceñolaza, F. G. 1990. Caracteres faunísticos, paleoecológicos y paleogeográficos de la Formación Puncoviscana (Precámbrico superior-Cámbrico inferior del Noroeste Argentino. El Ciclo Pampeano en el Noroeste Argentino. Serie de Correlación Geológica (UNT), 4:71-112. Tucumán.
- Fernández, R. R., Etcheverry, R., Aragón, E. y Palacios, T. 1984. Estudio de la ilmenita de las pegmatitas de "La Dichosa", Mazán, Provincia de La Rioja. Actas Noveno Congreso Geológico Argentino, 3:328-338. San Carlos de Bariloche.
- Hogarth, D. D. 1977. Classification and nomenclature of the pyrochlore group. American Mineralogist, 62:403-410.
- Krauskopf, K. 1983. Introduction to geochemistry. McGraw-Hill International Book Company. 617 p.
- Palache, Ch., Berman, H. and Frondel, C. 1946. The system of Mineralogy. Vol. I. John Wiley & Sons, Inc. 834 p.
- Pereyra, R. 1991. Sobre el origen de una yacencia de scheelita en la sierra del Morro este – San Luis. Instituto de Recursos Minerales, UNLP. Publicación N° 1:97-111. La Plata.
- Pérez, W. and Kawashita, K. 1992. K/Ar and Rb/Sr geochronology of igneous rocks from the Sierra de Paimán, northwestern Argentina. Journal South American Earth Science, 5: 251-264.
- Rabbia, O., Hernández, L., Coniglio, J., Otamendi, J. y Demichelis, A. 1994. Presencia de rutilo wolframífero en rocas ultrabásicas de las Sierras Pampeanas de Córdoba. II Jornadas de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de Rocas Ultrabásicas. Instituto de Recursos Minerales, UNLP. Publicación N° 3: 599-606. La Plata.
- Rabbia, O., Hernández, L. y Kojima, S. 1996a. Contenido de OH<sup>-</sup> en rutilos wolframíferos de rocas ultrabásicas de las Sierras de Córdoba, Argentina. III Reunión de Mineralogía y Metalogenia. Instituto de Recursos Minerales, UNLP. Publicación N° 5: 195-202. La Plata.
- Rabbia, O., Hernández, L. y Wetten, A. 1996b. Rutilos portadores de Sc, Cr, Fe y W del distrito minero de Tocota, San Juan, Argentina. III Reunión de Mineralogía y Metalogenia. Instituto de Recursos Minerales, UNLP. Publicación N° 5: 203-207. La Plata.
- Ramdohr, P. 1980. The ore minerals and their intergrowths. 2nd. Edition (International Series in Earth Sciences). Pergamon Press.
- Rogers, J. and Adams, J. 1969. Uranium. In: Wedepohl, K. (Executive Editor). Handbook of Geochemistry. Vol. II/1, Chapter 92. Editorial Board.
- Sardi, F. 1999a. Yacimientos de wolframio en Angulos, Ramblones y Faltriquera, La Rioja. En: Zappettini, E. (Ed.). Recursos Minerales de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales, SEGEMAR. Anales 35:431-436. Buenos Aires.
- Sardi, F. 1999b. Geología y geoquímica de los yacimientos de wolframio ubicados en la región centro-oriental del Sistema de Famatina. Interpretación Genética. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales e Instituto Miguel Lillo – UNT. 213 p. (inédito).
- Sardi, F. y Rossi, J. 1999. Caracteres petrográficos del stock granítico de Potrerillos y su depósito de W-Mo-Sn asociado, Sistema de Famatina, La Rioja, Argentina. Zentralblatt für Geologie und Paläontologie Teil I. Heft 7/8:883-894. Stuttgart.
- Sardi, F., Mas, G. y Bengoechea, L. 2000. Petrografía y termometría de las inclusiones fluidas de la manifestación wolframífera de Angulos, Sistema de Famatina (La Rioja, Argentina). Boletín Geológico y Minero, 111 (1):53-66. Madrid.
- Winchell, A. 1964. Elements of optical mineralogy. Part II. John Wiley & Sons. 551 p.

**Recibido:** 23 de enero, 2002

**Aceptado:** 13 de agosto, 2003