

# DETERMINACIÓN DE LA PROCEDENCIA DE MÁRMOLES ARQUEOLÓGICOS, COMO EJEMPLO PARA LA APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOCIENTÍFICOS

(Provenance determination of archaeological marbles as an example for the use of geoscientific methods)

Thomas Cramer

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, thrcramer@unal.edu.co

(Recibido el 20 de mayo de 2009 y aceptado el 18 de junio de 2009)

## Resumen:

El análisis geocientífico para determinar la procedencia de mármoles usados en la antigüedad griega y romana ayuda a resolver problemas arqueológicos. Este trabajo muestra métodos usados en la caracterización de hallazgos de mármol de Asia menor, que hoy se encuentran en el Museo de Pérgamo, en Berlín. 232 muestras de 39 objetos antiguos y 362 muestras de 20 yacimientos de mármol dieron una base de datos amplia. La frecuente superposición de características de los yacimientos requiere un enfoque multivariado. Pese a todas las técnicas analíticas modernas, las características petrográficas siguen siendo indispensables. Dolomitas medidas por XRD mostraron una buena correlación con Mg.

Mg, Fe, Sr y Mn se determinaron con ICP-OES, y los REE, por medio de ICP-MS. La isotopía estable ( $\delta_{\text{PDB}}$  y  $\delta\text{O}_{\text{PDB}}$ ) dio indicaciones importantes. La estadística multivariada (análisis factorial, clúster, discriminatorio) confirmó la relevancia geológica y la utilidad de las características usadas. La cromatografía de gases de fases volátiles, la catodoluminiscencia y los espectros de resonancia paramagnética electrónica dieron resultados adicionales. Aquí se muestra, con el ejemplo de los mármoles del Altar de Pérgamo, que provienen de Mármara y no de Akkaya, cómo se pudo determinar la procedencia de todos los 39 objetos antiguos investigados.

**Palabras clave:** mármol, altar de Pérgamo, procedencia, isotopía estable, geoquímica, catodoluminiscencia

## Abstract:

The geoscientific analysis with the purpose of provenance determination of marbles used in the greek and roman antiquity helps to resolve archaeological questions. Here we show methods used for the characterization of marble findings from Asia minor, which are now exposed in the Pergamon Museum in Berlin. 232 samples of 39 ancient objects and 362 samples of 20 marble deposits gave a broad database. The frequent superposition of characteristics of the deposits requires a multivariate approach. In spite of all modern analytical techniques, the petrographic characteristics continue being indispensable. Dolomites measured by means of XRD showed a good correlation with Mg.

Mg, Fe, Sr and Mn were determined by means of ICP-OES, and the REE, by means of ICP-MS. Stable isotopes ( $\delta_{\text{PDB}}$  and  $\delta\text{O}_{\text{PDB}}$ ) gave important indications. The multivariate statistic (factorial, to cluster, discriminatory analysis) confirmed the geologic relevance and the utility of the used characteristics. The gas chromatography of volatile phases, the cathodoluminescence and EPR yielded additional results. Here we use the marbles of the Pergamon Altar, which were proved to come from Marmara Island and not from the local deposit of Akkaya, to show how all the ancient objects could be assigned to marble quarries.

**Key words:** marble, Pergamon altar, provenance determination, stable isotopes, geochemistry, cathodoluminescence

## 1. INTRODUCCIÓN

En la antigüedad griega, a partir del siglo VI AC, el mármol se transformó en la roca ornamental preferida, de tal manera que se puede hablar de una cultura del mármol. Al comienzo, su uso se limitó a esculturas hechas de torsos de roca, pero ya pronto se desarrolló una exploración sistemática y una explotación en canteras extensas, que en algunos casos, como Mármara, Paros, Naxos, Thassos o, más tarde, Afrodiasias, adquirieron una importancia primordial como exportadores de mármol en todo el mundo helenístico y romano. Con estos mármoles se construyeron esculturas, columnas, templos, palacios y ciudades enteras.

En vista de esta importancia, no sorprende que en la Europa de finales del siglo XIX, cuando se buscaba fundamentar la propia identidad nacional en la historia helenista y romana, no solamente se realizaron las grandes excavaciones arqueológicas en el Mediterráneo, sino también se dio inicio a la investigación geocientífica, para la determinación de la procedencia de estos objetos de mármol, ayudándose en observaciones de campo y en las técnicas disponibles en su momento, como el recién desarrollado microscopio polarizante, o de análisis químicos básicos (Lepsius 1891).

La caída del muro en Berlín, hace 20 años, abrió para el autor, a partir de 1996, la posibilidad de empezar a caracterizar geocientíficamente los mármoles de treinta y nueve objetos antiguos en el Museo de Pérgamo y compararlos con muestras de veinte yacimientos de mármol, recolectadas en canteras (ver figura 1) y afloramientos, en Grecia y Turquía, principalmente.



Figura 1. Principales sitios antiguos y yacimientos de mármol investigados en Grecia y Turquía

En casi todos los casos, se logró asignar los objetos antiguos a sus yacimientos de origen (Cramer, 2004); es decir, se logró determinar su procedencia y ayudar así a los arqueólogos a resolver y replantear varias preguntas (Heilmeyer, 2008).

A continuación, se describen algunos métodos y resultados de este trabajo y de investigaciones posteriores, que pertenecen a una disciplina: la arqueometría, que por su metodología geocientífica interdisciplinaria y por la necesidad de comprender mejor los geomateriales usados en arquitectura y arte, encuentra cada vez más interés también en América Latina, para ayudar a comprender mejor algunos aspectos de la historia y de la tecnología precolombina, colonial y reciente.

## 2. MARCO GEOLÓGICO

En varias partes al norte y sur del mar Mediterráneo, se encuentran espesos estratos de calcita y dolomita, de origen biogénico, formados durante el mesozoico, en los alrededores del enorme viejo mar Tetis.

Vastas áreas sufrieron varias fases de metamorfismo regional, que llevaron a la formación de cinturones de montañas como los Alpes, transformando las calizas en mármoles (ver Cramer, 2005). Hoy, algunos de ellos forman yacimientos de mármoles explotables en unas docenas de yacimientos, con un significado mas allá del mero uso local (ver figura 1).

Entre los más famosos y ricos yacimientos explotados ya en la antigüedad, se encuentran los de Carrara (Alpes apuanas) en Italia; en Grecia, cerca de Atenas, los de Pentéli e Himeto, en la zona pelagónica, y los de Naxos, Paros y Ephesos, en la zona cicládica, zona que continúa hacia el este turco en el macizo del Menderes, con un cinturón meridional de yacimientos cerca del lago Bafa (Milet y Heracleia), Milas, Yatağan etc., hasta Afrodisias.

Más al norte, se destaca el extenso yacimiento de Mármara/Proconesos, que cubre el tercio septentrional de esta isla situada en el mar de Mármara, al oeste de Estambul -la vieja Constantinopla y Bizancio-; y al noroeste, la isla de Tassos con sus localidades de mármoles calcíticos de Alyki en el sur y dolomíticos en el norte.

Para poder determinar la procedencia de objetos antiguos de mármol en los distintos yacimientos, se deben encontrar características que, reflejando las condiciones distintas de sedimentación, diagénesis, fases metamórficas y una historia tectónica, se expresen en distintas características petrográficas, mineralógicas, geoquímicas, isotópicas, etc. (ver figura 2).

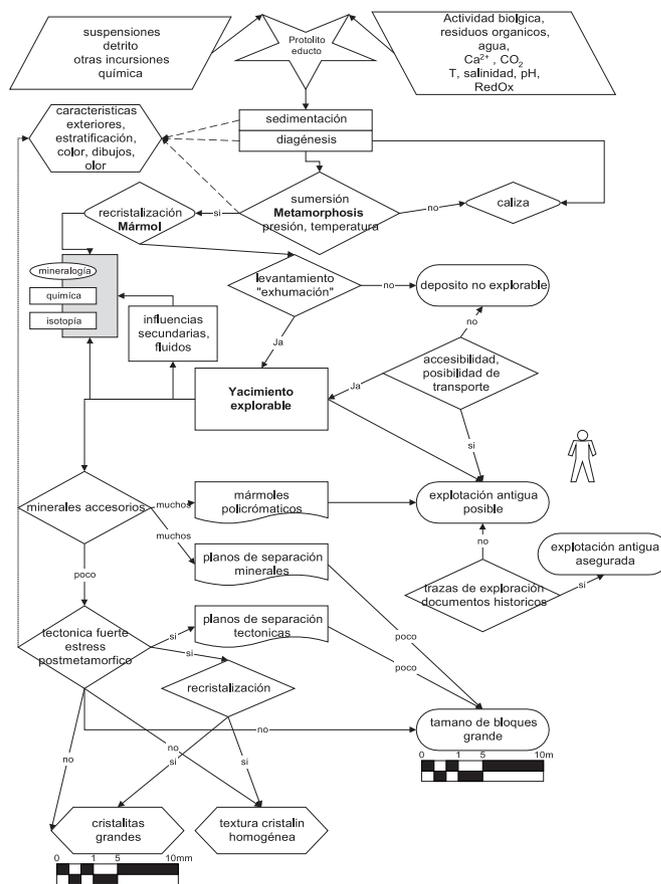


Figura 2. Diagrama de flujo mostrando factores geogénicos relacionados al posible uso de mármoles en la antigüedad y factores para la determinación de su procedencia

## 3. METODOLOGÍA

En total fueron analizadas geocientíficamente 232 muestras de 39 objetos antiguos y 362 muestras de 20 yacimientos de mármol, que suministraron una base de datos amplia. El hecho de que los griegos utilizaron preferiblemente mármoles blancos casi puros, de calcita o dolomita, hace más difícil una discriminación por propiedades exteriores, y aumenta la problemática de una frecuente superposición de características de los mármoles. Por lo tanto, no conviene confiar en la utilización de un solo método analítico y/o pocos datos, aunque sean el resultado de los métodos analíticos más sofisticados. Al contrario, un enfoque multivariado es indispensable para conseguir resultados confiables.

Pese a todas las técnicas analíticas modernas, las características petrográficas macroscópicas y microscópicas siguen siendo de suma importancia. Microfotografías de toda el área de 400 secciones delgadas facilitan la distinción de los granos con diámetros máximos, entre menos de uno y hasta 100 mm, y distribuciones características, reflejando las condiciones variantes de recristalización y destrucción parcial de los granos. La difracción con rayos X (Philips PW1710, 50 kV, 30 mA, tubo Cu-LFE,

monocromador de grafito, 3-80° con 0,02° cada 2,5s) permitió medir principalmente los contenidos de dolomita, calcita y cuarzo, el último como componente principal del residuo ácido-insoluble. Se mostró una buena correlación entre los contenidos de dolomita medido por DRX y MG medido por ICP-OES. Además de Mg, se midieron con ICP-OES (*Perkins Elmer Optima 3000 xl*) los tenores de Fe, Sr, Mn, Ba y Ca, elementos contenidos principalmente en la red cristalina de los carbonatos<sup>1</sup>. La suma de Mg y Ca llegó casi siempre a alrededor del 100%. De la misma solución<sup>2</sup>, por medio de ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass-Spectrometer DRC-e PerkinElmer/SCIEX) se midieron los elementos de tierra rara (REE incluyendo Y), Sr y Ba<sup>3</sup>.

La exclusión de varios elementos medidos se debe a la ya mencionada pureza de la mayoría de los mármoles relevantes (al contrario del caso de Ca, los efectos matriz fueron el problema, por su alto contenido que, adicionalmente, requería factores de disolución hasta 5000), la que a su vez hizo descartar la utilización de fluorescencia de rayos X (FRX) después de algunos intentos. La medición de Sr y Ba con ambos métodos mostró buena coincidencia; una dilución de 250 dio desviaciones de 9 ± 7% (0,41 a 25wt% de Sr en las muestras), ICP-OES mostró desviaciones positivas máximas en contenidos de Sr >150 ppm y desviaciones negativas máximas en el intervalo 42 < Sr < 69 ppm.

En la tabla 1 se comparan datos de muestras analizadas con AAS, después de extracción con HCl (Germann et al., 1988) y ahora con ICP-OES, después de extracción con HNO<sub>3</sub>. También allí las desviaciones son moderadas, y corresponden a variaciones naturales en las rocas, principalmente, aunque con ICP-OES hay una tendencia de aumento de los valores de Sr y disminución de Fe y Mn.

Entre las principales ventajas de ICP-MS figura, además de su alta capacidad de detección, la posibilidad de medir

los REE sin enriquecimiento previo. Estos elementos comprenden la serie IIIA del sistema periódico de elementos, menos Sc, o sea los lantanoides, y además se incluye Y. Su comportamiento químico es similar, pero con unas particularidades que permiten conclusiones para las condiciones de formación geológica (De Baar et al., 1991; Jones et al., 1996; Ver Lipin y McKay, 1989, y McLennan, 1989); son muy electrófilos, por lo que forman muchos compuestos ionares y complejos (boratos, carbonatos, óxidos, silicatos, fosfatos, etc.), con unos 200 minerales. Sus radios iónicos, dependiendo del número de coordinación, (e.g. Ce<sup>3+</sup> 10,1 nm y 11,96 nm) son similares a los de Ca y Sr, y los pueden sustituir en partes. La anomalía negativa de Ce, uno de los factores discriminatorios más importantes de los mármoles investigados, que corresponde a la interacción de Ce<sup>3+</sup> o Ce<sup>4+</sup> con el agua marina y la influencia de componentes detríticas terrestres, la hemos calculado utilizando la normalización PAAS (*Post-Archean Australian Shale, McLennan, 1989*), según la fórmula:

$$Ce_{neg} = \frac{Ce}{79,6} * \frac{2}{(La/38,2 + Pr/8,83)}$$

con Ce, La, Pr: contenido en ppm

Cifras: valores normalizadores en PAAS (ppm)

Para medir la isotopía estable (δC<sub>PDB</sub> y δO<sub>PDB</sub>) de 378 muestras, se disolvieron 10-15 mg de polvo de mármol según el método estándar (Craig y Craig, 1972) en ácido fosfórico, y se analizó la relación entre <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O y <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C en el CO<sub>2</sub>, liberado en un espectrómetro de masas. Los resultados se presentan en la notación PDB en permil. Para la catodoluminiscencia, se prepararon secciones delgadas (pero con 50, en vez de 25, micrómetros de espesor), pulidas en ambas caras, y se irradiaron con electrodos acelerados, en el Instituto de Geología de la Universidad Bern (Ramseyer et al., 1992). La estadística multivariada (análisis factorial, clúster, discriminatorio) confirmó la relevancia geológica y la utilidad de las características usadas. Gracias a la combinación de las diferentes características, todos los objetos antiguos pudieron ser asignados a los diferentes yacimientos.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS

Aquí se presentan, de manera ejemplar, argumentos que llevaron a asignar a los mármoles del Altar de Pérgamo (Friso Grande y Friso Télefo, construido en 170 AC, bajo el rey Eumenes II) a las canteras de la isla de Mármara/Proconesos, en el mar Bósforo, a más de 300 km de distancia, y no a las de Akkaya, en cercanías de la capital del reino de Pérgamo. Diferentes autores (Rybach y Nissen, 1965; Schuchhardt, 1912) habían postulado a las últimas como fuentes probables. En la tabla 2 se comparan las características de los mármoles del Altar de Pérgamo (Friso Grande y Friso de Télefo), que son

Tabla 1. Comparación de contenidos de elementos por ICP-OES y AAS

Código muestra	Procedencia muestra	Mg wt%	Fe ppm	Sr ppm	Mn ppm	Fe/Sr	Fe/Mn
Nx21,1 OES	Naxos,	1,16	64,6	153	48	0,42	1,34
21,1 AAS	Apollon	0,94	40	115	40	0,35	1,00
Nx21,11 OES	Naxos,	0,26	35	117	9,2	0,3	3,8
21,11 AAS	Kinidaros	0,29	50	90	15	0,56	3,33
PaLy38T, OES	Paros	0,17	10,7	212	5,19	0,05	2,06
38TUM AAS	Lychnites	0,2	30	180	18	0,17	1,67

1. Los resultados para Na, K, Zn, P no parecieron confiables.

2. 0,2 g muestra disuelta en 10 ml HNO<sub>3</sub> (subboiled, 6 Mol/l) y en baño de vibración con 75 °C extraída durante dos horas. La solución se filtró y pasó en un tubo de vidrio que se llenó después con agua ultrapura (Milli-Q, 18 MO, Millipore) a 50 ml. Para la medición se diluyó la solución con 0.5 Mol/l HNO<sub>3</sub> 1:10 (factor de disolución total VF=2500) y puso Ru/Re como estándar interno.

3. Los valores de Rb, Zr, Cs, Hf, Pb, Th, U y parcialmente Ca no parecieron confiables

iguales a las de Mármara/Proconesos (ver, por ejemplo, Germann y Cramer, 2005), con los de Akkaya.

**Tabla 2.** Comparación de las características de los mármoles de Mármara, del Altar de Pérgamo, con las de Akkaya; los argumentos con más relevancia están en negrilla

	Marmara/ Altar de Pergamon	Akkaya
<b>Características Petrográficas:</b>		
Color	(gris-)blanco,	Blanco homogéneo
Bandeamiento estratificación	<b>Bandeamiento gris paralelo (en el Altar normalmente paralelamente a la superficie de elaboración)</b>	Escaso bandeamiento y si se da, solamente de manera discontinua
Distribución de granos, Diámetro de Granos Máximos (MGS)	Bimodal a lognormal 2 – 3,5 mm	Más homogénea 2,3 – 3,6 mm
Maclas en los cristales de calcita	Muchas, en partes torcidas	Pocas
Límites de granos	Serradas, irregulares	Más regulares con tendencia a triple-junction
Fases minerales	En promedio 98 wt% calcita, 0-4 wt% dolomita; accesoriamente cuarzo, micas, pirita, óxidos de Fe	97-99 % calcita, 0,76-2,5 wt% dolomita; Acc.: algo más de cuarzo, micas, óxidos de Fe
Liberación de olor durante destrucción mecánica?	<b>Fuerte como H<sub>2</sub>S – huevos podridos</b>	Libre de olor
<b>Composición química:</b>		
Mg wt%	0,21 – 1,1	0,16 – 0,5
Sr (ICP-MS + ICP-OES) ppm	<b>113 – 275</b>	342 – 695
Fe (ICP-OES) ppm	<b>8 – 91</b>	342 – 695
Mn (ICP-OES) ppm	<b>2,5 – 10,1</b>	19 – 39
Σ SEE (ICP-MS) ppm	0,05 – 5,2	1,03 – 1,89
Σ SEE/Y	<b>0,32 – 1,46</b>	2,47 – 4,30
Anomalía negativa de Ce?	<b>Si, 0,2 – 0,5</b>	No, 0,82 – 0,93
Y/Ho (valores más bajos en partes bandeadas)	86 – 150	67 – 98
Catodoluminiscencia	<b>Azul a orange débil</b>	Rojo y naranja intenso
<b>Isotopía estable O/C:</b>		
δ <sup>18</sup> O <sub>PDB</sub>	-8,5 – -9,13 / -0,5 – -4,8	-12 a -16
δ <sup>13</sup> C <sub>PDB</sub>	1,1 – 3,5	1 – 2
<b>Otros argumentos:</b>		
Disponibilidad de mármol	Yacimiento muy grande, todavía uno de los más grandes proveedores de Turquía hoy en día.	Lentes de mármol pequeños
Situación logística	Posibilidad de transporte por barco al lugar de utilización	Solamente transporte por tierra y áreas montañosas difíciles

Los mármoles de Akkaya, situados en cercanías de intrusiones granodioríticas, son resultado de metamorfismo de contacto. Pese a sus mayores contenidos de elementos, como Fe, Mn y Sr, su color es más blanco. Les falta el bandeamiento gris paralelo que es característico de los mármoles de Mármara (ver figura 2, página siguiente), no apreciado por los griegos, pero mucho más por los romanos imperiales y en Bizancio. Inclusiones de restos de materia orgánica no completamente oxidada, incluyendo pirita, son los responsables de este color gris-blanco, y también de un olor fuerte exhalado, como de huevos podridos. Con cromatografía de gas, se pudo mostrar que se encuentran varias sustancias orgánicas volátiles más encerradas en inclusiones y límites de granos (Cramer, 2004) cuando se tritura el mármol. Un factor adicional que debilita el libre paso de la luz blanca es la textura muy heteroblástica, con granos máximos hasta 3,5 mm, en una matriz de granos finos, límites de granos cerrados y muchas maclas torcidas (ver figura 3, página siguiente), mientras, como lo indica figura 4 (ver página siguiente), los mármoles de Akkaya son más homeoblásticos y de tamaños en promedio más grandes (MGS 3,6 mm).

Entre los métodos que revelan con más claridad la diferencia entre estos dos tipos de mármol, se encuentra la catodoluminiscencia (ver figura 5, página siguiente). Todas las muestras de mármoles de Proconesos y del Altar tienen un aspecto similar al expuesto en figura 5 (izquierda); algunas con una intensidad mayor o menor, con un tono más rojizo o más azul, etc.; pero los contenidos mayores de elementos como Fe y Mn, y también de los REE en la muestra de Akkaya, se reflejan en una intensidad mucho mayor de los colores, y además parece que en los límites de grano hay un fuerte enriquecimiento de elementos estimulantes para la luminescencia, posiblemente a raíz de fluidos movilizados por los procesos relacionados con el metamorfismo de contacto. Estos fluidos también pueden haber sido causantes del empobrecimiento de isótopos pesados de oxígeno (δO<sub>PDB</sub> -13,74 - -11,81 en los mármoles de grano fino de Eski Maden, en la misma región del Kozak, al N de Pérgamo, reflejan un empobrecimiento aún mayor). Si hubiésemos aplicado solamente la isotopía estable (como lo hacen muchos autores), ésta hubiera sido un argumento a favor de la procedencia de Akkaya, porque entre las primeras mediciones del Friso de Télefos se dieron valores igualmente negativos. Sin embargo, con el tiempo pudimos mostrar que en la Isla de Mármara, hay de hecho dos campos isotópicos (PR-1 y PR-2 en figura 6 y figura 7, página siguiente) y no solamente uno (PR), como se sostenía en los años anteriores.

La figura 8 (ver página siguiente) ilustra posibles razones y mecanismos de esta variación isotópica: mientras la metamorfosis tiende a concentrar y a agrupar ciertos mármoles en campos isotópicos restringidos, posteriores fluidos hidrotermales o meteóricos suficientemente reactivos tienden a poner el equilibrio hacia isotopías más livianas. Esta tendencia es más clara en el caso del oxígeno que del carbono (solamente concreciones cársicas, después de la disolución y reprecipitación de la calcita, muestran un fuerte empobrecimiento de carbono pesado (δC<sub>PDB</sub> < -10, en figura 8, página siguiente). Mármoles directamente al lado de esquistos y de diques lamprofiricos, que cortan la roca y probablemente están asociados con intrusiones graníticas en el sur de la isla, también sufrieron un empobrecimiento de isótopos pesados de O y de C por los fluidos calientes, que se movieron a áreas más grandes de mármol, cuya composición isotópica estaba en el rango del campo PR-1. Ya no alcanzaron a variar los valores de δC<sub>PDB</sub>, pero sí de δO<sub>PDB</sub>, formando el campo PR-2.

Por último, también las curvas de distribución de los elementos de tierras raras apoyan la tesis de que Akkaya no puede ser fuente del material de construcción para el Altar de Pérgamo. Aunque los valores de Akkaya se encuentran entre el mínimo y el máximo de las muestras del Altar y de la Isla (ver figura 9, página siguiente), las

últimas tienen una fuerte anomalía negativa de Ce y mucho más Y, mientras la curva de los mármoles de Akkaya es casi horizontal. Estas muestras de distribución obedecen a condiciones de formación de las calizas en agua marina bien distintas (vea por ejemplo Bau et al. 1995, Bau et al. 1996).



Figura 3. Figura del Friso de Télefo (TF48), en la que se puede apreciar el bandeamiento oscuro paralelo, característico de los mármoles de Mármara (cantera moderna con pliegue isoclinal, cerca de Mandira)



Figura 4. Sección delgada de mármol del Friso de Télefo TF8 (izq.) y de Mármara Silinte (der.), N+, margen corto 2,4 mm

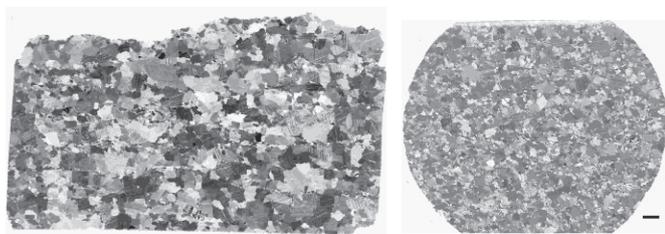


Figura 5. Sección delgada de mármol de Akkaya (izq.) con cristales más homogéneos y grandes que los de Proconesos (Placa B16 der.), N+, fotografía blanco y negro, escala 2 mm

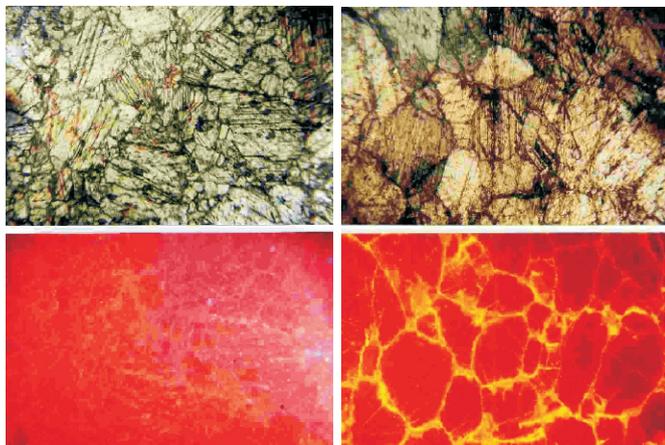


Figura 6. Microfotografía sin (arriba) y con (abajo) catodoluminiscencia de muestra del Friso de Télefo TF 34 (izq.) y de Akkaya 3 (der.), margen corto 8 mm

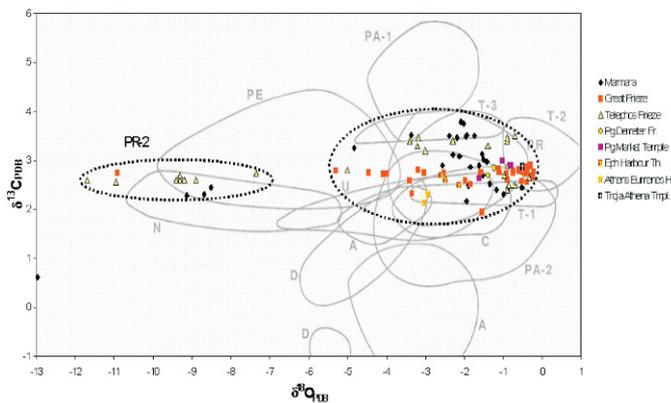


Figura 7. Isotopía de C y O de objetos antiguos y de muestras de canteras de mármoles de Proconesos investigados mostrando la existencia de un segundo campo isotópico (PR-2) en este yacimiento importante. Campos grises de mármoles clásicos según Moens et al. (1992) y Herz (1987): A: Aphrodisias, C: Carrara, D: Dokimeion-Afyon, Ef: Ephesos, Hym: Hymettos, N: Náxos, PA: Paros, PE: Pentelico, PR: Proconesos-Mármara, T: Thásos, U: Uşak

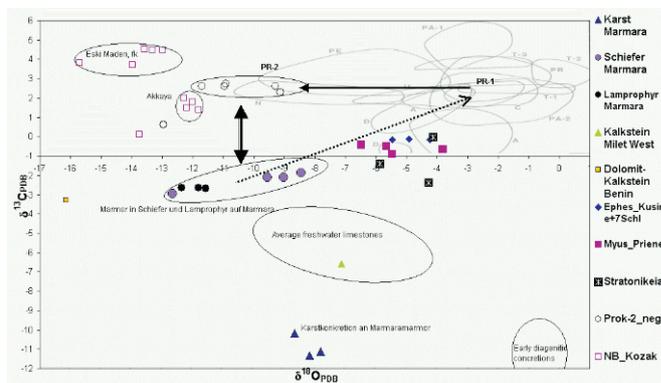


Figura 8. Muestras de mármol con empobrecimiento de isótopos pesados. El campo PR-2 se derribó del campo PR-1, de la isla Mármara (Proconesos), por interacción con soluciones empobrecidas en isótopos de O pesados, producto de la formación de esquistos y lamprofiros (flecha interrumpida). Tomado de Cramer, 2004

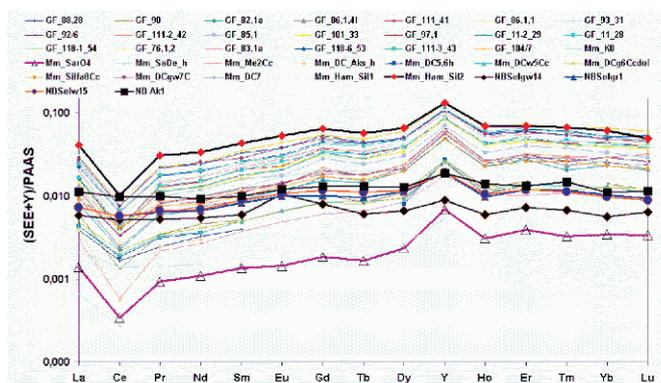


Figura 9. Elementos de tierras raras normalizados con PAAS de los mármoles de Akkaya (NB, al norte de Pérgamo) muestran una curva casi horizontal, mientras los mármoles provenientes de Proconesos, con una gran variación de los contenidos absolutos, tienen una curva de distribución similar y se destacan por una fuerte anomalía negativa de serio, como también por relaciones REE/Y alrededor de 1, en contraste con 2,5 - 4,3 en el caso de los mármoles de Akkaya

## 5. CONCLUSIONES

Aplicando un enfoque multivariado, que utiliza métodos analíticos geocientíficos adecuados, se puede determinar

la procedencia de mármoles y, como en el caso tratado aquí, descartar Akkaya como posible fuente de mármol para el Altar de Pérgamo. Es importante entender que los materiales de construcción y los de arte, en gran parte, son material geológico que requiere una comprensión y un procesamiento adecuado (ver figura 2). El análisis de 232 muestras de 39 objetos antiguos y 362 muestras de 20 yacimientos de mármol dio una base de datos amplia para el desarrollo de un sistema experto que permite, también a no geocientíficos, hacer por lo menos una preselección de posibles fuentes de mármoles utilizados en la antigüedad, pero que sirve, igualmente, como modelo para la toma de decisiones sobre diferentes problemas.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Klaus Germann, profesor de la Universidad Técnica de Berlín (TUB), y al entonces director de la Antikensammlung - Stiftung Preussischer Kulturbesitz Berlín, Profesor Dr. Wolf-Dieter Heilmeyer y al Dr. Volker Kästner, por su dedicación; igualmente, a todos los colaboradores de la TUB, del GeoForschungszen-trum y Alfred-Wegener-Institut Potsdam. La financiación de este trabajo la realizó la Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

Agradezco, de la misma manera, a la Universidad Nacional de Colombia, que apoya la continuación de estas investigaciones.

## 7. REFERENCIAS

- Bau, M., Dulski, P. y Möller, P., 1995. Yttrium and holmium in South Pacific seawater: Vertical distribution and possible fractionation mechanisms. - *Chemie der Erde* 55: 1-15
- Yttrium and lanthanides in eastern Mediterranean seawater and their fractionation during redox-cycling. - *Marine Chemistry* 56: 123-131
- Craig, H. y Craig, V., 1972. Greek marbles: determination of provenance by isotopic analysis. - *Science* 176: 401-403
- Cramer, T., 2004. Multivariate herkunftsanalyse von marmor auf petrographischer und geochemischer basis - das beispiel kleinasiatischer archaischer, hellenistischer und römischer marmorobjekte der berliner antiken-sammlung und ihre zuordnung zu mediterranen und anatolischen marmorlagerstätten. - dissertation fg lagerstättenforschung. Bau, M., Möller, P. y Dulski, P., 1996
- Cramer, T., 2005. Procedencia de mármoles usados en la antigüedad griega. En: *Memorias X Congreso Colombiano de Geología*, 26-29 julio 2005, CD-ROM
- De Baar, H. J. W., Schijf, J. y Byrne, R. H., 1991. Solution chemistry of the rare earth elements in seawater. - *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* 28: 357-373.
- Germann, K. y Cramer, T., 2005. Methoden der herkunftsbestimmung für naturwerksteine - das beispiel des marmors. - *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften - ZDGG* 156: 25-31.
- Germann, K., Gruben, G., Knoll, H., Valis, V. y Winkler, F. J., 1988. Provenance characteristics of Cycladic (Paros and Naxos) marbles - a multivariate geological approach. - In: Herz, N. y Waelkens, M. (eds.), *Classical marble: geochemistry, technology, trade.* Kluwer Academic Publishers, pp. 251-262.
- Heilmeyer, W.-D., 2008. Berliner Marmore aus Kleinasien - Bericht über ein geologisch-archäologisches Projekt 1994-2004. - In: *Deutsches Archäologisches Institut (ed.) Jahrbuch des Deutschen Archäologischen Instituts.* Walter de Gruyter, pp. 127-161
- Herz, N., 1987. Carbon and oxygen isotopic ratios: a data base for classical Greek and Roman Marble. - *Archaeometry* 29: 35-43.
- Jones, A. P., Wall, F. y Williams, C. T. (eds.). 1996. *Rare Earth Elements - Chemistry, origin and ore deposits.* - Chapman & Hall.
- Lepsius, R., 1891. *Griechische Marmorstudien.* - *Abhandlungen Königl. Akademie der Wissenschaften, Phil.-Hist. Kl.* 1890.
- Lipin, B. R. y McKay, G. A. (eds.). 1989. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements.* - Mineralogical Society of America.
- McLennan, S. M., 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes. - In: Lipin, B. R. y McKay, G. A. (eds.), *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements.* *Reviews in Mineralogy*, pp. 169-200.
- Moens, L., Roos, P., de Paepe, P. y Lunsingh Scheurleer, R., 1992. Provenance determination of white marble sculptures from the Allard Pierson Museum in Amsterdam, based on chemical, microscopic and isotopic criterias. - In: Waelkens, M., Herz, N. y Moens, L. (eds.), *Ancient stones : quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period.* Leuven University Press, pp. 269-276.
- Ramseyer, K., Decrouez, D., Barbin, V., Burns, S. J., Moens, L., de Paepe, P., Roos, P., Chamay, J. y Maier, J. L., 1992. Provenance Investigation of marble artifacts now in the collection of the Museum of Art and History in Geneva. - In: Waelkens, M., Herz, N. y Moens, L. (eds.), *Ancient stones: quarrying, trade and provenance : interdisciplinary studies on stones and stone technology in Europe and Near East from the prehistoric to the early Christian period.* Leuven University Press, pp. 287-292.
- Rybach, L. y Nissen, H. U., 1965. Neutron activation of Mn and Na traces in marbles worked by the ancient Greeks. - *Proc. Radiochemical Methods of Analysis* 1: 105-107.
- Schuchhardt, C., 1912. *Stadt und Land.* - In: Conze, A. (ed.) *Altertümer von Pergamon*, p. 71.