

# Nanomineralogía del Au en mineralizaciones magmáticas de Cr-Ni de la Serranía de Ronda

José María González-Jiménez (1\*), Rui Liu (2), Carlos Pinilla (1), Elena Moreno-Bermúdez (1), Lola Yesares (3), Francisco Javier López-Moro (4), Fernando Gervilla (5)

(1) Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (IACT), Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 18100 Armilla, Granada (España)

(2) School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000 (China)

(3) Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid (España)

(4) CN-IGME-CSIC, Oficina de Salamanca, Plaza de la Constitución 1, 37001, Salamanca (España)

(5) Departamento de Mineralogía y Petrología. Universidad de Granada, 18071 Granada (España)

\* corresponding author: [jm.gonzalez.j@csic.es](mailto:jm.gonzalez.j@csic.es)

**Palabras Clave:** Nanomineralogía, Oro, Magmático, Hidrotermal **Key Words:** Nanomineralogy, Gold, Magmatic, Hydrothermal

## INTRODUCCIÓN

En las Zonas Internas de la Cordillera Bético-Rifeña (dominio de Alborán) se localizan los afloramientos más extensos del mundo de peridotitas del manto subcontinental (peridotitas de la Serranía de Ronda, Alpujárride, Cordilleras Béticas, y de Beni Bousera, Rif interno, norte de Marruecos). Entre éstos, los más importantes son los que se encuentran en la comarca de la Serranía de Ronda, ocupando un área total aproximada de 430 km<sup>2</sup>, distribuidos en tres grandes afloramientos: Macizo de Ronda (~300 km<sup>2</sup>), Macizo de Ojén (~70 km<sup>2</sup>) y Macizo de Carratraca (~60 km<sup>2</sup>). Estos macizos están constituidos por lherzolitas y harzburgitas, y en menor proporción, dunitas y capas de piroxenitas. Los estudios estructurales, petrofísicos, metamórficos y geoquímicos de estos macizos han permitido diferenciar tres dominios tectonometamórficos que, de techo a muro, son: 1) dominio de tectonitas con espinela y milonitas con granate y espinela, 2) dominio de peridotitas granulares y 3) dominio de tectonitas con plagioclasa. Además de esta singularidad petrológica y metamórfica, los macizos ultramáficos de la Serranía de Ronda tienen también la peculiaridad de albergar una asociación única a nivel mundial de mineralizaciones magmáticas de Cr, Ni y Cu que incluye (Gervilla et al. 2019): (1) mineralizaciones de cromo-níquel (Cr-Ni) con cromita y arseniuros de Ni (fundamentalmente niquelina y maucherita); (2) mineralizaciones de sulfuros con grafito (S-G) que consisten en cuerpos irregulares con sulfuros (pirrotita, pentlandita y calcopirita, con menores cantidades de cubanita, niquelina y gersdorffita), y en menor medida cromita y grafito, que rellenan fracturas y zonas de fallas, (3) mineralizaciones de cromo (Cr), que forman cuerpos de cromititas con morfología podiforme, lentes y filoncillos o schlierens en dunitas, a menudo asociados con ortopiroxenitas o clinopiroxenitas. Las mineralizaciones de Cr-Ni se caracterizan por sus elevados contenidos de Au (hasta 18 ppm), en comparación con las mineralizaciones de tipo S-G (<230 ppb) y Cr (9 ppb) (Gervilla et al. 2019). Nuestro trabajo se focaliza en las tres mineralizaciones de Cr-Ni más enriquecidas en este metal noble que se conocen en cada uno de los tres macizos ultramáficos de la Serranía de Ronda: (1) Arroyo de la Cala, que aflora en el dominio de tectonitas con plagioclasa de la zona más interna del macizo de Ronda, (2) La Gallega, localizada en la zona de milonitas con granate y espinela del dominio de tectonitas con espinela de la zona más externa del macizo de Ojén, y (3) San Juan, también en el dominio de tectonitas con espinela, pero en este caso del macizo de Carratraca. La mineralización de La Gallega tiene la peculiaridad de no estar deformada, mientras que los casos del Arroyo de la Cala y San Juan muestran evidencias de deformación sin a tardimagmática. Este trabajo es el primer estudio detallado de la expresión mineralógica del Au en estas mineralizaciones, resaltando como los procesos a escala atómica tienen impacto en la concentración y removilización del oro, usando para ello una combinación de técnicas de microscopía, que incluyen la microsonda electrónica (EPMA), el microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FESEM) con haz de iones focalizados (FIB) y la microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HRTEM).

## RESULTADOS

El singular enriquecimiento en Au que muestran las mineralizaciones de Cr-Ni tiene su expresión mineralógica en abundantes granos de Au de tamaño nano y micrométrico (< 20 µm). En la mineralización no deformada de La

Gallega se han identificado granos aislados de Au y polifásicos de Au-Bi-Te incluidos en niquelina (NiAs) o, más frecuentemente, en löllingita (FeAs<sub>2</sub>) o en sus contactos de grano. La morfología de dichas inclusiones varía desde cristales idiomorfos con morfologías poligonales, subidimorfos con morfologías curvadas, a xenomorfos con morfologías redondeadas. Ocasionalmente, los granos idiomorfos muestran una orientación preferente dentro de los cristales de löllingita, que es común a la que muestran también inclusiones aladañas de pirrotina micrométrica (<10 µm). En la mineralización de San Juan se observan granos individuales de Au<sup>0</sup> (~15 µm) con morfologías poligonales y/o redondeadas, formando inclusiones aisladas en maucherita (Ni<sub>11</sub>As<sub>8</sub>). En cambio, granos polifásicos de Au-Bi-Te (< 20 µm) se localizan en los contactos de grano de calcopirita (hasta 80 µm), que también están incluidas en la maucherita. Granos de Au de menor tamaño (<1-10 µm) y morfología irregular se localizan en los contactos entre maucherita y niquelina. Por último, en la mineralización del Arroyo de la Cala, se han identificado granos idiomorfos de electro (Au-Ag) de tamaño nanométrico (<10 nm) en: (1) cristales de maucherita y orcelita que forman cadenas de inclusiones solidas secundarias que cortan a la cromita y al ortopiroxeno intergranular, y (2) una matriz intersticial serpentizada entre los cristales de cromita compuesta por serpentina, nepouíta y clorita. Identificables con el FESEM como pequeños cristales de alta reflectividad electrónica, su análisis detallado con FIB-HRTEM muestra que se trata de cristales idiomorfos de Au distribuidos de manera heterogénea en la matriz de los minerales que los albergan.

## DISCUSIÓN

La identificación en La Gallega de cristales de Au con morfologías curvilíneas en los contactos de grano entre cristales de niquelina y löllingita, y más frecuentemente dentro del diarseniuro sugiere la cristalización tardía del Au al final de la etapa magmática. La frecuente asociación del Au con Bi y Te sugiere la posible concentración de los semimetales y el oro en un fundido residual originado tras la cristalización temprana de la niquelina (<900 °C), el cual fue el responsable de la formación de la löllingita mediante la reacción entre la niquelina y dicho fundido residual (Gervilla y Rønsbo, 1992). Asimismo, el análisis mediante FIB-FESEM y HRTEM de la estructura interna de los granos polifásicos de Au, Bi y Te sugiere procesos de cristalización fraccionada en las gotas de los líquidos de Au-Bi-Te a temperaturas relativamente bajas (<271 °C). Este origen puede también asumirse para aquellos granos de Au poligonales y polifásicos de polifásicos de Au-Bi-Te asociados con calcopirita e incluidos en la maucherita de la mineralización deformada de San Juan. En este caso, la deformación sin a tardimagnética generó la precipitación masiva de maucherita en vez de niquelina debido a la devolatilización en arsénico del fundido arseniurado original, dando lugar a la concentración residual de fundidos de Au-Bi-Te en la maucherita. En cambio, la identificación de cristales irregulares de Au de menor tamaño (<1-10 µm) con morfologías irregulares en los contactos de reemplazamiento de niquelina por maucherita hidrotermal, o en maucherita y orcelita que forman cadenas de inclusiones fluidas que cortan a los cristales de cromita o piroxenos intersticiales, sugiere procesos de removilización post-magmática del oro. Esto es más evidente en el caso de los cristales nanométricos (<10 nm) de Au embebidos en nepouíta y clorita que forman la matriz intersticial serpentizada de la mineralización, cuyo origen se asocia a la circulación de fluidos producidos durante la serpentización de las peridotitas encajantes que han infiltrado al cuerpo mineralizado a través de una red de fracturas interconectadas.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por el proyecto NANOMET PID2022-138768OB-I00, financiado por el MCIN/AEI/<https://doi.org/10.13039/50110001133> y por “FEDER una manera de hacer Europa” y por la “Unión Europea”. Fondos adicionales de la CONEXIÓN CSIC GEOCIENCIAS POR UN PLANETA SOSTENIBLE han apoyado la JAE ICU INTRO a C.P.

## REFERENCIAS

- Gervilla, F. & Rønsbo, J. (1992): New Data on (Ni,Fe,Co) diarsenides and sulpharsenides in chromite-nicolite ores from Málaga province, south Spain. *Neues Jahrb. Mineralogie Mh.*, H.5, 193-206.
- Gervilla, F., González-Jiménez, J. M., Hidas, K., Marchesi, C., Piña, R (2019): Geology and metallogeny of the upper mantle rocks from the Serranía de Ronda. *Sociedad Española de Mineralogía*, ISBN: 978-84-15588-30-6, 122 p.