

Cruz Martínez, J.; García-Meléndez, E.; Rodríguez Álvarez, I.; Coronado, I.; Ferrer-Julià, M.; Bakker, W.; Valenzuela, P.; Colmenero Hidalgo, E.; Pereira, I.; Espín de Gea, A. Evaluación de la heterogeneidad composicional de una Piedra Natural ornamental mediante técnicas de teledetección óptica de proximidad.

Evaluación de la heterogeneidad composicional de una Piedra Natural ornamental mediante técnicas de teledetección óptica de proximidad.

Cruz Martínez, Juncal A. ¹ García-Meléndez, Eduardo ¹ Rodríguez Álvarez, Indira ¹ Coronado, Ismael ¹ Ferrer-Julià, Montserrat ¹ Bakker, Winn H. ² Valenzuela, Pablo ¹ Colmenero Hidalgo, Elena ¹ Pereira, Inés ¹ Espín de Gea, Antonio ³

¹ (1) Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Universidad de León., España

² (2) Department of Applied Earth Sciences, Faculty of Geo information Science & Earth Observation (ITC), University Twente, Hallenweg 8, 7522 NH Enschede, The Netherlands.

³ (3) Unidad Tecnológica Geológico-Minera del Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales (CTM), Cehegín (Murcia, España).

ORCID: Cruz Martínez 0000-0003-2768-9242 García-Meléndez 0000-0001-8217-8205 Rodríguez Álvarez 0000-0002-2518-952X Coronado 0000-0002-8469-6003 Ferrer-Julià 0000-0001-8021-1040 Bakker 0000-0003-0382-7225 Valenzuela 0000-0002-2424-5884 Colmenero Hidalgo 0000-0002-5449-2739 Pereira 0000-0002-7328-4791

Correspondencia: jcrum@unileon.es egarm@unileon.es iroda@unileon.es icorv@unileon.es mferj@unileon.es w.h.bakker@utwente.nl pvalm@unileon.es e.colmenero@unileon.es iperr@unileon.es antonio.espin@ctmarmol.es

RESUMEN

La Piedra natural presenta una variabilidad composicional que a menudo pasa desapercibida mediante las inspecciones visuales convencionales en cantera. En este trabajo se caracteriza la roca carbonatada ornamental "Emperador Castril" dicha heterogeneidad química y mineralógica mediante la integración de técnicas espectroscópicas (espectroscopia de reflectancia difusa de laboratorio e imágenes hiperespectrales). La validación se realiza con técnicas analíticas (difracción y fluorescencia de rayos X) sobre muestras comerciales y de descarte. La espectroscopia de reflectancia VNIR-SWIR puntual permitió identificar bandas diagnósticas de la dolomita (~2325 nm), presencia de arcillas y contenido de hierro. Posteriormente, las imágenes hiperespectrales permitieron conocer la distribución irregular de las distintas fases minerales aplicando el algoritmo de clasificación Spectral Angle Mapper (SAM). Todas las técnicas mostraron coherencia en revelar una composición predominantemente dolomítica, con presencia minoritaria de calcita y, en casos específicos, cuarzo y fases arcillosas, además de confirmar una variabilidad composicional ligada al mayor aporte detrítico. Se concluye que el uso de tecnologías espectroscópicas in situ puede optimizar la clasificación del material y la eficiencia de la explotación, reduciendo los residuos mineros conforme a la normativa europea.

Palabras clave: Difracción de Rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), reflectancia difusa de laboratorio (VNIR-SWIR), imagen hiperespectral, roca carbonatadas

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 19 febrero 2026

Evaluación de la heterogeneidad composicional de una Piedra Natural ornamental mediante técnicas de teledetección óptica de proximidad.



Cruz Martínez, Juncal A. ⁽¹⁾, García-Meléndez, Eduardo ⁽¹⁾, Rodríguez Álvarez, Indira ⁽¹⁾, Coronado, Ismael ⁽¹⁾, Ferrer-Julíà, Montserrat ⁽¹⁾, Bakker, Winn H. ⁽²⁾, Valenzuela, Pablo ⁽¹⁾, Colmenero Hidalgo, Elena ⁽¹⁾, Pereira, Inés ⁽¹⁾, Espín de Gea, Antonio ⁽³⁾

⁽¹⁾ Grupo de Investigación Geología Ambiental, Cuaternario y Geodiversidad (Q-GEO), Universidad de León., España.


 0000-0003-2768-9242, jcrum@unileon.es;  0000-0001-8217-8205, egarm@unileon.es

 0000-0002-2518-952X, iroda@unileon.es ;  0000-0000-0000-0001, icorv@unileon.es

 0000-0001-8021-1040, mferj@unileon.es ;  0000-0002-2424-5884, pvalm@unileon.es

 0000-0002-5449-2739, e.colmenero@unileon.es ;  0000-0002-7328-4791, iperr@unileon.es

⁽²⁾ Department of Applied Earth Sciences, Faculty of Geo information Science & Earth Observation (ITC), University Twente, Hallenweg 8, NH Enschede, The Netherlands.

 0000-0003-0382-7225, w.h.bakker@utwente.nl

⁽³⁾ Unidad Tecnológica Geológico-Minera del Centro Tecnológico del Mármol, Piedra y Materiales (CTM), Cehegín (Murcia, España).

antonio.espin@ctmarmol.es

Resumen: La Piedra natural presenta una variabilidad composicional que a menudo pasa desapercibida mediante las inspecciones visuales convencionales en cantera. En este trabajo se caracteriza la roca carbonatada ornamental "Emperador Castril" dicha heterogeneidad química y mineralógica mediante la integración de técnicas espectroscópicas (espectroscopia de reflectancia difusa de laboratorio e imágenes hiperespectrales). La validación se realiza con técnicas analíticas (difracción y fluorescencia de rayos X) sobre muestras comerciales y de descarte. La espectroscopia de reflectancia VNIR-SWIR puntual permitió identificar bandas diagnósticas de la dolomita (~2325 nm), presencia de arcillas y contenido de hierro. Posteriormente, las imágenes hiperespectrales permitieron conocer la distribución irregular de las distintas fases minerales aplicando el algoritmo de clasificación *Spectral Angle Mapper* (SAM). Todas las técnicas mostraron coherencia en revelar una composición predominantemente dolomítica, con presencia minoritaria de calcita y, en casos específicos, cuarzo y fases arcillosas, además de confirmar una variabilidad composicional ligada al mayor aporte detrítico. Se concluye que el uso de tecnologías espectroscópicas *in situ* puede optimizar la clasificación del material y la eficiencia de la explotación, reduciendo los residuos mineros conforme a la normativa europea.

Palabras clave: Difracción de Rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX), reflectancia difusa de laboratorio (VNIR-SWIR), imagen hiperespectral, roca carbonatadas.

Assessment of the compositional heterogeneity of an ornamental natural stone using optical proximal sensing techniques

Abstract: *Natural stone exhibits compositional variability that often goes unnoticed during conventional visual inspections in quarries. This study characterizes the chemical and mineralogical heterogeneity of the ornamental carbonate rock "Emperador Castril" by integrating spectroscopic techniques (laboratory diffuse reflectance spectroscopy and hyperspectral imaging). Validation was performed using analytical techniques (X-ray diffraction and fluorescence) on commercial and discard samples. Spot VNIR-SWIR reflectance spectroscopy allowed for the identification of diagnostic bands of dolomite (~2325 nm), the presence of clays, and iron content. Subsequently, hyperspectral imaging revealed the irregular distribution of the different mineral phases using the Spectral Angle Mapper (SAM) classification algorithm. All techniques consistently reveal a predominantly dolomitic composition, with minor calcite and, in specific cases, quartz and clay phases, while also confirming compositional variability linked to the greater detrital input. It is concluded that the use of in-situ spectroscopic technologies can*

optimize material classification and mining efficiency, reducing mining waste in accordance with European regulations.

Keywords: X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), laboratory diffuse reflectance (VNIR-SWIR), hyperspectral imaging, carbonate rocks.

1. INTRODUCCIÓN

La piedra natural engloba a las rocas (ígneas, metamórficas o sedimentarias) procesadas en bloques o losas para la construcción y decoración como rocas ornamentales. Aunque comercialmente se dividen en granitos, mármoles y pizarras, cada grupo incluye una amplia variedad de rocas con distintas propiedades (IGME, 2022). El mercado de rocas ornamentales carbonatadas es un sector estratégico global. Sin embargo, la industria enfrenta el desafío de la heterogeneidad del material. La clasificación tradicional en cantera se basa en criterios visuales (color, textura), los cuales son insuficientes para detectar variaciones químicas

o mineralógicas que afectan a la durabilidad (resistencia y dureza) y al valor comercial. Este trabajo se centra en el "Mármol Emperador Castril", una dolomía utilizada en arquitectura moderna, con el objetivo de evaluar su variabilidad mediante técnicas analíticas avanzadas y espectroscopia de reflectancia e imágenes hiperespectrales.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología se diseñó priorizando técnicas de teledetección no destructivas, seguidas de una fase de validación analítica para confirmar los hallazgos basados en la respuesta espectral (Figura 1).

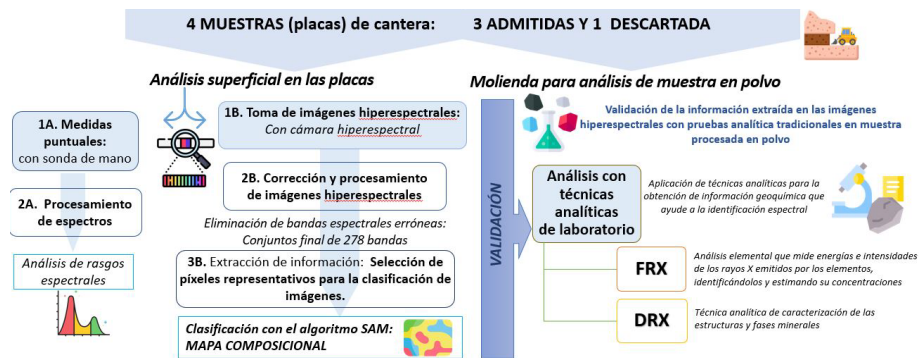


Figura 1. Esquema del procedimiento seguido para los análisis de la roca ornamenta

2.1. Selección de Muestras

Se seleccionaron cuatro placas representativas del "Mármol Emperador Castril" (5-10 cm²): tres clasificadas comercialmente como aceptables (CMam-3, CMam-4a, CMam-4b) y una de descarte (CMam-2) (Figura 2).

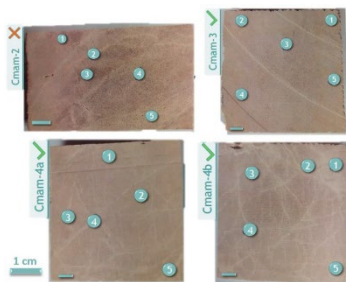


Figura 2. Las 4 muestras de Piedra Natural analizadas incluyendo en su superficie los puntos de análisis para espectroscopia VNIR-SWIR, DRX y FRX.

2.2. Teledetección de Proximidad

2.2.1. Espectroscopia de Reflectancia puntual

Se adquirieron curvas espectrales (350-2500 nm) con un espectrorradiómetro ASD-Fieldspec® 4 en el laboratorio de Geodinámica Externa de la Universidad de León. Se

tomaron medidas en cinco puntos por placa de roca mediante una sonda de contacto calibrada con un blanco de Spectralon® para identificar rasgos de absorción específicos. La sonda presenta una fibra óptica que recoge espectros con 2151 bandas desde 350-2500 nm, con una resolución espectral de 3 nm en el rango de 350-1000 nm y de 10 nm en el rango de 1000-2500 nm. Los espectros fueron procesados con el software SpectraGryph v.1.2.

2.2.2. Imágenes Hiperespectrales (HSI)

Las imágenes obtenidas de las placas se captaron mediante un sensor SPECIM (SWIR) de laboratorio con la diposición establecida por la Universidad de Twente (Países Bajos) obteniendo unas imágenes con una resolución espacial de 0.256 mm y una resolución espectral de 12 nm. Los datos se procesaron con el programa ENVI 5.2.

El procesamiento consistió inicialmente en eliminar los datos de bandas erróneas para trabajar finalmente con 278 bandas correspondientes al SWIR. Posteriormente se analizó visualmente las muestras a través de varias composiciones en color con el fin de detectar visualmente la distribución espacial general de las diferentes zonas composicionales. A continuación, se comparan las curvas espectrales de píxeles representativos de diferentes áreas de la imagen con la respuesta espectral de los minerales de la biblioteca espectral del USGS (Kokaly et al. 2017). A partir de estos

píxeles representativos se seleccionaron *endmembers* para la posterior clasificación de imágenes. Se utilizó como algoritmo de clasificación el *Spectral Angle Mapper (SAM)*, ya que se basa en la similitud espectral entre la reflectancia espectral de los píxeles de la imagen y los espectros de referencia de la misma con materiales conocidos de bibliotecas espectrales (Rodríguez *et al.*, 2025). Se ejecutó con un umbral de 0.13 radianes. Los píxeles más alejados del umbral máximo especificado en radianes no se clasifican.

2.3. Validación Analítica de Laboratorio

Para validar la interpretación espectral, se analizaron muestras en polvo obtenidas mediante un micro-taladro en los mismos puntos de análisis de la espectroscopia de reflectancia VNIR-SWIR, y se estudiaron mediante:

Difracción de Rayos X (DRX): Técnica utilizada con un equipo *Bruker D8 Advance* del Servicio General de Difracción de Rayos X de la Universidad de Salamanca para la identificación mineralógica cuali-cuantitativa.

Fluorescencia de Rayos X (FRX): Análisis elemental con un equipo portátil *Niton XL3t GOLDD+* de la Universidad de Twente (Países Bajos), para determinar la concentración de elementos menores y traza.

3. RESULTADOS

Los datos se muestran comentados principalmente para CMam-2 y CMam-3 por mostrar los resultados más diferenciados y mayor contraste, con respecto a las otras dos placas, mucho más homogéneas.

3.1. Caracterización espectral

Los sensores ópticos detectaron una variabilidad composicional clara en todas las muestras con las dos técnicas utilizadas. Así, en cuanto a los espectros de reflectancia, un rasgo de absorción que se aprecia en todos los espectros de las distintas muestras es en torno a 2300 nm (figura 3). Esa característica de absorción es causada por procesos vibracionales de los iones carbonato (CO_3^{2-}), alrededor de 2315 nm para la dolomita y de 2335 nm para la calcita.

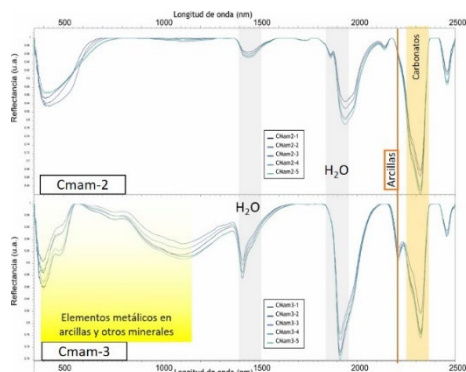


Figura 3. Curvas espectrales VNIR -SWIR de las muestras CMam-2 y CMam-3.

La presencia de minerales arcillosos intercalados con carbonatos suele estar indicada por un rasgo de absorción vibracional alrededor de 2200 y 2315 nm debido a la combinación del estiramiento de los grupos OH con los modos de flexión Al-OH y Mg-OH, respectivamente (Zaini, *et al.*, 2014).

Con respecto a los distintos espectros de las cuatro muestras de roca, los que se diferencian más en sus rasgos de absorción son los que pertenecen a la muestra CMam-3. No solo presentan los rasgos distintivos antes mencionados, sino que en el rango de longitudes de onda del VNIR sus rasgos, debido a la presencia de minerales con contenido en hierro, son claramente diferentes a los de las demás muestras.

Para la clasificación SAM se escogieron 5 *endmembers*, correspondientes tanto a píxeles de carácter monomineral como de mezclas, cuyos nombres aparecen en la leyenda de la figura 4, en donde se aprecian las áreas en las que aparecen las 5 clases correspondientes. Destaca la prevalencia de fases puras en la placa CMam-2, con respecto a la muestra CMam-3, en donde las fases-mezcla con arcillas están presentes en una proporción muy superior.

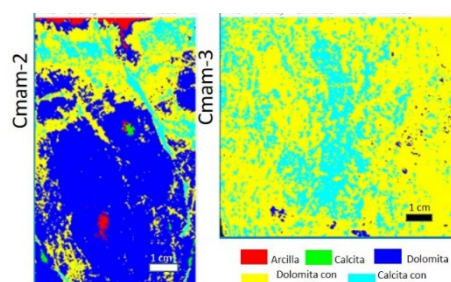


Figura 4. Mapas composicionales a partir de las imágenes hiperespectrales de las muestras CMam-2 y CMam-3

3.2. Validación y Confirmación Analítica (DRX y FRX)

Los datos de laboratorio confirmaron con precisión las observaciones de las técnicas de teledetección de proximidad. Los resultados obtenidos demuestran la coexistencia de 3 fases minerales: calcita, dolomita y cuarzo (figura 5). Esta última presente solo en la muestra CMam-3 y en un porcentaje menor al 5%. Sin embargo, sí se aprecia variabilidad en el porcentaje de calcita/dolomita en las distintas muestras. Siendo en la mayoría de los casos dominante el contenido en dolomita.

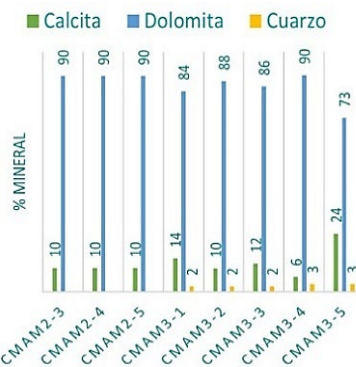


Figura 5. Análisis de DRX de las muestras CMam-2 y CMam-3.

Los análisis químicos de FRX (figura 6.) evidencian que las muestras consisten en carbonatos cuya composición en elementos traza es muy variable. En todas las muestras se observa distinto contenido en Mg, Ba, Cl, Cr, Fe, Ti, K, S, Si y Sr, pero la muestra CMam-3 muestra mayor contenido en Ba, Cr, Fe, Ti, K y Si que el resto. Además, también presenta

elementos como el Rb y el Al con valores significativos. Curiosamente, esta muestra es la que mayor porcentaje en cuarzo tiene y la segunda en cuanto a dolomita (por detrás de CMam-2).

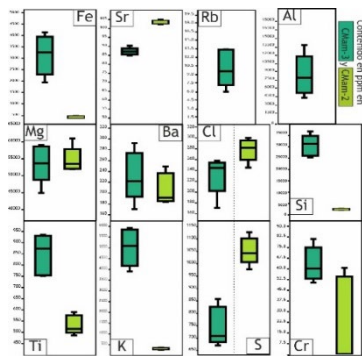


Figura 6. Análisis de FRX de las muestras CMam-2 y CMam-3.

4. DISCUSIÓN

La aplicación de técnicas de teledetección óptica de proximidad ha demostrado ser una metodología robusta para la evaluación de la heterogeneidad composicional del Mármol Emperador Castril. El análisis de los datos espectrales y de imagen permite una caracterización detallada que supera las limitaciones de la inspección visual convencional en cantera.

4.1. Análisis Espectral e Imagen Hiperespectral (VNIR-SWIR)

La espectroscopía VNIR-SWIR y la imagen hiperespectral se postulan como herramientas diagnósticas fundamentales para la identificación de fases minerales en tiempo real. La posición de los rasgos de absorción de los carbonatos, gobernada por la masa del catión, permitió discriminar con precisión entre la dolomita (~2315 nm) y la calcita (~2335 nm).

El procesamiento de las imágenes hiperespectrales mediante el algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) facilitó la generación de mapas composicionales que evidencian la distribución espacial de estas fases y sus mezclas. Particularmente, la detección de rasgos de absorción vibracional en torno a los 2200 nm y 2300 nm permitió identificar la presencia de filosilicatos (arcillas) intercalados en la matriz carbonatada, un hallazgo especialmente abundante en la muestra CMam-3. Asimismo, el análisis del grado de hidratación mediante los rasgos de absorción en 1400 nm y 1900 nm aportó información adicional sobre la presencia de minerales arcillosos hidratados o posibles inclusiones fluidas.

4.2. Validación mediante DRX y FRX

Los resultados obtenidos a través de la teledetección fueron rigurosamente verificados mediante técnicas analíticas de laboratorio. El análisis por DRX confirmó la naturaleza predominantemente dolomítica de la roca y validó la presencia de cuarzo y fases arcillosas en las muestras donde la espectroscopía ya había detectado anomalías (como CMam-3).

Por su parte, los datos de FRX corroboraron la variabilidad geoquímica observada espectralmente. Se observó una correlación directa entre los espectros con

rasgos de absorción más intensos en el VNIR y mayores concentraciones de elementos metálicos (Fe) y detríticos (Si, Al, K, Ti) en la FRX. Esta validación cruzada acredita que la respuesta espectral es un indicador fiable de la composición química y mineralógica de la piedra natural.

5. CONCLUSIONES E IMPLICACIONES

Este estudio subraya que los criterios visuales tradicionales son insuficientes para garantizar la homogeneidad técnica del material. La teledetección permitió identificar que muestras aceptadas visualmente (CMam-3) poseen impurezas silíceas y arcillosas que podrían comprometer su durabilidad y proceso de pulido. Por el contrario, materiales descartados (CMam-2) mostraron una pureza espectral y química equiparable a los de alta calidad, lo que representa una oportunidad de recuperación de recursos.

Se concluye que la integración de sensores hiperespectrales y espectrorradiómetros *in situ* facilita una minería inteligente y sostenible. Esta tecnología puede llegar a optimizar la clasificación del material, reducir la generación de residuos mineros y alinear a la industria extractiva con los objetivos de Economía Circular de la Unión Europea.

Como línea futura, la metodología podría escalarse a nivel de cantera mediante la integración de sensores hiperespectrales embarcados en drones, permitiendo cartografías composicionales rápidas y no invasivas, con alto potencial para optimizar la explotación, mejorar la toma de decisiones y reducir la generación de residuos.

6. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por los proyectos HYPOPROCKS (PDC2021-121352-100), financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea "NextGenerationEU"/PRTR, y por el proyecto PID2023-150229OB-100 (HYPERLANDFORM), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER

7. REFERENCIAS

- IGME (2022). Panorama Minero 2022. Piedra Natural. Instituto Geológico y Minero de España - CSIC. <https://web.igme.es/PanoramaMinero/actual/PIEDRA%20NATURAL%202021.pdf>
- Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., ... & Klein, A. J. (2017). *USGS spectral library version 7* (No. 1035). US Geological Survey.
- Rodríguez Álvarez, I., García-Meléndez, E., Ferrer-Juliá, M., Bakker, W., Cruz, J. A., & Espín de Gea, A. (2025). Teledetección hiperespectral de proximidad para la caracterización de rocas carbonatadas en el infrarrojo de onda corta (SWIR). *Geogaceta*, 77, 55–58. <https://doi.org/10.55407/geogaceta108997>
- Zaini, N., Van der Meer, F., & Van der Werff, H. (2014). Determination of Carbonate Rock Chemistry Using Laboratory-Based Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4149–4172. <https://doi.org/10.3390/rs6054149>