

RESEARCH ARTICLE

Magnetic trace and modeling of the alkaline-carbonatitic magmatism in the Quilengues region, SW Angola

Respuesta aeromagnética y modelización del magmatismo alcalino-carbonatítico de la región de Quilengues, SW de Angola

 Carmen Rey-Moral^{1*},  Tania Mochales²,  Enrique Merino-Martínez³,  José Luis García-Lobón¹,
 Domingos Cordeiro⁴

¹Instituto Geológico y Minero de España. IGME (CSIC). 28760 Tres Cantos, Madrid (España)

²Instituto Geológico y Minero de España. IGME (CSIC). 50059 Zaragoza (España)

³Instituto Geológico y Minero de España. IGME (CSIC). 28003 Madrid (España)

⁴Instituto Geológico de Angola (IGEO), Centralidade do Kilamba, Luanda (Angola)

Corresponding author: c.rey@igme.es (Carmen Rey-Moral)

Key point:

Alkaline-carbonatite magmatism in SW Angola.

3D modelling of the Tchivira massif.

Depth determination of bodies causing magnetic anomalies.

ABSTRACT

In the SW Angola, during the Mesozoic and in a context of intracontinental extension, the rise of plutonic to volcanic bodies of tholeiitic, alkaline, carbonatite and kimberlitic composition took place. The Tchivira and Bonga massifs exhibit the evolutionary sequence between different alkaline and carbonatite pulses that are reflected in the associated magnetic anomalies. Tchivira has the highest composition across the range of high magnetic susceptibility alkaline to ultra-alkaline materials within a complex alkaline to tholeiitic dike swarm extending in a NNE-SSW direction. Bonga is mainly carbonatite with an absence of ferromagnetic materials. The 3D inversion of the Tchivira magnetic field strength data shows the geometry at depth of three plutonic bodies generating the anomalies. The 3D model obtained, without any other previously available information (boreholes, samples etc.), thus contributes to the knowledge of the geometry of the intrusion of carbonatite bodies and alkaline-carbonatite complexes in extensional contexts. Additionally, Bouguer anomaly provides some information about the cortical structure in the area. The carbonatitic bodies are associated with magnetic anomalies of lower intensity (between -50 and +200 nT, in Tchivira and between -150 and -50 nT, in Bonga) than the syenite and gabbro bodies. The possible presence of carbonatite bodies at depths between 400 and 2000 m increases their potential for exploration for Light Rare Earth-bearing minerals, as well as other critical elements of interest.

Keywords: SW Angola; Mesozoic magmatism; Alkaline-Carbonatite magmas; Magnetic anomalies; 3D Modeling.

Article History:

Received: 10/01/2024

Accepted: 05/03/2025

Published: 22/08/2025

Puntos clave:

Magmatismo alcalino-carbonatítico en SW de Angola.

Modelización 3D del macizo de Tchivira.

Profundidad de los cuerpos causantes de las anomalías.

RESUMEN

En el SW de Angola, durante el mesozoico y en un contexto de extensión intracontinental, tuvo lugar el ascenso de cuerpos plutónicos a volcánicos de composición toleítica, alcalina, carbonatítica y kimberlítica. Los macizos de Tchivira y Bonga exhiben la secuencia evolutiva entre distintos pulsos alcalinos y carbonatíticos que tienen su reflejo en las anomalías magnéticas asociadas. Tchivira tiene la mayor composición en todo el rango de materiales ultra-alcalinos de elevada susceptibilidad magnética situado dentro de un complejo de diques alcalinos a toleíticos que se prolonga en dirección NNE-SSW. Bonga es fundamentalmente carbonatítico con ausencia de materiales ferromagnéticos. En base a esta diferenciación se sugiere la modelización del macizo de Tchivira. La inversión 3D de los datos de intensidad del campo magnético de Tchivira muestra la geometría en profundidad de los tres cuerpos plutónicos que generan las anomalías. El modelo 3D obtenido, sin ninguna información previa disponible (sondeos, muestras etc.) contribuye por tanto al conocimiento de la geometría de la intrusión de cuerpos de carbonatitas y complejos alcalino-carbonatíticos en contextos extensionales. Adicionalmente, la anomalía de Bouguer informa sobre la estructura cortical en la zona. Los cuerpos carbonatíticos estarían asociados a anomalías magnéticas de menor

intensidad (entre -50 y +200 nT, en Tchivira y entre -150 y -50 nT, en Bonga) que los cuerpos de sienitas y gabros. La posible presencia de cuerpos carbonatíticos a profundidades entre 400 y 2000 m aumenta su potencial en exploración de minerales portadores de Tierras Raras Ligeras, así como de otros elementos críticos de interés.

Palabras clave: SW de Angola; Magmatismo mesozoico; Magmas alcalino-carbonatíticos; Anomalías magnéticas; Modelización 3D.

Historial del artículo:

Recibido: 10/01/2024

Aceptado: 05/03/2025

Publicado: 22/08/2025

Citation / Cómo citar este artículo: Rey-Moral, C., Mochales, T., Merino-Martínez, E., García-Lobón, J.L., Cordeiro, D. (2025). Magnetic trace and modeling of the alkaline-carbonatitic magmatism in the Quilengues region, SW Angola. *Boletín Geológico y Minero*, 136(1), 004. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin/136.1/004>

1. Introducción y contexto geológico

El Plan Nacional de Geología de Angola (PLANAGEO) ha sido uno de los proyectos de infraestructura africanos más importantes de los últimos años, cuyos principales objetivos fueron: (a) mejorar el conocimiento de los recursos geológicos y minerales de Angola; b) fomentar la diversificación de la economía nacional; y, c) atraer inversión extranjera y promover el desarrollo del país. El proyecto integró estudios regionales geológicos, aerogeofísicos y geoquímicos; y prospección de materias primas y recursos minerales en áreas objetivo. En el marco de los trabajos realizados en el proyecto PLANAGEO se distinguieron algunos dominios geológicos en el suroeste de la República de Angola (Fig. 1), que se caracterizan por presentar unidades litológicas singulares.

Su historia geológica se desarrolla con una tectónica compleja, que abarca desde el Arcaico hasta la actualidad. La zona de estudio se encuadra dentro del dominio centro-oeste que se caracteriza por la presencia de un gran volumen de rocas ígneas y metasedimentarias paleoproterozoicas, variablemente deformadas y asociadas al evento eburneano (2.04-1.93 Ga). Durante el mesozoico, y en un contexto de extensión intracontinental, se produce la intrusión de diversos cuerpos plutónicos a volcánicos de composición toleítica, alcalina, carbonatítica y kimberlítica, a favor de lineamientos tectónicos activos desde el Jurásico Superior (138–130 Ma Cahen *et al.*, 1984; Allsopp & Hargraves, 1985; Alberti *et al.*, 1999; Comin-Chiaramonti *et al.*, 2005, 2007), formando el Arco de Moçamedes (p.ej., Sulima, Bailundo, Longonjo, Coola e Tchivira-Bonga; Alberti *et al.*, 1999). En la zona de estudio, estos materiales están representados por los macizos de Tchivira y Bonga (1 y 2 en mapa geológico, Fig. 1). En el macizo de Tchivira (1, en Fig. 1) se observa la secuencia evolutiva entre los distintos pulsos alcalinos y carbonatíticos, que consiste en una primera intrusión de cuerpos anulares de composición alcalina (sienitas nefelínicas), seguida de intrusiones de magmas con afinidad ultra-alcalina (ijolitas), moderadamente alcalina (sienitas y gabros alcalinos) y una etapa final dominada por la intrusión de rocas carbonatíticas. Por su parte, el macizo de Bonga (2, en Fig. 1) muestra un núcleo carbonatítico rodeado e intruido por un complejo plutono-volcánico (sienitas, fonolitas, traquitas, riolitas y lamprófiros). En ambos casos, se señalan procesos de afección hidrotermal asociada a la expulsión de fluidos tras el emplazamiento de los cuerpos carbonatíticos, que afectan también al basamento circundante (Bambi, 2015). Ambos macizos se encuentran afectados por un sistema de fracturación complejo con direcciones NW-SE a WNW-ESE y NNE-SSW a NE-SW posteriores a la intrusión. Bambi (2015) sugiere un movimiento de componente normal que afectó a los bloques corticales con un desplazamiento vertical estimado de aproximadamente 1 km, que hundió el macizo de Bonga con respecto al de Tchivira, lo que justificaría las diferencias petrográficas (subvolcánicas y plutónicas, respectivamente) encontradas entre ambos macizos.

En el marco del Proyecto PLANAGEO se midieron datos aerogeofísicos de campo magnético total con separación de líneas de vuelo de 1 km, altura nominal de 100 m, y dirección predominante N-S. Atendiendo a las especificaciones de control de calidad de toda la campaña se volaron líneas perpendiculares (dirección E-W) con una separación de 10 km. Se obtuvieron datos de altísima calidad que permiten una óptima interpretación de las anomalías de campo magnético total que están asociadas a los depósitos alcalino-carbonatíticos de la región de Quilengues.

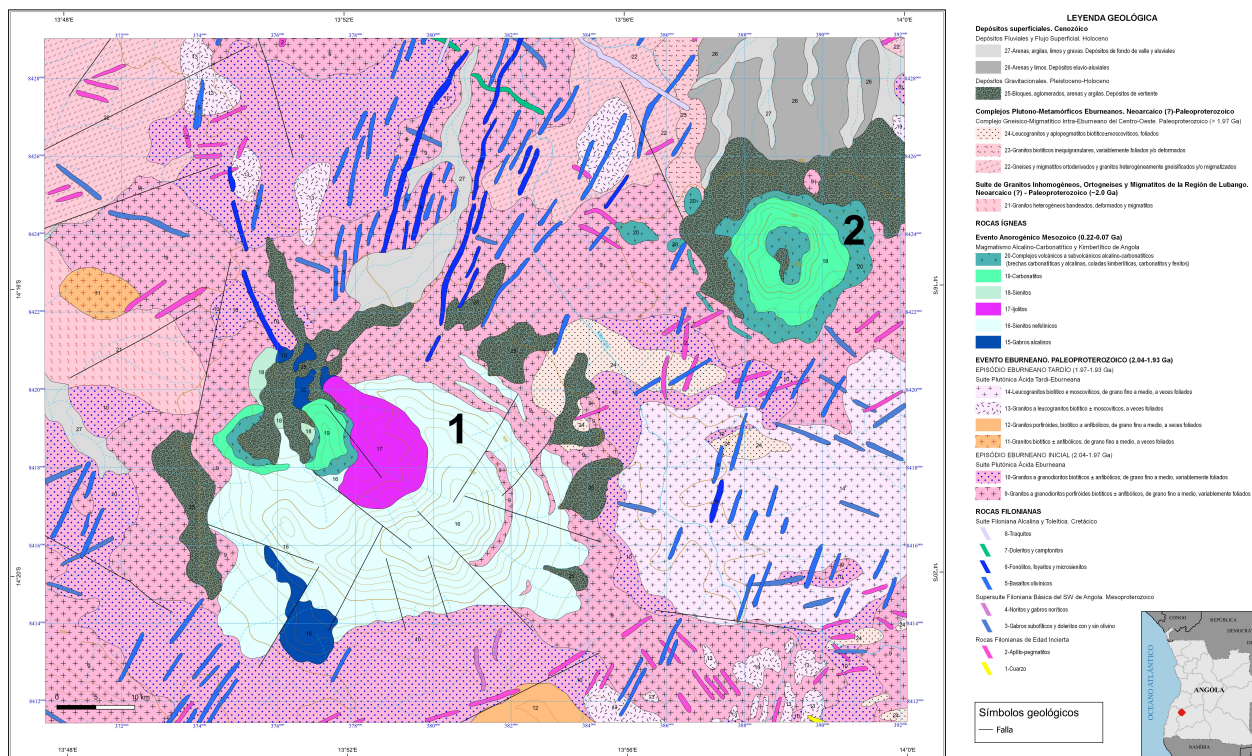


Figura 1. Mapa geológico extraído del mapa Geológico de Lola (n° 316) a escala 1:100.000 (Merino-Martínez, 2022). Se numeran los complejos alcalino-carbonatíticos objeto de este estudio: 1- Tchivira, 2- Bonga, con litologías asociadas al magmatismo alcalino-carbonatítico y kimberlítico de Angola (15- Gabros alcalinos, 16- Sienitas nefelíticas, 17- Ijolitas, 18- Sienitas, 19- Carbonatitas y 20- Complejos volcánicos a sub-volcánicos alcalino-carbonatíticos, brechas carbonatíticas y alcalinas, coladas kimberlíticas, carbonatitas y fenitas).

Figure 1. Geological map extracted from Lola geological map (n° 316) 1:100.000 scale (Merino-Martínez, 2022) with the numbered alkaline-carbonatitic complexes: 1- Tchivira, 2- Bonga. The involving lithologies are 15- Alkaline gabbros, 16- Nepheline syenites, 17- Ijolites, 18- Syenites, 19- Carbonatites and 20- Volcanic to sub-volcanic alkaline-carbonatitic complex, carbonatitic and alkaline breccias, kimberlite lavas, carbonatites and phenites.

La modelización geofísica de datos aeromagnéticos, en contextos geológicos caracterizados por rocas ígneas, proporciona información extremadamente útil sobre la geometría y profundidad de los cuerpos fuente que producen las anomalías. De esta manera, las anomalías magnéticas más significativas registradas en el estudio de Quilengues, y aquellas que pueden estar asociadas a recursos minerales con algún interés para la exploración, se utilizan para inferir las características más llamativas de las estructuras que las originan. El objetivo principal es producir interpretaciones tridimensionales lo más cercanas posible a la realidad, teniendo como principal restricción el conocimiento geológico de la región.

2. Datos geofísicos: anomalía de Bouguer, intensidad de campo magnético corregido IGRF y reducido al polo. Mapas derivados.

2.1. Anomalía de Bouguer

El análisis de la estructura cortical de la zona será de gran utilidad a la hora de investigar la intrusión de los magmas de afinidad alcalino-carbonatítica. Para ello utilizamos los mapas de anomalía de Bouguer y campo magnético reducido al polo correspondientes al área del mapa de Lola (Merino-Martínez, 2022) que engloban a los complejos de Tchivira y Bonga (Fig. 2). El mapa de anomalías de Bouguer regional (Bonvalot *et al.*, 2012), procede del modelo EGM2008 (en coordenadas geográficas y con un paso de malla de 2.5' x 2.5') e incluye mediciones de tierra, mar y aeroportadas. La altimetría

procede de datos satelitales. Al tratarse de datos regionales, el paso de malla, en coordenadas proyectadas (UTM, datum WGS 84, Zona 33S), es de 5000 m. Los datos se han interpolado usando el método de mínima curvatura con un filtro *low-pass desampling* de 3, que actúa como suavizado.

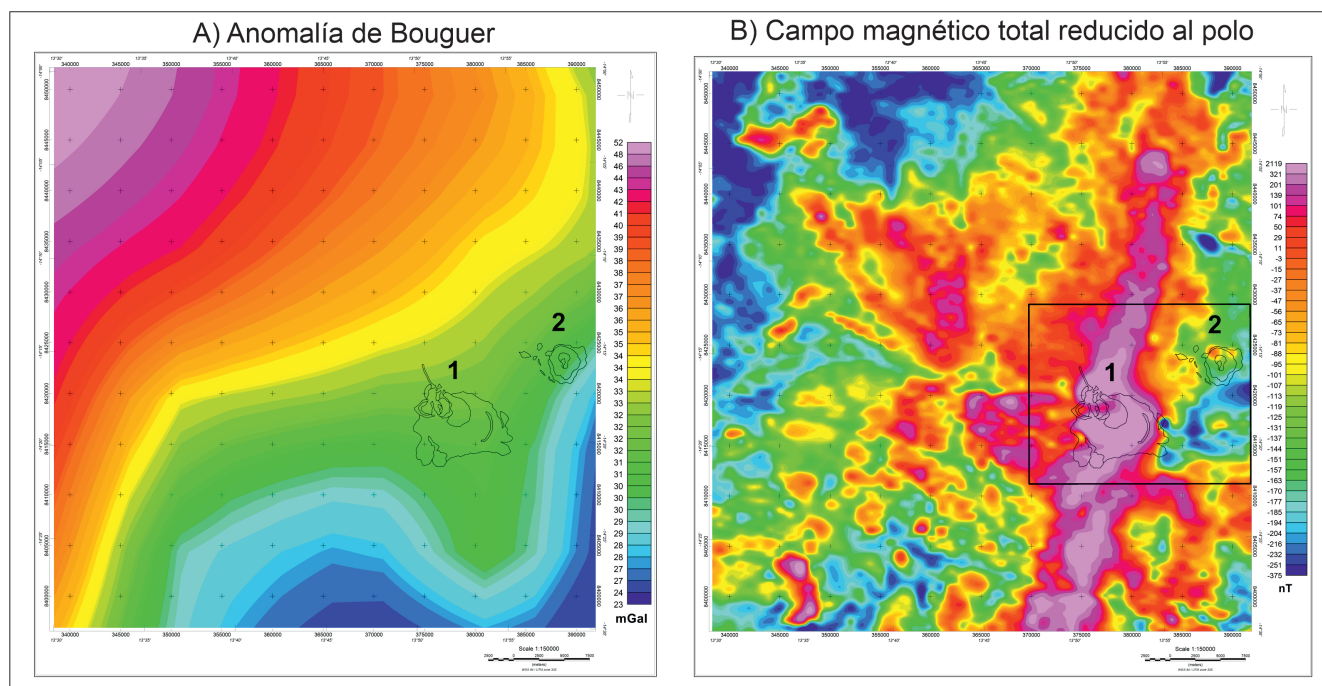


Figura 2. A) Anomalía de Bouguer del área correspondiente al mapa de Lola (Merino-Martínez, 2022) con los máximos gravimétricos al NW y los mínimos gravimétricos en el SE, B) Campo magnético reducido al polo del mapa de Lola con los máximos magnéticos situados al este según una banda de dirección NE-SW. Se marca la situación de los macizos 1- Tchivira y 2- Bonga. Recuadrada la zona de detalle que aparece en la figura 3.

Figure 2. A) Bouguer anomaly of the Lola geological map (Merino-Martínez, 2022), with maximum values in the NW, and minimum Bouguer values to the SE. B) Total magnetic intensity of Lola map with maximum values linked to a NE-SW band. The complexes are marked: 1- Tchivira and 2- Bonga. The area depicted in figure 3 is squared.

La anomalía de Bouguer (Fig. 2A) varía entre valores relativos máximos en el noroeste (+ 52 mGal) hasta los valores mínimos en el sureste de la zona (+23 mGal), cuya variación es el reflejo de la flexión cortical en esa zona, y coherente con el movimiento de bloques corticales señalado por Bambi (2015). Entre los macizos de Tchivira y Bonga se observa un gradiente de dirección NNE-SSW en los valores de anomalía de Bouguer coherente con el hundimiento del macizo de Bonga y corroborado con los datos de Laske *et al.* (2013) que sitúa el límite inferior de la corteza superior en 11,02 km en el límite noroeste y en 11,8 km en el límite sureste, confirmando el aumento de espesor cortical en 0,6 km hacia el sureste.

2.2. Intensidad de campo magnético corregido IGRF y reducido al polo.

El campo magnético reducido al polo (Fig. 2B) (Intensidad total: 31.112,9 nT; Declinación $-5,8175^\circ$; Inclinação $-54,8146^\circ$) presenta una amplitud en las anomalías de ~2500 nT, desde las situadas en la esquina noroeste (-375 nT) hasta +2119 nT en una banda N-S al este de la zona, asociada a la gran abundancia de diques de basaltos olivínicos de dirección NE-SW, del evento anorogénico mesozoico.

Fuera de la banda magnética N-S, otras señales magnéticas de alta intensidad > 50 nT y longitudes de onda entre 2 y 5 kilómetros corresponden con la suite plutónica básica eburneana (Fig. 2B), compuesta por gabros, dioritas, cuarzo-dioritas y en menor medida hornblenditas, dunitas y peridotitas (de naturaleza ultrabásica). Un estudio gravimétrico de detalle de algunos de estos cuerpos básicos (1-Quilengues, 2-Cacimbas y 3-Lola) indica la extensión en profundidad de las unidades ultrabásicas alcanzando los 3 km (Rey-Moral *et al.*, 2023).

El fondo magnético del mapa magnético total reducido al polo, con intensidades de -375 nT (colores azulados) hasta 0 nT (color rojo), corresponde al zócalo Neoarcaico a Paleoproterozoico (evento eburneano de 2,04-1,93 Ga), que está constituido por diversas suites plutónicas, de básicas, a intermedias y ácidas. Entre ellas, las suites intermedias y ácidas (granitos a granodioritas, leucogranitos y granitos porfídicos) son las que están asociadas a estas anomalías de fondo.

Dentro de la banda altamente magnética (> 100 nT), se sitúa el magmatismo alcalino-carbonatítico y kimberlítico de edad cretácica, que forma parte de la suite coetánea con la apertura del Atlántico Sur (p.ej., Alberti *et al.*, 1999). Se trata de estructuras lineares máficas y alcalinas (basaltos, fonolitas, basanitas y teschenitas) altamente ferromagnéticas, dispuestas en dirección predominante NNE-SSW que parcialmente enmascaran las anomalías magnéticas del macizo de Tchivira. Las estructuras anulares de Tchivira corresponden con afloramientos de las carbonatitas, sienitas nefelínicas e ijolitas (delineados en negro en la Figura 2B). Un mapa de detalle de los dos complejos, se puede ver en la Figura 3 donde las zonas más anómalas se sitúan en el macizo de Tchivira (1 en Fig. 3) con anomalías entre +200 y +2119 nT, incluidas en la banda magnética NNE-SSW que se prolonga al norte y sur del complejo. Dentro del macizo de Tchivira se puede diferenciar una anomalía circular con longitud de onda de ~ 3 km localizada sobre el afloramiento de gabros (Gb) situado al norte, incluyendo a las sienitas (Si). El conjunto de sienitas nefelínicas (Si_{nf}), ijolitas (Ij) y gabros (Gb) situados en el centro y sur del macizo presentan anomalías > 200 nT, siendo difícil asociarlas a los cuerpos cartografiados, pues todas se sitúan dentro de la banda magnética. La modelización 3D de estas anomalías ayudará a diferenciar mejor el origen de estas anomalías. Los afloramientos anulares de carbonatitas (Cr) del macizo de Tchivira y los complejos volcánicos a subvolcánicos alcalino-carbonatíticos –Cm– (brechas carbonatíticas y alcalinas) asociados presentan anomalías magnéticas de menor intensidad ($\sim +100$ y $+150$ nT). Por el contrario, el macizo de Bonga (2 en Fig. 3) está formado únicamente por complejos volcánicos a subvolcánicos alcalino-carbonatíticos (Cm) y un anillo central de carbonatitas (Cr), asociados a valores negativos de anomalía magnética, entre -50 y -150 nT.

De la observación de las anomalías en los macizos de Tchivira y Bonga se puede deducir que las unidades gabroicas, que afloran individualmente en el macizo de Tchivira, junto con el complejo de diques de basaltos olivínicos y diques alcalinos (mapa geológico, Fig. 1) son las principales causantes de las anomalías magnéticas, mientras que las carbonatitas y los complejos volcánicos a subvolcánicos alcalino-carbonatíticos asociados presentan una señal magnética mucho más atenuada.

2.3. Mapas derivados

Los mapas de derivadas, tanto horizontal como vertical, se utilizan para detectar límites litológicos, fallas y otras discontinuidades, relacionados con un contraste de propiedades magnéticas, que no siempre se ven en la cartografía geológica o magnética. En el caso de los macizos de Tchivira y Bonga, hemos representado las derivas horizontales en los tres ejes espaciales, X, Y y Z, además de la derivada total del campo magnético que incluye las tres anteriores (Fig. 4). La derivada horizontal según la dirección X (Fig. 4A) refleja zonas de alta intensidad magnética en el límite oeste del macizo de Tchivira, coincidiendo con los afloramientos gabroicos y la unidad central sienítica-nefelínica (Si_{nf}). Asimismo, estas unidades evidencian máximos valores magnéticos cuando observamos la derivada horizontal según los ejes Y y Z (figs. 4B y 4C), en este caso con las anomalías más centradas en los afloramientos cartografiados. La derivada total (Fig. 4D) muestra una serie de anomalías con pequeña longitud de onda (200-300 m) según direcciones N-S y E-W a lo largo de toda la zona, mientras que en los macizos de Tchivira y Bonga predominan las direcciones N-S. En el límite oeste de Tchivira las máximas anomalías no se sitúan sobre las unidades gabroicas, sino que aparecen ligeramente desplazadas hacia el oeste, posiblemente debido a la importante componente horizontal (ver Fig. 4B), originada por la prolongación de los cuerpos gabroicos en profundidad, preferentemente en las zonas noroeste y suroeste del macizo. Es posible que algunas derivadas de menor intensidad encontradas en la parte oriental del macizo de Tchivira sean consecuencia de la presencia de materiales del basamento granítico eburneano, aflorantes o encontrados entre los distintos pulsos

anulares sieníticos. La orientación de las principales derivadas N-S probablemente se relacione con la orientación estructural extensiva Mesozoica que origina los macizos de Tchivira y Bonga. Más difícil es la justificación de las anomalías en el macizo de Bonga, pues los máximos aparecen asociados a las carbonatitas (Cr), que en el caso de Tchivira no son magnéticas. Sin embargo, cuerpos menores de afinidad kimberlítica son encontrados en el flanco noroeste del macizo (Bambi, 2015; Merino-Martínez, 2022). En este caso las anomalías magnéticas podrían estar asociadas a los miembros kimberlíticos asociados con este magmatismo carbonatítico, aunque no se descarta la presencia de diques básicos de la zona, ocultos por los productos de denudación del macizo de Bonga o bien encontrados bajo la superficie.

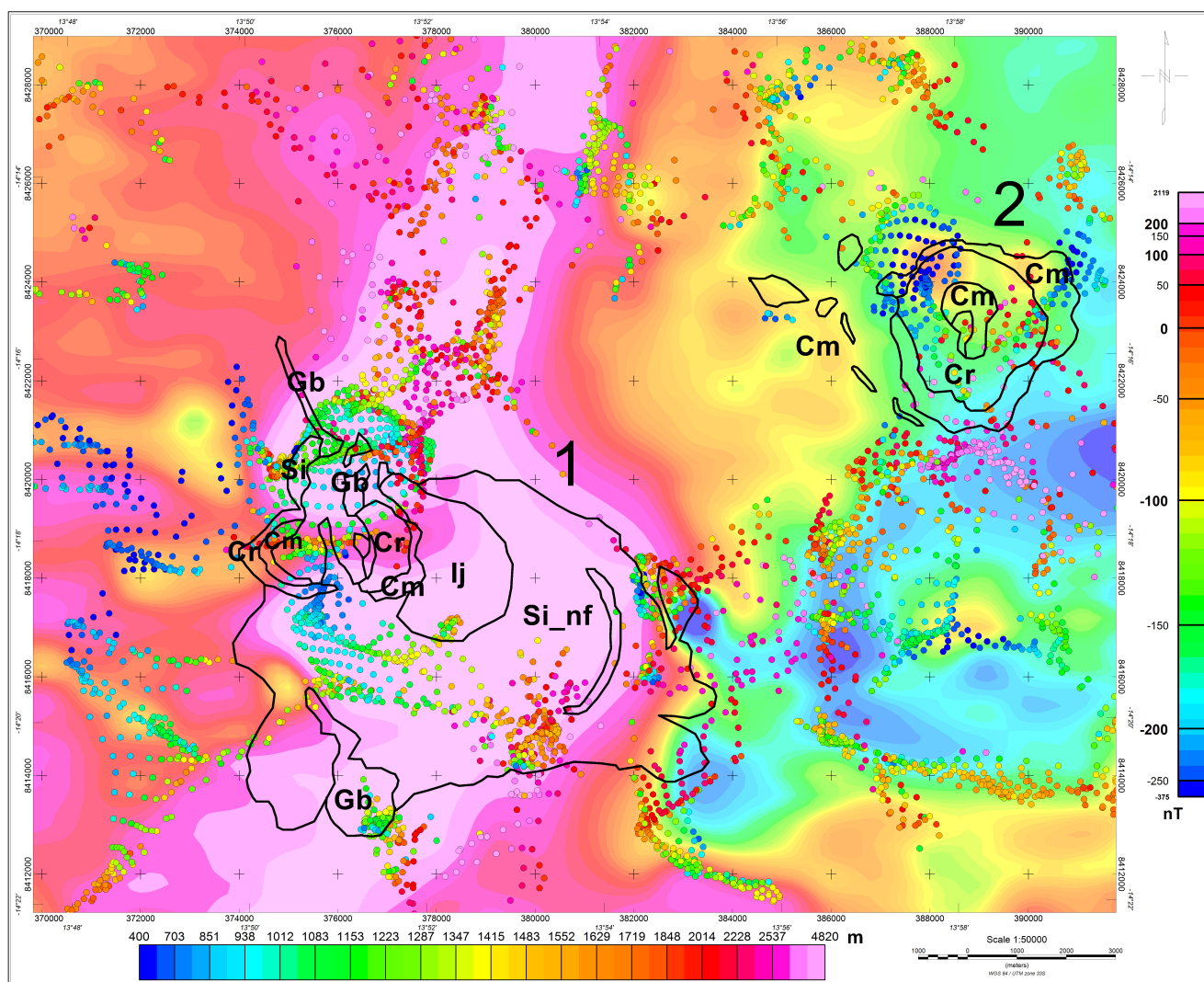


Figura 3. Campo magnético reducido al polo centrado en el entorno de los complejos estudiados. Se observa la diferencia de señal magnética entre Tchivira (1) con importante anomalía magnética y Bonga (2) con valores medios-bajos de anomalía. Las litologías involucradas son: Gb, gabros; Si, sienitas; Ij, ijolitas; Si_nf, sienitas nefelínicas y Cm: brechas carbonatíticas y alcalinas, coladas kimberlíticas, carbonatitas y fenitas. Se superponen las soluciones de Euler, con profundidad en el macizo de Tchivira de entre 1000 y 1300 m asociadas a los cuerpos gabroicos y de 2000 m hacia los extremos. Profundidades más someras en el macizo de Bonga, ~ 400-500 m.

Figure 3. Total magnetic intensity in a detailed area around the complexes. Note the remarkable magnetic anomaly of Tchivira (1) in contrast to the moderate signal in Bonga (2). The involved lithologies are Gb: gabbros; Si: syenites; Ij: ijolites; Si_nf: nepheline syenites and Cm: volcanic to sub-volcanic alkaline-carbonatitic complex, carbonatitic and alkaline breccias, kimberlites, carbonatites and phenites. Overprinted the Euler solutions with depth of 1000-1300 m linked to the outcropping gabbros, in Tchivira. Shallower solutions in Bonga, ~ 400-500 m.

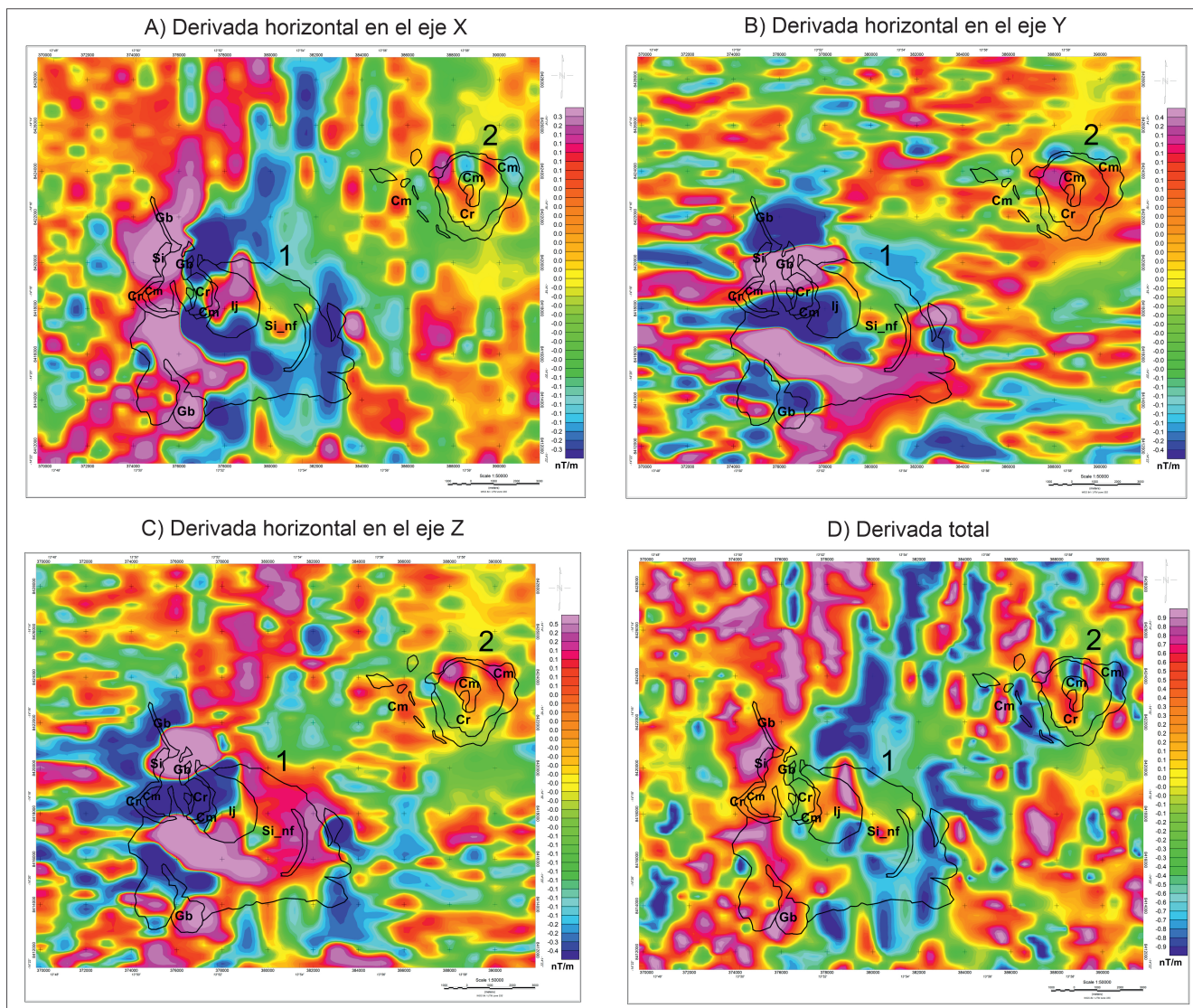


Figura 4. Derivada horizontal según los ejes X (A), Y (B), Z (C) y derivada total del campo magnético total (D), donde se observan direcciones predominantes N-S y E-W de las anomalías.

Figure 4. X-axis horizontal derivative (A), Y-axis horizontal derivative (B), Z-axis horizontal derivative (C) and total magnetic intensity derivative (D) depicting N-S and E-W trends.

3. Profundidad de fuentes magnéticas. Soluciones de Euler

La deconvolución de Euler 3D (Thompson, 1982) está basada en la relación de homogeneidad de Euler que no requiere de hipótesis geológicas “a priori”, por lo que resulta un método rápido e imparcial para estimar la profundidad de las fuentes que generan las anomalías. Para los cálculos hemos utilizado el software Oasis Montaj[®] de Seequent. El grado de homogeneidad puede ser interpretado como el Índice Estructural (SI, en inglés), que representa la variación del campo según la distancia. El índice estructural puede variar entre 0 y 3 (Reid *et al.*, 1990, 2014). En este trabajo hemos seleccionado las soluciones para el índice 1 que en general se asocia con zonas de contacto y diques (p. ej. Reid *et al.*, 2014) en consonancia con las estructuras que estamos estudiando. Adicionalmente obtuvimos soluciones con índice 0 (para cuerpos laminados) y 3 (para cuerpos esféricos) sin resultados satisfactorios, por elevada dispersión de datos o falta de información en los complejos estudiados.

Las soluciones de Euler proporcionan un rango de profundidades entre 400 m y 4820 m (Fig. 3), con las soluciones concentradas en los macizos de Tchivira y Bonga y en el mínimo magnético asociado a los leucogranitos biotítico-moscovíticos tardi-eburneanos, al sur de Bonga. En el macizo de Tchivira las profundidades entre 1000 y 1300 m se localizan en el centro de las anomalías relacionadas

con los cuerpos gabroicos (Gb) cartografiados. En la parte central de las sienitas nefelínicas (Si_nf) el rango de profundidades oscila entre 1000 y 1700 m, pudiendo estar los valores con más profundidad asociados también a cuerpos gabroicos. El afloramiento de ijolitas no aparece ligado a ninguna solución de Euler, lo que podría ser debido a la escasa profundidad de este cuerpo. Por su parte, las carbonatitas, que presentan afloramientos más reducidos, se asocian a valores mayores de 2000 m, coherente con la morfología de la etapa final de intrusión de rocas carbonatíticas.

En el caso del macizo de Bonga las profundidades son bastante más someras (~ 400-500 m) en la parte norte, lo que sería acorde con el carácter subvolcánico de sus unidades (Bambi, 2015), profundizando hacia el sur-sureste con soluciones de Euler de entre 1000 y 2000 m, y enlazando con profundidades de hasta 4000 m que bordean el cuerpo de leucogranitos biotítico-moscovíticos. Estos cuerpos plutónicos se emplazan en zonas epizonales de la corteza, con condiciones de extensión continental.

Las profundidades obtenidas nos ayudarán a la modelización 3D de los cuerpos que están causando las anomalías.

4. Modelización geofísica en 3D

El modelado realizado con el software Oasis Montaj® (Geosoft), utilizando la extensión VOXI, permite la inversión 3D de las anomalías magnéticas en una determinada zona de interés para obtener un modelo de la distribución de susceptibilidad magnética (k) para el área considerada en la inversión. Los modelos resultantes proporcionan una estimación de la geometría y profundidad de los cuerpos fuente que causan las anomalías magnéticas observadas, así como los valores de susceptibilidad magnética característicos de cada unidad geológica asociada. En este caso se utilizó el método MVI (Magnetic Vector Inversion), (MacLeod & Ellis, 2013) donde el parámetro invertido es el vector de magnetización para obtener una susceptibilidad aparente y las zonas donde la magnetización remanente es sugerida.

La Figura 5A muestra la ubicación del área de interés modelada sobre el macizo de Tchivira (zona 1). El voxel donde se incluye el área modelizada incluye las tres anomalías circulares de mayor intensidad identificadas sobre los afloramientos de gabros (Gb), sienitas (Si) y sienitas nefelínicas (Si_nf) del macizo de Tchivira. Este macizo alcalino-carbonatítico presenta una firma magnética suficientemente contrastada (>800 nT) para ser detectable mediante la prospección magnética. Esta área fue seleccionada con el fin de investigar las características del cuerpo de carbonatitas cartografiado en superficie y su configuración en profundidad. En el caso del macizo de Bonga, el bajo contraste de su respuesta magnética en relación con el basamento circundante no permite una modelización clara de su morfología en profundidad.

La anomalía modelizada en 3D logró determinar la profundidad y forma de los cuerpos generadores de las anomalías. En el caso del macizo de Tchivira los materiales que se asocian a las iso-superficies resultantes de la inversión son sienitas y gabros (Si+Gb), sienitas nefelínicas (Si_nf) y gabros (Gb) (Fig. 5B). Los valores medios de susceptibilidad de estas rocas en la zona de estudio abarcan valores de 0,0134 a 0,0646 S.I., siendo por tanto los responsables de los cuerpos intensamente magnetizados en relación con las iso-superficies 0,05 – 0,015 S.I. (Fig. 5C). Los resultados de la inversión de los datos de intensidad del campo magnético revelan dos cuerpos cuyas dimensiones son 1800 x 2200 m para el cuerpo norte y 1100 x 2000 m para el sur. La profundidad estimada alcanza 1800 m y 1700 m respectivamente (Figs. 5D, E). Estas profundidades concordarían con las obtenidas por medio de las soluciones Euler (entre 1000 y 2000 m). Por otro lado, los afloramientos anulares de carbonatitas (Cr) y complejos volcánicos a subvolcánicos alcalino-carbonatíticos (Cm), de interés económico, se asocian a anomalías magnéticas de menor intensidad (~ +100 y +150 nT) (Fig. 5A), las cuales se ven enmascaradas por las fuertes anomalías de los cuerpos de sienitas y gabros (Fig. 5C). La respuesta de los cuerpos carbonatíticos de Tchivira, de escaso volumen en relación con los cuerpos intensamente magnéticos circundantes (Si_nf y Gb), impide su caracterización por medio de los minerales ferromagnéticos contenidos. La baja susceptibilidad y escaso volumen aportado por las carbonatitas no permite que sean correctamente caracterizados por la inversión, si bien, su extensión máxima podría alcanzar 2000 x 1500 m, sin poder terminar su profundidad.

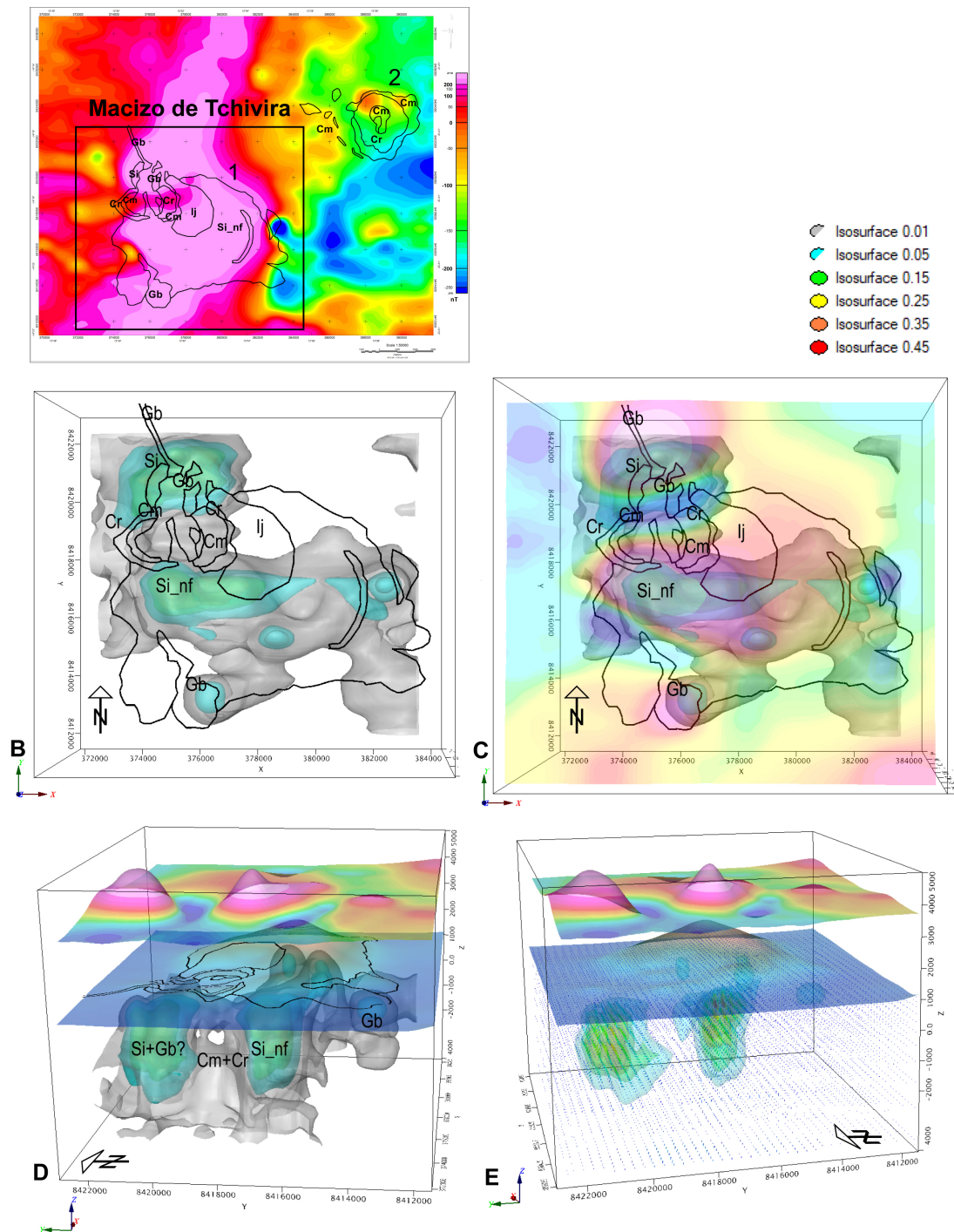


Figura 5. Modelización 3D del Macizo de Tchivira. A- Localización en el mapa ICMT (cuerpo 1). B- Resultado de la inversión de los datos del campo magnético total ICMT y cartografía geológica. Sienitas (Si), sienitas nefelínicas (Si_nf), gabros (Gb), carbonatitas (Cr), complejos alcalino-carbonatíticos (Cm). C- Inversión magnética, cartografía y superposición de carta de anomalías magnéticas (ICMT). D- Perspectiva de los cuerpos norte y sur resultado de la inversión, cuyas iso-superficie de interés son 0,05 y 0,15 S.I. (azul y verde respectivamente). Los cuerpos grises de baja susceptibilidad se asocian a las unidades de carbonatitas. E- Cuerpos resultantes de la inversión con flechas indicativas de la orientación magnética (flechas azules paralelas a la magnetización inducida y flechas desviadas por la remanencia en colores). La unidad de las iso-superficies es S.I. y aplica a las figuras B, C, D y E.

Figure 5. 3D modeling of the Tchivira Massif. A- Location on the total magnetic intensity ICMT map (body 1). B- Result of the inversion of ICMT data and geological mapping. Syenites (Si), nepheline syenites (Si_nf), gabbros (Gb), carbonatites (Cr), alkaline-carbonatite complexes (Cm). C- Magnetic inversion, geological mapping and magnetic anomaly map overlay (ICMT). D- Perspective of the north and south bodies resulting from the inversion, whose iso-surface of interest are 0,05 and 0,15 S.I. (blue and green respectively). Low susceptibility grey bodies are associated with carbonatite units. E- Bodies resulting from the inversion with arrows indicative of the magnetic orientation (blue arrows parallel to the induced magnetisation and arrows deviated by the remanence in colours). The units of isosurfaces are S.I. and applied to the figures B, C, D and E.

5. Potencial económico

Una de las principales características de las carbonatitas es su enriquecimiento en elementos incompatibles como Ti, F, Nb, Ta, Zr y Hf, así como el conjunto de tierras raras (Pirajno, 2009; Anenburg et al., 2021), entre otros elementos de interés. El Nb, el Ta, y especialmente el conjunto de tierras raras tienen un amplio abanico de aplicaciones básicas para el desarrollo de la industria tecnológica, energética y telecomunicaciones. El mayor interés del macizo de Tchivira podría concentrarse en la presencia de carbonatos y tierras raras, tal y como se reporta en el macizo de Bonga, a pesar de que también existen indicios de mineralizaciones de fluorita asociada a venas hidrotermales tardías que atraviesan los cuerpos carbonatíticos de Tchivira (Bambi, 2015; Merino-Martínez, 2022). Algunos carbonatos de tierras raras (La, Ce) pueden formarse en estadios más tardíos del proceso hidrotermal y están asociados a la precipitación de carbonatos tardíos (bastnasita, sinchisita) en venas, bordes de grano, reemplazando a otros carbonatos primarios, o rellenando cavidades de porosidad (Melgarejo et al., 2012). En la mayoría de los depósitos, el enriquecimiento en tierras raras se atribuye a etapas magmáticas tardías. En consecuencia, a menudo se supone que las carbonatitas evolucionadas están mejor dotadas en REE (Rare-Earth Elements) (Wall & Mariano, 1996). Por tanto, el potencial contenido en tierras raras de los carbonatos en la zona de Quilengues podría resultar de interés económico relevante.

A su vez, una amplia variedad de silicatos y fosfatos enriquecidos en tierras raras ligeras es descrita asociada a las diversas etapas de actividad hidrotermal descritas en este macizo. Entre otros, destaca la presencia de (fluor-) apatito, rhabdofana, britolita y pirocloro, este último tanto de carácter primario como secundario/hidrotermal, mostrando amplios enriquecimientos en Nb y mayores contenidos en ETR (Elementos de Tierras Raras) en las carbonatitas de Bonga (Bambi et al., 2012; Melgarejo et al., 2012; Bambi, 2015). En estos macizos carbonatíticos se describe, además, una diversidad de minerales enriquecidos en Sr, Ba, Mn y Al, lo que genera un potencial interés añadido en su exploración.

A pesar de que el modelo no pueda establecer la profundidad máxima de los cuerpos carbonatíticos del macizo de Tchivira, las profundidades estimadas para los cuerpos alcalinos alcanzan entre 1000 y 1300 m, mientras que los cuerpos gabroicos podrían alcanzar profundidades de hasta 2000 m (Fig. 5D). Dado que las carbonatitas de este macizo se encuentran emplazadas entre estos pulsos alcalinos y subsaturados, es previsible que el cuerpo principal o los conductos de alimentación de las unidades carbonatíticas puedan encontrarse a profundidades similares, comprendidas entre 1000 y 2000 m. Aunque los distintos procesos hidrotermales acontecidos desde el emplazamiento de los cuerpos carbonatíticos de Tchivira puedan haber movilizado parte del Nb, F, Sr y Tierras Raras Ligeras (La, Ce) de los minerales primarios, la abundante presencia de minerales portadores de estos elementos como fases principales encontradas en las carbonatitas aflorantes sugiere que existe un amplio potencial de exploración en profundidad de estas unidades.

A pesar de no haber modelizado el macizo de Bonga en 3D el carácter de las unidades carbonatíticas que componen este macizo (Bambi, 2015), sugiere que se trata de cuerpos epizonales subvolcánicos, probablemente procedentes de una cámara magmática principal encontrada en profundidad. De acuerdo con la información aerogeofísica y la modelización a partir de las soluciones de Euler, los cuerpos plutónicos carbonatíticos de Bonga podrían encontrarse en profundidad en la parte central y sur-sureste del macizo, en donde se encuentran profundidades de Euler de entre 1000 y 2000 m, incluso señalando en algunos casos profundidades de hasta 4000 m. Esta información puede ayudar a sugerir la presencia de una cámara carbonatítica principal en profundidad que alimenta a las unidades subvolcánicas aflorantes, por lo que su potencial económico encontrado en superficie puede ser claramente incrementado mediante su exploración en profundidad. Como se ha visto que el contraste de susceptibilidad magnética no es suficiente, se requerirá el uso de otros métodos geofísicos, como puede ser una gravimetría de detalle o perfiles continuos de resistividad extraídos de tomografía eléctrica para establecer la morfología de estos cuerpos subyacentes y su relación con las rocas encajantes en profundidad, preferentemente en la región meridional del macizo.

6. Conclusiones

En el SW de Angola, durante la extensión intracontinental mesozoica, se produjo la intrusión de magmas de naturaleza alcalina con depósitos minerales asociados de alto interés económico. Los macizos de Tchivira y Bonga exhiben la secuencia evolutiva entre distintos pulsos alcalinos y carbonatíticos que, unido a las importantes anomalías magnéticas asociadas, los hace especialmente interesantes para su investigación.

La diferente composición entre el macizo de Tchivira, con magmas de afinidad alcalina (sienitas nefelínicas), moderadamente alcalina (sienitas y gabros alcalinos) y ultra-alcalina (ijolitas), y el de Bonga, eminentemente carbonatítico, tiene su reflejo en la desigual intensidad de la anomalía magnética. Además, Tchivira se engloba en una zona de rocas filonianas altamente magnéticas, asociadas también a importantes anomalías magnéticas. Por otra parte, los afloramientos anulares de carbonatitas y complejos volcánicos a subvolcánicos alcalino-carbonatíticos del macizo de Tchivira llevan asociadas anomalías magnéticas de menor intensidad que se ven enmascaradas por las fuertes anomalías de los cuerpos de sienitas y gabros.

El mapa de anomalías de Bouguer muestra un gradiente de dirección NNE-SSW coherente con el hundimiento del macizo de Bonga, corroborando la diferencia entre los dos macizos.

El análisis de las soluciones de Euler y la modelización geofísica en 3D del macizo de Tchivira nos informa de la morfología en profundidad de los cuerpos causantes de las anomalías, divididas en 1) un cuerpo norte, formado por sienitas+gabros de dimensión 1800 x 2200 m y profundidad estimada de 1800 m; 2) un cuerpo sur, de sienitas nefelínicas, con dimensión 1100 x 2000 m y profundidad estimada de 1700 m; y 3) un cuerpo situado entre ambos, de origen carbonatítico, cuya máxima extensión sería 2000 x 1500 m, sin poder terminar su profundidad. Estos datos presentan profundidades próximas obtenidas con el análisis de Euler, con numerosas soluciones contenidas entre 1000 y 2000 m. Si bien existen soluciones Euler más profundas (4000 m) que podrían estar relacionadas con heterogeneidades dentro de los cuerpos intrusivos.

En el caso del macizo de Bonga, la ausencia de contraste magnético entre las unidades carbonatíticas y el basamento circundante limita la posibilidad de establecer un modelo de profundidad del cuerpo principal. Sin embargo, las profundidades de Euler calculadas sugieren presencia de materiales carbonatíticos hasta 400-500 m de profundidad en la región septentrional del macizo, alcanzando profundidades de entre 1000 y 2000 m en la zona central y meridional. Ligeras anomalías magnéticas positivas son encontradas en la zona noroeste del macizo, lo que podría estar ligado a la presencia de pequeños cuerpos kimberlíticos, también aflorantes en superficie.

Las profundidades estimadas en ambos macizos carbonatíticos aumenta claramente el potencial de exploración de elementos críticos de interés, tales como Nb, Sr, Ba, F y Tierras Raras Ligeras (preferentemente La y Ce), entre otros, encontrados en distintos minerales primarios y secundarios en las unidades carbonatíticas. Aunque la ausencia de un claro contraste magnético limita la modelización de los cuerpos, la posibilidad de encontrar cámaras magmáticas en profundidades que oscilan entre 400 y 2000 m en ambos macizos, de acuerdo con las profundidades de Euler, claramente incrementa el potencial económico encontrado en superficie en estas regiones.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al Proyecto PLANAGEO, financiado por el Gobierno de la República de Angola a través del Servicio Geológico de Angola (IGEO). Algunos análisis fueron financiados por el programa "Ayudas Extraordinarias Menciones Excelencia Severo Ochoa" del IGME-CSIC (proyecto AECEX2021, número de ayuda 15903). Agradecemos especialmente la ayuda del personal local en Angola y el apoyo de Impulso Industrial Alternativo. Agradecemos a los revisores Manuel Joao Senos Matias y Fernando Pedro Ortega de Oliveira Figueiredo por ayudar a mejorar sustancialmente el manuscrito.

Authorship contribution statement

Carmen Rey-Moral: Writing - Original Draft, Writing – Review, Investigation, Conceptualization, Methodology, Visualization, Supervision, Formal analysis.

Tania Mochales: Writing - Original Draft, Writing – Review, Investigation, Conceptualization, Methodology, Visualization, Supervision, Formal analysis.

Enrique Merino-Martínez: Supervision, Writing – Review, Data Curation.

José Luis García-Lobón: Project administration, Funding acquisition.

Domingos Cordeiro: International collaboration, Local support.

Referencias

- Alberti, A., Castorina, F., Censi, P., Comin-Chiaramonti, P., & Gomes, C.B. (1999). Geochemical characteristics of Cretaceous carbonatites from Angola. *Journal African Earth Sciences*, 29 (4), 735-759.
- Allsopp, H.L., & Hargraves, R.B. (1985). Rb-Sr ages and palaeomagnetic data for some Angolan alkaline intrusives. *Transactions Geological Society South Africa*, 88, 295-299.
- Anenburg, M., Broom-Fendley S., & Chen W. (2021). Formation of Rare Earth Deposits in Carbonatites. *Elements*, 17(5), 327-332. <https://doi.org/10.2138/gselements.17.5.327>.
- Bambi, A.C.J.M. (2015). Metalogenia de las carbonatitas en dominios plutónicos, subvolcánicos y volcánicos: Tchivira, Bonga y Catanda, Angola. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona. 705 pp.
- Bambi, A.C.J.M., Costanzo, A., Gonçalves, A., & Melgarejo, J.C. (2012). Tracing the chemical evolution of primary pyrochlore from plutonic to volcanic carbonatites: the role of fluorine. *Miner. Mag.* 76 (2), 377-393.
- Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., Kuhn, M., Peyrefitte, A., Vales N., Biancale, R., Gabalda, G., Moreaux, G., Reinquin, F., Sarrahih, M., & CGMW (2012). World Gravity Map 1:50M. Bureau Gravimétrique International (BGI). CGMW-BGI-CNES-IRD Ed., Paris. BGI, <http://bgi.omp.obs-mip.fr/data-products/Gravity-Databases/Land-Gravity-data>.
- Cahen, L., Snelling, N.J., Delhal, J., & Vail, J.R. (1984). The geochronology and evolution of Africa: London, Oxford University Press, 512 p.
- Comin-Chiaramonti, P., Barros Gomes, C., Cundari, Al., Castorina, F., & Censi, P. (2007). A review of carbonatitic magmatism in the Paraná-Angola-Namibia (PAN) system. *Periodico di Mineralogia* 76 (2-3), 25-78.
- Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., Censi, P., & Speziale, S. (2005). Carbonatites from southeastern Brazil: a model for the carbon and oxygen isotope variations. In: Comin-Chiaramonti, P. and Gomes, C.B. (Eds.): Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian platform. Edusp/Fapesp, São Paulo, Brazil, 629-650.
- Laske, G., Masters, G., Ma, Z., & Pasyanos, M. (2013). Update on CRUST1.0 - A 1-degree Global Model of Earth's Crust, *Geophys. Res. Abstracts*, 15, Abstract EGU2013-2658.
- MacLeod, I. N., & Ellis, R. G. (2013). Magnetic Vector Inversion, a simple approach to the challenge of varying direction of rock magnetization. ASEG Forum on the Application of Remanent Magnetization, 2013 ASEG general meeting.
- Melgarejo, J.C., Costanzo, A., Bambi, A.C.J.M., Gonçalves, A.O., & Neto, A.B. (2012). Subsolidus processes as a key factor on the distribution of Nb species in plutonic carbonatites: The Tchivira case, Angola. *Lithos*, 152, 187-201.
- Merino Martínez, E. (2022). "Mapa Geológico e Notícia Explicativa da carta nº 316 da Lola, à escala 1:100 000". Instituto Geológico de Angola, Ministério de Recursos Minerais, Petróleos e Gas. Luanda, Angola.
- Pirajno, F. (2009). Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Geological Survey of Western Australia. Springer. 1250 pp.
- Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Miller, A.J., & Somerton I.W. (1990). Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution. *Geophysics*, 55, 80-91.

- Reid, A.B., Ebbing, J., & Webb, S.J. (2014). Avoidable Euler Errors - the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields. *Geophys. Prospect.* 62, 1162-1168. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12119>.
- Rey-Moral, C., Merino-Martínez, E., Rubio, F.M., García-Lobón, J.L., Llorente, J.M., García, A., Fera, M.C., Yocane Van-Dunem Manuel, N., & Pedro Gaspar, A. (2023). El método gravimétrico para el estudio de cuerpos plutónicos básicos-ultrabásicos en el SW de Angola. *Geometría de las intrusiones y su relación con mineralizaciones metálicas. X Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Libro de proceedings*, pp 1000-1009. NIPO Digital: 798-23-029-X, ISBN: 978-84-416-7540-7. <https://doi.org/10.7419/162.07.2023>. <https://www.ign.es/web/ign/portal/libros-digitales/10-ahpgg>.
- Thompson, D.T. (1982). EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics* 47, 31-37. <https://doi.org/10.1190/1.1441278>.
- Wall, F., & Mariano, A.N. (1996). Rare earth minerals in carbonatites: a discussion centred on the Kangankunde Carbonatite, Malawi. In: Jones, A.P., Wall, F. & Williams, C.T. (Eds) *Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits*. Mineralogical Society Series. London, Chapman & Hall, pp. 193-226.