

**El proyecto “Sistema de imagen espectral de alta definición para el análisis de obra de arte (ARTEC)” se desarrolló entre el 1 de enero de 2019 y el 31 de diciembre de 2021 en el marco del Programa Estatal de Generación de Conocimiento del Ministerio de Ciencia e Innovación (PGC2018-099269-B-100). La Real Academia y el Museo del Prado han sumado esfuerzos y capacidades en esta investigación sobre tecnologías y técnicas aplicadas al apoyo a la restauración, a la conservación y al estudio de las obras de arte.**

### **Proyecto de investigación**

**1 de enero de 2019 - 31 de diciembre 2021**

El conocimiento de las características materiales y del estado de conservación de una obra de arte es esencial para tomar decisiones en las tareas dirigidas a su restauración y su conservación. Las aportaciones de la investigación científica y tecnológica en este campo han enriquecido este conocimiento gracias a la utilización de instrumentos de apoyo al estudio. La diversidad de posibilidades y la complejidad técnica de las herramientas de análisis actuales hace indiscutible para cualquier centro de conservación a escala internacional la necesidad de crear, desarrollar y apoyar la presencia de grupos de expertos en áreas científicas y técnicas para la salvaguarda del Patrimonio. No obstante, la tecnología de análisis no es un fin en sí mismo y el trabajo de los especialistas en historia del arte y restauración es imprescindible para interpretar los procesos creativos y el contexto en el que las obras se realizaron. En este marco, se hacía necesario avanzar en el establecimiento de una estrecha colaboración horizontal entre equipos de expertos en restauración, historia del arte, ciencia y tecnología. El proyecto ARTEC ha fortalecido la cooperación multidisciplinar mediante la investigación en tecnologías y técnicas aplicadas al apoyo de la restauración, conservación y la gestión de las obras de arte del Museo del Prado y de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, instituciones cuya colaboración se remonta a la fundación del Museo en 1819 y ha continuado desde entonces de forma ininterrumpida.

Durante el proyecto se ha creado un laboratorio específico de calibración y evaluación de sistemas de imagen espectral para el análisis técnico de la pintura en el que se han establecido procedimientos de calibración y medidas de reflectografía infrarroja adaptados a las necesidades específicas para su estudio. Estos procedimientos han sido validados posteriormente en varias campañas de medida en las que ha quedado demostrado el avance en la capacidad de sistematización de los resultados, en el análisis lógico de los mismos en función de las características y las variables del experimento, y en la obtención y registro de resultados cuantitativos que posibilitan la observación más profunda y precisa de las obras, así como la optimización de los estudios que actualmente se abordan y los que se llevarán a cabo en el futuro.

La colaboración multidisciplinar que ha caracterizado el desarrollo del proyecto ha permitido la elaboración de una relación de los pigmentos más característicos de las obras de las colecciones de los dos museos participantes, que se ha materializado en la fabricación de lienzos patrón con el fin de hacer una reducción lógica del problema de análisis sobre la base de la composición de las pinturas del Museo del Prado y de la Real Academia en función de varias combinaciones de soporte, pigmentos, imprimaciones y dibujos subyacentes.

Tanto la implementación del laboratorio de calibración como el estudio de los lienzos patrón, han permitido realizar el registro minucioso de la respuesta de cada pigmento a la radiación infrarroja. Con ello se han podido extraer conclusiones muy relevantes en cuanto a la resolución espectral más adecuada a la hora de configurar tanto las condiciones del experimento a realizar, en función de los objetivos perseguidos con cada medida, como las técnicas de análisis adecuadas para maximizar la información que se puede extraer de las distintas obras. La validación de los resultados del proyecto se ha concretado en dos obras sobre tabla de la colección del Museo del Prado: *Cristo entre la Virgen María y San Juan Bautista*, de Jan Gossaert (1510-1520), y *Mona Lisa*, del taller de Leonardo da Vinci (1507-1516).

Para el desarrollo de las soluciones de estudio basadas en los análisis de imagen, los investigadores principales de ARTEC, Miguel Falomir Faus (Museo del Prado) y Ana González Mozo (Museo del Prado), han trabajado estrechamente con Sergio Sánchez Carballido, especialista en el área tecnológica.

El equipo de investigación está integrado por distintos especialistas tanto de la Real Academia (Publio López Mondéjar, Itziar Arana Cobos) como del Museo del Prado (Andrés Úbeda de los Cobos, Enrique Quintana Calamita, Ana María Martín Bravo, Jaime García Máiquez y Alberto Gómez Turrión.

En el equipo de trabajo se ha contado con la participación de Philippe Walter (Laboratoire d'Archéologie moléculaire et structurale, CNRS-UMR 8220) y con Isabel Sánchez-Bella Solís (Academia de San Fernando), Míriam del Moral Sandoval, Laura Martínez Alcón y Patricia Campos Alguacil (estudiantes de Master en prácticas).

## **Objetivos y actividades**

- Puesta a punto de los sistemas de análisis por imagen del Gabinete Técnico del Museo Nacional del Prado (OSIRIS y APOLLO) para el estudio de obras pictóricas mediante reflectografía infrarroja, optimizando su resolución espectral en las bandas de análisis en el intervalo del infrarrojo más habituales para el examen de la pintura de caballete. Para ello se adquirió e integró en los equipos un conjunto de tres filtros interferenciales que cubren toda la banda de sensibilidad espectral de los sistemas mencionados (desde 900 nm a 1600 nm). Los tres filtros son complementarios y sus bandas de transmitancia son

consecutivas (Figura 1). Filtro 1: 850 nm a 1250 nm; Filtro 2: 1250 nm a 1500 nm; Filtro 3: 1500 nm a 1800 nm.

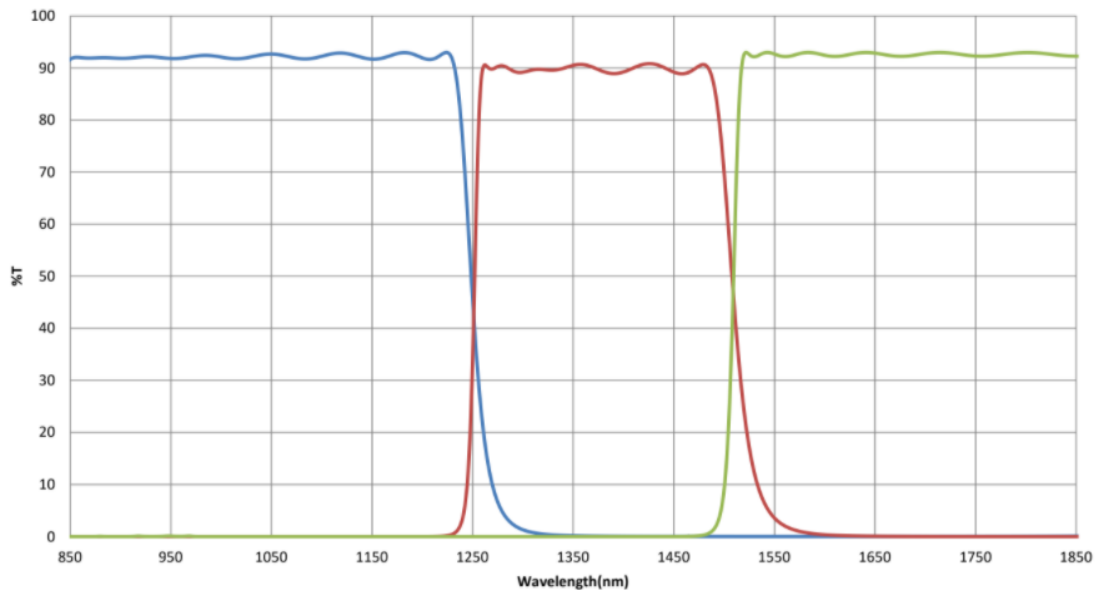


Figura 1: Transmitancia espectral de los filtros interferenciales para dotar a los sistemas de reflectografía infrarroja OSIRIS y APOLLO de resolución espectral en su banda de análisis.

- Establecimiento de un laboratorio de imagen para la realización experimentos, preparación de medidas y realización de calibraciones.
- Definición de los lienzos patrón a partir del estudio de artículos publicados por equipos de trabajo que mencionan la fabricación de patrones y de los datos aportados por los las fuentes antiguas -tratados y recetas- sobre técnicas pictóricas. Se ha recopilado toda la información disponible en la actualidad sobre tipos de dibujo subyacente, preparaciones, imprimaciones y mezclas de pintura habituales en pintura española, italiana y flamenca desde la Edad Media hasta la época actual. Las características que debían tener los patrones se han consensuado con el equipo de la Sorbona liderado por Philippe Walters.
- Fabricación de los lienzos patrón según técnicas tradicionales (Figura 2).
  - Método de trabajo seguido:
    - a) Elaboración de probetas de 30 x 60 cm de tela de lino con una preparación tradicional de yeso y cola adherida a un soporte rígido. Cada probeta se ha dividido en secciones de 6 x 6 cm, asignándose un código a cada muestra y sección.
    - b) Elaboración de una probeta de referencia con trazos de dibujo realizados con distintos materiales (punta de plomo, tinta negra, carboncillo, sanguina, piedra negra y grafito). Estos trazados permanecerán sin cubrir y servirán de marcador para comparar la

respuesta de los materiales ocultos por las diferentes capas de pintura.

c) Imprimación de los lienzos patrón con las mezclas definidas en las recetas tradicionales.

d) Trazado de líneas con los diferentes materiales de dibujo seleccionados sobre estas imprimaciones.

e) Ocultación de los trazos con parches de pintura realizados con distintas combinaciones de pigmentos y aglutinantes tradicionales. Se han fabricado probetas que incluyen todas las combinaciones posibles de todos los pigmentos planificados.



Figura 2: Fotografía tomada durante la fabricación de los lienzos patrón en las instalaciones de la RABASF.

- Definición y adquisición de los patrones de calibración radiométrica. Tras una investigación previa se han adquirido dos patrones de reflectancia con calibración certificada: un patrón uniforme de 99% de reflectancia y un patrón con 4 bandas de reflectancia uniformes de 10%, 20%, 50% y 90% de reflectancia respectivamente.
- Definición y fabricación de los patrones de calibración geométrica. Tras una investigación previa se han diseñado y fabricado internamente dos patrones de calibración geométrica. Un patrón de 5x3 cuadros inclinados y otro patrón tipo tablero de ajedrez.
- Establecimiento de nuevos protocolos de preparación, ejecución y procesado de los experimentos para maximizar la información a extraer de los resultados obtenidos de los test de reflectografía infrarroja en función de los requerimientos de los departamentos de conservación y restauración de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando y el Museo Nacional del Prado.
- Campañas de medidas:
  - a) De calibración: jornadas para la toma de medidas con los sistemas Apollo y Osiris, sobre los distintos patrones de calibración radiométrica y geométrica mencionados.

b) De medida sobre lienzos patrón: jornadas para la toma de medidas sobre los lienzos patrón fabricados (Figura 3) en función de los procedimientos y las conclusiones extraídas de las campañas de calibración.

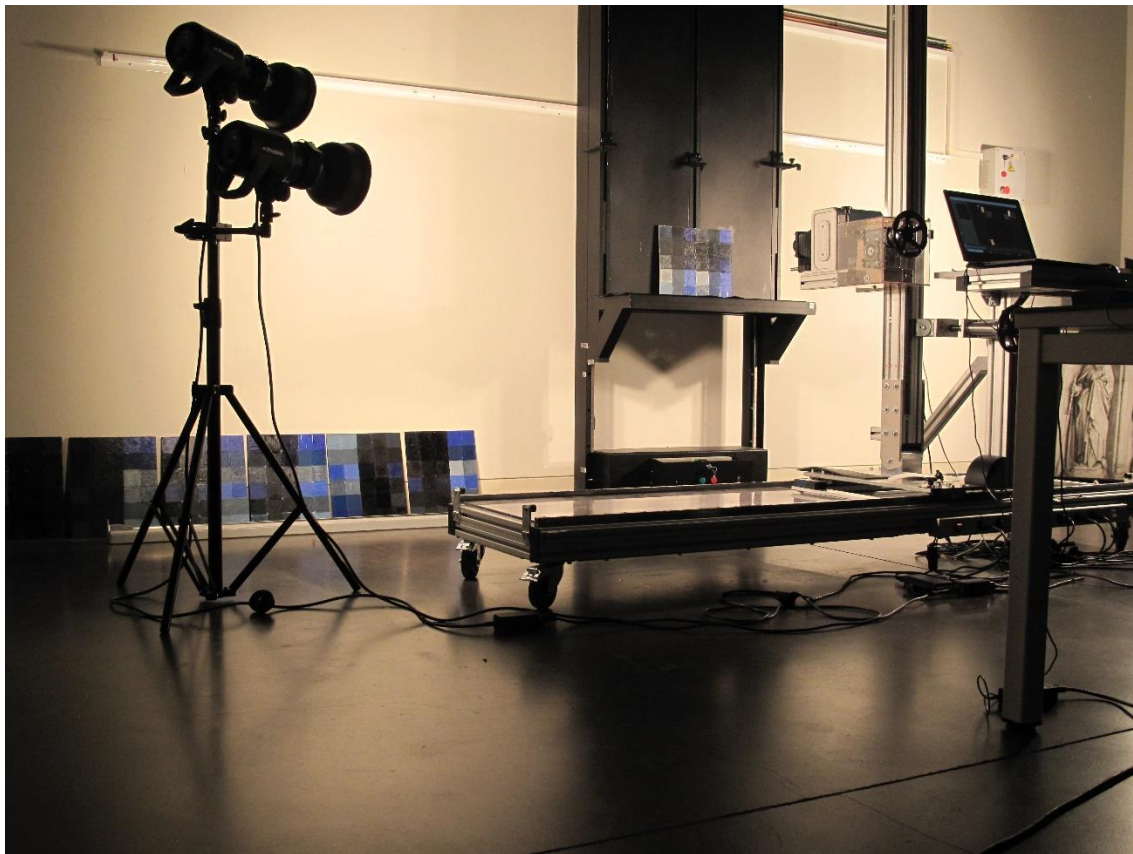


Figura 3: Fotografía tomada durante la campaña de medidas sobre los lienzos patrón en las instalaciones del MNP

- Estudio de las medidas obtenidas en las campañas y establecimiento de un protocolo para obtención de parámetros de calibración. Con el término “calibración” se está haciendo referencia a la obtención de las imágenes en valores físicos de reflectancia (%R). El proceso se realiza utilizando un patrón cuyos valores de reflectancia espectral son conocidos y están certificados. El patrón utilizado tiene 4 bandas de reflectancia de aproximadamente el 10%, 20%, 50% y 90%. Para poder realizar esta relación se debe asegurar una respuesta de la cámara constante ND vs. %R, por lo que se han estudiado todos los parámetros que pueden afectar a la medida de reflectografía infrarroja tanto los internos de los sistemas de medida como los externos del experimento.
- Protocolo SW de corrección de la iluminación. Se comprobó que existe cierta heterogeneidad en la iluminación que afectará al proceso de calibración (Figura 4). Tras el estudio de este efecto y su impacto en el proceso de calibración, se observa que para el caso con iluminación

corregida los valores recuperados son mejores (más cercanos al valor de la banda de %R calibrada de referencia).

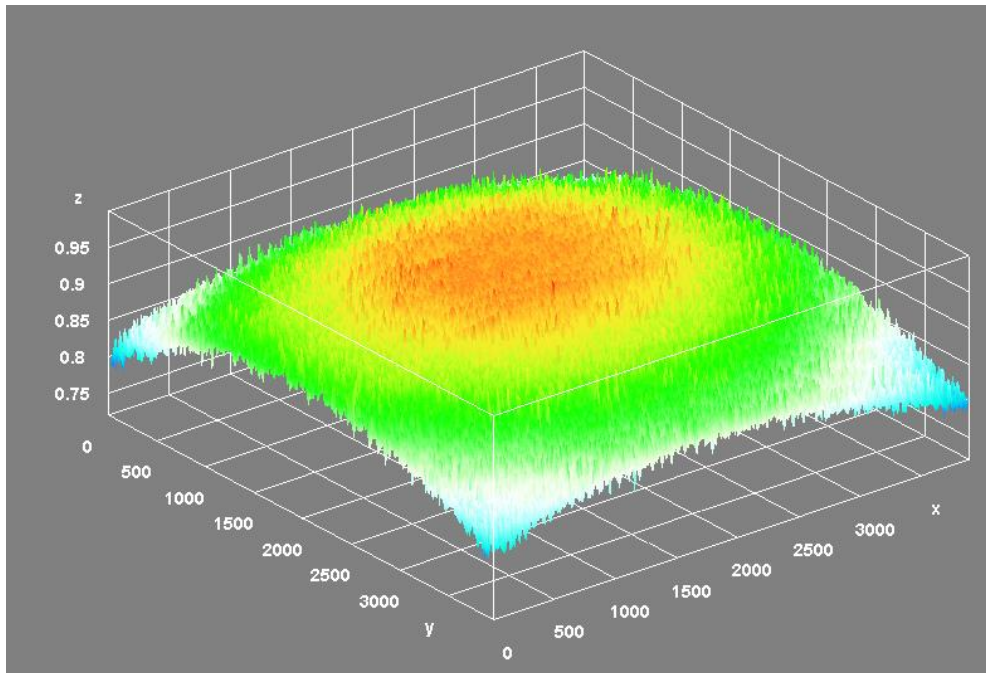


Figura 4: Distribución de la iluminación normalizada entre 0 y 1 sobre el patrón de calibración con 99% de reflectancia uniforme en una superficie de 300 x 300 mm<sup>2</sup>.

- Estudio objetivo de la resolución espacial mediante patrones geométricos. Se ha calculado la MTF del sistema cámara-lente con la técnica "Slanted Edge" a partir de un patrón de cuadros inclinados.
- Medida del calentamiento que producen las lámparas con termografía. Las lámparas utilizadas para la reflectografía infrarroja son alógenas incandescentes y aseguran la emisión de energía en la región infrarroja a la que son sensibles las cámaras Osiris y Apollo. Con el fin de estudiar el efecto del calentamiento de las lámparas sobre las obras, debido a su sensibilidad a cambios de temperatura bruscos, se realizó un experimento con cámaras termográficas iluminando un lienzo de referencia. Tras un experimento de 10 minutos se observó que el aumento de temperatura era inferior a 2K, medida que se considera segura para las obras.
- Registro de imágenes para alinear geométricamente dos o más imágenes con diferente geometría de visualización en el mismo sistema de coordenadas para que los píxeles correspondientes representen los mismos objetos. El proceso incluye ubicar y hacer coincidir una serie de puntos característicos llamados "puntos de unión" en una imagen base y una imagen de deformación seleccionada para el registro. Además, se ha implementado una técnica para unir las imágenes geométricamente registradas en un mosaico. Para ello se ha utilizado un proceso

completamente controlado y trazable que no cambia los valores de medida de la imagen original mejorando así el método anterior de elaboración de mosaicos que se utilizaba. Este procedimiento se ha utilizado tanto en el procesado de los lienzos patrón como en un caso práctico sobre imágenes de *Mona Lisa*, del taller de Leonardo da Vinci.

- Implementación de nuevas técnicas de análisis de imagen automático y de procesado de imagen fotográfica que apoyen a historiadores del arte y restauradores, y doten de mayor objetividad a los análisis y conclusiones obtenidos.

Combinación de rangos dinámicos (también denominada “exposure fusion”). Es un método para combinar imágenes tomadas con diferentes configuraciones de tiempo de exposición de la cámara, obteniéndose una imagen de alto rango dinámico (HDR). Esta técnica es muy valiosa cuando se pretende medir con reflectografía infrarroja pinturas que contienen áreas realizadas con compuestos metálicos, como el pan de oro. Aunque la respuesta general de los cuadros es normalmente de una reflectancia baja, estas zonas metálicas tienen una reflectancia muy alta. En estos casos, a pesar de los 16 bits de rango dinámico de la cámara APOLLO, la medición en este tipo de regiones resulta insuficiente para resolver la escena con el nivel de detalle requerido. La combinación de varios rangos dinámicos permite obtener una imagen con un nivel de detalle mayor. Esta técnica se ha puesto en práctica inicialmente sobre el patrón de reflectancia múltiple calibrado y sobre un caso práctico real en la obra *Cristo entre la Virgen María y San Juan Bautista*, de Jan Gossaert (Figura 5).



Figura 5.- Medidas llevadas a cabo en sala en la obra *Cristo entre la Virgen María y San Juan Bautista*, de Jan Gossaert (1510-1520), según los parámetros establecidos en los primeros experimentos.

- Se ha diseñado, desarrollado e implementado una base de datos MySQL para la persistencia lógica de los resultados del proyecto y de medidas futuras siguiendo la metodología desarrollada.
- Tras la implementación de los protocolos de preprocesado y calibración de las imágenes obtenidas de los lienzos patrón, se han obtenido imágenes comparables espacialmente (registración) y cuantitativamente/radiométricamente (valores calibrados en reflectancia). Utilizando estos resultados en combinación con los registros de las composiciones y los dibujos subyacentes conocidos para las diferentes zonas lienzos se ha podido realizar un estudio sistemático y objetivo de su respuesta espectral al experimento de reflectografía infrarroja para cada uno de los filtros espectrales de la cámara Apollo del Museo del Prado (Figura 6).



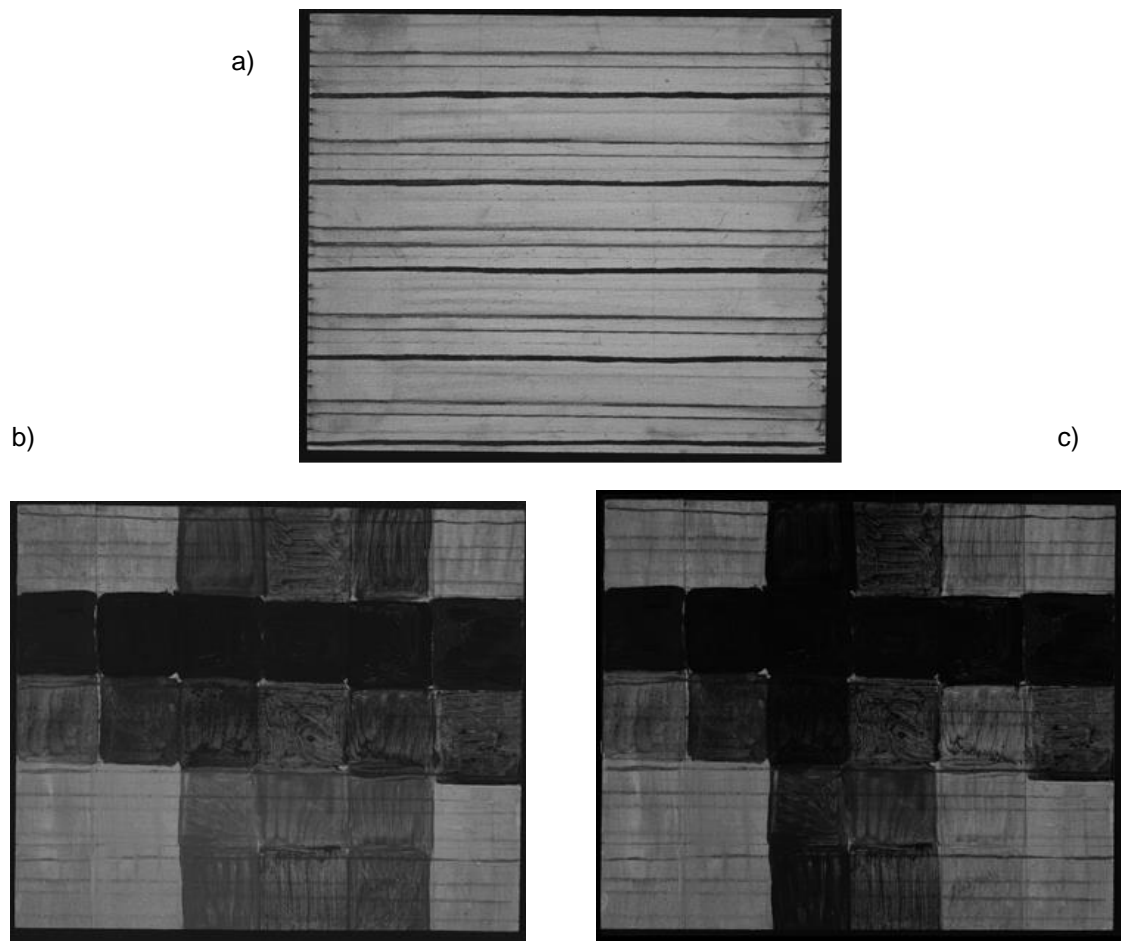


Figura 6: imágenes de reflectografía infrarroja sin procesar, a) del lienzo patrón de referencia únicamente con dibujo subyacente, b) con capa pintada sobre el dibujo subyacente, c) con capa pintada sobre el dibujo subyacente medido en banda espectral diferente a imagen b).

### **Internacionalización**

Durante todo el periodo de ejecución del proyecto se ha mantenido una estrecha colaboración con el equipo de investigación del Laboratorio de Arqueología Molecular (LAMS) de la Universidad de la Sorbona, que cuenta con químicos, físicos, ingenieros, arqueólogos e historiadores del arte que han contribuido con sus aportaciones a ARTEC. El LAMS posee además equipamiento para la obtención de imágenes técnicas de las obras de arte que es complementario al existente en el Museo del Prado y de gran valor añadido de medida. Ha sido especialmente relevante la utilización de su dispositivo de imagen de scanning de fluorescencia de rayos X y de su sistema de imagen hiperspectral.

También se ha mantenido un contacto estrecho con el personal del departamento de restauración de la National Gallery de Londres, que cuenta con un laboratorio de imagen técnica altamente equipado con sistemas de imagen espectral. Además de los modelos Osiris y Apollo presentes también en el Museo del Prado, tienen otros sistemas complementarios de imagen

hiperspectral que han construido *ad-hoc* en función de sus necesidades y requerimientos específicos. Este contacto se ha utilizado para compartir las aproximaciones y las decisiones tomadas por ambas instituciones en el desarrollo del laboratorio de imagen técnica.

La línea de investigación iniciada con ARTEC continúa con financiación del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia\_ Next Generation UE, mediante el que se dotará al Museo Nacional del Prado de un innovador sistema de imagen multiespectral de alta resolución espacial, diseñado en función de los avances y resultados obtenidos con el proyecto.



Real Academia  
de Bellas Artes  
de San Fernando  
rabasf.com



MINISTERIO  
DE CIENCIA, INNOVACIÓN  
Y UNIVERSIDADES

ei  
AGENCIA  
ESTATAL DE  
INVESTIGACIÓN