

RESEARCH ARTICLE

Geochemical exploration using portable X-ray fluorescence (pXRF) analysers in the Giraúl region (Namibe, SW Angola)

Exploración geoquímica con analizadores de fluorescencia de rayos X portátiles (FRXp) en la región de Giraúl (Namibe, SW Angola)

 Iván Martín-Méndez^{1*},  Enrique Merino-Martínez¹,  Maria João Batista²,  Maria del Carmen Feria^{3,4},
 Cátia Prazeres²,  Juan Carlos Gumiel¹,  Mario Iglesias-Martínez⁴,  Jorge Fernández¹,
 Darío Chinchilla-Benavides⁴,  Miguel Gutiérrez-Medina⁴,  Jorge Buzzi-Marcos⁴,  José Manuel⁵

¹Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC), c/Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España

²Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estr. Da Portela 999, Amadora, Portugal

³Sistemas Avanzados de Tecnología, S.A (SATEC), Av. Europa, 34 A, 28023, Madrid, España

⁴UTE-PLANAGEO (IGME/LNEG/Impulso), Parque tecnológico de Asturias, parcela 13 A, 33428, Asturias, España

⁵Instituto Geológico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Rua Nr, Luanda (Angola)

*Corresponding author: i.martin@igme.es (Iván Martín Méndez)

Key points:

The PLANAGEO project has highlighted the importance of critical raw materials exploration in Angola through pXRF analysers.

The Giraúl pegmatites and denudation products show significant contents of Ta and Nb, together with a Li-rich mineral paragenesis.

The Giraúl region also has significant Cr-Ni-Co (Cu) and Fe-Ti contents in the surrounding Palaeoproterozoic to Cretaceous units.

ABSTRACT

A major geochemical exploration campaign was carried out in SW Angola during the PLANAGEO project, including the analysis of rock, soil, and stream sediment samples using *in situ* portable X-ray fluorescence (pXRF) analysers. The present work focuses on the analytical results obtained in the area of the Giraúl Pegmatitic Field, a world-class Li-rich pegmatitic dike swarm, as well as on adjacent areas with potential for critical element mineralisation. *In situ* pXRF geochemical analyses revealed high Nb and Ta contents in the pegmatites of Giraúl, in the surrounding soils, suggesting a clear relation to LCT pegmatites. The most important Nb contents are found in denudated soils from the Cretaceous latite volcanic units of the Bero Volcanic Complex, reaching values up to 896 mg/kg. This work has enabled to define some areas of special interest: (a) the Giraúl Pegmatitic Field, where significant anomalous concentrations of Nb-Ta (Li-Be) occur; (b) the amphibolitic units of the Namibe Group metasediments and other mafic Palaeoproterozoic intrusions, which show potential interest for base metal (Cr-Ni-Co, Cu) exploration; and (c) the Cretaceous volcanic rocks of the Namibe Basin, in the coastal region, which hold potential interest for Fe-Ti (V).

Article History:

Received: 23/01/2024

Accepted: 05/03/2025

Published: 09/04/2026

Keywords: Critical element exploration; Geochemistry; Portable X-ray fluorescence (pXRF); Pegmatites; Angola.

Puntos clave:

El proyecto PLANAGEO ha demostrado la importancia en la prospección de materias primas críticas en Angola mediante analizadores FRXp.

Las pegmatitas de Giraúl y sus productos de denudación muestran contenidos notables de Ta-Nb, junto con una paragénesis mineral rica en Li.

La región de Giraúl también muestra contenidos relevantes de Cr-Ni-Co (Cu) y Fe-Ti en unidades paleoproterozoicas a cretácicas circundantes.

RESUMEN

Durante el Proyecto PLANAGEO se llevó a cabo una importante campaña de exploración geoquímica en el SW de Angola, incluyendo el análisis *in situ* de muestras de roca, suelos y sedimentos de corriente mediante analizadores de fluorescencia de rayos X portátiles (FRXp). Este trabajo se centra en los resultados analíticos obtenidos en la zona del Campo Pegmatítico de Giraúl, uno de los campos pegmatíticos enriquecidos en Li más extensos del mundo, así como en zonas cercanas con posible interés en elementos críticos. Los análisis geoquímicos *in situ* de FRXp revelaron altos contenidos de Nb y Ta en las pegmatitas de Giraúl en los suelos circundantes, sugiriendo una clara relación con pegmatitas de tipo LCT. Los contenidos más importantes de Nb se encuentran en los suelos denudados de las unidades volcánicas latíticas cretácicas del Complejo Volcánico de Bero, alcanzando valores de hasta 896 mg/kg. Estos trabajos han permitido definir las siguientes zonas de especial interés: a) el Campo Pegmatítico de Giraúl, donde se han observado importantes concentraciones de Nb-Ta (Li-Be); b) las unidades anfíbolíticas de los metasedimentos del Grupo Namibe y otras intrusiones máficas paleoproterozoicas, que presentan un potencial interés para la prospección de metales base (Cr-Ni-Co, Cu); y c) las rocas volcánicas cretácicas de la Cuenca de Namibe, en la región costera, que presentan potencial interés para Fe-Ti.

Historial del artículo:

Received: 23/01/2024

Accepted: 05/03/2025

Published: 09/04/2026

Palabras clave: Exploración de elementos críticos; Geoquímica; Fluorescencia de rayos X portátil (FRXp); Pegmatitas; Angola.

Citation / Cómo citar este artículo: Martín-Méndez, I., Merino-Martínez, E., Batista, M.J., Fera, M.C., Prazeres, C., Gumiel, J.C., Iglesias-Martínez, M., Fernández, J., Chinchilla-Benavides, D., Gutiérrez-Medina, M., Buzzi-Marcos, J., Manuel, J. (2025). Geochemical exploration using portable X-ray fluorescence (pXRF) analysers in the Giraúl region (Namibe, SW Angola). Boletín Geológico y Minero, 136(2), 005. <http://dx.doi.org/10.21701/bolgeomin/136.2/005>

1. Introducción

La exploración de las pegmatitas ha suscitado un considerable interés en los últimos años, dentro del contexto de exploración de materias primas críticas (*Critical Raw materials – CRMs*; European Commission, 2023), debido a que estas rocas pueden concentrar algunos de estos elementos de interés, entre los que destacan Li, Be, Ta, Nb, Y, y REE (incluidos en la última lista de metales críticos publicada por la Unión Europea (European Commission, 2023), así como diversos elementos estratégicos, tal como Rb, Cs, Sn y U, entre otros (Linnen et al., 2012, London, 2016).

El Campo Pegmatítico de Giraúl se encuentra localizado en la provincia de Namibe, en el sector SW de Angola, correspondiendo al extremo septentrional del desierto de Namibe. El Campo Pegmatítico de Giraúl está formado por más de 600 cuerpos pegmatíticos emplazados en dirección mayoritaria WNW-ESE, expuestos en superficie a lo largo de unos 30 km en dirección E-W, y unos 15 km en dirección N-S (Fig. 1). La importancia de este campo pegmatítico radica en la elevada presencia de minerales como espodumena, lepidolita, berilo y minerales del grupo de la columbita, portadores de elementos críticos de interés. Las pegmatitas de Giraúl fueron objeto de estudio en la tesis doctoral de Gonçalves (2010) y artículos posteriores (Gonçalves et al., 2019), que llegó a definir 5 tipos bien diferenciados, aunque posteriormente a ese estudio, no ha sido publicado ningún trabajo relacionado con el potencial de exploración en el área.

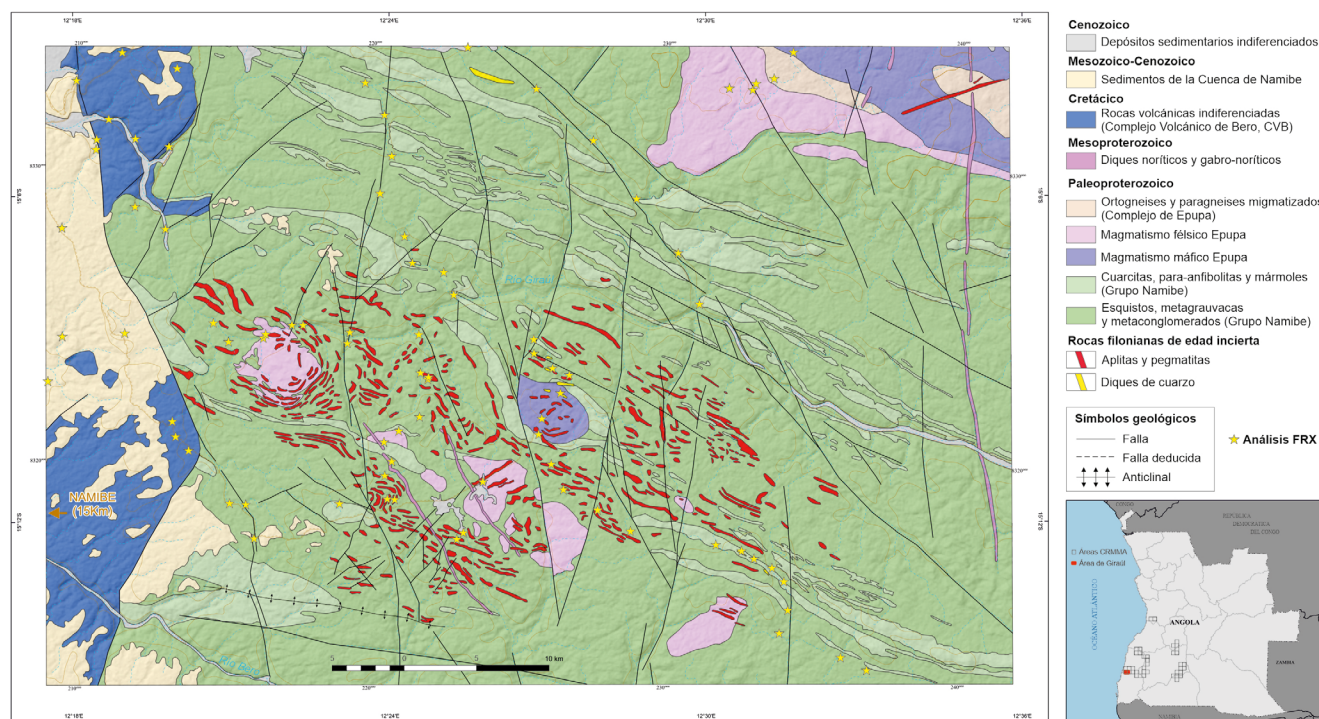


Figura 1. Mapa geológico del área de estudio, mostrando las principales unidades geológicas descritas en la región de Giraúl (modificado de Escuder-Viruete et al., 2021, y Fernández-Suárez & Iglesias-Martínez, 2022a, b), con la localización de los puntos de muestreo y análisis FRXp de la campaña geoquímica. La figura inferior derecha muestra la localización de la zona de estudio (área de Giraúl, en rojo), dentro de las áreas estudiadas en el subprograma CRMMA.

Figure 1. Geological map of the study area, showing the main geological units described in the region of Giraúl (modified from Escuder-Viruete et al., 2021, and Fernández-Suárez & Iglesias-Martínez, 2022a, b), with the location of the sampling and pXRF analysis points of the geochemical campaign. The figure inset shows the location of the study area (Giraúl area, in red), within the areas studied in the CRMMA sub-programme.

Con relación a los trabajos de exploración, se llevaron a cabo labores de investigación de estas pegmatitas para la extracción de moscovita y de berilo hasta los años 70, durante la época en la que Angola era una colonia portuguesa, aunque estos trabajos se paralizaron tras su independencia y durante los casi 30 años de guerra civil que sufrió el país. No ha sido hasta recientemente cuando se ha prestado de nuevo atención a este campo pegmatítico, en primer lugar, debido al Proyecto PLANAGEO (2014-2022), dentro del cual se incluye este trabajo, y en segundo lugar por parte de la empresa australiana *Tyranna Resources Ltd.* y la empresa angoleña *Angolito Exploração Mineira Lda.*, que comenzaron los trabajos de exploración de litio en el año 2022.

Durante el proyecto PLANAGEO, se desarrolló un ambicioso programa de trabajo de exploración de minerales metálicos denominado Cartas de Recursos Minerales Metálicos de Angola (Subprograma Cartas de Recursos Minerales Metálicos de Angola, CRMMA; ver *inset* en Fig. 1), con el interés de evaluar aquellas zonas con potencial en recursos minerales en la región SW de Angola. El objetivo de estos trabajos fue el de establecer criterios geoquímicos que definiesen asociaciones elementales de interés, obtenidos mediante el análisis *in situ* a partir de analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X (FRXp). La utilización de FRXp supone una valiosa ayuda en el trabajo de campo, orientando las prospecciones y muestreos a zonas más favorables y ahorrando tiempo y recursos.

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos a partir de este programa de exploración, fundamentalmente focalizado en el área del Campo Pegmatítico de Giraúl, pero también evaluando otras posibles zonas de interés de elementos metálicos. Los análisis de FRXp han resaltado la presencia de diversas asociaciones elementales en base a Nb-Ta, Cr-Co-Ni y Fe-Ti, permitiendo definir tres áreas potenciales de exploración en la región de Giraúl.

2. Contexto geológico

2.1. Geología Regional

El área de estudio se encuentra en la Zona de Namibe, un dominio geológico caracterizado por la presencia de rocas de edad orosírica a estatérica (1.83–1.74 Ga; Rodrigues *et al.*, 2021; Merino-Martínez *et al.*, 2022), relacionadas con el Evento Kamanjab-Epupa-Namibe (Jelsma *et al.*, 2018), y cuya extensión hacia el sur alcanza la frontera noroccidental de Namibia. Esta región se caracteriza por la presencia de una extensa secuencia metavolcano-sedimentaria denominada Grupo Namibe (Escuder-Virueite *et al.*, 2021), que es intruida por un vasto conjunto de rocas plutónicas de composición gabro-diorítica a granítica, extensamente gneisificadas y migmatizadas en diversas zonas, que conforman el Complejo de Epupa-Namibe (Pereira *et al.*, 2013; Merino-Martínez *et al.*, 2022), escasamente representado en la región de estudio (Fig. 1).

El Grupo Namibe está representado en la región de estudio por extensos afloramientos de esquistos y metagrauvacas, con capas alternas de metaconglomerados, en los que se intercalan ocasionalmente cuarcitas, cuarcitas ferríferas, niveles de para-anfibolitas, anfibolitas, meta-vulcanoclastitas y mármoles (figs. 2A y 2B; Escuder-Virueite *et al.*, 2021). La macroestructura general del Grupo Namibe se dispone en dirección WNW-ESE a W-E, y forma diversas estructuras antiformales-sinformales de pequeña escala, dentro de una estructura sinformal de escala kilométrica (Escuder-Virueite *et al.*, 2021).

Rocas paleoproterozoicas (Epupa) félsicas de composición granítica, intermedia a ácida (Gonçalves, 2010) cubren una extensa zona al noreste de la región de estudio y, de manera subordinada, en la región del Campo Pegmatítico de Giraúl (Fig. 1). Estas litologías muestran una variación composicional de tonalitas a granitos, siendo comunes los términos monzograníticos a granodioríticos, y una variedad de texturas de deformación (Escuder-Virueite *et al.*, 2021). Términos dioríticos a gabróticos son también encontrados de manera dispersa en la región, ocasionalmente intruidos por las pegmatitas de Giraúl (Fig. 2D).

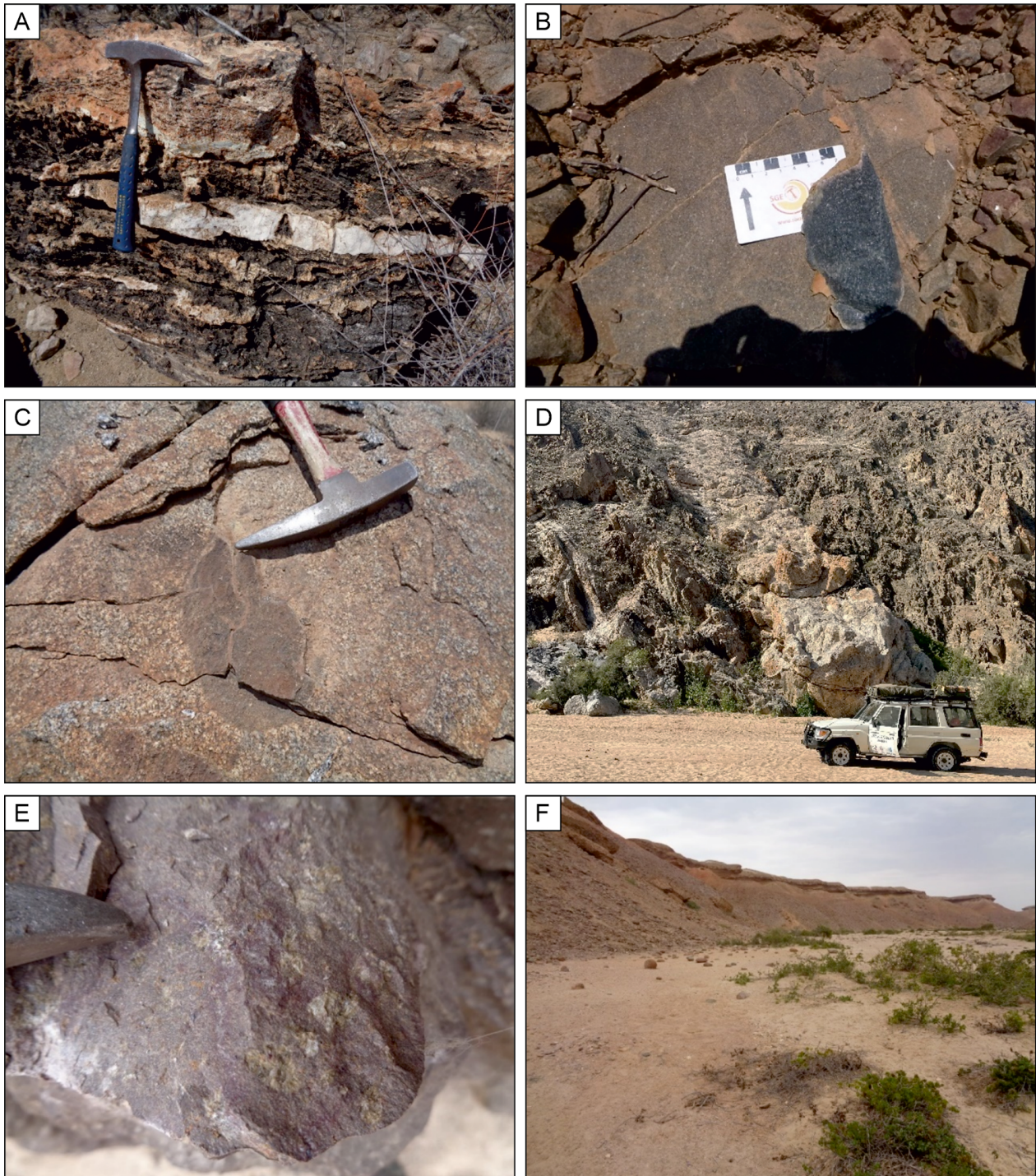


Figura 2. A) Niveles de mármoles intercalados entre unidades metapelíticas del Grupo Namibe. B) Niveles anfíbolíticos del Grupo Namibe, mostrando procesos de alteración *in situ* y formación de suelos de color castaño. C) Magmatismo félsico Epupa: monzogranitos ricos en minerales máficos (biotita y anfíbol) con enclaves metasedimentarios corneanizados, intruyendo en el Grupo Namibe. D) Pegmatita granítica de dimensión métrica, intrusiva en el zócalo metamórfico del Grupo Namibe en el cauce del río Giraúl. E) Roca volcánica de tipo latita, de textura porfídica marcada por fenocristales de plagioclasa alterados y matriz desvitrificada. F) Aspecto del río Giraúl a su paso por los sedimentos cretácicos de la cuenca de Namibe.

Figure 2. A) Marble levels intercalated between metapelitic units of the Namibe Group. B) Amphibolitic levels of the Namibe Group, showing *in situ* alteration processes and formation of *in situ* brownish soils. C) Epupa felsic magmatism: monzogranites rich in mafic minerals (biotite and amphibole) intruding into the Namibe Group, showing metasedimentary hornfels enclaves. D) Granitic pegmatite of metric dimension, intrusive in the metamorphic basement of the Namibe Group in the Giraúl riverbed. E) Volcanic rock of latite affinity, with porphyritic texture marked by altered plagioclase phenocrysts within a devitrified matrix. F) Aspect of the Giraúl River as it passes through the Cretaceous sediments of the Namibe Basin.

En la región occidental de estudio, en la franja costera Atlántica, se encuentra una diversidad de rocas volcánicas que conforman el Complejo Volcánico de Bero (CVB), de edad cretácica (132-120 Ma; Fig. 1; Renne *et al.*, 1996; Marsh & Swart, 2018). Litológicamente, este complejo está constituido principalmente por unidades volcánicas ácidas (láminas de ignimbritas, latitas a cuarzo-latitas y otras rocas piroclásticas), y básicas (coladas basálticas a andesíticas), esencialmente vítreas y bien estratificadas, con estructura interna masiva y potencia decamétrica (< 120 m; Fig. 2E; Escuder-Virue et al., 2021; Fernández-Suárez & Iglesias-Martínez, 2022a).

Por encima de estos materiales se depositan en discordancia los sedimentos mesozoicos a cenozoicos de la Cuenca de Namibe (Fig. 2F). Las unidades sedimentarias encontradas en esta región corresponden a unidades yesíferas, conglomeráticas, calizas y areniscas, relacionadas con las etapas de *rifting* Atlántico y deriva continental, fluctuaciones eustáticas del nivel del mar y a diversos procesos de levantamiento continental (Gindre-Chanu *et al.*, 2015; Escuder-Virue et al., 2021). Los ríos actuales Giraúl y Bero atraviesan todas las unidades anteriormente descritas, formando amplias llanuras de inundación de carácter intermitente, normalmente activas durante la estación de lluvias (Fig. 2F).

El Campo Pegmatítico de Giraúl está formado por un cortejo filoniano de composición granítica que se distribuye en una banda en dirección WNW-ESE, coherente con la macroestructura general de la región, extendiéndose a lo largo de una longitud de unos 30 km y una anchura de unos 15 km (Fig. 1). Las pegmatitas forman diques subverticales, encontrándose también cuerpos con inclinaciones de bajo ángulo, que intruyen fundamentalmente en las unidades metasedimentarias del Grupo Namibe y, más escasamente, en las rocas graníticas y máficas paleoproterozoicas encontradas en la región (Fig. 2D). Contactos difusos y transicionales son descritos entre las pegmatitas y el stock leucogranítico encontrado al W del enjambre pegmatítico, sugiriendo contemporaneidad y relación genética (Gonçalves, 2010; Gonçalves *et al.*, 2019).

El interés del Campo Pegmatítico de Giraúl se debe a su extensa paragénesis mineral primaria enriquecida en diversos elementos críticos de interés (p.ej., Li, Be, Nb, Ta, Y, Rb, y, puntualmente, P y Cs; Gonçalves, 2010; Gonçalves *et al.*, 2019). Las rocas pegmatíticas estudiadas en campo suelen estar zonadas y presentar gran variedad de texturas y mineralogía (Fig. 3). Se observan términos estériles, ricos en cuarzo, albita y feldespato potásico (microclina), con escasa moscovita y turmalina (Fig. 3A); términos ricos en moscovita (Fig. 3B); diversas facies con grandes cristales de turmalina, de tipo chorlo-dravita (Fig. 3C) y de tipo elbaíta (variedad verdelita; Fig. 3D), que a veces aparecen concentrados formando agregados de turmalina de tamaño decimétrico; así como facies pegmatíticas con espodumena, lepidolita y escasa turmalina (Fig. 3E) y espodumena y minerales del grupo de la amblygonita (Fig. 3F).

Aunque no es posible su diferenciación cartográfica debido a la escala del trabajo, Gonçalves (2010) y Gonçalves *et al.* (2019) distinguen cinco tipos de pegmatitas en la región de Giraúl, a partir de criterios de composición mineral y estructura interna, tal como se detallan a continuación:

- El tipo I (estéril) es el único que se limita a los leucogranitos y cuyo contacto con ellos es gradual. Tiene una estructura concéntrica simple, con dos zonas intermedias (que pueden contener berilo) y un núcleo de cuarzo, a veces rosa y de calidad gemológica. Los minerales principales son microclina, plagioclasa y cuarzo, y los accesorios son granate, turmalina y moscovita.
- El tipo II (estéril) presenta, además de las zonas del tipo anterior, zonas de borde y de pared. Los minerales principales son microclina, albita y cuarzo, y los minerales accesorios incluyen granate, moscovita, biotita y berilo. Este tipo de pegmatitas suele presentar una ligera albitización, asociada a la circulación de fluidos hidrotermales tardíos, que promovió la cristalización *subsólido* de minerales del grupo de la columbita.
- El tipo III (subtipo berilo-columbita) presenta una tercera zona intermedia con cristales de mayor tamaño, rica en minerales del grupo de la columbita y con muy poco berilo.
- El tipo IV (subtipo berilo-columbita-fosfatos) presenta una estructura similar al anterior, aunque se superponen bandas de albita de cristalización tardía (con albita y con cuarzo-moscovita-elbaíta). Además, los fosfatos de la secuencia trifilita-ferrisclerita-heterosita son muy abundantes en las zonas intermedias. Berilo y minerales del grupo de la columbita (Nb-Ta) también suelen estar presentes.

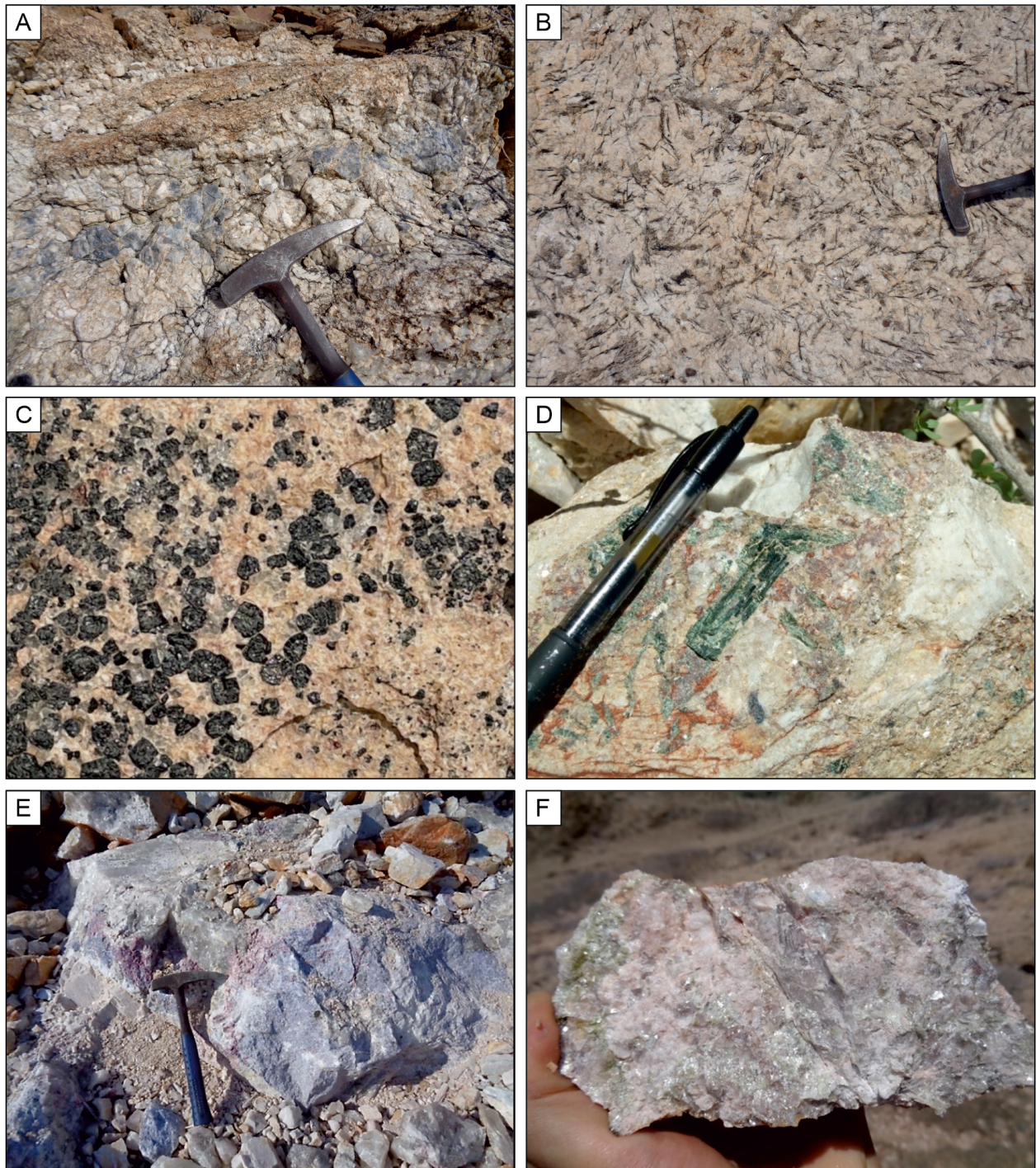


Figura 3. Tipos pegmatíticos observados en los trabajos de exploración geoquímica. A) Pegmatita estéril mostrando zonación con un núcleo de cuarzo, plagioclasa sódica (albita), feldespato potásico (microclina) y turmalina (de tipo chorlo-dravita) en los bordes. B) Pegmatita con intercrecimiento de micas y cristales de feldespato potásico (microclina). C) Acumulaciones de cristales primarios centimétricos de turmalina, de la variedad chorlo-dravita, en pegmatita granítica. D) Cristales prismáticos centimétricos de turmalina de tipo elbaite (variedad verdelita), junto con plagioclasa, feldespato, cuarzo y escasa lepidolita. E) Pegmatita con abundante espodumena y lepidolita, de tonalidades rosadas a violáceas, respectivamente. F) Muestra de mano de pegmatita enriquecida en espodumena, junto con amblygonita y escasa lepidolita.

Figure 3. Pegmatite types studied in the geochemical exploration work. A) Barren pegmatite showing a mineralogical zoning consisting of a core of sodium plagioclase (albite-type), K-feldspar (microcline) and tourmaline (schorl-dravite-type) at the edges. B) Pegmatite with intergrowth of micas and K-feldspar crystals (microcline). C) Accumulations of centimetric primary tourmaline crystals, of the schorl-dravite variety, in a granitic pegmatite. D) Prismatic centimetric tourmaline crystals of elbaite (verdelite variety), together with plagioclase, feldspar, quartz and scarce lepidolite. E) Pegmatite with abundant spodumene and lepidolite, with pink to purple tones, respectively. F) Hand sample of pegmatite rich in spodumene, together with amblygonite group minerals and scarce lepidolite.

- El tipo V (espodumena) es el más fraccionado y evolucionado. Presenta una zona intermedia con predominio de espodumena, minerales del grupo de la ambligonita y escasa petalita, donde los minerales del grupo de la columbita son relativamente frecuentes. En las fases post-magmáticas se forman vetas de albita y cuarzo-moscovita (lepidolíticas)-elbaíta y, posteriormente, una mica rica en Cs (nanpingite), que sustituye a la moscovita.

3. Metodología

3.1. Toma de muestras para exploración geoquímica

El tipo de muestras que se seleccionaron para la campaña de exploración geoquímica fueron 1) los sedimentos de corriente de los lechos secos de la cuenca de drenaje del río Giraúl y su entorno, 2) las muestras de afloramientos rocosos de las pegmatitas y unidades del entorno y 3) los suelos de alteración de estas rocas siguiendo los parámetros de muestreo indicados en el Manual de Geoquímica de la IUGS (Demetriades *et al.*, 2022).

Durante la campaña de campo llevada a cabo en septiembre de 2021 se tomaron 32 muestras de sedimentos de corriente, 14 de rocas y 37 de suelos residuales (figs. 4A y 4B). Para los sedimentos de corriente se tomaron entre 2.5-3 kg de muestra compuesta en el lecho activo de arroyo y tamizando a 5 mm, para los afloramientos de rocas se llevó a cabo un muestreo puntual con la finalidad de conocer las características litogeoquímicas de un determinado punto del afloramiento de manera sistemática, mientras que para los suelos se tomaron 3 kg de muestra del horizonte B, a una profundidad aproximada de 30-40 cm, y tamizando la muestra a 5 mm. El material granular (sedimentos y suelos) fue homogeneizado en un balde de plástico con materiales exentos de contaminantes (sin pintura y libres de metales), previo a su análisis por FRXp.



Figura 4. Fotografías de los trabajos de campo. A) Toma de muestras en sedimentos de corriente. B) Suelos residuales en la zona de las pegmatitas de Giraúl. C) Ejemplo de las mediciones realizadas con los analizadores portátiles de fluorescencia de rayos X en la zona de trabajo.

Figure 4. Fieldwork photographs. A) Sampling of stream sediments. B) Residual soils in the area of the Giraúl pegmatites. C) Example of the measurements performed using the pXRF analysers in the working area.

3.2. Análisis y control de calidad

Para obtener los datos analíticos, se optó por la utilización de dos analizadores FRXp, que permitieron llevar a cabo análisis multielementales *in situ* de diversos materiales geológicos en un corto período de tiempo. Esta técnica ha sido utilizada en trabajos anteriores por varios autores en distintos medios de muestreo, con resultados relevantes (p.ej., Piercey *et al.*, 2014; Lemièrre, 2018; Zhou *et al.*, 2023).

	K	Ca ^a	Fe	Ti ^a	Mn	Cr ^a	Co ^a	Ni ^a	Cu	V ^a	Zn	Ba	Rb	Sr ^a	Nb ^a	Ta ^a	Th ^a	Zr	Pb	Sb ^a	As
	%	%	%	%	%	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
OREAS_1_A	3,285	0,055	7,047	0,324	0,045	-	89	-	0,6654	92	-	134	168	24	17	12	15	175	13	-	99
OREAS_2_A	3,327	0,069	7,068	0,332	0,044	-	89	10	0,6646	92	7	150	169	25	17	18	16	176	9	-	102
OREAS_3_A	3,296	0,069	7,179	0,330	0,048	-	62	21	0,6841	88	8	166	170	25	18	25	17	178	9	-	96
OREAS_4_A	3,476	0,085	7,302	0,344	0,045	-	78	25	0,6901	102	-	155	175	26	17	23	17	177	13	10	108
OREAS_5_A	3,448	0,064	7,201	0,345	0,043	-	71	-	0,6804	76	-	156	171	24	17	18	15	177	10	-	105
OREAS_6_A	3,368	0,062	7,235	0,333	0,048	-	100	14	0,6867	103	-	173	169	26	18	13	16	178	14	11	104
OREAS_7_A	3,046	0,056	6,636	0,307	0,040	-	63	-	0,6220	78	-	143	157	23	15	16	15	167	8	19	95
OREAS_8_A	3,164	0,053	6,887	0,312	0,042	-	83	12	0,6475	80	7	136	162	23	16	22	14	170	8	18	99
OREAS_9_A	3,179	0,057	6,885	0,321	0,045	-	49	-	0,6440	106	-	147	160	23	17	19	14	167	3	10	98
OREAS_10_A	3,271	0,061	7,038	0,316	0,043	-	88	11	0,6657	103	-	157	172	25	16	13	16	178	9	-	104
OREAS_11_A	3,272	0,054	6,977	0,327	0,044	-	62	-	0,6514	94	-	157	166	25	17	21	15	177	9	11	100
OREAS_12_A	3,232	0,069	6,990	0,321	0,040	-	59	13	0,6535	69	8	158	159	24	17	23	14	169	14	-	96
OREAS_1_B	3,622	0,161	9,526	0,366	0,060	0	78	0	0,9983	0	0	237	247	38	27	22	23	267	16	20	153
OREAS_2_B	3,797	0,185	8,299	0,360	0,053	0	105	0	0,8209	0	0	166	206	33	24	29	20	221	14	16	123
OREAS_3_B	3,661	0,166	8,303	0,362	0,054	0	102	0	0,8178	0	11	71	202	32	15	15	22	222	18	0	121
OREAS_4_B	3,664	0,221	7,944	0,359	0,055	0	96	0	0,7746	0	0	147	193	30	22	15	19	208	11	0	119
OREAS_5_B	3,624	0,181	8,058	0,370	0,053	0	108	0	0,7935	0	0	75	189	29	21	10	18	218	12	0	122
OREAS_6_B	3,679	0,191	8,175	0,364	0,053	0	76	0	0,8108	0	0	166	196	30	24	26	21	218	14	0	120
OREAS_7_B	3,662	0,190	8,135	0,371	0,053	0	90	0	0,8030	0	0	71	191	31	22	18	18	212	10	0	124
OREAS_8_B	3,696	0,170	8,327	0,370	0,055	0	73	0	0,8285	0	0	67	203	32	24	29	20	220	15	0	128
OREAS_9_B	3,695	0,180	8,352	0,367	0,054	0	82	0	0,8316	0	0	71	203	31	25	28	19	222	13	0	128
OREAS_10_B	3,691	0,184	8,185	0,372	0,055	0	78	0	0,7967	0	0	145	203	30	24	17	19	219	12	0	120
OREAS_11_B	3,639	0,189	8,252	0,385	0,059	0	91	0	0,8172	0	0	158	199	31	21	7	18	217	15	0	122
Promedio	3,47	0,12	7,65	0,35	0,05	-	81,39	5,89	0,74	47,09	2,73	139,39	183,91	27,83	19,61	19,09	17,43	197,09	11,70	6,76	112,43
Lim. Detección ^c	0,05	0,02655	0,08	0,012	0,002	22,00	3,50	5,00	0,0003	0,93	3,50	11,26	0,32	12,00	1,00	1,00	1,00	1,15	0,78	0,0005	0,50
Desv. Prom.	0,22	0,06	0,73	0,02	0,01	-	15,76	8,30	0,09	46,90	4,10	41,75	21,76	4,06	3,68	6,08	2,63	26,87	3,34	7,93	14,59
Certificado	3,31	0,05	6,68	0,19b	0,04	54	83	40,1	0,612	76	26,3	194	130	27,2	6,3b	0,54	14,3	171	10,6	1,48	98
Error abs.	0,16	0,07	0,97	0,16	0,01	-	1,61	34,21	0,13	28,91	23,57	54,61	53,91	0,63	13,31	18,55	3,13	26,09	1,10	5,28	14,43

^a Valores de elementos no certificados en informe de análisis elemental de OREAS 904 de los equipos FRX portátiles Hitachi X-MET8000

^b Valores indicativos de Ti y Nb de patrón certificado (OREAS 904), obtenidos por digestión ácida ICP-OES/MS.

^c Límite de detección calculado a partir de la mitad del valor mínimo de cada elemento en todas las muestras analizadas.

Tabla 1. Análisis, en porcentaje en peso (wt. %), del patrón de referencia OREAS y resultados analíticos del patrón certificado mediante el método MINING-FP de ambos analizadores (A y B). Se muestra el promedio, así como el error absoluto promedio, de los valores obtenidos en los análisis realizados en los patrones, y el valor de desviación con respecto a la composición del patrón OREAS reportada en los analizadores. n.d.: no definido. ^aValores de elementos no certificados en informe de análisis elemental de OREAS 904 de los equipos FRX portátiles Hitachi X-MET8000. ^bValores indicativos de Ti y Nb de patrón certificado (OREAS 904), obtenidos por digestión ácida ICP-OES/MS. ^cLímite de detección calculado a partir de la mitad del valor mínimo de cada elemento en todas las muestras analizadas.

Table 1. Analysis of the OREAS reference standard, in weight %, and analytical results of the certified standard for both analyzers A and B. It is also shown the average of the values obtained, as well as the average absolute error, in the analyses performed on the standards, and the deviation value with respect to the composition of the OREAS standard reported on the analysers. n.d.: not defined. ^aNon-certified element values in OREAS 904 elemental analysis report of Hitachi X-MET8000 portable XRF equipment. ^bIndicative values of Ti and Nb of certified standard (OREAS 904), obtained by acid digestion ICP-OES/MS. ^cDetection limit calculated from half of the minimum value of each element in all samples analyzed.

Los datos analíticos se han obtenido usando estos dos analizadores del modelo de FRXp Hitachi/X-MET8000, que está equipado con un tubo de rayos X de 45 kV con un área de detección de 25 mm². Las muestras se han analizado utilizando el modo Mining-FP, obteniendo un amplio rango de elementos que va desde el Mg al U. El litio, a pesar de ser un elemento de interés en esta zona, no se detecta mediante FRXp, por ser un elemento ligero. Por lo tanto, se han utilizado las asociaciones geoquímicas de otros elementos incompatibles (i.e., Rb, Nb, Ta; Černý & Ercit, 2005) como indicadores de su presencia.

Los tiempos de medida de cada análisis fueron de 60 segundos. Ya que la penetración de los rayos X en el material no es muy grande (aunque puede alcanzar más de 2 cm en algún elemento, p.e., Ba; Laperche & Lemièrre, 2021), se llevaron a cabo 3 medidas en los medios de muestreo granulados (suelos y sedimentos), homogeneizando antes de cada medida para tener una mayor representatividad, y 5 medidas puntuales en el caso de rocas, en las zonas de menor tamaño de grano o mayor porcentaje de matriz. Se utilizaron como medidas finales para el manejo de resultados y proyecciones composicionales, los resultados promedios de estas 3 a 5 medidas obtenidas en el campo (Fig. 4C).

El control de calidad (QC) de las medidas de FRXp se llevó a cabo de manera rutinaria, midiendo un patrón de referencia certificado, previamente a comenzar el trabajo diario de muestreo. Dicho patrón de referencia es una probeta que contiene una mineralización de Cu procedente de Queensland (Australia), denominada OREAS 904 (Tabla 1). Aunque los valores en determinados elementos de los patrones certificados reportados en los analizadores muestran una ligera desviación (p.e., K₂O y Fe₂O₃), los errores absolutos calculados con respecto al promedio de todos los análisis realizados en los patrones indican baja dispersión y elevado nivel de precisión en las mediciones.

Los elementos que contaban con valores certificados para los equipos FRX utilizados en la campaña de campo se han normalizado a los valores del patrón OREAS (K, Ca, Fe, Mn, Cu, Zn, Ba, Rb, Zr, Pb y As).

Se tomaron además 3 muestras duplicadas, lo que corresponde a aproximadamente un 4% del total de muestras analizadas en esta campaña lo que se aproxima al 5% de muestras duplicadas recomendadas (Demetriades *et al.*, 2022), que muestran desviaciones estándar de todos los elementos normalmente constreñidas entre 0.26 y 0.001, a excepción de algunos valores puntuales con elevada discrepancia, lo que fiabilidad en los resultados obtenidos.

4. Resultados y discusión

La campaña de exploración geoquímica resultó en el análisis *in situ* mediante FRXp de un total de 14 rocas, 32 sedimentos de corriente y 37 suelos en el área de Giraúl. Con el objetivo de observar dispersiones elementales y concentraciones anómalas, se procedió a la realización de análisis estadísticos univariantes y a la proyección de los contenidos de cada elemento seleccionados (TiO₂, Fe₂O₃, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Nb y Ta) en distintos mapas unielementales, representados según intervalos de clase en percentiles (figs. 5-9). Cabe mencionar que los resultados mostrados deben interpretarse con criterios cualitativos más que cuantitativos, debido a las restricciones que existen en cuanto a los límites de detección de cada elemento (Laperche & Lemièrre, 2021).

4.1. Análisis estadístico univariante

Con todos los resultados analíticos obtenidos, se creó una base de datos para el tratamiento estadístico basada en Reimann *et al.* (2008). A las concentraciones de los elementos no detectados, por ausencia o concentración inferior al límite de detección, se les asignó un valor correspondiente a la mitad del valor mínimo del elemento de todos los análisis realizados, para poder ser tratadas con el resto de los valores. Para generar los parámetros estadísticos que sirvieron de guía para la interpretación de resultados, todos los resultados fueron procesados usando el software STATISTICA 12.0.

Los parámetros estadísticos básicos calculados fueron: medidas de la tendencia central (media aritmética y geométrica, mediana y cuando fuera posible la moda), medidas de la dispersión (varianza y desviación típica; Tabla 2). El análisis estadístico muestra errores promedio elevados, incluso superiores al valor media en diversos elementos (Cr, V, Co, Sb), lo que conlleva a emplear los resultados con carácter cualitativo, como herramienta informativa de análisis de anomalías geoquímicas orientada a la prospección. En el caso de los parámetros de varianza y desviación estándar, no pueden ser empleados como medidas directas de variabilidad estadística, ya que son calculados a partir del análisis de múltiples litotipos o sus productos de denudación, aunque ayudan a establecer el grado de dispersión elemental en la región.

Variable	Media	Error promedio	Med. Geom.	Mediana	Moda	Frec.	Min.	Max.	Varianza	Dev.Est.
Rocas (n = 14)										
K ₂ O (%)	2,68	1,27	1,65	2,67	Múltiple	7	0,13	6,36	3,46	1,86
CaO (%)	3,57	0,84	0,83	0,69	Múltiple	12	0,12	33,72	79,17	8,90
Fe ₂ O ₃ (%)	3,11	0,98	1,91	3,08	Múltiple	7	0,24	9,57	7,41	2,72
TiO ₂ (%)	0,24	0,07	0,07	0,02	0,02	9	0,02	1,10	0,13	0,37
MnO (%)	0,04	0,02	0,01	0,01	Múltiple	11	0,001	0,19	0,00	0,06
Cr (mg/kg)	46,36	70,18	33,12	22,00	22,00	11	22,00	165,00	2502,55	50,03
Co (mg/kg)	13,39	14,04	10,07	11,25	3,50	9	3,50	32,00	96,16	9,81
Ni (mg/kg)	12,64	10,00	9,20	7,00	7,00	11	7,00	70,00	281,02	16,76
Cu (mg/kg)	7,84	10,38	3,89	2,96	2,96	13	2,96	68,31	303,56	17,42
V (mg/kg)	49,40	60,10	4,72	0,93	0,93	11	0,93	266,11	8482,46	92,10
Zn (mg/kg)	417,82	304,48	234,06	380,45	21,17	8	21,17	1647,60	171014,86	413,54
Ba (mg/kg)	208,45	129,69	65,75	68,48	11,26	11	11,26	1143,10	127617,82	357,24
Rb (mg/kg)	418,49	277,56	40,67	69,83	Múltiple	12	0,64	4598,81	1465827,90	1210,71
Sr (mg/kg)	223,25	77,14	118,11	88,50	37,00	9	27,00	633,00	54342,03	233,11
Nb (mg/kg)	32,18	26,46	16,03	15,00	18,00	10	2,00	138,50	1609,37	40,12
Ta (mg/kg)	32,64	13,61	18,66	23,50	23,00	11	1,00	166,00	1637,32	40,46
Th (mg/kg)	9,54	8,89	4,87	4,00	1,00	10	1,00	42,00	143,63	11,98
Zr (mg/kg)	98,33	24,65	24,23	31,56	1,15	10	1,15	446,94	23270,14	152,55
Pb (mg/kg)	17,20	8,80	10,50	18,27	0,78	6	0,78	48,97	155,61	12,47
Sb (mg/kg)	2,57	5,36	0,01	0,0005	0,0005	11	0,0005	21,00	33,80	5,81
Sedimentos de corriente (n = 32)										
K ₂ O (%)	2,33	0,41	2,22	2,31	Múltiple	16	1,07	3,61	0,46	0,68
CaO (%)	3,84	1,25	3,37	3,02	Múltiple	20	1,03	9,76	4,44	2,11
Fe ₂ O ₃ (%)	4,69	0,88	4,21	4,59	Múltiple	19	1,27	10,21	5,00	2,24
TiO ₂ (%)	0,56	0,12	0,50	0,54	Múltiple	16	0,21	1,87	0,10	0,31
MnO (%)	0,10	0,03	0,08	0,08	Múltiple	21	0,03	0,63	0,01	0,10
Cr (mg/kg)	78,44	83,53	57,40	41,00	41,00	25	41,00	317,00	6869,22	82,88
Co (mg/kg)	15,06	12,16	10,87	8,25	5,50	19	5,50	68,00	204,96	14,32
Ni (mg/kg)	18,06	9,97	11,30	7,50	5,00	22	5,00	66,00	359,67	18,97
Cu (mg/kg)	12,16	6,54	6,89	5,55	5,55	30	5,55	164,36	826,09	28,74
V (mg/kg)	79,35	69,69	34,35	44,21	5,89	21	5,89	601,67	14495,84	120,40
Zn (mg/kg)	319,23	69,77	258,48	242,14	114,27	19	48,97	832,62	42075,25	205,12
Ba (mg/kg)	695,60	156,85	587,51	555,31	Múltiple	18	212,21	1941,41	177658,28	421,50
Rb (mg/kg)	83,14	18,56	77,18	77,30	77,30	19	34,35	152,48	1068,79	32,69
Sr (mg/kg)	245,50	56,41	209,70	208,00	294,00	20	74,00	567,00	20256,52	142,33
Nb (mg/kg)	15,84	5,44	12,73	11,50	15,00	25	5,00	64,00	171,88	13,11
Ta (mg/kg)	21,78	6,66	20,00	18,00	18,00	22	11,00	77,00	142,11	11,92
Th (mg/kg)	8,28	3,05	6,61	7,00	7,00	19	1,00	23,00	27,63	5,26

Variable	Media	Error promedio	Med. Geom.	Mediana	Moda	Frec.	Min.	Max.	Varianza	Dev.Est.
Zr (mg/kg)	160,20	37,16	132,59	117,05	136,54	22	42,24	468,55	12288,57	110,85
Pb (mg/kg)	17,64	4,68	16,12	16,71	17,10	19	4,28	33,43	52,79	7,27
Sb (mg/kg)	12,19	16,13	8,01	4,50	4,50	25	4,50	81,00	252,79	15,90
Suelos (n = 37)										
K ₂ O (%)	2,21	0,38	2,03	2,33	Múltiple	16	0,28	3,45	0,56	0,75
CaO (%)	6,40	1,27	4,65	4,40	Múltiple	28	1,14	29,41	40,42	6,36
Fe ₂ O ₃ (%)	8,11	2,29	6,72	6,86	Múltiple	24	0,72	26,47	29,30	5,41
TiO ₂ (%)	0,76	0,13	0,66	0,78	Múltiple	18	0,04	1,57	0,10	0,32
MnO (%)	0,33	0,06	0,14	0,13	0,07	33	0,02	7,09	1,31	1,15
Cr (mg/kg)	235,62	143,51	111,21	100,00	34,50	24	34,50	1869,00	125279,19	353,95
Co (mg/kg)	96,03	116,80	20,93	15,00	5,50	33	5,50	1151,00	69891,96	264,37
Ni (mg/kg)	96,85	81,78	37,45	50,00	5,50	31	5,50	1528,00	62180,83	249,36
Cu (mg/kg)	1553,94	1110,45	25,57	20,73	4,81	36	4,81	54954,17	81430774,94	9023,90
V (mg/kg)	74,95	52,08	10,24	1,30	1,30	24	1,30	730,57	19625,63	140,09
Zn (mg/kg)	1606,51	1291,43	641,45	691,50	769,11	34	54,41	22163,20	15588317,58	3948,20
Ba (mg/kg)	3016,59	3182,24	806,21	792,10	334,21	35	59,72	46075,14	88217142,02	9392,40
Rb (mg/kg)	154,46	110,81	79,31	86,67	57,78	35	3,20	1681,79	100738,35	317,39
Sr (mg/kg)	589,38	303,55	371,28	321,00	Múltiple	26	90,00	4426,00	602079,24	775,94
Nb (mg/kg)	62,62	65,41	13,88	16,00	16,00	33	1,00	896,00	37164,63	192,78
Ta (mg/kg)	87,27	96,57	26,13	23,00	16,00	35	3,00	1867,00	96901,26	311,29
Th (mg/kg)	24,20	21,34	10,29	10,00	5,00	36	2,00	497,00	6416,38	80,10
Zr (mg/kg)	432,34	342,50	184,24	187,79	Múltiple	33	2,95	5601,44	1053860,29	1026,58
Pb (mg/kg)	42,88	36,88	17,50	18,66	27,98	36	1,60	893,16	20736,65	144,00
Sb (mg/kg)	218,65	299,77	14,59	11,00	4,50	35	4,50	3932,00	737383,18	858,71

Tabla 2. Resultados analíticos y análisis estadístico de los tres medios de muestreo utilizados en la región de Giraúl. N: número de muestras; Media: media aritmética; Error prom: error promedio; M. Geom: media geométrica; Frec: frecuencia; Min: mínimo; Max: máximo; Dev.Std: desviación estándar.

Table 2. Analytical results and statistical analysis of the three-sampling media used in the Giraúl region. N: number of samples; Median: arithmetic average; Error prom: average error; M. Geom: geometric mean; Frec: frequency; Min: minimum; Max: maximum; Dev.Std: standard deviation.

4.2. Distribución espacial unielemental

A partir de los análisis estadísticos anteriores, se procedió a la cartografía de los elementos para representar geográficamente su comportamiento. De este modo, se proyectaron las clases de los percentiles 0-75%, 75-90%, 90-95%, 95-99% y 99-máximo (Tabla 3), para los elementos que se seleccionaron. En estos mapas se utilizó la cartografía geológica desarrollada en el proyecto PLANAGEO de las cartas de Mirapraia (353B; Fernández Suárez & Iglesias-Martínez *et al.*, 2022b), Naobva (354A; Fernández Suárez & Iglesias-Martínez *et al.*, 2022a) y Namibe (Sul D-33/S y Sul D-32/Z; Escuder-Virquete *et al.*, 2021), junto con los indicios minerales descritos en la bibliografía y encontrados durante PLANAGEO (Araújo *et al.*, 1998, 2001; Martín-Méndez *et al.*, 2022a, b). Si observamos cada uno de los distintos mapas elemento a elemento (figs. 5-9), podemos sugerir los rasgos que controlan la distribución de cada uno de ellos.

El óxido de titanio (Fig. 5B), al igual que el óxido de hierro muestra valores elevados asociados a las rocas ácidas y básicas del CVB. En este caso los valores más elevados se han medido en muestras tomadas en el Grupo Namibe, al igual que en el caso del hierro probablemente derivados de cuerpos máficos presentes en esta unidad.

En el mapa del cromo (Fig. 6A), los valores más elevados encontrados en la región de Giraúl se relacionan con afloramientos de diques máficos y de cuerpos plutónicos máficos paleoproterozoicos de escasa entidad, encajados en el Grupo Namibe. Los valores máximos se localizan en la parte más occidental del campo pegmatítico, influenciados probablemente por los afloramientos de rocas volcánicas cretácicas.

		K ₂ O (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	MnO (%)	Cr (mg/ kg)	Co (mg/ kg)	Ni (mg/ kg)	Cu (mg/ kg)	V (mg/ kg)	Zn (mg/ kg)	Ba (mg/ kg)	Rb (mg/ kg)	Sr (mg/ kg)	Nb (mg/ kg)	Ta (mg/kg)	Th (mg/ kg)	Zr (mg/ kg)	Pb (mg/ kg)	Sb (mg/ kg)
Percentil Rocas (14)	MIN	0,13	0,12	0,24	0,02	0,00	22,00	3,50	7,00	2,96	0,93	21,17	11,26	0,64	27,00	2,00	1,00	1,00	1,15	0,78	0,00
	75	3,75	0,98	4,58	0,32	0,02	38,50	19,50	7,00	2,96	27,37	548,67	157,47	156,36	429,25	46,75	28,75	11,25	108,53	20,79	1,00
	90	4,63	6,18	5,77	0,81	0,10	128,80	27,90	15,40	5,03	201,03	583,54	711,15	417,92	566,30	81,20	45,00	24,35	348,80	26,24	7,10
	95	5,25	16,77	7,32	1,01	0,13	159,80	30,70	34,90	27,76	237,46	957,34	997,27	1934,82	599,20	108,28	87,35	32,58	441,08	34,57	12,55
	99	6,14	30,33	9,12	1,08	0,18	163,96	31,74	62,98	60,20	260,38	1509,55	1113,94	4066,01	626,24	132,46	150,27	40,12	445,77	46,09	19,31
	MAX	6,36	33,72	9,57	1,10	0,19	165,00	32,00	70,00	68,31	266,11	1647,60	1143,10	4598,81	633,00	138,50	166,00	42,00	446,94	48,97	21,00
Percentil Sedimentos (32)	MIN	1,07	1,03	1,27	0,21	0,03	41,00	5,50	5,00	5,55	5,89	48,97	212,21	34,35	74,00	5,00	11,00	1,00	42,24	4,28	6,00
	75	2,75	4,30	5,29	0,68	0,11	41,00	17,50	25,25	5,55	100,84	467,96	906,39	97,66	301,50	15,00	22,50	11,00	191,35	21,86	14,25
	90	3,18	7,09	7,99	0,81	0,14	223,50	30,00	51,60	10,55	141,22	590,60	1204,76	140,79	456,40	36,90	32,50	15,80	290,62	27,66	26,40
	95	3,40	8,05	8,96	0,94	0,18	284,50	41,60	58,25	27,29	293,83	687,19	1445,96	148,06	551,30	41,25	36,90	18,00	409,22	31,04	59,25
	99	3,60	9,29	10,12	1,61	0,50	315,45	61,18	64,45	128,00	511,70	807,29	1830,19	152,48	564,52	57,80	64,91	21,45	464,07	32,70	97,88
	MAX	3,61	9,76	10,21	1,87	0,63	317,00	68,00	66,00	164,36	601,67	832,62	1941,41	152,48	567,00	64,00	77,00	23,00	468,55	33,43	114,00
Percentil Suelos (37)	MIN	0,28	1,14	0,72	0,04	0,02	34,50	5,50	5,50	4,81	1,30	54,41	59,72	3,20	90,00	1,00	3,00	2,00	2,95	1,60	4,50
	75	2,70	6,34	9,27	0,99	0,18	272,00	42,00	73,00	70,33	85,05	973,74	1343,46	117,12	704,00	27,00	33,00	16,00	243,98	27,98	22,00
	90	3,14	13,57	12,85	1,10	0,27	540,20	89,20	111,00	197,91	193,68	1129,79	1715,28	143,51	1114,60	47,80	46,40	19,80	370,50	32,34	44,20
	95	3,29	21,10	21,43	1,19	0,40	801,60	590,40	209,40	431,04	284,85	6550,73	8921,18	358,91	1410,20	219,40	143,40	23,20	1132,91	34,98	805,20
	99	3,40	27,29	25,10	1,45	4,69	1531,68	1144,88	1098,52	35452,92	604,77	18116,67	42750,57	1501,88	3581,08	866,12	1378,12	326,72	4816,22	584,21	3806,00
	MAX	3,45	29,41	26,47	1,57	7,09	1869,00	1151,00	1528,00	54954,17	730,57	22163,20	46075,14	1681,79	4426,00	896,00	1867,00	497,00	5601,44	893,16	3932,00
Percentil Total (83)	75	2,91	5,58	7,56	0,86	0,14	162,00	27,00	55,00	21,84	98,95	698,55	980,02	110,48	458,00	21,50	28,00	13,50	233,45	25,65	17,00
	90	3,31	8,17	9,89	1,07	0,21	309,00	50,40	77,80	110,91	198,74	1001,48	1450,47	151,84	776,00	51,20	43,60	18,00	362,81	30,86	36,40
	99	4,96	30,19	23,36	1,62	1,79	1100,66	1137,06	549,74	10534,66	624,87	12946,10	38502,52	2206,85	2501,46	827,94	753,44	123,90	3812,89	200,93	3645,00
	MAX	6,36	33,72	26,47	1,87	7,09	1869,00	1151,00	1528,00	54954,17	730,57	22163,20	46075,14	4598,81	4426,00	896,00	1867,00	497,00	5601,44	893,16	3932,00

Tabla 3. Percentiles, MIN, 0-75%, 75-90%, 90-95%, 95-99% y 99-MAX de los distintos medios de muestreo, mostrados en las figuras 5 a 9; y percentiles totales MIN-75%, 75-90%, 90-99% y 99-MAX, calculados conjuntamente para todos los medios de muestreo, mostrados en la Figura 10.

Table 3. Percentiles; MIN, 0-75%, 75-90%, 90-95%, 95-99% and 99-MAX of different sampling media, shown in figures 5 to 9; and overall percentiles MIN-75%, 75-90%, 90-99% and 99-MAX, calculated jointly for all sampling media, shown in Figure 10.

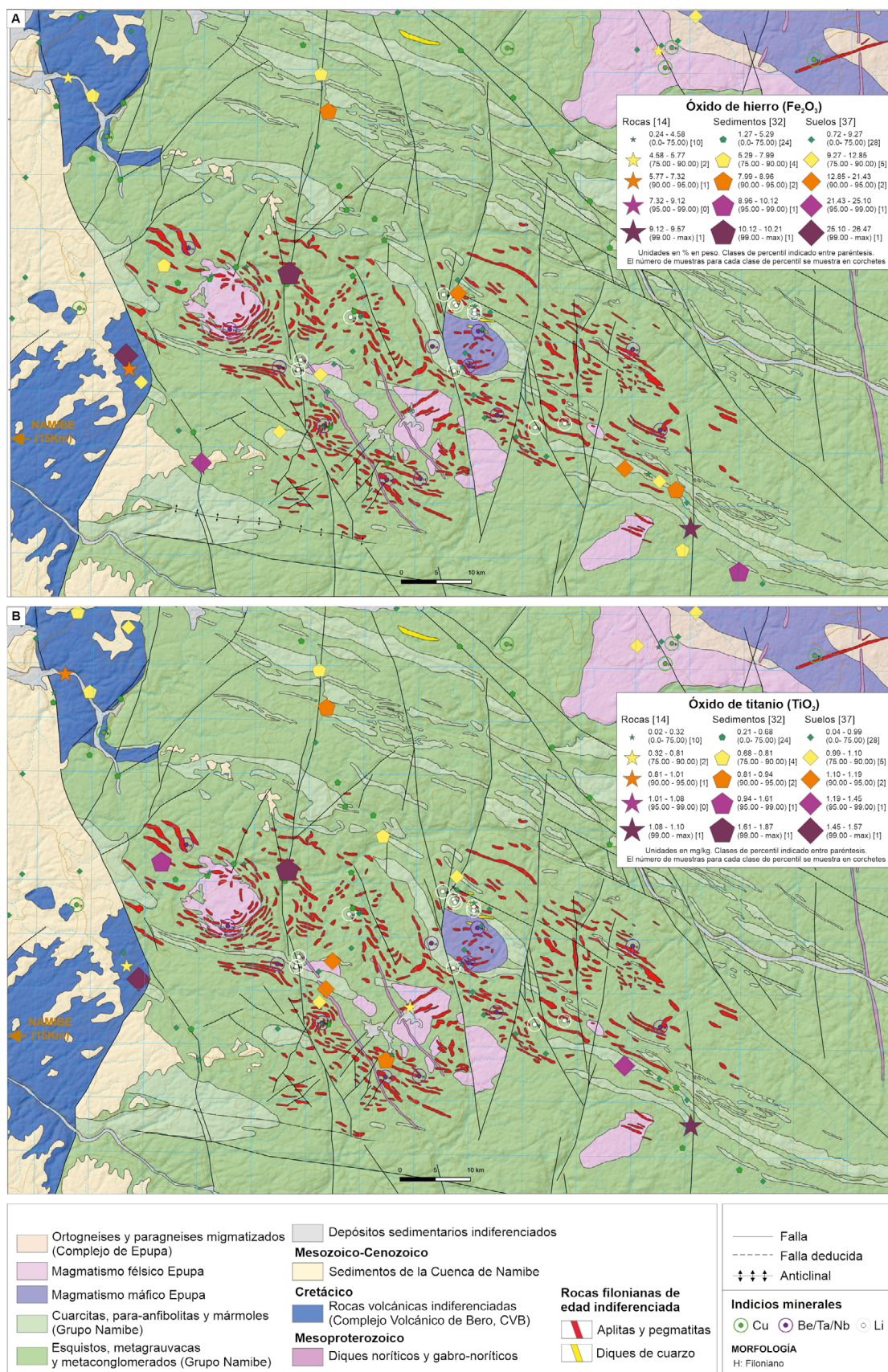


Figura 5. Mapas unielementales de óxido de hierro (A) y óxido de titanio (B), proyectando las concentraciones de cada elemento (en %), clasificadas en función de su percentil.

Figure 5. Single element maps showing the concentrations (in wt %) of iron oxide (A), and titanium oxide (B), ranked according to its percentile class.

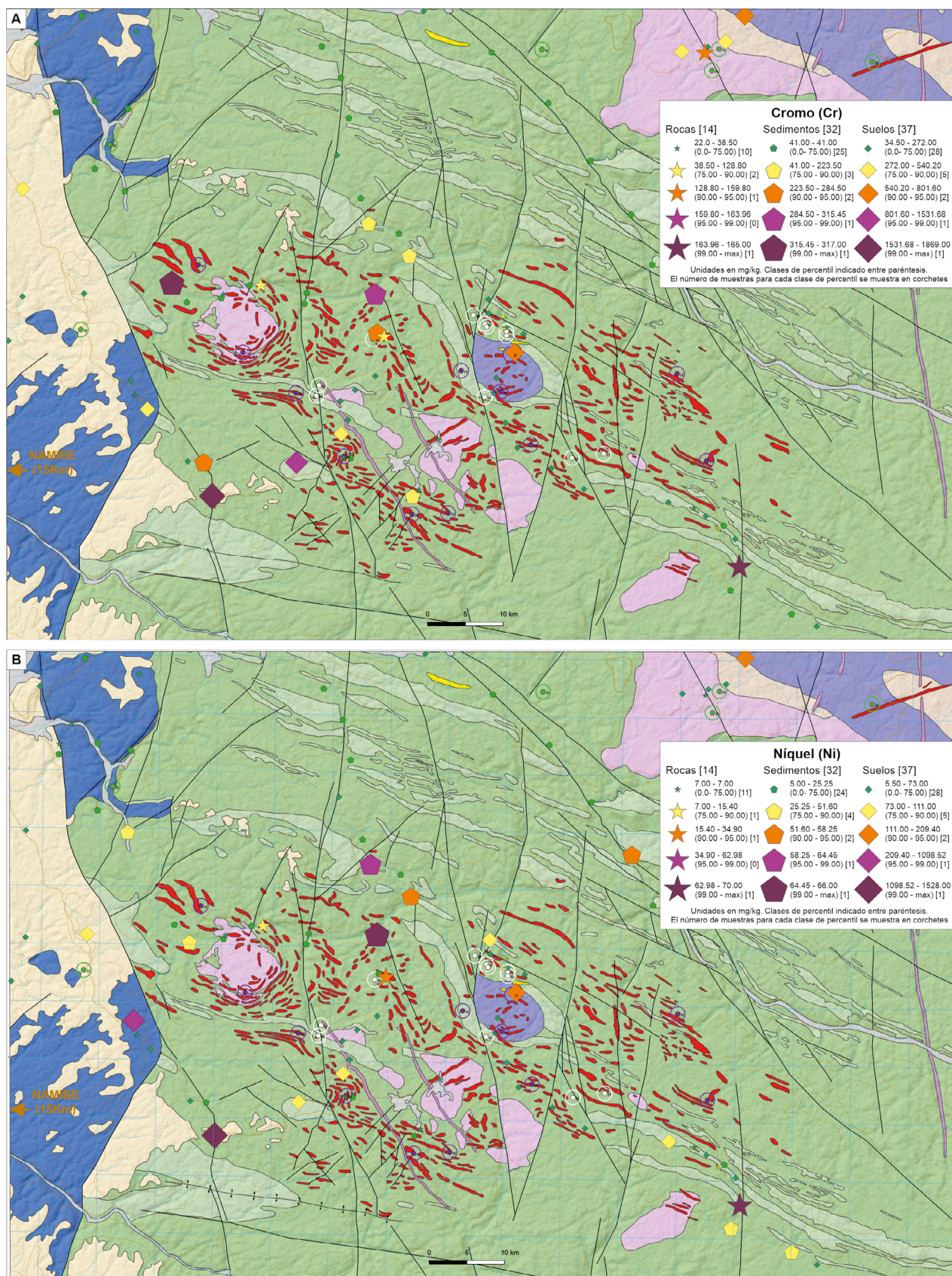


Figura 6. Mapas unielementales de cromo (A) y níquel (B), proyectando las concentraciones de cada elemento (en mg/kg), clasificadas en función de su percentil. La leyenda aparece en la Figura 5.

Figure 6. Single element maps showing the concentrations (in mg/kg) of chromium (A) and nickel (B), ranked according to its percentile class. The legend appears in Figure 5.

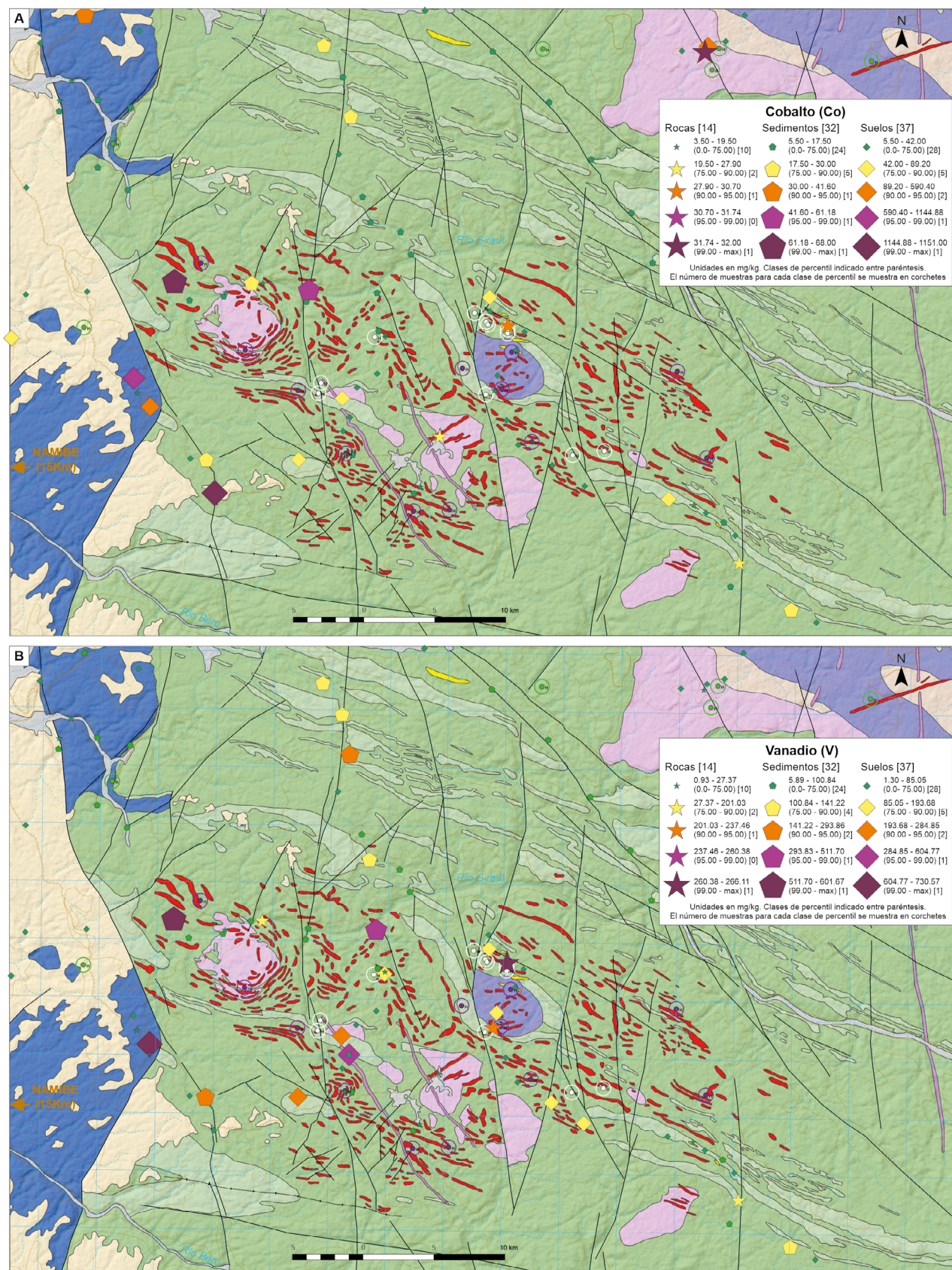


Figura 7. Mapas unielementales de cobalto (A) y vanadio (B), proyectando las concentraciones de cada elemento (en mg/kg), clasificadas en función de su percentil. La leyenda aparece en la Figura 5.

Figure 7. Single element maps showing the concentrations (in mg/kg) of cobalt (A) and vanadium (B), ranked according to its percentile class. The legend appears in Figure 5.

El níquel presenta una distribución similar a la observada en el cromo (Fig. 6B), con valores intermedios y elevados asociados tanto a la presencia de unidades básicas intrusivas en el Grupo Namibe, así como por la posible presencia de unidades anfibolíticas de la secuencia metasedimentaria. Valores elevados de níquel se relacionan también con las rocas volcánicas cretácicas que afloran en la zona oeste, posiblemente debido a la presencia de niveles basálticos del CVB.

En el mapa del cobalto (Fig. 7A), se observa una distribución muy controlada por la presencia de los afloramientos de rocas volcánicas (ácidas a básicas) del CVB. Se observan los valores más elevados en la parte occidental, con máximos en suelos sobre los materiales sedimentarios de la cuenca de Namibe, que se encuentran próximos a los afloramientos del CVB (Fig. 1), y valores intermedios en sedimentos de corriente tomados en los arroyos que drenan estas mismas rocas. En la zona NE, se observan algunos valores puntuales más elevados en muestras de rocas félsicas paleoproterozoicas, sobre los cuáles, además, aparecen indicios de sulfuros de cobre, a los que podrían ir asociados estos valores elevados de cobalto.

El vanadio (Fig. 7B) presenta valores máximos en suelos y sedimentos de corriente relacionados con las rocas metasedimentarias del Grupo Namibe y con las rocas volcánicas cretácicas. En general, los elevados valores de vanadio se asocian a la presencia de apatito y piroxeno en las unidades básicas a intermedias ígneas y metamórficas descritas.

El cobre también presenta una distribución en cierta medida similar a los metales explicados previamente (Fig. 8A). Sin embargo, hay que destacar los valores máximos en suelos relacionados con los indicios filonianos de cobre que se encuentran en la zona NE de estudio, encajados en los intrusivos félsicos y en el Complejo de Eupa-Namibe.

El zinc presenta los valores más elevados en las proximidades del Campo Pegmatítico de Giraúl (Fig. 8B), probablemente debido a la presencia de algunas mineralizaciones con sulfuros en las rocas pegmatíticas y en los materiales encajantes. Además, se observan contenidos elevados de zinc asociados a las rocas volcánicas cretácicas en la región occidental de estudio.

El niobio tiene fondos ligeramente superiores a los elementos anteriormente descritos, en primer lugar, en las rocas pegmatíticas de Giraúl, donde se encuentran valores máximos registradas (Fig. 9A), además de en sedimentos de corriente, con concentraciones, probablemente relacionados con la denudación de las pegmatitas, debido a la presencia de minerales de niobio en estas litologías, como son los minerales del grupo de la columbita (Gonçalves, 2010). Además, se observan valores elevados de niobio asociados a las rocas volcánicas del CVB, en la parte occidental de la zona de trabajo. Estas rocas muestran también en general fondos bastante elevados al tratarse de cuarzo-latitas enriquecidas en niobio (Marsh & Swart, 2018).

El tántalo presenta una asociación muy semejante al Nb (Fig. 9B), con el cual se encuentra normalmente asociado. Los valores más elevados aparecen de igual manera en muestras pegmatíticas, probablemente por la existencia de minerales ricos en Nb-Ta, como los minerales del grupo de la columbita. También se observan valores intermedios de tántalo asociados a las rocas volcánicas cretácicas enriquecidas en niobio (Fig. 9B).

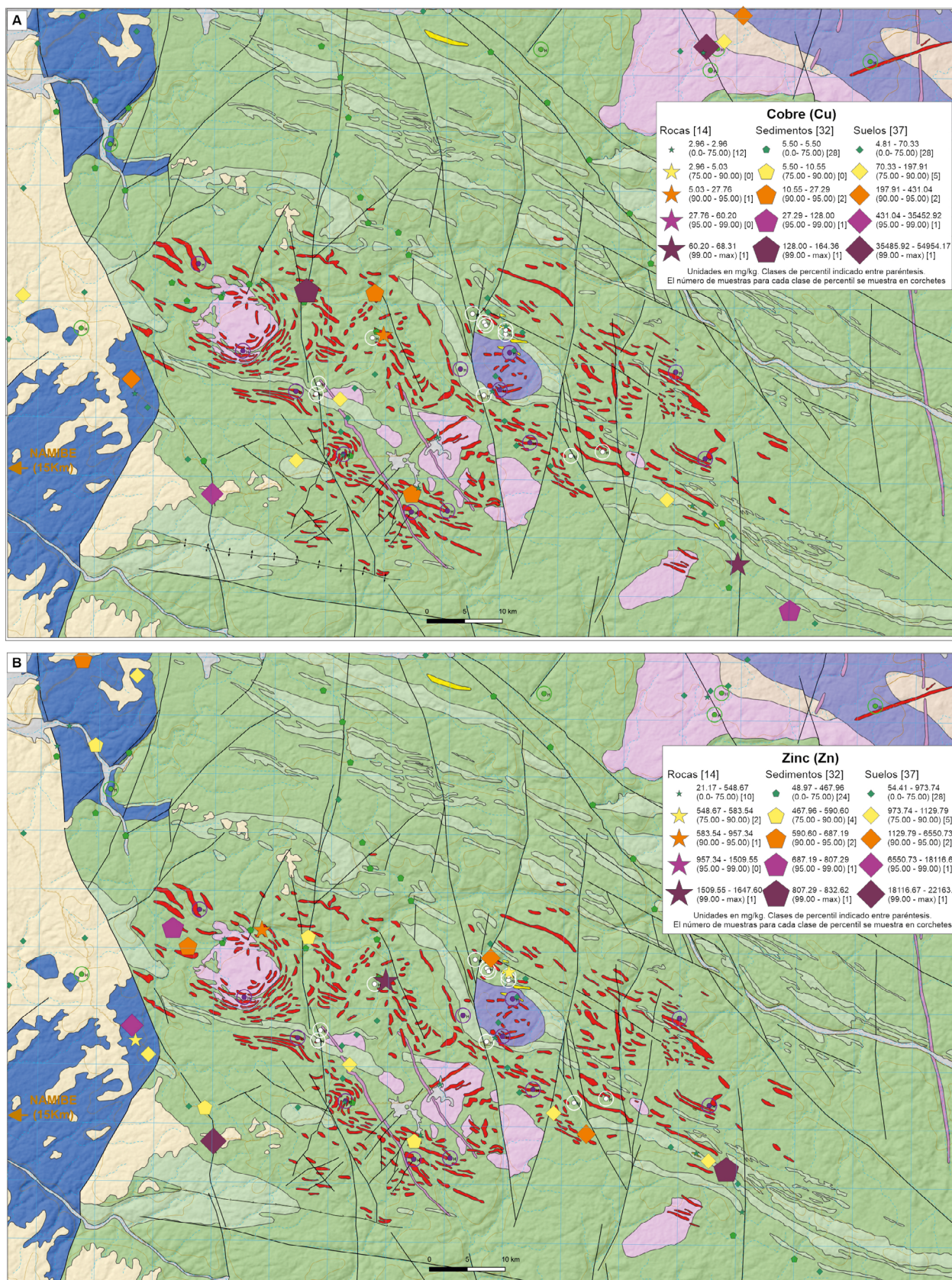


Figura 8. Mapas unielementales de cobre (A) y zinc (B), proyectando las concentraciones de cada elemento (en mg/kg), clasificadas en función de su percentil. La leyenda aparece en la Figura 5.

Figure 8. Single element maps showing the concentrations (in mg/kg) of copper (A) and zinc (B), ranked according to its percentile class. The legend appears in Figure 5.

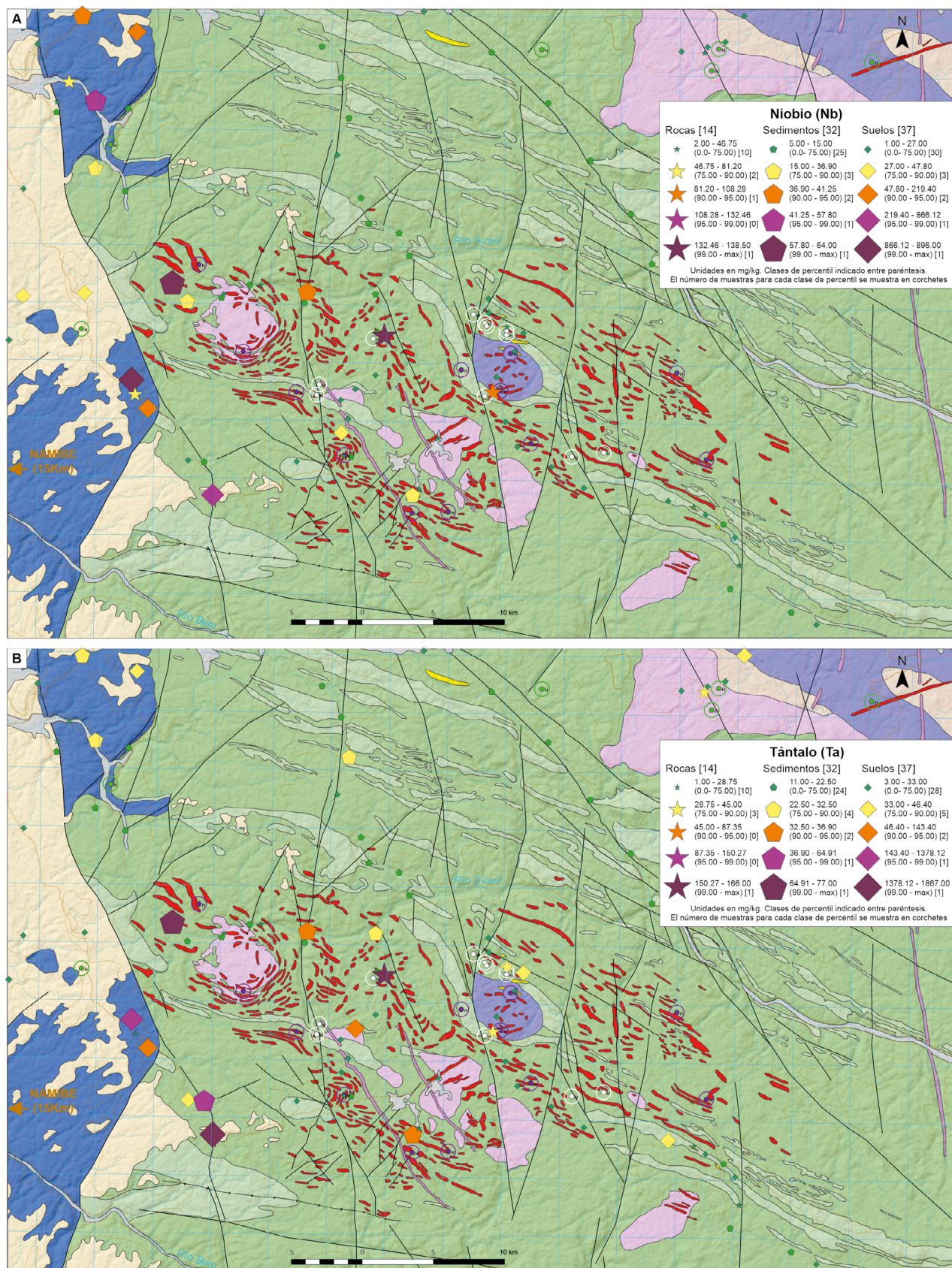


Figura 9. Mapas unielementales de niobio (A) y tántalo (B), proyectando las concentraciones de cada elemento (en mg/kg), clasificadas en función de su percentil. La leyenda aparece en la Figura 5.

Figure 9. Single element maps showing the concentrations (in mg/kg) of niobium (A) and tantalum (B), ranked according to its percentile class. The legend appears in Figure 5.

4.3. Correlación geológico-geoquímica y áreas potenciales de exploración

4.3.1. Interpretación de la cartografía de prospección geoquímica

Con el fin de interpretar los resultados extraídos de la información geoquímica y sugerir la naturaleza de las mineralizaciones y/o posibles agrupaciones elementales, se ha adoptado un criterio de superposición de las concentraciones anómalas de los diferentes elementos de estudio, en correlación con las características geológicas de los materiales encontrados en la región. A su vez, con el objetivo de establecer relaciones de afinidad geoquímica con los materiales de la zona de estudio y definir zonas de potencial interés, se ha ampliado el rango elemental de los elementos de interés (K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 , Rb , Sr , Ba , Cr , Co , Ni , Cu , V , Zn , Pb , Sb , Nb , Ta , Th y Zr). Para ello, los percentiles más representativos (percentil >75%, percentil >90% y percentil >99%; Fig. 9) de estos elementos han sido proyectados conjuntamente, calculados a partir del volumen total de datos (rocas, suelos y sedimentos), independientemente del medio de muestreo. Los valores superiores al percentil 75%, por tanto, son considerados como valores anómalos que definen asociaciones geoquímicas en función del medio geológico al que se asocian.

Las unidades anfibolíticas del Grupo Namibe presentan valores de interés en relación a metales base, de Cr , Ni , Cu , Fe_2O_3 y de TiO_2 (Fig. 10). Los suelos analizados en la región cubierta por el Grupo Namibe, así como en la región cubierta por los sedimentos cretácicos de la cuenca del Namibe, de color claro, crema, gris a amarillento, tienden a mostrar contenidos más bajos de Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO , Co , Ni , Pb , Zn y V , y ligeramente mayores en K_2O .

Las rocas graníticas paleoproterozoicas presentan contenidos medios de K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO , Pb y V . Destacan los elevados contenidos de Cu y Co registrados en las muestras de roca y de suelo asociados a las rocas graníticas y zonas mineralizadas asociadas de la región NE de estudio. Los suelos analizados en los escasos afloramientos de rocas básicas paleoproterozoicas muestran, en general, valores bajos en la mayoría de los elementos, destacando los contenidos más elevados de Cr , Ni , Cu y Fe_2O_3 .

Las pegmatitas de Giraúl y sus productos de denudación muestran concentraciones medias a altas de K_2O , Rb , Ta , Sr , Nb y Zn , con valores puntuales destacables de Fe_2O_3 , MnO y Pb . Los elevados contenidos de Ta con respecto a Nb en esta región confirman su asociación con pegmatitas de tipo LCT (Černý & Ercit, 2005; Gonçalves *et al.*, 2019). En la región circundante al Campo Pegmatítico el Giraúl, los suelos analizados también suelen presentar contenidos notables de V (Fig. 7B), Nb (Fig. 9A), y, en menor medida, Ta (Fig. 9B).

No se aprecian contenidos de elementos metálicos destacables en las rocas volcánicas cretácicas analizadas *in situ* mediante FRXp, mostrando contenidos intermedios de K_2O , CaO , TiO_2 , MnO y Pb (Fig. 10). Sin embargo, los suelos asociados a la denudación del CVB, normalmente de tonalidad oscura, muestran altas concentraciones de Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO , Co , Ni , Cu y, en menor medida, V y Sb (Fig. 10).

Finalmente podemos indicar que algunos de los suelos generados a partir de la denudación de las formaciones sedimentarias de la Cuenca de Namibe (Fm. Bambata y Fm. Giraúl), presentan concentraciones considerables de CaO , Fe_2O_3 , MnO , Th , Cu y Nb .

4.3.2. Áreas potenciales de exploración de elementos metálicos

Dada la complejidad ligada a la extensa historia geológica de la región y a los posibles eventos tectonotermales y otros procesos de alteración hidrotermal superpuestos, la integración de toda la información geológica y geoquímica de la región se hace indispensable para la valoración y priorización de zonas con potencial para la exploración de recursos minerales.

La información geoquímica obtenida permite definir preliminarmente zonas de concentraciones anómalas, a veces estrechamente vinculadas a determinadas características geológicas del medio superficial, y correlacionarlas con el contexto geológico en el que se encuentran, para sugerir zonas de prospección minera. Las agrupaciones elementales descritas en el anterior apartado delimitan diferentes áreas de interés metálico que pueden ser sugeridas para la prospección minera. En la región de Giraúl se definen tres agrupaciones elementales de interés metálico (Fig. 10), tal como se describen en las siguientes secciones.

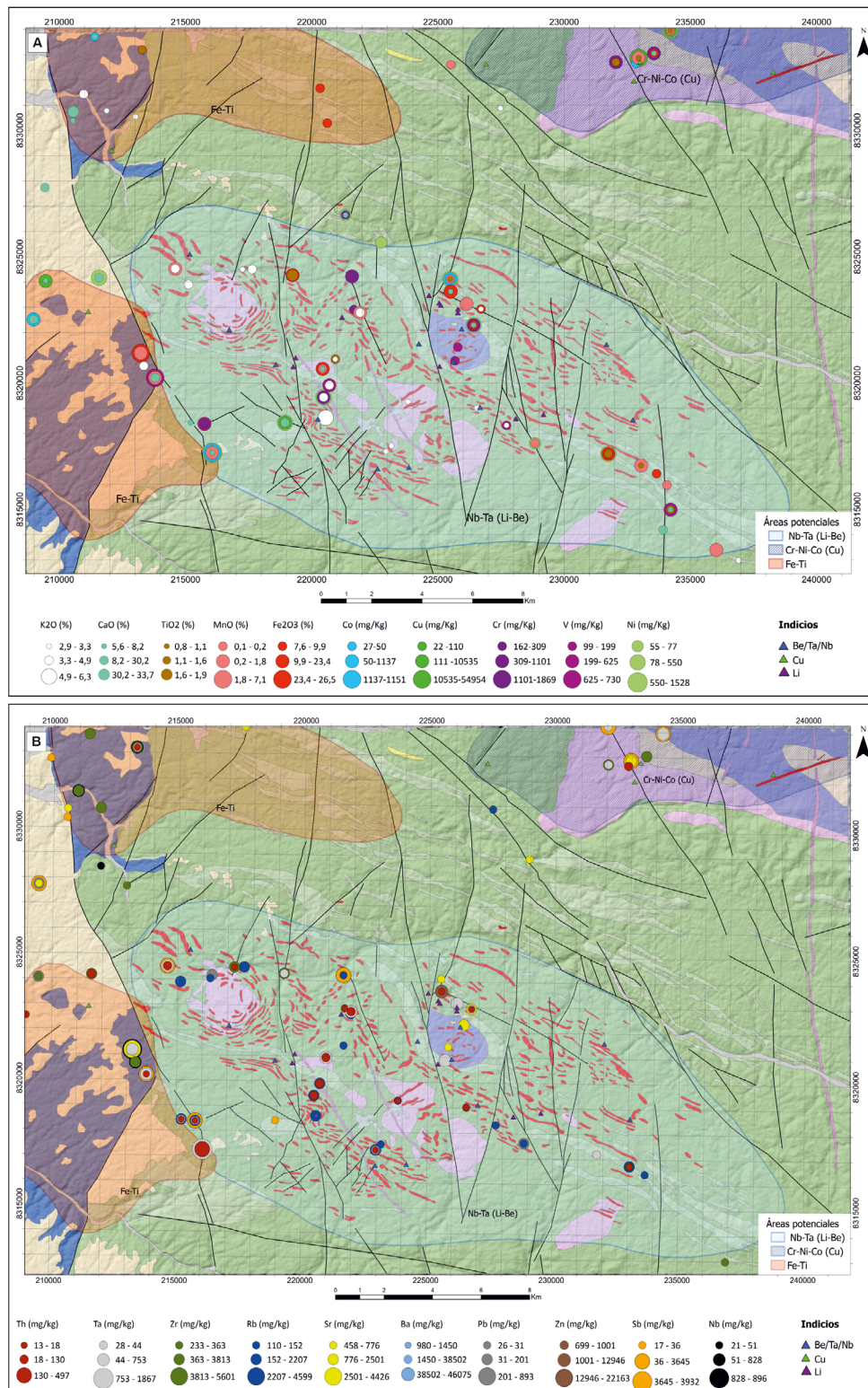


Figura 10. Superposición de las mayores concentraciones (percentil >75%, percentil >90% y percentil >99%) de los diversos elementos químicos seleccionados de interés en la región de Giraúl: A) K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 , en % en peso, y Co , Cr , V , Ni y Cu , en mg/kg ; B) Th , Ta , Zr , Rb , Sr , Ba , Pb , Zn , Sb y Nb , en mg/kg . Las concentraciones anómalas de las distintas asociaciones elementales definen las áreas potenciales de interés propuestas para prospección de elementos metálicos, que consisten en: Nb-Ta (Li-Be), Cr-Ni-Co (Cu) y Fe-Ti.

Figure 10. Overlay of the highest concentrations (>75% percentile, >90% percentile and >99% percentile) of selected chemical elements of interest in the Giraúl region: A) K_2O , CaO , TiO_2 , MnO , and Fe_2O_3 , in wt.%, and Co , Cr , V , Ni and Cu , in mg/kg ; B) Th , Ta , Zr , Rb , Sr , Ba , Pb , Zn , Sb and Nb , in mg/kg . The concentrations of different elemental associations that deviate from the norm indicate potential areas of interest for metallic element prospecting, which include: Nb-Ta (Li-Be), Cr-Ni-Co (Cu), and Fe-Ti.

4.3.2.1. Zonas de enriquecimiento en Metales Base (Cr-Ni-Co)-Cu

Existe una zona de interés que está relacionada con los magmas máficos paleoproterozoicos encontrados al NE de la región de estudio y dentro del Campo Pegmatítico de Giraúl (figs. 6A y 10A). Algunos cuerpos granitos del NE de la región también presentan enriquecimientos muy elevados de Cu, debido a la presencia de mineralizaciones de cobre (figs. 8A y 10A). También se observan enriquecimientos puntuales de Cr en las unidades del Grupo Namibe, probablemente debido a la presencia intercalada de términos anfibolíticos entre la secuencia metasedimentaria (figs. 6A y 10A). Estas zonas presentan generalmente anomalías de Cr, con contenido variable de Ni, y concentraciones notables de Cu, Co y V. También se asocian a contenidos intermedios a altos de Fe-Ti.

4.3.2.2. Zonas de enriquecimiento en Fe-Ti (V).

El área sugerida se relaciona con las unidades volcánicas cretácicas del CVB, que junto con Fe-Ti, presentan notables contenidos de Zn y V (figs. 7B, 8A y 10), y en registran puntualmente elevadas concentraciones de Ni (figs. 6B y 10A). Además, se observan anomalías locales de Co, Cu y Nb en muestras de suelos y sedimentos (figs. 7A, 8A, 9A y 10).

También se encuentran notables concentraciones de Zn, V, Cu, Fe y Ti en los suelos y sedimentos de la región, probablemente derivadas de la alteración y denudación de los metasedimentos, y términos anfibolíticos del Grupo Namibe (figs. 5, 7B, 8 y 10).

4.3.3.3. Zonas de enriquecimiento en Nb-Ta (Li-Be)

Los valores anómalos de Ta y Nb se encuentran claramente en el campo de pegmatitas de Giraúl. Esta región muestra altos contenidos de Ta en mediciones de FRXp en rocas, suelos y sedimentos de arroyos cercanos a los afloramientos de filones pegmatíticos. También existen notables concentraciones de Nb, aunque inferiores a las de Ta (figs. 9, 10). En esta zona se han descrito evidencias de Li-Be ($\pm$ Cs), junto con la abundante presencia de lepidolita y espodumena en algunos términos pegmatíticos (Araújo *et al.*, 1998, 2001; Gonçalves, 2010; Gonçalves *et al.*, 2019; Martín-Méndez *et al.*, 2022a). En mediciones puntuales de suelos en la región del CVB también se han observado notables anomalías de Nb y Ta (figs. 9, 10), probablemente relacionadas con la denudación de las unidades de cuarzo-latitas enriquecidas en Nb (Marsh & Swart, 2018).

5. Conclusiones

El estudio geoquímico *in situ* a partir de equipos FRXp en la región de Giraúl, como resultado de las campañas de exploración geoquímica del Proyecto PLANAGEO, y en el marco del subproyecto de Cartas de Recursos Minerales Metálicos de Angola (CRMMA), ha revelado distintas distribuciones potencialmente anómalas asociadas a diferentes unidades geológicas del SW de Angola.

Los análisis estadísticos univariantes realizados en la región de Giraúl han permitido profundizar en el estudio del comportamiento elemental, permitiendo definir de manera preliminar distintas áreas para prospección y, en los casos con potencial metalogenético, para exploración minera. En la región de estudio, estas áreas han sido delimitadas por tres asociaciones geoquímicas características con concentraciones anómalas:

- Un área, en la zona NE, con interés para la prospección de metales base (Cr-Ni-Co)-Cu, asociada a materiales ígneos máficos paleoproterozoicos y unidades básicas de la secuencia metasedimentaria del Grupo Namibe.
- Dos áreas, en las zonas W y NW, con relativo enriquecimiento en Fe-Ti (V), relacionada con las rocas volcánicas cretácicas de la región costera.
- Un área principal, en la parte central-meridional, enriquecida en Nb-Ta (Li-Be), estrechamente vinculada al Campo Pegmatítico de Giraúl.

Además, se han encontrado otras zonas con concentraciones anómalas de Cu, Zn y Nb-Ta que podrían merecer atención para la investigación de elementos críticos. Aunque las concentraciones

registradas de estos elementos no muestran claramente máximos para la exploración, su asociación con otros elementos metálicos añade interés a su estudio y prospección.

Agradecimientos

Este trabajo es resultado del Plan Geológico Nacional de Angola (PLANAGEO). Este proyecto contó con el apoyo del Gobierno de la República de Angola y fue ejecutado juntamente con el Servicio Geológico de Angola (IGEO), bajo la supervisión del Ministerio angolés de Recursos Minerales, Petróleo y Gas (MIREMPET). Nos gustaría expresar nuestra gratitud por la inestimable ayuda prestada por el personal local, que facilitó las difíciles condiciones durante nuestro trabajo de campo y la toma de muestras geológicas. También apreciamos enormemente la valiosa contribución del personal de la empresa Impulso Industrial Alternativo a este proyecto.

Authorship contribution statement

Iván Martín-Méndez: Writing - Original Draft, Writing - review & editing, Investigation, Conceptualization, Data curation, Methodology, Visualization, Supervision, Project administration, Formal analysis, Validation.

Enrique Merino-Martínez: Writing - Original Draft, Writing - review & editing, Investigation, Conceptualization, Data curation, Methodology, Visualization, Supervision, Project administration, Formal analysis, Validation.

Maria João Batista: Writing - review & editing, Investigation, Conceptualization, Methodology, Supervision, Project administration, Formal analysis, Validation.

Maria del Carmen Feria: Writing - review & editing, Investigation, Visualization, Software

Cátia Prazeres: Investigation, Methodology.

Juan Carlos Gumiel: Visualization, Investigation, Software.

Mario Iglesias-Martínez: Investigation.

Jorge Fernández: Investigation, Project administration.

Dario Chinchilla-Benavides: Investigation.

Miguel Gutiérrez Medina: Investigation.

Jorge Buzzi Marcos: Investigation.

José Manuel: Funding acquisition, Project administration.

Referencias

- Araújo, A.J., Perevalov, O.V., Guimarães, F.R., Kondratiev, A.I., Tselikovski, A.F., Khodriev, V.L., Polskoi, F.R., Agueev, Y.I., Voinovski, A.S., Sunda, P., & Joaquim, A. (1998). Carta de Recursos Minerais de Angola. Instituto Geológico de Angola, Ministério de Geologia e Minas.
- Araújo, A.G., Perevalov, O. V., Guimarães, F., Kondratiev, A.I., Tselikovski, A.F., Khódríev, V.L., Polskoi, F.R., Agueev, Y.I., Voinovski, A.S., Sunda, P., & Joaquim, A. (2001). Catálogo de Recursos Minerais de Angola. Instituto Geológico de Angola, Ministério de Geologia e Minas.
- Černý, P., & Ercit, T.S. (2005). The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, 43, 2205-2026.
- Demetriades, A., Johnson, C.C., Smith, D.B., Ladenberger, A., Adánez Sanjuan, P., Argyraki, A., Stouraiti, C., Caritat, P. de, Knights, K.V., Prieto Rincón, G. & Simubali, G.N. (Editors). (2022). International Union of Geological Sciences Manual of Standard Methods for Establishing the Global Geochemical Reference Network. IUGS Commission on Global Geochemical Baselines, Athens, Hellenic Republic, Special Publication. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7307696>.
- Escuder-Virquete, J., Gumiel, J.C., Merino, E., Da Cruz Correia, J., & Quintana, L. (2021). Carta Geológica de Angola à escala 1:250.000, Folhas Sul D-33/S e Sul D-32/Z, Namibe, e Notícia Explicativa. Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gás, UTE PLANAGEO (IGME-LNEG-Impulso) – Instituto Geológico de Angola (IGEO), Luanda (Angola), 188 p.

- European Commission (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report, 160 p.
- Fernández-Suárez, J., & Iglesias-Martínez, M. (2022a). Carta de Rochas e Minerais Industriais de Angola à escala 1:50.000, 354A-Naobva, e Notícia Explicativa. Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gás, UTE PLANAGEO (IGME-LNEG-IA), Instituto Geológico de Angola (IGEO), Luanda (Angola), 122 p.
- Fernández-Suárez, J., & Iglesias-Martínez, M. (2022b). Carta de Rochas e Minerais Industriais de Angola à escala 1:50.000, 353B-Mirapraia, e Notícia Explicativa. Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gás, UTE PLANAGEO (IGME-LNEG-IA), Instituto Geológico de Angola (IGEO), Luanda (Angola), 103 p.
- Gindre-Chanu, L., Warren, K.J., Puigdefabregas, C., Sharp, I., Peacock, C.P., Swart, R., Poulsen, R., Ferreira, H., & Henrique, L. (2015). Diagenetic evolution of Aptian evaporates in the Namibe basin, South-West Angola. *Sedimentology*, 62(1), 204-233.
- Gonçalves, A.O. (2010) Caracterización mineralógica, geoquímica y petrogenéticas de las pegmatitas graníticas de Giraúl, Namibe Angola. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza, 764 p.
- Gonçalves, A.O., Melgarejo, J.-C., Alfonso, P., Amores, S., Paniagua, A., Buta Neto, A.B., Morais, E.A., & Camprubí, A. (2019). The Distribution of Rare Metals in the LCT Pegmatites from the Giraúl Field, Angola. *Minerals*, 9, 580. <https://doi.org/10.3390/min9100580>
- Jelsma, H.A., McCourt, S., Perritt, S.H., & Armstrong, R.A. (2018). The Geology and Evolution of the Angolan Shield, Congo Craton. In: Siegesmund, S., Basei, M.A.S., Oyhantçabal, P., & Oriolo, S. (Eds.), *Geology of Southwest Gondwana, Regional Geology Reviews*. Springer International Publishing, Cham, pp. 217-239. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68920-3_9
- Lemière, B. (2018). A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 188, 350-363. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.02.006>.
- Linnen, R. L., Van Lichtenvelde, M., & Černý, P. (2012). Granitic Pegmatites as Sources of Strategic Metals. *Elements*, 8(4), 275-280. doi:10.2113/gselements.8.4.275
- London, D. (2016). Rare-element Granitic Pegmatites. In: Verplanck, P.L., Hitzman, M.W. (Eds.), *Rare Earth and Critical Elements in Major Deposit Types, Reviews in Economic Geology*. Society of Economic Geologists, Inc, Littleton, CO, 18, pp. 165-193.
- Marsh, J.S., & Swart, R. (2018). The Bero Volcanic Complex: Extension of the Paraná-Etendeka Igneous Province into SW Angola. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 355, 21-31.
- Martín-Méndez, I., Merino-Martínez, E., Fera, M.C., Buzzi J., & Rey-Moral, M.C. (2022a). Notícia Explicativa da Carta de Recursos Minerais Metálicos. Escala 1:50 000. Cluster (Cr-Ni-EGP)-Cu. Subcluster de Giraúl. Carta 353B. Instituto Geológico y Minero de Angola. Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gas. Luanda (Angola), 176 p
- Martín-Méndez, I., Merino-Martínez, E., Fera, M.C., Buzzi J., & Rey-Moral, M.C. (2022b). Notícia Explicativa da Carta de Recursos Minerais Metálicos. Escala 1:50 000. Cluster (Cr-Ni-EGP)-Cu. Subcluster de Giraúl. Carta 354A. Instituto Geológico y Minero de Angola. Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gas. Luanda (Angola), 177 p.
- Merino-Martínez, E., Rodrigues, J.F., Ferreira, E., Chamizo, M., Potti, J., Labaredas, J., Francés, A., Morais, A. Oliveira, A., & Pereira, E. (2022). Mapa Geológico de Angola à escala 1:1.000.000, e Notícia Explicativa. Zona UTE (Região Sul de Angola). Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gás, UTE PLANAGEO (IGME-LNEG-Impulso) - Instituto Geológico de Angola (IGEO), Luanda (Angola), 105 p.
- Pereira, E., Rodrigues, J.F., Tassinari, C., & Van-Dúnen, M.V. (2013). Geologia da região de Lubango, SW de Angola. Evolução no contexto do cratão do Congo. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, (LNEG), Portugal. Instituto Geológico de Angola, IGEO. 164 p.
- Piercey, S.J., & Devine, M.C. (2014). Analysis of powdered reference materials and known samples with a benchtop, field portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometer: evaluation of performance and potential applications for exploration lithogeochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 14 (2), 139-148. <https://doi.org/10.1144/geochem2013-199>

- Reimann, C., Filzmoser, P., Garrett, R., & Dutter, R. (2008). Statistical data analysis explained: Environmental statistics with R. John Wiley. 337p.
- Renne, P. R., Glen, J. M., Milner, S. C., & Duncan, A. R. (1996). Age of Etendeka flood volcanism and associated intrusions in southwestern Africa. *Geology*, 24(7), 659-662.
- Rodrigues, J. F., Merino Martínez, E., & Ferreira, E. (Coords.) (2021). Mapa Tectónico de Angola à escala 1:1.000.000, e Notícia Explicativa. Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gás, UTE PLANAGEO (IGME-LNEG-Impulso) - Instituto Geológico de Angola (IGEO), Luanda (Angola), 101 p.
- Zhou, S., Wang, J., Wang, W., & Liao, S. (2023). Evaluation of Portable X-ray Fluorescence Analysis and Its Applicability as a Tool in Geochemical Exploration. *Minerals*, 13, 166. <https://doi.org/10.3390/min13020166>