

Estudios analíticos en el Pórtico de la Gloria. Metodología científica aplicada al seguimiento de los tratamientos de restauración

María Antonia García Rodríguez¹, Pedro Pablo Pérez², Livio Ferrazza³, María Teresa Pastor Valls³, Consuelo Ímaz Villar¹, Noelia Yanguas¹

¹Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE-MCD), Madrid, España

²DACITEC, colaborador externo del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE-MCD), Madrid, España

³Colaborador externo del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE-MCD), Madrid, España. Plan Nacional de Investigación en Conservación de Patrimonio (PNIC)

Estudio de los materiales del Pórtico de la Gloria

1. Introducción

Transcurrido ya cerca de un año del fin de nuestra «relación científica» con el Pórtico, toca hacer un resumen de cuál ha sido la aportación de los estudios analíticos al proyecto de restauración de esta excepcional obra. Los cuatro años de estudio han sido para nosotros un reto constante, un continuo aprendizaje y una oportunidad de trabajar coordinadamente con un conjunto de profesionales procedentes de las más diversas áreas de conocimiento. En este sentido, los ensayos analíticos aplicados al estudio del conjunto escultórico del Pórtico de la Gloria, que comenzaron hace más de diez años, han supuesto un estudio multidisciplinar, con distintos equipos de trabajo, en los que han participado profesionales de muy diversos campos: arqueólogos, arquitectos, biólogos, canteros, documentalistas, físicos, historiadores, geólogos, ingenieros, químicos y restauradores. La enorme cantidad de datos obtenidos de estos estudios ha servido para conocer de una manera muy precisa cuál era el estado de conservación del Pórtico de la Gloria, evaluar los riesgos existentes y establecer qué tipo de actuaciones eran necesarias para estabilizar los procesos de deterioro existentes. Asimismo, se ha realizado un importante estudio histórico material sobre las intervenciones realizadas en el Pórtico a lo largo del tiempo, con el fin de relacionar alguna de ellas con las patologías detectadas.

El estudio científico completa los datos históricos de un bien cultural, investigando sobre la naturaleza de los materiales utilizados, la técnica de ejecución y el comportamiento de la obra a través del tiempo; asimismo asesora al restaurador sobre las técnicas y productos a utilizar en cada caso. Desde este campo se intenta aportar conocimientos antes, durante y después de los procesos de intervención. La puesta en común de los resultados obtenidos por los profesionales de las distintas disciplinas es necesaria para realizar el diagnóstico y el correcto seguimiento de la restauración. Además, los procedimientos de intervención deben adaptarse a los resultados obtenidos.

El estudio de los materiales de las policromías del Pórtico de la Gloria se ha desarrollado mediante dos líneas de trabajo analítico complementarias y de gran interés tanto para la documentación del conjunto escultórico como para proporcionar el apoyo científico necesario a los trabajos de restauración y conservación del mismo. Ambos proyectos han sido supervisados por el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). El estudio de la secuencia de policromías fue realizado en diferentes etapas, desde 2011 hasta 2018, en las que se logró establecer un protocolo de estudio por parte del laboratorio Arte-Lab S.L. y la empresa Petra S. Coop., basado en la fusión de los estudios analíticos con la evaluación *in situ* de la correspondencia de policromías; dicho protocolo permitió establecer los criterios que definieron la secuencia de intervenciones. Por otra parte, se desarrolló una línea de trabajo especializada en los laboratorios del IPCE, que permitió dar respuesta a numerosos interrogantes sobre las alteraciones observadas en diferentes materiales presentes en las policromías del Pórtico, contribuir a la elaboración de los procedimientos de control de los sistemas de limpieza y realizar un apoyo sistemático durante las distintas etapas de la restauración.

Para realizar este estudio se analizaron alrededor de quinientas muestras de diferente tipología —muestras sólidas, raspados superficiales, hisopos de algodón, polvo, residuos, lavados, etc.— y variable carácter material —piedra, policromía, morteros, sales, metal, madera, recubrimientos, cales, etc.—, procedentes de diferentes áreas representativas del Pórtico. Las técnicas analíticas empleadas para la caracterización de los materiales fueron: microscopía estereoscópica, microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido con microanálisis por dispersión de energías de rayos X (SEM-EDX), difracción de rayos X (DRX), espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), espectroscopía Raman y técnicas cromatográficas (GC-MS, Py-GC/MS, HPLC-DAD-QTOF).

2. Estudios científicos previos

Los estudios desarrollados desde un punto de vista científico han sido realizados sobre todo en los últimos veinte años. El primero de ellos corresponde a un proyecto titulado «Estudio, diagnose e medidas urgentes previas a restauración integral do Portico da Gloria. Catedral de Santiago de Compostela», realizado entre los años 1992 y 1993 por una unión temporal de empresas entre la Fundación Empresa-Universidad Gallega (UGA) y CPA S.L. Dentro de este proyecto se efectuó una intervención parcial en tres zonas —tercer nivel de arco central y arcos laterales y figuras de arranque de bóvedas derecha e izquierda— y se redactó una monografía histórico-artística por parte de Serafín Moralejo. Además, se acometió un estudio de las características climáticas y de los materiales del conjunto escultórico y, por último, un análisis de las policromías por parte de Carmen del Valle y José María Cabrera, en el que se incluía una extensa documentación fotográfica, un análisis de los daños existentes, complementado con cartografías de las lesiones, y un estudio de la secuencia estratigráfica de las capas policromas.

Posteriormente, en el año 2000, la empresa Tomos realizó un «Informe sobre el estado de alteración de los basamentos y columnas del Pórtico de la Gloria. Catedral de Santiago de Compostela». En este informe se presentó un estudio de las humedades y sales contenidas en las basas y columnas del Pórtico, se determinaron los factores de alteración —humedades de distinta tipología, sales solubles, rebaje del suelo al cambiar el solado de la nave central en los años cincuenta del siglo xx y factores antrópicos como, por ejemplo, el rito táctil—, se analizaron los granitos y mármoles del soporte y se estableció un posible origen de los mismos, se dictaminó cuál es el estado de conservación en ese momento, se presentó una cartografía de alteraciones y, finalmente, se establecieron unas recomendaciones de actuación.

En el año 2004, un equipo de la Escuela de Ingenieros de Minas de Madrid realizó el estudio «Pórtico de la Gloria. Causas de Deterioro». Dentro de este trabajo se pueden destacar los siguientes aspectos:

- a) análisis microclimático (humedad y temperatura), estudio y cartografía de sales y humedades y determinación de la naturaleza de las sales;
- b) caracterización de los tipos de piedra existentes;
- c) caracterización de la policromía;
- d) descripción de los daños;
- e) realización de estudios con georadar y termografía de infrarrojos y de pruebas de limpieza;
- f) propuesta de actuación con especial énfasis en el control de humedades.

Los estudios realizados por la empresa Coo.Be.C (Cooperativa Beni Culturali) entre los años 2010 y 2012, enmarcados dentro del Programa Catedral, constituyeron sin duda un avance importantísimo en el conocimiento del Pórtico de la Gloria. Dentro de este macroproyecto interdisciplinar, cabe destacar la realización de los siguientes estudios:

- Estudio estructural realizado por la Universidad de Perugia y coordinado por el profesor Antonio Borri, cuyos objetivos fundamentales fueron conocer el origen de las grietas y fisuras y determinar el funcionamiento estructural del Pórtico.
- Estudio constructivo realizado por Rodrigo de la Torre, que ahondó en el conocimiento de materiales, técnicas de tallado y procesos constructivos.
- El estudio de biodeterioro fue abordado de manera simultánea por personal del área de biodeterioro del IPCE y por biólogos contratados por Coo.Be.C. Se realizaron estudios mediante cultivos y se determinaron cuáles eran los microorganismos dominantes: cianobacterias y algas junto a menores porcentajes de actomicetos (bacterias), hongos, bacterias y posibles líquenes.
- El estudio petrológico realizado por Arcadia Ricerche S.L.R. condujo al establecimiento de cuatro grupos de granitos, que fueron comparados con muestras de canteras locales. Dentro de este estudio también se abordaron análisis de alteración del material: grado de inmersión, grado de inmersión por higroscopicidad, porosimetría y medición de sales solubles por cromatografía iónica.
- Estudio de morteros superficiales con determinación del tipo de ligante y árido, así como del contenido en sales. El análisis realizado permitió la determinación de cinco tipos de morteros.
- Estudio de policromía realizado por Artelab S.L. en el que, además del conocimiento de los pigmentos empleados, se establecen las principales fases de policromía existentes.
- Estudio de policromía no invasivo MOLAB, centrado en la identificación de pigmentos y productos de alteración mediante FRX, FTIR, colorimetría y fluorescencia de UV.
- Por último, hay que destacar la realización de distintas pruebas y ensayos en el Pórtico, entre las que podemos destacar las acometidas para la eliminación de depósitos biológicos, sales solubles y concreciones, limpiezas de distinta tipología y sobre distintos materiales, eliminación de juntas, cera y consolidación de piedra.

3. Estudio de los materiales

Se presenta, a continuación, un breve resumen de los materiales más significativos que han sido estudiados en el Pórtico, sin pretender una descripción exhaustiva de estos, puesto que excedería el carácter general que se le quiere dar a este artículo y porque además muchos de ellos han sido objeto, o lo serán próximamente, de estudios específicos.

3.1. Soporte pétreo

Junto al carácter polícromo del Pórtico, la naturaleza esencialmente granítica del conjunto escultórico mateano quizá sea el aspecto más conocido de esta maravilla pétreo.

Así, el material pétreo empleado en el Pórtico de la Gloria corresponde mayoritariamente a rocas graníticas con distintas características (Torre, 2011; Morabito, 2011). El tipo de roca granítica empleada depende, en primer lugar, de su uso en el monumento —sillares lisos, molduras, esculturas, etc.— y, en segundo lugar, de su ubicación en el Pórtico central o en los pórticos laterales —cronología—. De manera general todas las rocas son clasificables petrográficamente como granitos en sentido estricto, si bien se diferencian al menos tres variedades: un granito de tamaño de grano medio a grueso, con alto contenido en feldespato potásico que se emplea en la sillería de los muros y en sillares lisos de la parte inferior y media de fachada y contrafachada; un granito de grano fino, muy leucocrático y homogéneo, empleado en algunas columnas y trabajos escultóricos y decorativos, y por último, un granito con tamaño de grano fino a medio y color pardo amarillento, empleado fundamentalmente en labores escultóricas, pero que también se usa para labores de sillería o en molduras (fig. 1).

En cuanto a la procedencia de estas rocas se han sugerido distintas posibilidades en el entorno próximo de Santiago (Silva *et al.*, 1994): el granito de grano grueso procedería del mismo Santiago, concretamente de canteras de la zona de Conxo-Vidan, hoy desaparecidas por la expan-

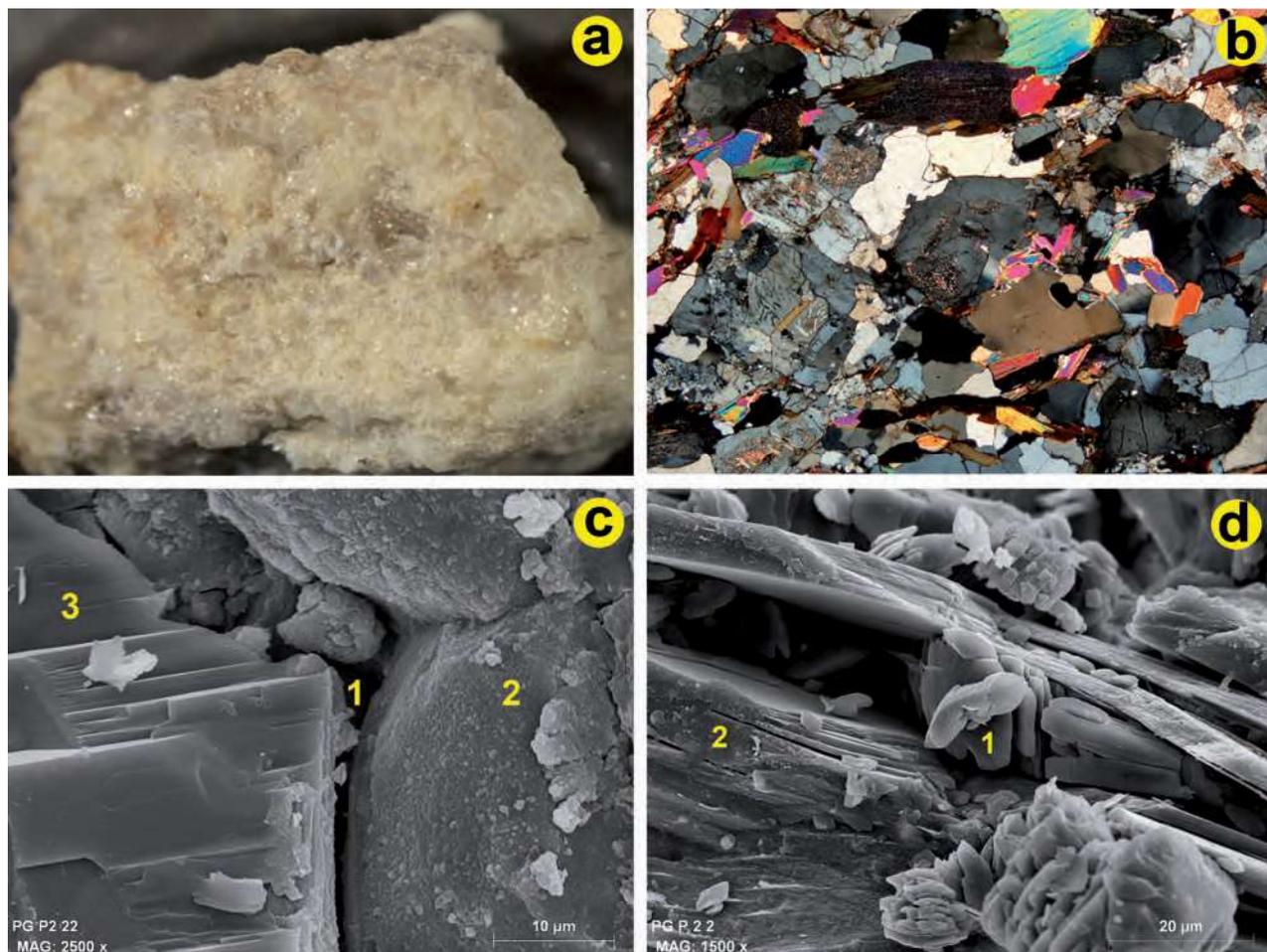


Figura 1. Imágenes correspondientes al material granítico. **a)** Granito leucocrático de las arquivoltas del arco izquierdo. **b)** Imagen microscópica de un granito de dos micas. **c)** Uniones intercristalinas abiertas (1) entre un cristal de albita (2) y cuarzo (3). **d)** Imagen SEM de detalle correspondiente a yeso (1) cristalizado entre los planos de exfoliación de moscovita (2).

sión urbanística de la ciudad; en cuanto a la procedencia de los granitos de grano medio a fino, podría proceder de canteras ubicadas en el entorno de Pedroso-Monte Fontecova-Vrins. Una vez concluida la actividad analítica en el Pórtico, centrada sobre todo en cuestiones relacionadas con la intervención en sentido estricto, está prevista la realización de estudios de caracterización más precisos de todo el material granítico.

En mucha menor proporción que las rocas graníticas se identifican rocas marmóreas; concretamente, se localizan en cuatro columnas —tres del arco central y una del arco norte— y en la cabeza de San Andrés. Aprovechando la restauración del Pórtico, y bajo la dirección de la profesora Pilar Lapuente de la Universidad de Zaragoza, se ha realizado un exhaustivo estudio sobre los mármoles presentes, empleando principalmente técnicas microscópicas e isotópicas. Los resultados de dicho estudio (Lapuente *et al.*, en prensa) indican la presencia de mármoles calcíticos, de colores blanquecinos a grises, de grano fino, frecuentemente bandeados y cuyas características macroscópicas, microscópicas y, sobre todo, isotópicas indican procedencias diferentes: en unos casos de las canteras del entorno de Estremoz (Portugal) y en otros, probablemente, de las canteras de Incio (Lugo).

3.2. Morteros

La situación inicial del Pórtico, con muchos depósitos de polvo y un carácter esencialmente monocromático, no permitía *de visu* una identificación precisa de los morteros existentes ni de su significado en el contexto de la obra. Así una primera aproximación a las juntas mostraba un material de aspecto compacto y rígido, aplicado frecuentemente de forma que sobresalía de la llaga, de notable rigidez y con una tonalidad fundamentalmente parda. Durante la fase de estudios previos llevada a cabo por la cooperativa Coo.Be.C (2010-2012), se encargó un estudio sobre los morteros superficiales —el muestreo en aquel momento no pudo ser ni totalmente significativo, ni exhaustivo ni en profundidad—, pudiendo diferenciar cinco tipos de morteros (Morabito, 2011b): cal hidráulica y cemento con fragmentos de roca pelítica y margosa —el mayoritario—, cal aérea y árido silíceo, cemento y árido carbonatado, cal aérea, cemento y arena silícea y el quinto, cemento con escasa arena carbonatada.

El comienzo de la intervención propiamente dicha supuso un importante avance en el conocimiento de los morteros; por una parte porque se limpiaron y picaron las juntas, con lo cual se pudo observar el material y muestrear con más criterio, y en segundo lugar porque los restauradores, acostumbrados a trabajar con distintos materiales de junta, aportaron interesantes contribuciones sobre la naturaleza de estos materiales¹. El muestreo, realizado por los restauradores y completado en algún caso con muestras recogidas por nosotros, nos ha permitido distinguir, de manera esquemática, los siguientes tipos de morteros:

1. Morteros de color marrón, avellana o beis oscuro, compactos y de aspecto cementoso que son los que se identifican mayoritariamente en las juntas visibles. Se trata de morteros hidráulicos, con una alta proporción de aglomerante y presencia de fragmentos de margas redondeadas, escorias, fragmentos carbonosos y escasos granos de calcita, cuarzo y feldespatos. Interpretamos estos morteros como cementos naturales basándonos en las siguientes características: composición química esencialmente silico-cálcica; presencia de belita y ausencia de alita; presencia de gehlenita (aluminosilicato cálcico indicativo de temperaturas inferiores a 1200°C) y, sobre todo, presencia de fragmentos de margas, la materia prima original que, calcinada a temperaturas entre 800 y 1200 °C, da lugar al cemento natural. Este tipo de aglomerante se utilizó en España desde mediados del siglo XIX, con un máximo uso

¹ En este sentido, véase dentro de esta misma monografía sendos trabajos presentados por Gago y Morillo.

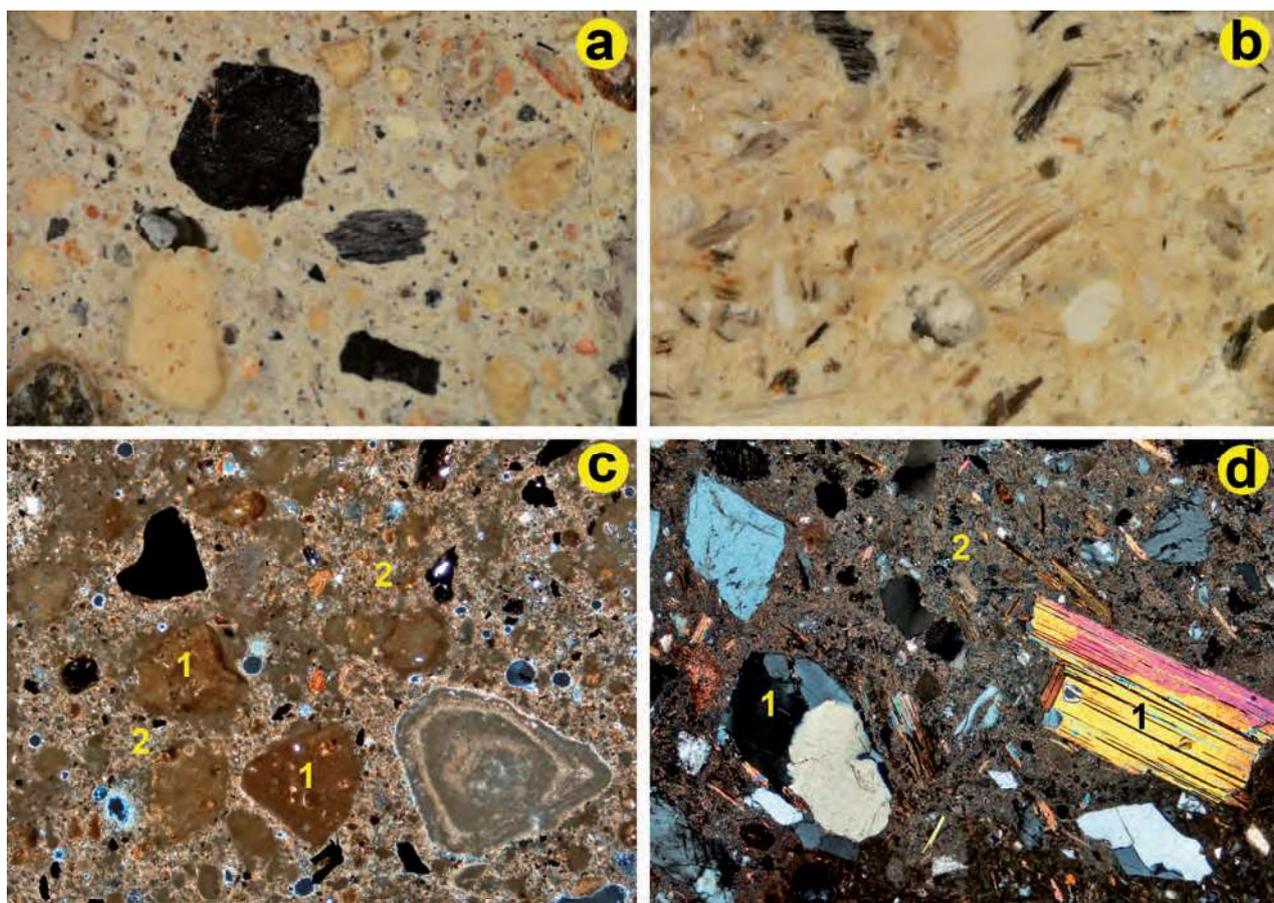


Figura 2. Imágenes correspondientes a morteros de junta del Pórtico de la Gloria. **a)** Imagen *de visu* de un mortero de cemento natural. **b)** Imagen *de visu* de un mortero de cal. **c)** Imagen microscópica de un mortero de cemento natural con fragmentos de margas no calcinadas (1) entre una masa de grano fino de composición silico-cálcica (2). **d)** Imagen microscópica de un mortero de cal con árido silíceo de naturaleza granítica (1) entre el ligante de cal (2).

en el tránsito del siglo XIX al XX y una progresiva disminución de su empleo con posterioridad, sobre todo a partir de los años treinta del pasado siglo (Varas *et al.*, 2005; Mayo, 2015).

2. Morteros de cal con árido silíceo y color amarillo, situados estratigráficamente por debajo de los morteros de cemento natural. Se trata de morteros cuyo ligante corresponde a una cal muy pura, con abundantes señales de recristalización, presencia de caliches carbonatados y árido heterométrico de naturaleza silícea —cuarzo, fragmentos de roca granítica, feldspatos y micas— procedente del machaqueo de rocas graníticas. Estos morteros, que aparecen sobre todo en el Pórtico propiamente dicho, se caracterizan por una notable descohesión granular, una elevada porosidad y por la presencia de abundantes microgrietas (fig. 2).
3. Morteros de cal aérea con árido silíceo y tonalidad blanca. Se trata de un mortero de cal, localizado preferentemente en la contrafachada y que presenta, en general, una mayor compacidad que el mortero de tonalidad amarillenta. El ligante corresponde a calcita micrítica con recristalizaciones puntuales de esparita que engloba un árido silíceo, anguloso y heterométrico —de 4 mm a 60 μm — procedente del machaqueo de rocas graníticas. Es frecuente que presente un acabado superficial de cal con un espesor en torno a 100 μm .
4. De manera irregular y discontinua se identifican morteros de cemento Portland, de color gris, muy duros, con textura matriz-soportada y árido de naturaleza esencialmente carbonatada.

5. Mortero de cera-resina. Mortero singular que aparece de manera aislada en el parteluz y que corresponde a un mortero histórico cubierto por una policromía del siglo XVI o incluso anterior. Se trata de un mortero duro, de aspecto acaramelado, cuyo aglomerante es un material orgánico y que incorpora carga de grano fino de naturaleza fundamentalmente silíceo —cuarzo, feldespatos, micas, escorias férricas, óxidos de hierro, fragmentos de madera calcinada, etc.—.

3.3. Sales

Dentro del carácter multidisciplinar y colaborativo planteado en los estudios del Pórtico de la Gloria, los análisis sobre contenido salino y humedades fueron contratados a la empresa Georotec Technical Solutions. El planteamiento consistió en un análisis inicial del contenido salino mediante conductividad de contacto y de las humedades mediante sondas de contacto, en todo el contexto del Pórtico —Pórtico de la Gloria, contrafachada, tribuna y peineta—. Se realizaron unos estudios en el año 2015, con anterioridad a la intervención material en el Pórtico, y en el año 2018, justo en el momento de darse por finalizada la intervención.

El estado inicial en 2015 reflejaba que el mayor contenido salino se concentraba en el Pórtico de la Gloria propiamente dicho y que los valores más elevados de salinidad se registraban en la mitad sur, con máximos registrados en diversos puntos de las figuras de los apóstoles. También se registraban concentraciones salinas elevadas en las zonas de encuentro con las paredes laterales y en el pilar sur. Es destacable la buena correlación existente entre zonas de máxima humedad y concentraciones salinas elevadas.

El estudio realizado en 2018, tras los trabajos de desalación efectuados en las zonas de máxima concentración salina cartografiadas en 2015, reveló una situación radicalmente diferente, pues los valores de conductividad elevada habían disminuido radicalmente y solo se registraron valores elevados de manera puntual en el tímpano, pilar sur y encuentros con los paramentos norte y sur, aunque los valores alcanzados eran muy inferiores. En consecuencia, se puede decir que las tareas de impermeabilización y aislamiento realizadas en los alrededores del Pórtico —torres, tribuna, etc.— y las tareas de limpieza y desalación llevadas a cabo en el Pórtico han sido efectivas (fig. 3).

Queremos citar también que desde el laboratorio del IPCE se ha realizado un seguimiento de las tareas de desalación acometidas por el equipo de restauradores del Pórtico. En este sentido, se ha trabajado de manera coordinada con las restauradoras a la hora de establecer el lugar y el tiempo óptimo de colocación de las papetas de desalación, determinar su grosor y humectación, medir su conductividad en laboratorio y realizar mapas parciales de concentración salina en las zonas desaladas. Los resultados obtenidos en estos estudios, realizados durante la intervención, son coherentes con los más generales expuestos previamente.

Un último aspecto que se puede reseñar respecto a las sales está relacionado con la aparición de unas manchas rosáceas de biodeterioro vinculadas a la colonización bacteriana. Los estudios realizados tanto en el monumento como en el laboratorio, nos permitieron comprobar cómo estas manchas, dispuestas de manera irregular por los distintos paramentos del entorno del Pórtico, tenían concentraciones elevadas de sulfatos y nitratos, lo cual parece indicar que las bacterias tienen un carácter halófilo.

3.4. La policromía

El contenido de este apartado se centra en el estudio de la policromía con un doble enfoque. En primer lugar, el diagnóstico de sus alteraciones, los mecanismos que las desarrollan y, como consecuencia de lo anterior, la necesidad de aplicar un tratamiento previo de preconsolidación y de adhesión. En segundo lugar, contemplando un carácter esencialmente práctico encaminado al asesoramiento y a dar respuesta a las cuestiones planteadas por los restauradores durante las intervenciones de limpieza

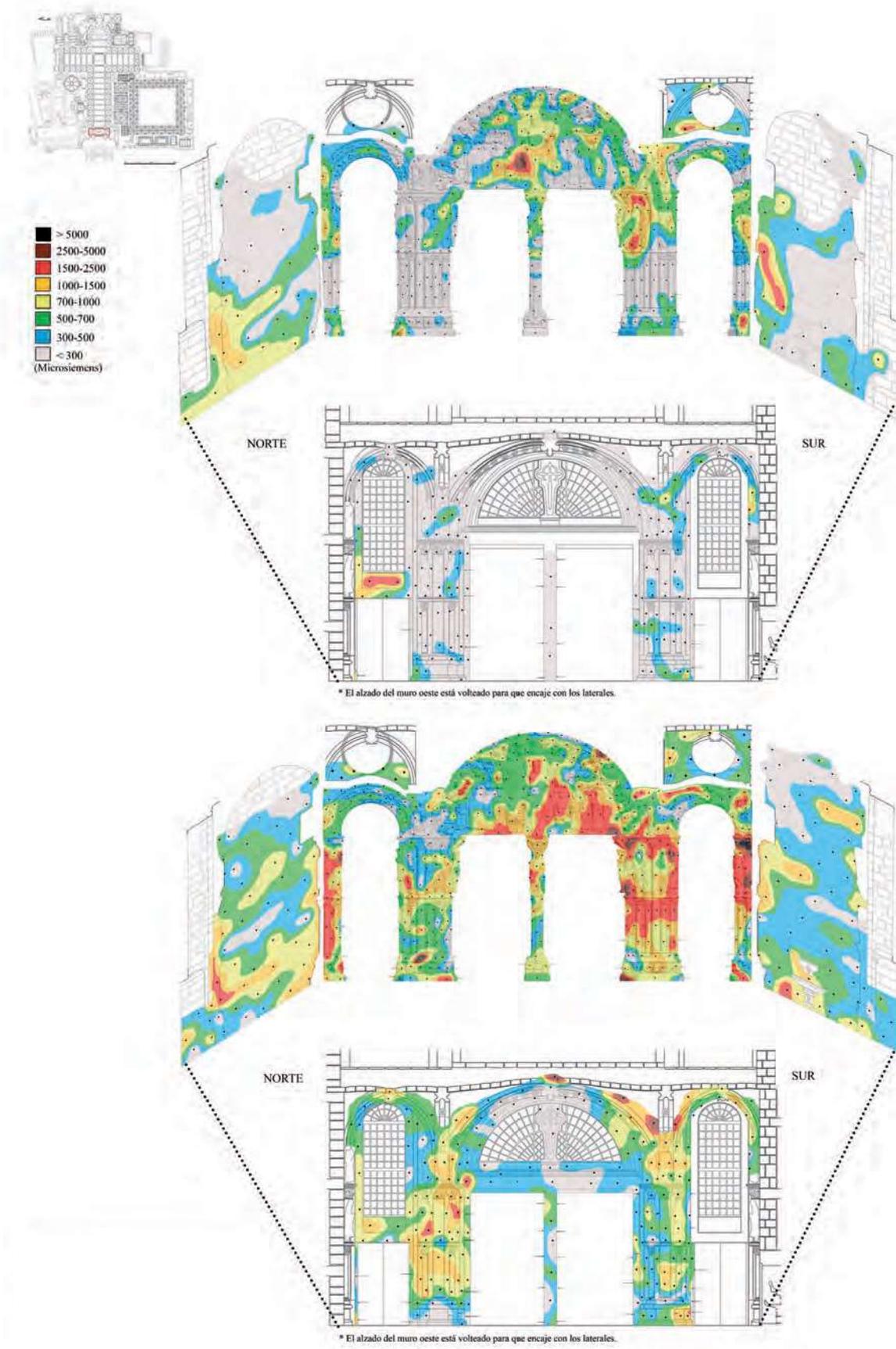


Figura 3. Mapas de sales correspondientes al Pórtico de la Gloria y la contrafachada en 2015 (abajo) y 2018 (arriba). Obsérvese la disminución de los valores de conductividad tras la intervención. Elaborado por Geoartec.

realizadas en el Pórtico. Hay que destacar la importancia de este estudio, puesto que los métodos de limpieza pueden redefinirse durante la intervención, debido a la heterogeneidad del estado de conservación del soporte y de la policromía en el conjunto escultórico.

De manera breve e introductoria, ya que esta cuestión ha sido desarrollada en diversos trabajos (Cortázar y Sánchez, 2017), se puede señalar que la policromía del Pórtico responde a distintas fases policromas, que se suceden en el tiempo y que en unos casos tienen un carácter general y en otros parcial. Dentro de estas fases, se puede destacar la policromía original, entre cuyos pigmentos cabe citar el bermellón, el lapislázuli, el oro, las tierras, el minio, el albayalde, el cardenillo y el negro carbón vegetal, aglutinados con aceite de lino.

3.4.1. La policromía: sus alteraciones

El grado de alteración observado en la policromía del Pórtico de la Gloria está relacionado con una serie de factores, entre los cuales destacan los siguientes:

1. La composición química, el tamaño de grano y la morfología del pigmento, que condicionan su alterabilidad.
2. La naturaleza y cantidad de aglutinante de los distintos estratos; en este caso el aglutinante es aceite de lino, por lo que se trata de una policromía al óleo. En aquellas capas donde existan pigmentos básicos —como son los de plomo— se produce la formación de jabones metálicos, así como craquelados en capas de policromía donde hay un exceso de aceite secante.
3. Espesor, porosidad y permeabilidad de las capas pictóricas.
4. Otro elemento a tener en consideración es la situación específica de la policromía dentro del Pórtico, ya que se observó una mayor alteración de esta en aquellas zonas donde había más humedad y mayor concentración salina.
5. Los posibles tratamientos aplicados en las diferentes intervenciones también habían afectado en gran medida a la superficie pictórica.
6. Por último, el grado de adhesión de las capas pictóricas al soporte pétreo influye en el estado de conservación de la policromía.

Las alteraciones identificadas tanto en el estudio *in situ* como en el análisis de las correspondientes micromuestras pueden clasificarse de la siguiente forma: capas de policromía alteradas por un tratamiento aplicado, alteración o transformación química de los pigmentos, capas pictóricas que presentan fisuración y sucesivo desprendimiento, estratos de policromía que presentan desprendimiento y disgregación, y capas que presentan pulverización.

Respecto a los resultados obtenidos de los estudios realizados, se resumen las características que se describen a continuación.

Gran parte de la policromía presentaba un aspecto pulverulento y se desprendía con facilidad. Se observaba una descohesión granular en sus capas, además de la falta de adhesión entre los diferentes estratos. Asimismo, las láminas de oro presentaban una escasa adhesión con su asiento, con el consiguiente desprendimiento de las mismas. La imprimación más antigua compuesta por albayalde mostraba en la mayoría de los casos un aspecto disgregado y estaba alterada por la formación de compuestos de cloro y plomo. La naturaleza lipófila del aglutinante —aceite de lino— contribuye al deterioro de la policromía, debido a su envejecimiento y a la formación de jabones de plomo que migran hacia la superficie formando un estrato blanquecino superficial. Se analizaron capas de poli-

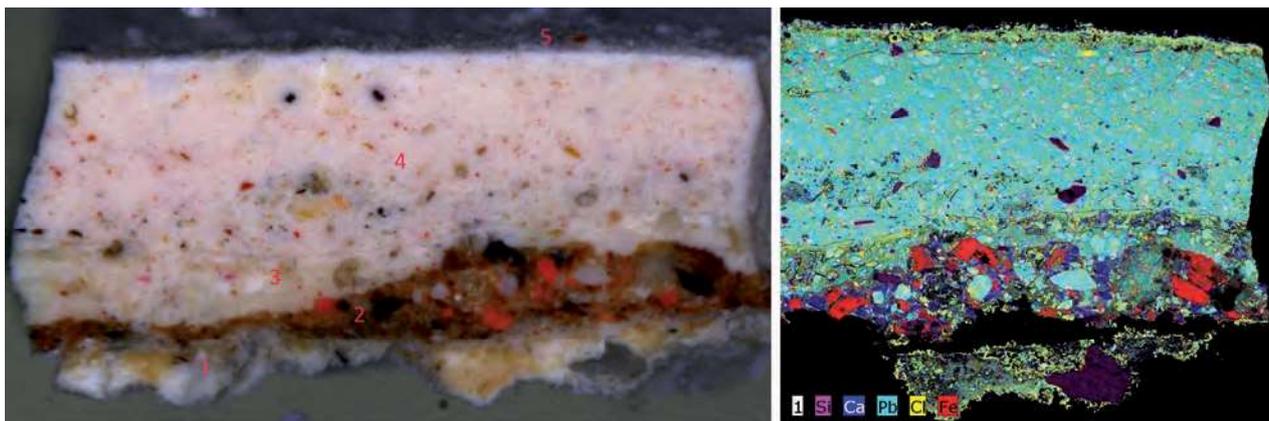


Figura 4. Fotografías de microscopía óptica y microscopía electrónica de una muestra de encarnación con albayalde, donde la parte superior e inferior aparece transformada en compuestos de cloro y plomo. Se observa la falta de adhesión de la encarnación inferior.

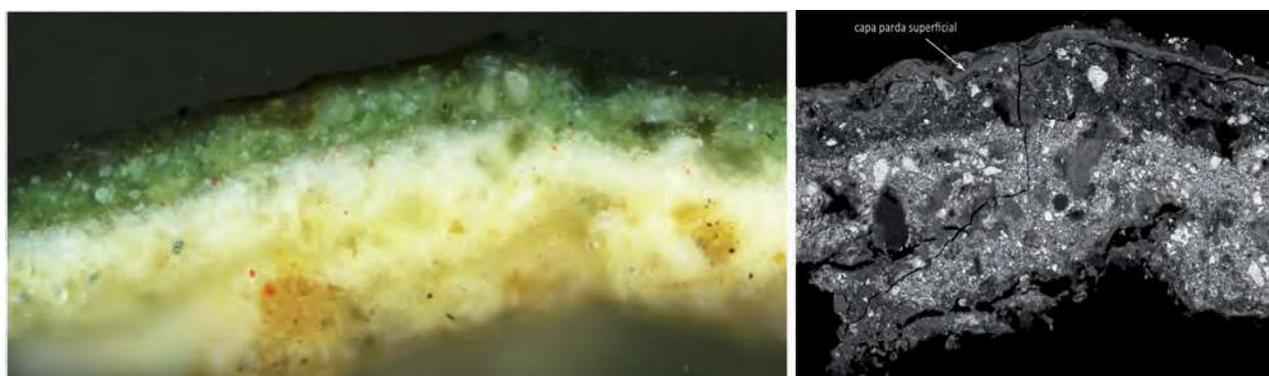


Figura 5. Fotografías de microscopía óptica y electrónica de una muestra parda verdosa. Se observa un fino estrato superficial que contiene cardenillo aglutinado con aceite de lino, de aspecto pardo oxidado.

cromía donde existía una alteración de los pigmentos, como era el caso de la transmutación de la azurita a un cloruro de cobre verde o la posible transformación química de la azurita a malaquita. En las capas pictóricas que contienen cardenillo se apreció una coloración más parda en superficie causada por la oxidación de sus componentes. De manera diferente, existían tonos verdes superficiales ligados a la biocolonización. Asimismo, se analizaron en algunas capas superiores estratos continuos y homogéneos de oxalatos cálcicos con presencia de proteína, hecho que podría estar relacionado con la aplicación en superficie de materiales proteicos y su posterior degradación (figs. 4 y 5).

Por último, la alteración ligada a la aparición de diferentes compuestos enriquecidos en cloro y plomo, que afecta en gran medida al estado crítico de conservación de la policromía. En este sentido, en la mayoría de las muestras analizadas se detectaron compuestos de cloro-plomo en las capas superior e inferior de las mismas, así como migración de estos productos entre la imprimación y los estratos más externos, donde se observó una mezcla de los mismos. Puesto que la existencia de estos compuestos contribuía de forma importante al deterioro de las capas de policromía, es necesario comentar esta singular alteración de una manera más detallada, si bien ya ha sido tratada en otros artículos (Pérez *et al.*, 2017).

De una manera resumida se puede señalar que, desde los primeros estudios realizados, se comprobó que en todas las muestras en las que había compuestos con alto contenido en plomo, este aparecía en mayor o menor medida alterado al transformarse en compuestos de naturaleza clorada. Esta situación era particularmente alarmante, como cabe suponer, en las encarnaciones (fig. 6). Estas alteraciones suponen:

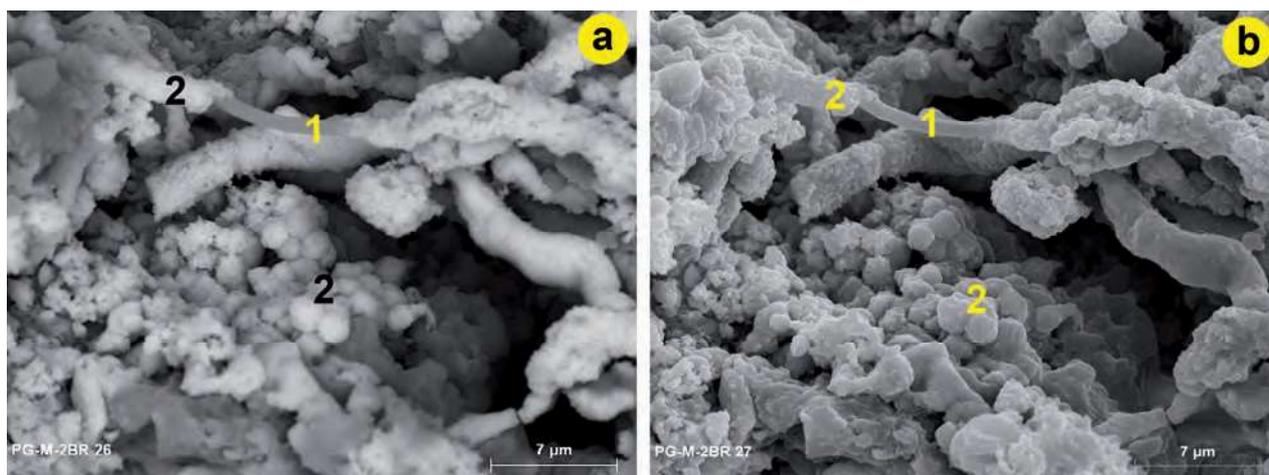


Figura 6. Imágenes SEM equivalentes realizadas con la señal de electrones retrodispersados (a) y electrones secundarios (b). Obsérvese la presencia de restos biológicos (1), total o parcialmente recubiertos de compuestos enriquecidos en cloro y plomo (2).

- a) La transformación de los compuestos originales —albayalde, principalmente— en otros compuestos —cloruros y cloro carbonatos de plomo— con el consiguiente aumento de porosidad, microfisuración y descohesión interna.
- b) Estos cloruros aparecen en forma de cristales de simetría ortorrómbica, junto con formas globulares, tubulares o microgranulares que parecen relacionar estos compuestos con distintos mecanismos de precipitación.
- c) La ausencia de halita (ClNa) en el entorno del Pórtico, relacionable con aguas subterráneas o meteóricas, hace que relacionemos los altos contenidos en cloro con intervenciones sobre el Pórtico (lavado con lejías, limpiezas con ácido, eliminación de biodeterioro, etc.).
- d) Los estudios de estabilidad realizados sobre fragmentos de encarnaciones desprendidos indican la transformación de unos compuestos en otros —compuestos con cloro y plomo en cerusita— en condiciones de humedad relativa elevada y, sobre todo, en presencia de agua líquida. Esta situación confirma que una cuestión crítica en el Pórtico es el control de las condiciones ambientales.

La existencia de capas pictóricas pulverulentas o disgregadas, así como la falta de adhesión en las policromías, hizo necesario realizar un estudio de evaluación de materiales para la consolidación y adhesión de la policromía previo a los tratamientos de restauración, con el fin de evitar o minimizar el riesgo de desprendimiento de los estratos pictóricos durante la limpieza efectuada en el conjunto escultórico.

3.4.2. *Policromía: asesoramiento durante la intervención*

El estudio de los materiales durante la restauración ha proporcionado el apoyo científico necesario para el correcto seguimiento de las tareas de intervención realizadas en el Pórtico de la Gloria. Uno de los objetivos principales de este estudio ha sido dar respuesta a los interrogantes planteados por el equipo de restauración en todo momento y con la mayor celeridad posible. Por un lado, se han analizado muestras con el fin de caracterizar los materiales constituyentes de las policromías que han ido apareciendo durante las distintas etapas de la restauración y que no habían sido estudiados en las fases anteriores. Por otro lado, se han estudiado aquellos materiales que formaban estratos superficiales y que presentaban un comportamiento distinto frente a los diferentes tratamientos de limpieza que se aplicaron.

De acuerdo con el criterio de intervención, en lo que se refiere a las limpiezas, antes de la eliminación de los materiales superficiales se procedió a su análisis. En este sentido los productos examinados se señalan a continuación.

Sobre algunas de las encarnaciones localizadas en distintas zonas del Pórtico (tímpano, Santiago Apóstol del parteluz, arco del juicio final) se detectó un material de naturaleza proteica, posiblemente cola animal.

Asimismo, se identificaron recubrimientos oleosos sobre la superficie de la policromía y sobre la piedra no policromada, aplicados posiblemente como tratamientos de protección. Estos materiales favorecen la adhesión de las partículas de suciedad superficial y se oxidan con el paso del tiempo, enmascarando y oscureciendo la policromía, además de crear capas impermeables que impiden la transpiración de la piedra. En este caso se detectó aceite secante (aceite de lino), resina de colofonia, cera de abejas y parafinas (fig. 7).

Se identificaron resinas acrílicas aplicadas sobre la superficie, como es el Paraloid B72. También se analizó silicato de etilo, así como compuestos de siloxano, posiblemente relacionados con algún tratamiento de protección o con restos de un molde.

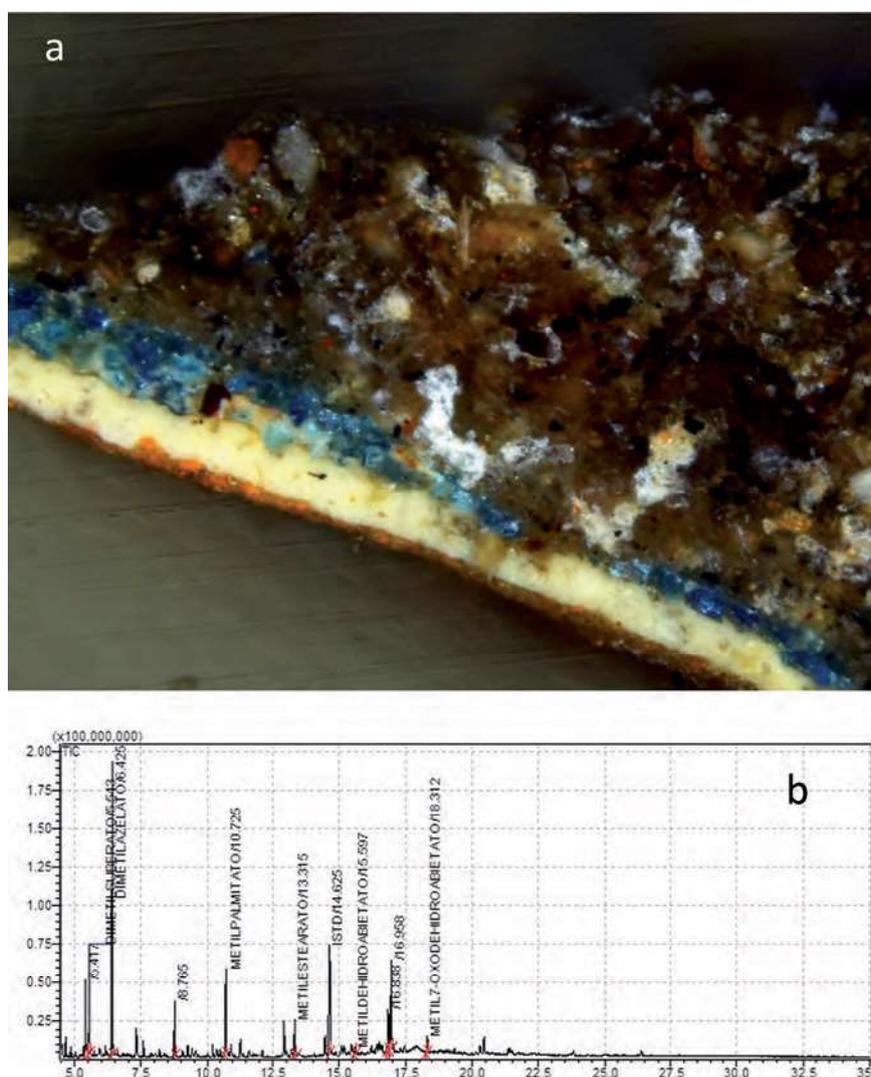


Figura 7. a) Fotografía de microscopía óptica de una muestra con una capa parda de aceite secante y resina de colofonia sobre una capa pictórica azul. b) Cromatograma de gases del aceite secante y resina de colofonia.

De forma generalizada, en toda la superficie del conjunto escultórico se han analizado depósitos de sales solubles y otros que contienen sales no solubles, que dan lugar a la formación de estratos superficiales de aspecto blanquecino. En este sentido se han detectado yeso, fosfato de calcio, oxalatos de calcio y jabones metálicos, además de capas superficiales formadas por compuestos enriquecidos en cloro y plomo.

La metodología científica aplicada al seguimiento de los tratamientos de restauración

La evaluación de los tratamientos de estabilización y limpieza de las policromías se realizó durante toda la fase de restauración del Pórtico de la Gloria. Este estudio, realizado tanto en la obra como en el laboratorio, permitió medir la efectividad y el riesgo que presentan la consolidación, la adhesión y la limpieza, estableciendo los parámetros de seguridad para la aplicación de los tratamientos, todo ello en función de las propiedades y condiciones de conservación de la obra. La metodología de trabajo fue, en general, de carácter progresivo, comenzando por una batería de análisis básicos no destructivos acometidos en obra hasta llegar a otros de mayor complejidad, realizados en laboratorio y que precisaron de toma de micromuestras.

El seguimiento, tanto para la estabilización como para la limpieza de la policromía, se realizó mediante la selección de áreas de estudio representativas en función de su constitución material y estado de conservación. Sobre cada área seleccionada se efectuó, tanto de manera previa como después del tratamiento, la documentación fotográfica estándar en luz visible y UV; la documentación mediante videomicroscopio, y la medición del pH, de la conductividad y de las coordenadas colorimétricas L^* a^* b^* , así como la extracción de micromuestras de referencia previas al tratamiento (fig. 8). Este primer estudio en la obra permite determinar si el tratamiento aplicado tiene alguna incidencia negativa, valorando tanto los posibles cambios estructurales y morfológicos de la superficie policromada como la permanencia de residuos, y evaluando el cambio de las propiedades químicas y ópticas de la superficie tratada. Estas observaciones de la superficie son necesarias para corroborar la incidencia del tratamiento, determinando las siguientes cuestiones:

- Grado de limpieza alcanzado, mediante la determinación de si se ha producido una remoción total o parcial de las capas de recubrimientos, costras, depósitos.
- Grado de adhesión y cohesión alcanzado en zonas donde hubiera separación de policromías o estratos de color pulverulentos y disgregados.



Figura 8. Detalle de la policromía de la encarnación. Imagen obtenida mediante videomicroscopio del área de ensayo de la policromía. **a)** Antes del tratamiento de limpieza. **b)** Después del tratamiento.

- Posibles daños mecánicos, con la observación de levantamientos o pérdida de la capa pictórica. Asimismo, se pueden evaluar los materiales empleados en el tratamiento de limpieza, tales como geles, hisopos de algodón, esponjas o gomas, para valorar la posible remoción de materiales que puedan corresponder a la capa de policromía.
- Posibles alteraciones morfológicas de las superficies policromadas, relacionadas en unos casos con la presencia de residuos de materiales de adhesión y consolidación o de limpieza, como geles, fibras de algodón, residuos de esponjas, etc., y en otros casos con alteraciones morfológicas debidas a la acción mecánica del tratamiento —surcos, estrías de abrasión, deformación de granos, fisuras, etc.—.

En general, este estudio es necesario para evaluar si un determinado tratamiento puede resultar demasiado agresivo, representando un riesgo para la conservación de los materiales pictóricos. En el caso de que así fuese, el sistema aplicado se descarta sin la necesidad de proseguir con el estudio de evaluación con técnicas de análisis portátiles o con extracción de micromuestras.

Por el contrario, si el tratamiento de restauración se considera adecuado, se procede a la extracción de una micromuestra que, junto con la muestra de referencia inicial, se estudian en el laboratorio para valorar exactamente si el tratamiento pudiese producir algunas modificaciones físicas o químicas en la superficie. Las herramientas analíticas que se emplean en este caso deben proporcionar una información precisa sobre cuestiones como pérdidas o abrasiones en el estrato pictórico tratado; formación de subproductos como consecuencia de la interacción tratamiento-capa pictórica; permanencia de algunos componentes de los materiales de limpieza empleados —geles, aditivos, materiales de aclarados—, además de evaluar posibles procesos de disolución. En este estudio, las técnicas analíticas básicas que se utilizan son generalmente la microscopía esteoscópica (ME), la microscopía óptica (MO vis-UV), la microscopía electrónica de barrido (SEM) con microanálisis (EDX) y las técnicas de separación cromatográfica (GC-MS, Py-GC-MS).

1. Seguimiento de la limpieza en las encarnaciones

Como se ha descrito, los estudios previos detectaron la existencia de un fino estrato de recubrimiento proteico. Debido al envejecimiento natural del material proteico, los fenómenos de oxidación que se producen y el depósito de materiales de diferente naturaleza adheridos en la superficie, estos estratos superficiales presentaban una tonalidad oscura que impedía la correcta lectura de la obra. La eliminación de este estrato hidrosoluble se realizó principalmente mediante un sistema de limpieza mecánico con goma abrasiva y, de manera puntual, utilizando un sistema de hidrogel cargado con un agente quelante con pH tamponado. La evaluación del tratamiento durante toda la fase de restauración, tanto en la obra como en el laboratorio, fue necesaria para comprobar el nivel de limpieza, la permanencia de residuos de goma o de gel, la posibilidad de producir cambios morfológicos en la superficie o la retirada de material pictórico o solubilización de la policromía.

En el caso de la goma abrasiva, el resultado de la acción mecánica se valoró esencialmente con técnicas microscópicas. En general, este tratamiento de limpieza mecánica permite eliminar de manera gradual y selectiva el estrato superficial sin alterar las propiedades morfológicas y ópticas de la policromía. Únicamente en aquellas zonas debilitadas, debido a la alteración del blanco de plomo por presencia de compuestos de cloro, se observaba cómo la fricción producida por la goma provocaba un cambio en la morfología del estrato pictórico. Como ejemplo, se ilustra el estudio realizado mediante SEM de la superficie de una muestra de policromía de encarnación extraída tras la limpieza con goma abrasiva. En la imagen de la figura 9a se aprecia la existencia de un estriado que, de acuerdo con la composición química elemental, afecta principalmente a una capa de ennegrecimiento superficial que aparece desgastada y aplastada por la acción mecánica de la goma. En la figura 9b se observa con más detalle la existencia de un estriado, con una dirección predominante, si bien se distinguen, al menos, dos direcciones más subordinadas. Se puede constatar

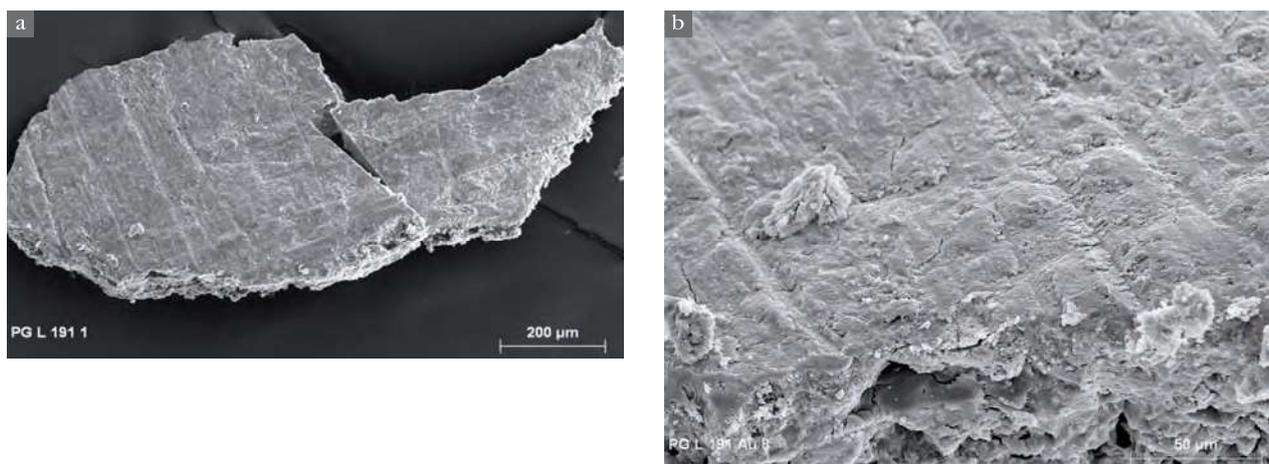


Figura 9. a) Muestra de policromía extraída después del tratamiento de limpieza para su estudio de laboratorio, limpieza con goma abrasiva. Imagen SEM general de la muestra en modo electrones secundarios. b) Estrías superficiales sobre la muestra examinada al microscopio electrónico.

que el efecto abrasivo alcanzado con esta limpieza supone la aparición de la policromía aproximadamente en un 15% de la muestra. En general, la profundidad de las estrías es de 5 µm, con una anchura máxima inferior a las 20 µm. Otros aspectos que se pueden apreciar son la compactación y agrietamiento de la capa o el efecto puntual de trituración mecánica de algunos granos de pigmentos. A partir de los resultados obtenidos para este caso se considera que el sistema proporciona un grado de limpieza adecuado, pero no óptimo, ya que existen señales abrasivas que afectan a la policromía.

Por otro lado, los hidrogeles se utilizaron en las áreas más alteradas por mecanismos de disgregación y pulverización, donde la aplicación de la goma abrasiva presentaba un alto riesgo para la conservación de la policromía. Las imágenes de la figura 10 corresponden a la micromuestra de policromía de referencia antes de la limpieza. Tanto en las imágenes de microscopía estereoscópica como en las imágenes de la sección estratigráfica estudiada mediante microscopía óptica y electrónica se observa el estrato oscuro superficial.

La figura 11 corresponde al estudio de la muestra de policromía extraída después del tratamiento de limpieza con el sistema gelificado. Las observaciones iniciales de la superficie, así como el estudio estratigráfico, muestran que se produce la remoción de la capa superficial respetando totalmente la integridad de la capa de policromía. El nivel de limpieza es adecuado, ya que permite conservar un fino estrato de la capa de recubrimiento en contacto con la policromía.

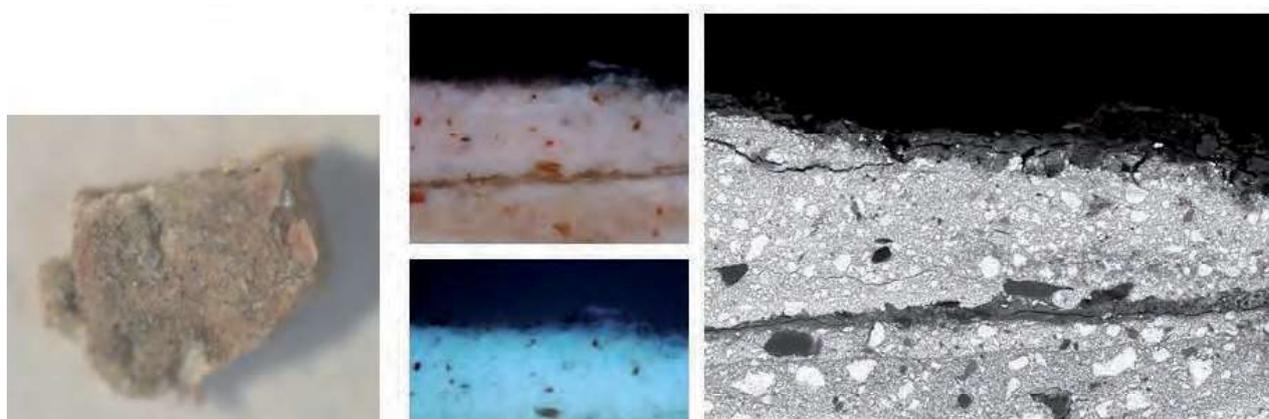


Figura 10. Imagen de la superficie de la muestra de policromía de referencia observada con microscopía estereoscópica y estudio estratigráfico con microscopía óptica (MO vis-UV) y microscopía electrónica de barrido (SEM).



Figura 11. Imagen de la superficie de la muestra de policromía después del tratamiento de limpieza observada con MO vis-UV y SEM. El tratamiento de limpieza permite conservar un fino estrato de depósito respetando la integridad de la policromía.

2. Seguimiento de la limpieza con microabrasión

Las previsiones iniciales de limpieza de los paramentos del Pórtico de la Gloria no contemplaban la posibilidad de limpieza de los mismos mediante microabrasión controlada a baja presión, si bien la falta de resultados con los métodos inicialmente previstos nos hizo plantear esta posibilidad. Las zonas en las que se planteó este tipo de limpieza fueron las zonas inferiores (zócalos) de los pilares y pilastras, ya que la limpieza con geles de distintas características, nanogeles y diversas papeetas no conseguían eliminar el encostramiento pardo que presentaban. Para valorar la idoneidad de este tratamiento de limpieza y minimizar los daños sobre el sustrato pétreo se procedió de una manera secuencial:

1. Elección de microabrasivos y comprobación en laboratorio de que sus características de composición y textura eran las especificadas por el fabricante. El microabrasivo elegido fue el polvo de vidrio Rotatec. El estudio mediante microscopía estereoscópica y microscopía electrónica de barrido de estos abrasivos nos confirmó que correspondían a fragmentos angulosos de vidrios de composición silico-cálcico-férrico, con tamaños comprendidos entre 100 y 200 μm .
2. Previamente a la realización de una cata de limpieza mediante microabrasión, se estudió mediante microscopía electrónica un pequeño fragmento de costra. De manera resumida se puede señalar que existía una costra, de textura craquelada, espesor en torno a 10-20 μm y con un alto contenido en fosfato cálcico y tierras. Por debajo de la costra los minerales graníticos mostraban una alteración diferencial; las micas presentaban la exfoliación bastante abierta y rota, y los feldespatos abundantes señales de microcorrosión.
3. Tras la realización de una cata de limpieza se procedió a coger una muestra que incluyera una parte que hubiera sido limpiada y otra sin limpiar con la intención de poder comparar el estado inicial y el final. Los resultados obtenidos indican que la zona limpia se caracteriza por una casi total eliminación de la costra, que la textura en el material granítico es muy similar tanto en la zona limpia como en la sucia, y que hay una presencia moderada de señales abrasivas, de escasa profundidad, en la zona limpia como consecuencia de los impactos de los microabrasivos.

Teniendo en cuenta la escasa efectividad de otros métodos de limpieza, el estado de alteración superficial de la roca granítica antes de la limpieza, la eliminación de la costra, la nula variación de la porosidad superficial y que la incidencia de los microabrasivos sobre el material pétreo se limita a pequeñas microerosiones, se concluyó que la limpieza con microabrasión controlada a baja presión podría ser una limpieza adecuada para los zócalos considerados (fig. 12). Debemos señalar, por último, que para minimizar la incidencia del polvo generado como consecuencia del

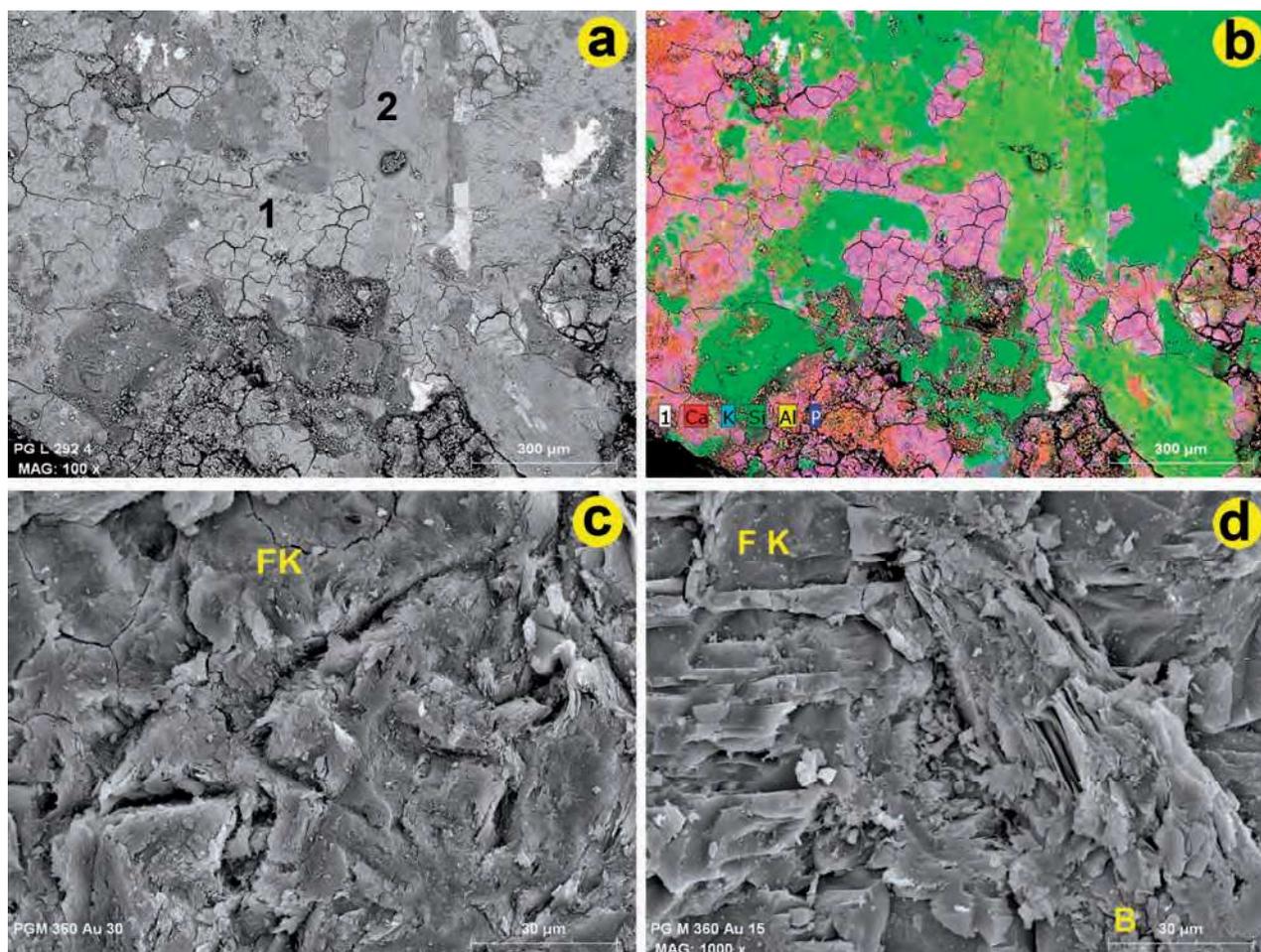


Figura 12. Imágenes correspondientes a la limpieza mediante microabrasión. **a)** Costra de fosfato cálcico (1) sobre la roca granítica (2). **b)** Mapa con la distribución de elementos de la imagen anterior. **c)** Feldespato potásico en zona no limpiada con evidentes señales de microcorrosión. **d)** Cristales de feldespato potásico y biotita con señales erosivas en la zona limpia.

impacto de los abrasivos se diseñó un encapsulado de las zonas limpiadas que impidiera que otras partes del Pórtico se viesen afectadas.

3. Seguimiento de la limpieza mediante ablación láser

Otro de los métodos de limpieza empleados en el Pórtico de la Gloria fue la limpieza mediante ablación láser, tanto para el material pétreo como sobre algunas zonas con policromía. Para evaluar la eficacia de este sistema, aparte de la evaluación en el propio monumento —videomicroscopio, variación colorimétrica, rugosidad, etc.—, se diseñó una metodología centrada en tres aspectos fundamentales: identificación del material liberado como consecuencia de la interacción entre la radiación láser y la superficie elegida, valoración de la situación inicial de la superficie considerada y valoración de la superficie tras la ablación con la radiación láser.

La identificación del material liberado como consecuencia de la interacción láser-materia se basó en la interposición de un vidrio transparente entre la radiación y la superficie, ya que la radiación atraviesa el vidrio sin ninguna modificación y el material liberado se deposita en el vidrio. Posteriormente se evaluaron en el laboratorio, mediante microscopía electrónica y microanálisis elemental en nuestro caso, las partículas liberadas, estableciendo la naturaleza de las mismas —depósitos superficiales, partículas de alteración biodeterioro, pigmentos, sustrato pétreo, etc.—, su porcentaje y, en función de lo anterior, el riesgo existente.

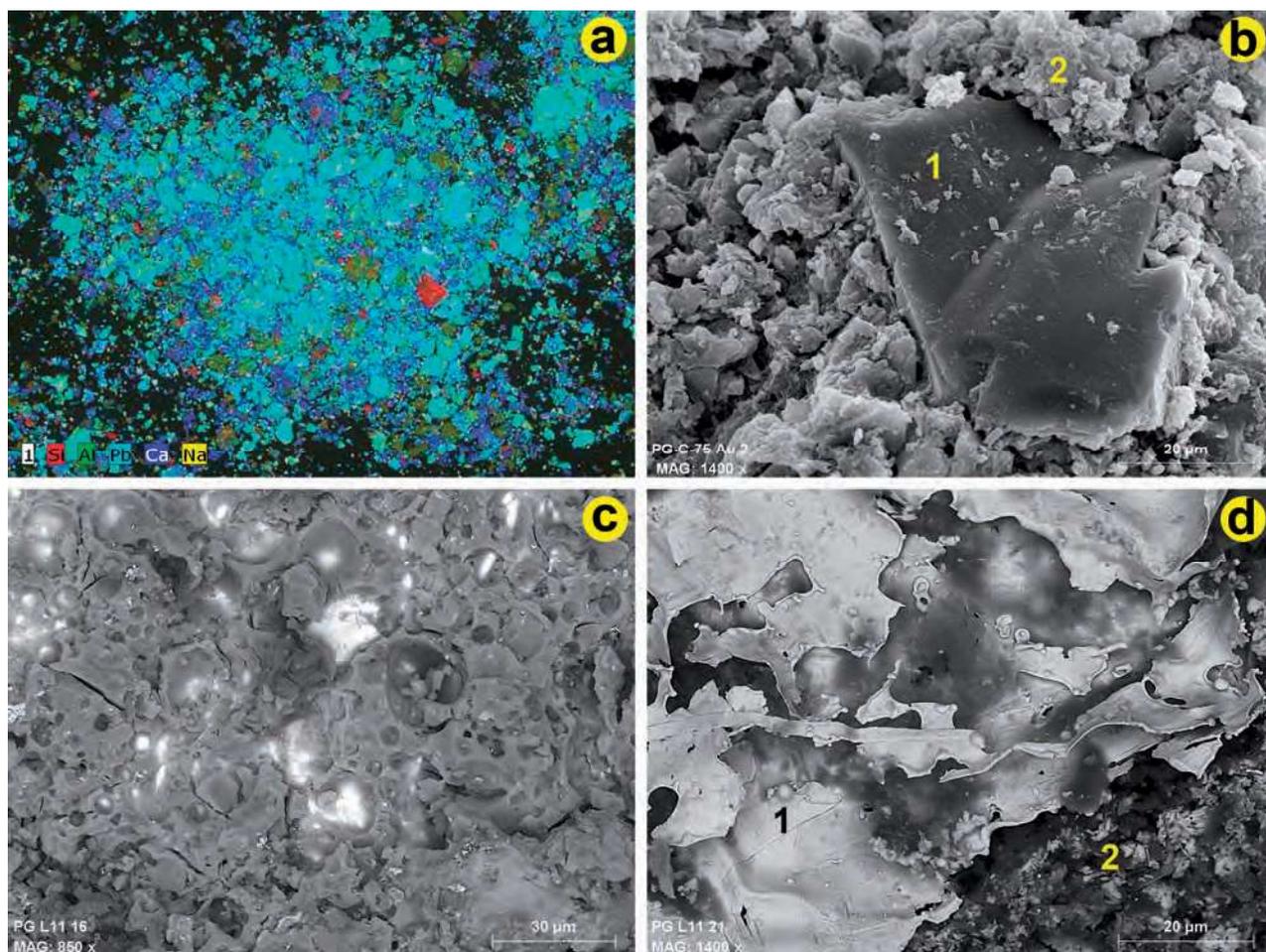


Figura 13. Imágenes correspondientes a la limpieza láser: **a)** Mapa con la distribución de elementos correspondiente al material ablacionado —cloruros de plomo y yeso principalmente—. **b)** Grano de lapislázuli (1) sin afección tras la limpieza, entre albayalde (2). **c)** Degradación térmica de una capa de asiento con alto contenido orgánico. **d)** Láminas de oro (1) con texturas de fusión y formación de gotas sobre una capa parda (2).

De forma complementaria se recogieron micromuestras en el monumento del material considerado antes y después de la limpieza, para ser analizadas posteriormente en el laboratorio de manera comparativa. El objetivo era valorar cuestiones como el material que se pretendía eliminar, el grado de homogeneidad conseguido en la limpieza, las modificaciones de textura de la superficie —porosidad, rugosidad, microfisuración, etc.—, la afectación térmica en los componentes —fusión de partículas minerales o metálicas, degradación de componentes orgánicos—, las modificaciones composicionales de algún componente, etc. (fig. 13).

La valoración conjunta de todos los parámetros anteriores es la que permitió, en los distintos casos considerados, determinar si la limpieza láser era adecuada o no.

4. Seguimiento de la limpieza con geles de Wolbers

A diferencia de las encarnaciones, las policromías y los dorados en diversos elementos escultóricos del Pórtico presentaban un estrato de recubrimiento orgánico oscurecido de naturaleza oleosa. Para estas superficies, los sistemas de limpieza fueron principalmente los geles de Wolbers aplicados con diferentes aditivos dentro de un intervalo de pH de seguridad. Como en el caso anterior, la evaluación de la limpieza se realizó mediante un control en la obra y en el laboratorio utilizando las diferentes técnicas de estudio. Como se muestra en la figura 14, la superficie presentaba este fino es-

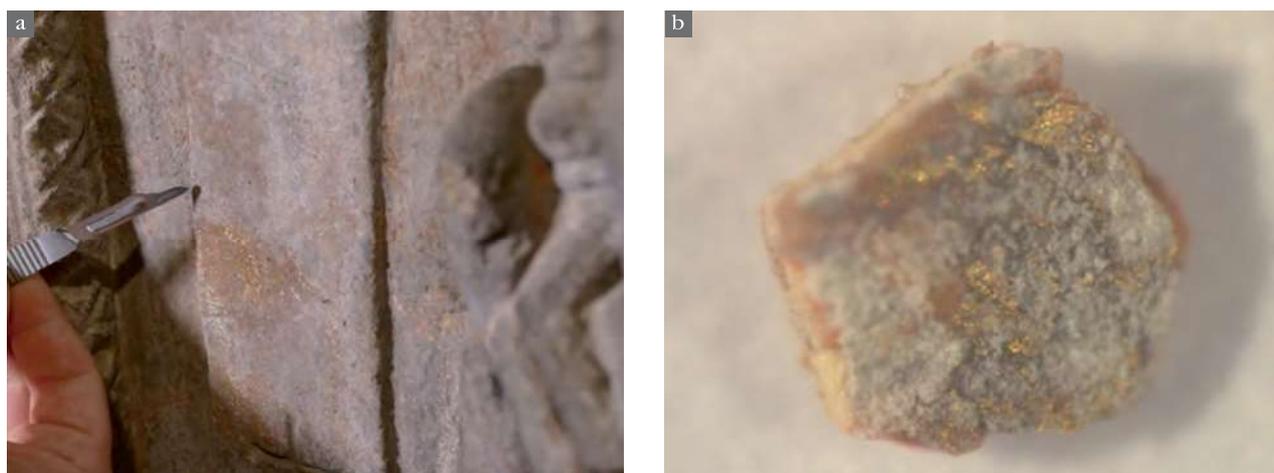


Figura 14. a) Superficie dorada que presenta un fino estrato de recubrimiento de naturaleza oleosa y depósitos de compuestos inorgánicos. b) Muestra de referencia antes de la aplicación de un gel de Wolbers.

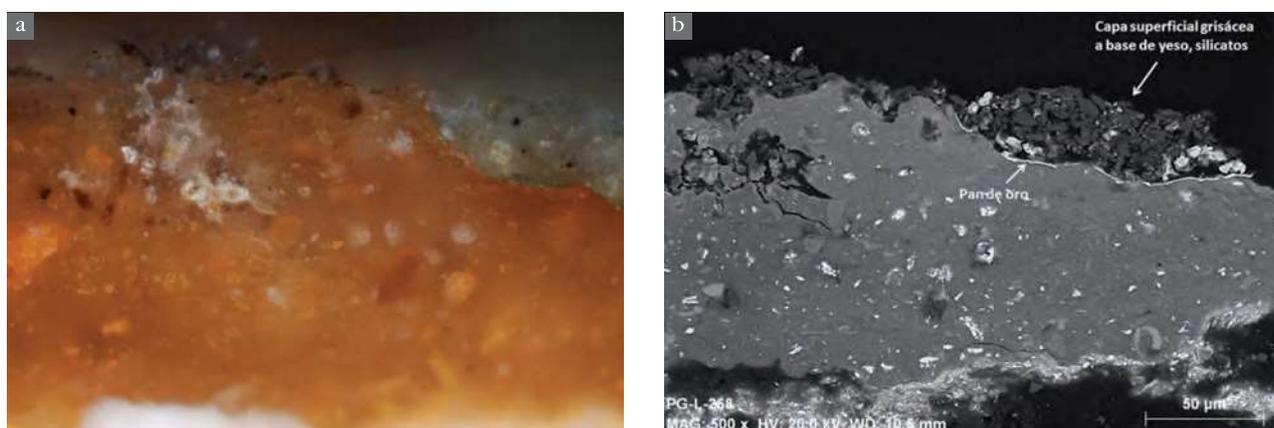


Figura 15. Detalle de la sección estratigráfica de la muestra de referencia obtenida mediante microscopía óptica (a) y microscopía electrónica de barrido en modalidad electrones retrodispersados (b).

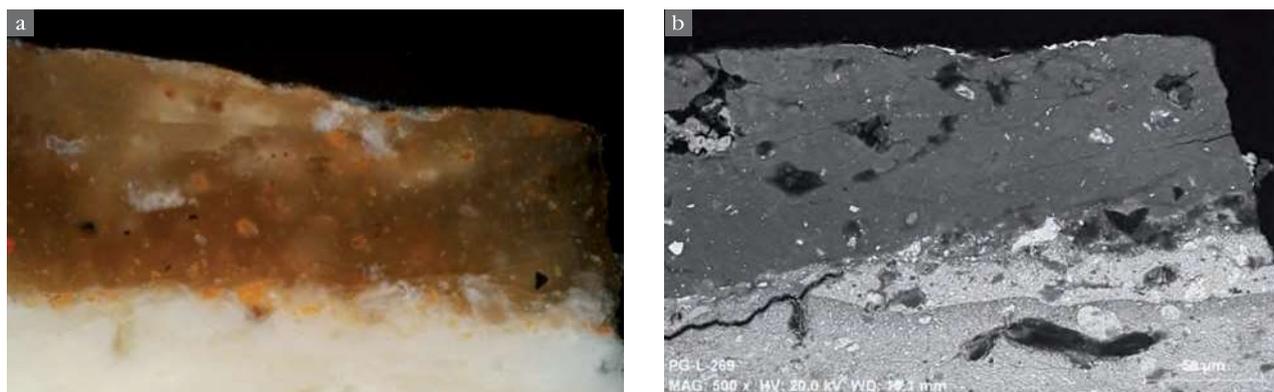


Figura 16. Detalle de la sección estratigráfica de la muestra extraída después del tratamiento de limpieza con un gel de Wolbers, obtenida mediante microscopía óptica (a) y microscopía electrónica de barrido en modalidad electrones retrodispersados (b).

trato orgánico con depósitos de componentes de naturaleza inorgánica —carbonatos y sulfatos de calcio, silicatos—. En el estudio estratigráfico realizado mediante microscopía óptica y SEM (figs. 15 y 16) se observa que el gel de Wolbers gradualmente elimina casi por completo el estrato superficial sin afectar a la conservación del dorado. Asimismo, los resultados cromatográficos indicaron

que los tratamientos con los geles de Wolbers no causaban la solubilización de los componentes pictóricos y, tras el aclarado, no dejaban residuos en la superficie.

5. Evaluación de los tratamientos de estabilización de la policromía

Las observaciones de las policromías, conjuntamente con los resultados que proporcionaron los estudios científicos de laboratorio, pusieron de manifiesto la necesidad de introducir en ocasiones algún tratamiento de estabilización de la policromía previo a la limpieza, como puede ser la pre-consolidación o la fijación de las capas de pintura que presentaban mecanismos de alteración tales como pulverización, descamación por pérdida de aglutinante o falta de adhesión con el soporte pétreo. Igual que en el caso del tratamiento de limpieza, fue posible implementar una metodología que permitiera realizar un estudio previo de los diferentes consolidantes y adhesivos para valorar la estabilidad química, óptica y mecánica, seguida por un estudio para la evaluación en la obra de la incidencia de los tratamientos de consolidación y fijación.

Los recubrimientos policromos del Pórtico de la Gloria forman una compleja estructura de policromías y repolicromías de cuatro a cinco estratos que presentaban antes de la restauración un estado de conservación crítico, heterogéneo y muy complejo. Estas presentaban fallos adhesivos y cohesivos de forma heterogénea y combinados con daños, como levantamientos, disgregación y pulverulencia (fig. 17).

Las oscilaciones termohigrométricas, la exposición a los elevados niveles de humedad del clima, la condensación, la infiltración de agua de lluvia y la cristalización de sales han determinado el desprendimiento de los estratos pictóricos. Dicha falta de estabilidad suele estar producida también por la sinergia de una serie de factores que pueden ser tanto de tipo químico —degradación del aglutinante, formación de compuestos de reacción o de contaminantes— como físico-mecánico —rigidez excesiva, tensiones mecánicas, presión por migración de compuestos—, a los que hay que añadir la actividad biológica, junto al agravamiento por intervenciones con limpiezas agresivas y tratamientos biocidas.

La complejidad técnica planteada por los tratamientos de estabilización, lo es también por el hecho de tratarse de intervenciones con una limitada reversibilidad. Es por ello que se acometió, conjuntamente con los tratamientos de limpieza, un protocolo de evaluación del riesgo a fin de controlar su eficacia e inocuidad: el «Programa de puesta a punto y mejora de metodologías y protocolos de conservación y restauración PNIC2015-05. Protocolo de evaluación del riesgo para la intervención en conjuntos históricos escultóricos en piedra policromada». Este proyecto de investigación abordó el problema de estabilización de las policromías en conjuntos escultóricos en piedra, llevando a cabo una investigación sobre la estabilidad física, química (pH) y mecánica frente al envejecimiento de dieciséis productos de naturaleza orgánica e inorgánica: gelatina tipo B, cola de conejo, cola de esturión, Tri-Funori, Aquazol® 200, Aquazol® 500, Beva® O.F. 371, Acril® 33, Plectol® B-500, EVA neutral pH adhesive®, Lascaux Medium for Consolidation®, Acril® Me, Nanoestel®, Wacker® OH, Nanorestore® y Nanorestore® Plus.

El objetivo principal de la investigación aplicada a la intervención de las policromías del Pórtico de la Gloria consistió en evaluar, de forma pormenorizada y específica, el riesgo y eficacia de la estabilización de las encarnaciones al ser la más problemática y preocupante. Estas presentaban fallos adhesivos y disgregación de los estratos subyacentes e imprimación de blanco de plomo. En este caso se seleccionaron aquellos productos que habían aportado los mejores resultados en los estudios previos, tales como las colas proteicas —cola de conejo y esturión— y la microemulsión acrílica Acril Me®. Además se incluyeron otros como el Nanorestore® —formulado a partir de una dispersión de nanocal en alcohol isopropílico desnaturalizado—.



Figura 17. Detalles del estado de conservación de las policromías.

La evaluación de la viabilidad y de los riesgos de su aplicación antes y después del envejecimiento acelerado se llevó a cabo en una primera fase mediante distintos tipos de análisis realizados en laboratorio. Fundamentalmente, se emplearon probetas y muestras de apoyo, como fragmentos de granito original y aquellas desprendidas de las encarnaciones, las cuales contenían restos de los estratos subyacentes. Las muestras y probetas tratadas se estudiaron con lupa binocular, medición de color, pH, pruebas mecánicas de corte y separación (test de pelado), SEM-EDX y FTIR. En una segunda fase se realizó un testado y evaluación en áreas piloto del Pórtico. De este modo pudo estudiarse su estabilidad antes y después del envejecimiento y su capacidad de penetración, consolidación y adhesión. Para ello se tuvieron en cuenta las patologías presentadas, el estado de conservación de las policromías, los materiales aplicados en intervenciones anteriores, las propiedades físico-químicas y mecánicas de los productos evaluados y las condiciones ambientales del Pórtico, que sirvieron para establecer el tipo de envejecimiento². Además se valoraron otras variables, como sistemas de aplicación, compatibilidad y retratabilidad.

Por lo que se refiere al estudio de la viabilidad de los materiales testados, cabe señalar que todos ellos aportaron un nivel adhesivo suficiente en términos de resistencia a la separación, con excepción del consolidante inorgánico Nanorestore[®]. Aquellos que favorecieron una mayor unión adhesiva entre la pintura y el granito fueron la cola de conejo y el Acril[®] ME —uniones heterogéneas—. La cola de esturión proporcionó tensiones de rotura más bajas. Respecto a su viabilidad como consolidantes, destaca la afinidad de las colas proteicas, sobre todo la de conejo, en cuanto a la mejora de la cohesión de la imprimación de blanco de plomo disgregada. Las colas no aportaban variaciones estéticas, mantenían la porosidad de las muestras y contribuían a mejorar la resistencia al corte (fig. 18). La sensibilidad a la humedad respecto a la hinchazón de los *films* podría afectar a su capacidad adhesiva, por lo que serían aconsejables controles periódicos y tratamientos puntuales de mantenimiento. La limitada capacidad de penetración de la microemulsión acrílica Acril[®] ME pudo observarse mediante MEB, debido a la formación de *films* poliméricos superficiales que engloban las superficies, unidas a un oscurecimiento de la muestra (fig. 19). Este venía ligado muchas veces al incremento del brillo de las anteriores.

El riesgo presentado por el Nanorestore se encontraba ligado a su pH alcalino, a la formación de cristales superficiales y al tiempo y condiciones de humedad necesarias para reaccionar con los

² Se estableció un programa de envejecimiento acelerado termohigrométrico basado en los estudios ambientales de 2015 facilitados por TSA, seleccionando los valores más frecuentes y representativos (24 horas a 14°C y 90% HR; 24 horas: 23°C y 55% HR, 72 horas: 14°C y 90% HR y 48 horas: 23°C y 55% HR). La exposición fue de 1.124 horas y se utilizó una cámara HC2020 Heraeus Votsch.

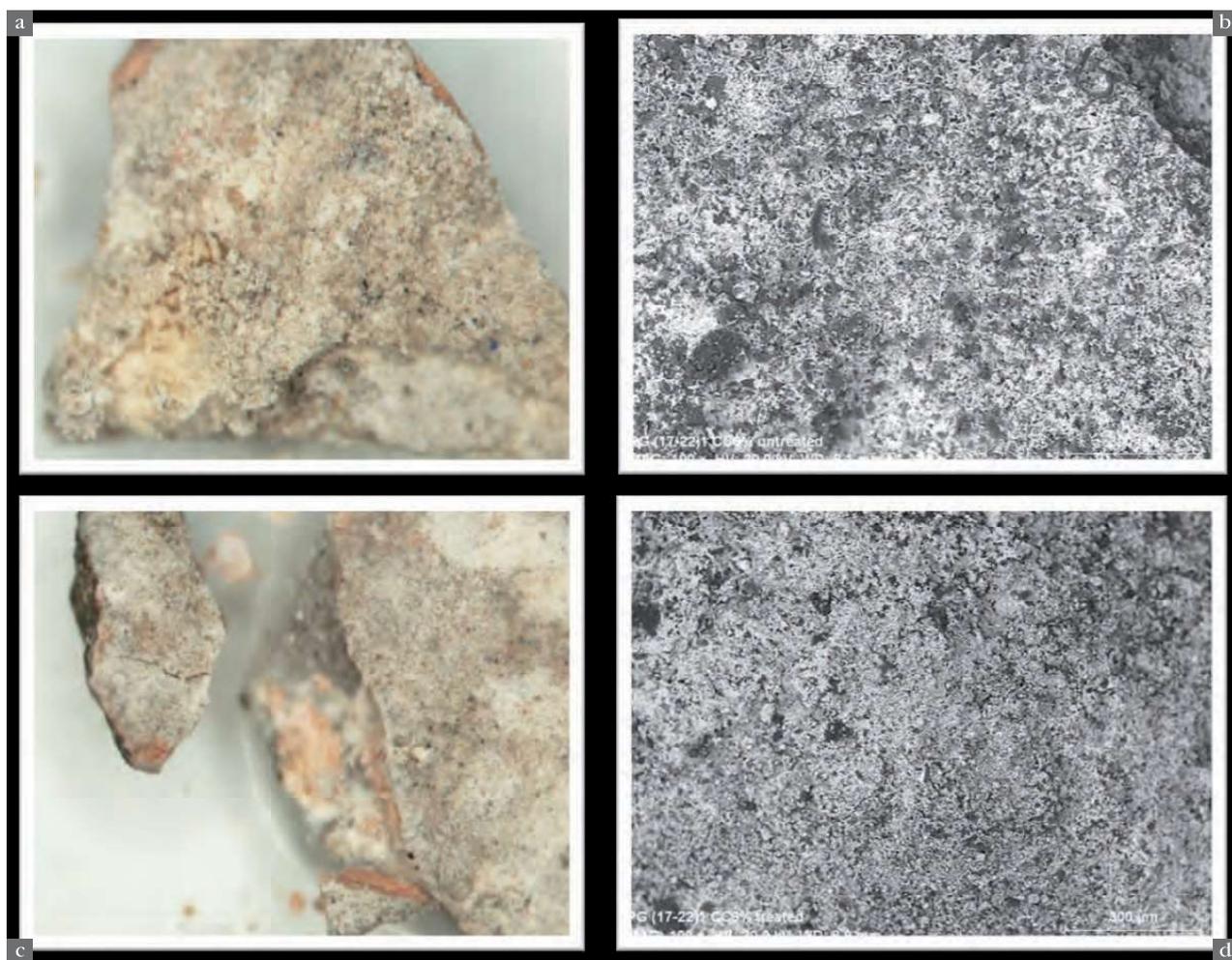


Figura 18. Estudio de la aplicabilidad en los tratamientos de consolidación y adhesión de las colas proteicas en fragmentos de encarnaciones del Pórtico. Observaciones de la superficie con microscopía estereoscópica y microscopía electrónica de barrido. Imágenes **a)** y **b)** Antes del tratamiento. Imágenes **c)** y **d)** Después del tratamiento.

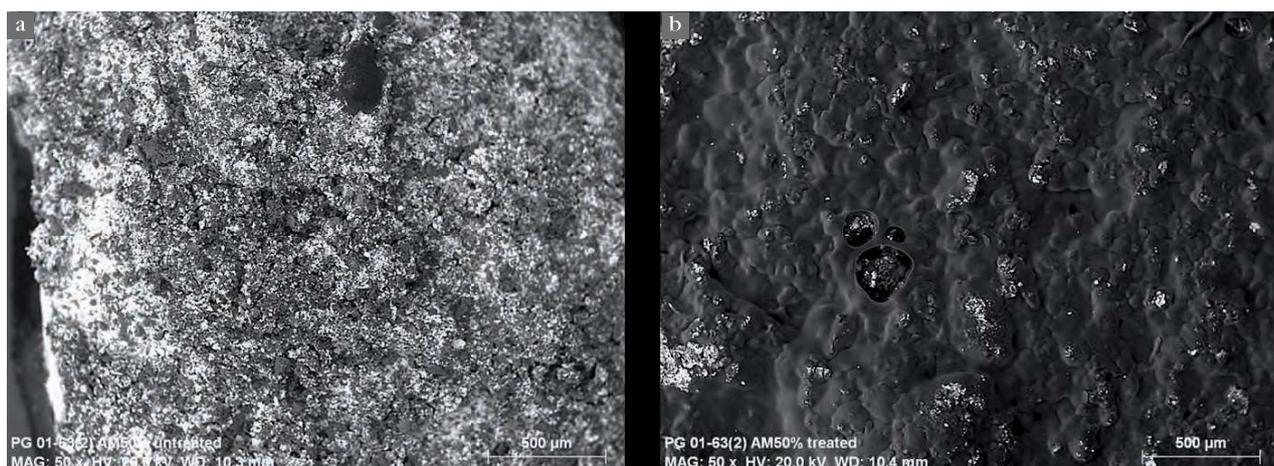


Figura 19. Estudio de la aplicabilidad en los tratamientos de consolidación y adhesión con Acril® ME. Observaciones de la superficie con microscopía electrónica de barrido. **a)** Antes del tratamiento. **b)** Después del tratamiento.

materiales constitutivos. La detección de bandas a 1580 y 1570 cm^{-1} indicaba una posible formación de carboxilatos relacionada con la saponificación de los aceites constitutivos (fig. 20).

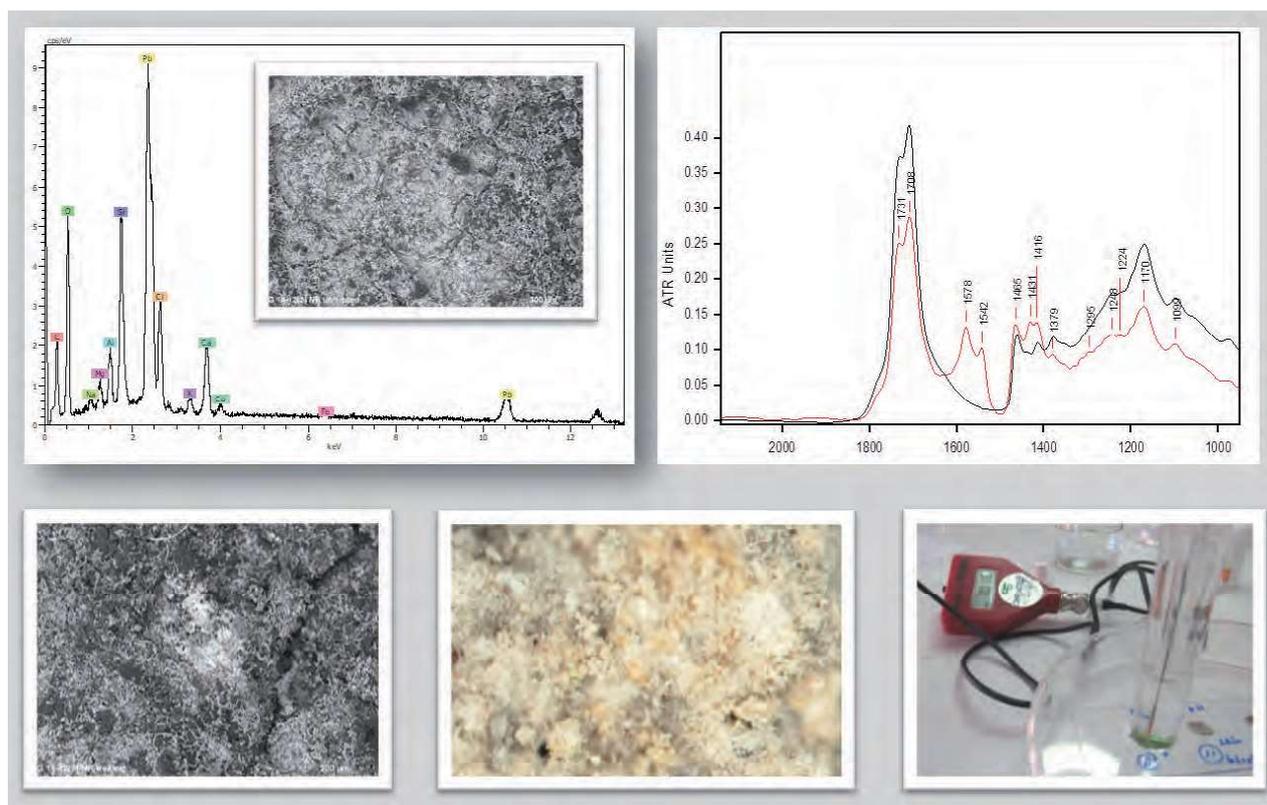


Figura 20. Ejemplo del estudio de la aplicabilidad del Nanorestore® sobre un fragmento de policromía con imprimación alterada. La evaluación se ha realizado mediante un estudio con técnicas microscópicas, espectroscópicas y mediciones del pH.

Conclusiones

Los estudios previos realizados en el Pórtico de la Gloria han sido necesarios para la caracterización de los materiales constituyentes y para el diagnóstico del estado de conservación general del conjunto escultórico y han sido imprescindibles para la intervención material realizada. Los ensayos analíticos se han realizado antes, durante y después de realizar la intervención, con la intención de garantizar un resultado de calidad y que se mantenga el mayor tiempo posible en el futuro.

Antes de la intervención se caracterizaron los materiales de todas las épocas, los productos introducidos en las intervenciones realizadas a lo largo del tiempo y los diferentes procesos y mecanismos de alteración.

El análisis de cada tratamiento de intervención ha servido para desarrollar un protocolo de actuación con el que se consigue establecer sistemas, metodologías y productos de intervención con garantía. El diálogo e intercambio de información entre los diferentes profesionales implicados ha sido constante.

Finalmente se han realizado análisis de los materiales introducidos en esta intervención con la finalidad de constatar su idoneidad y una correcta conservación. Asimismo, es necesario establecer una serie de criterios de conservación preventiva para el mantenimiento y control de dicha intervención. Las medidas preventivas que se contemplen deberán proporcionar la sostenibilidad de este delicado monumento de un valor artístico y humano incalculable.

De igual modo, la importancia y excepcionalidad de esta joya del románico hacen que sea una obra en la que es necesario establecer limitaciones a los tratamientos y materiales introducidos, apostando por el control ambiental de este templo accesible al público y por el mantenimiento

periódico. Estas cuestiones de tipo ético tienen que ver con la posible pérdida de información y transformación de las técnicas y materiales constitutivos, con la baja o nula reversibilidad técnica de las intervenciones de estabilización y con la necesidad de garantizar la retratabilidad futura.

Bibliografía

- Cortázar, M. y Sánchez, A. (2017): «Estudio de la secuencia de policromías y de la composición de los materiales empleados en las decoraciones del conjunto escultórico del Pórtico de la Gloria de la catedral de Santiago de Compostela», *Informes y Trabajos 15*, Madrid: Instituto del Patrimonio Cultural de España.
- Gómez, M. L. (2000): *La restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*, Madrid: Cátedra.
- Higgitt, C.; Spring, M. y Saunders, D. (2003): «Pigment-medium Interactions in Oil Paint Films containing Red Lead or Lead-tin Yellow», *National Gallery Technical Bulletin*, 24: 75-95.
- Lapuente, P.; Savin, M. -C.; González, S.; Gutiérrez, A.; Chapoulie, R.; Laborde, A. y Pérez, P. (en prensa): «Marble Pieces in the Romanesque Portal of Glory of the Santiago de Compostela Cathedral. New Data through a Multi-Analytical Approach», *International Journal of Architectural Heritage*. London: Taylor and Francis.
- Matteini, M. y Moles, A. (2001). *La química en la restauración: los materiales del arte pictórico*, Donostia-San Sebastián: Nerea.
- Milles, J. S. y White, R. (1987): *The Organic Chemistry of Museum Objects*, London: Butterworths.
- Morabito, Z. (2011): «Pórtico de la Gloria. Estudio del material pétreo (caracterización petrográfica-mineralógica y determinación del deterioro)», informe para CooBe.C, 2ª fase de Restauración del Pórtico de la Gloria.
- Pastor, M. T. (en prensa): «Estudio del envejecimiento y viabilidad de los polímeros aplicados en la consolidación y adhesión de los estratos pictóricos del Pórtico de la Gloria», en Prado-Vilar, F. (ed.) *The Portal of Glory: Conservation, Polychromy and the Transfiguration of Matter*. Fundación General Universidad Complutense de Madrid, Andrew Mellon Foundation y Fundación Catedral.
- Pérez, P. P.; García, M. A. y Ferrazza, L. (2017): «Aportación de los estudios científicos a la restauración del Pórtico de la Gloria de la Catedral de Santiago de Compostela» *Ciencia y Arte 6*, *Ciencias experimentales y conservación del patrimonio*. Ministerio de Cultura, IPCE: 134-151.
- Pina, C. M.; López-Andrés, S.; Rull, F.; Prieto, C.; Fernández-Díaz, L. y Prieto, M. (1992): «Fenómenos de alteración y transformación fosgenita-cerusita», XII Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía, *Boletín de la Sociedad Española de Mineralogía*, 15-1: 16-19.
- Silva, B.; Casal, M.; Prieto, B.; Rivas, T. y Guitián, F. (1994): «Forms and factors of weathering in the Cathedral of Santiago de Compostela», en *Proceedings of VII International Congress on Deterioration and Conservation of Monuments in The Mediterranean Basin*, Venecia: 743-748.
- Torre Martín-Romo, R. de la (2011): «Aspectos técnicos y constructivos del Pórtico de la Gloria», informe para CooBe.C, 2ª fase de Restauración del Pórtico de la Gloria.
- Verret, D y Steyaert, D. (coords.) (2002): *La couleur et la pierre. Polychromie des portails gothiques. Actes du Colloque. Amiens 12-14 octobre 2000*. Paris: Editions A. et J. Picard.