

Presentado por:

Pascual Pérez Colomer

Tutor:

José Antonio Madrid García

# **MATLAB COMO HERRAMIENTA DE OBJETIVACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LÁMINAS DE COBRE COMO SOPORTE PICTÓRICO**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



FACULTAT DE BELLES ARTS DE SANT CARLES



departamento  
Conservación  
Restauración  
Bienes  
Culturales





# **MATLAB COMO HERRAMIENTA DE OBJETIVACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN DE LÁMINAS DE COBRE COMO SOPORTE PICTÓRICO**

Trabajo Final de Máster

València, 2019

Presentado por:

Pascual Pérez Colomer

Tutor:

José Antonio Madrid García



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



FACULTAT DE BELLES ARTS DE SANT CARLES



departamento  
Conservación  
Restauración  
Bienes  
Culturales



## RESUMEN

El siguiente Trabajo Final de Máster, tiene por objetivo aportar una visión más objetiva de un proceso subjetivo, para determinar las diferencias en los procesos de fabricación de láminas de cobre como soporte pictórico mediante el *software* matemático Matlab. Se trata por tanto de realizar una prueba de concepto, fundamentada en las posibilidades que ofrece este *software*, como se ha podido ver a través de estudios realizados en otros campos de investigación como el de la medicina o la ingeniería.

Con esto se pretende acercar aún más este programa al ámbito de la conservación y restauración como herramienta rigor y objetividad. Además de fomentar la interdisciplinariedad con el fin de implementar nuestro conocimiento sobre el patrimonio. Para llevarlo a cabo se han utilizado cinco láminas de cobre pintadas al óleo, de las que se ha obtenido su radiografía. Imágenes que sirven para fundamentar el trabajo que presentamos. Estas radiografías han sido obtenidas con los dispositivos del Laboratorio de Documentación y Registro del Instituto de Restauración del Patrimonio de la Universitat Politècnica de València. Además se ha realizado también una búsqueda acerca del uso del cobre como soporte pictórico, así como de las características de este y las alteraciones a las que se puede ver expuesto.

La consecución de esta visión objetiva, se ha traducido en el establecimiento de la diferencia de espesores así como en la búsqueda de puntos de interés de las diferentes técnicas de fabricación de las láminas de cobre. Para ello se ha trabajado tanto en formato DICOM como en BMP. Esta elección se ha debido al peso de la imagen en su formato original que ralentizaba el procesado de la imagen en Matlab.

**Palabras clave:** Matlab, lámina de cobre, rayos X, objetivación, prueba de concepto

## RESUM

El següent Treball Final de Màster, té per objectiu aportar una visió més objectiva d'un procés subjectiu, per a determinar les diferències en els processos de fabricació de làmines de coure com a suport pictòric mitjançant el programari matemàtic Matlab. Es tracta per tant de realitzar una prova de concepte, fonamentada en les possibilitats que ofereix aquest programari, com s'ha pogut veure a través d'estudis realitzats en altres camps d'investigació com el de la medicina o l'enginyeria.

Amb això es pretén acostar encara més aquest programa a l'àmbit de la conservació i restauració com a eina rigor i objectivitat. A més de fomentar la interdisciplinarietat amb la finalitat d'implementar el nostre coneixement sobre el patrimoni. Per a dur-ho a terme s'han utilitzat cinc làmines de coure pintades a l'oli, de les quals s'ha obtingut la seua radiografia. Imatges que serveixen per a fonamentar el treball que presentem. Aquestes radiografies han sigut obtingudes amb els dispositius del Laboratori de Documentació i Registre de l'Institut de Restauració del Patrimoni de la Universitat Politècnica de València. A més s'ha realitzat també una cerca sobre l'ús del coure com a suport pictòric, així com de les característiques d'aquest i les alteracions a les quals es pot veure exposat.

La consecució d'aquesta visió objectiva, s'ha traduït en l'establiment de la diferència de grossàries així com en la cerca de punts d'interés de les diferents tècniques de fabricació de les làmines de coure. Per a això s'ha treballat tant en format \*DICOM com en \*BMP. Aquesta elecció s'ha degut al pes de la imatge en el seu format original que alentia el processament de la imatge en \*Matlab..

**Paraules clau:** Matlab, làmina de coure, raigs X, objectivació, prova de concepte

## ABSTRACT

The following Final Master's Project, aims to provide a more objective view of a subjective process, to determine the differences in the processes of manufacturing copper sheets as pictorial support using mathematical software Matlab. It is therefore a test of concept, based on the possibilities offered by this software, as has been seen through studies in other fields of research such as medicine or engineering.

This is intended to bring this program even closer to the field of conservation and restoration as a tool of rigor and objectivity. In addition to promoting interdisciplinarity in order to implement our knowledge about heritage. To carry it out, five copper sheets painted in oil have been used, from which their x-rays have been obtained. Images that serve to support the work we present. These x-rays have been obtained with the devices of the Documentation and Registration Laboratory of the Institute of Restoration of the Patrimony of the Universitat Politècnica de València. In addition, a search has also been made about the use of copper as a pictorial medium, as well as the characteristics of copper and the alterations to which it can be exposed.

The achievement of this objective vision has resulted in the establishment of the difference in thicknesses as well as in the search for points of interest of the different manufacturing techniques of copper sheets. This has been done in both DICOM and BMP formats. This choice has been due to the weight of the image in its original format that slowed the processing of the image in Matlab.

**Keywords:** Matlab, copper plate, X-rays, objectification, proof of concept

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	8
2. OBJETIVOS.....	11
3. METODOLOGÍA.....	12
4. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	14
5. PINTURA SOBRE COBRE.....	17
5.1.    FABRICACIÓN DE LAS LÁMINAS DE COBRE.....	18
5.2.    ALTERACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LA PINTURA SOBRE COBRE.....	21
6. RADIOGRAFIAR METALES.....	25
7. RADIOGRAFÍAS DE LAS PINTURAS SOBRE COBRE.....	27
7.1.    RELACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO.....	27
7.2.    EQUIPO DE RAYOS X.....	30
8. PROCESADO MEDIANTE MATLAB.....	37
9. CONCLUSIONES.....	58
10. BIBLIOGRAFÍA.....	60

# 1. INTRODUCCIÓN

En el presente Trabajo Final de Máster, se realiza una prueba de concepto sobre el uso de Matlab como herramienta de objetivación en la determinación de los procesos de fabricación de láminas de cobre como soporte pictórico. Con ello se ha pretendido mostrar de forma gráfica, las diferencias en la manufactura empleada en los procesos de obtención de la lámina de cobre como soporte pictórico. De esta forma, se pretende indagar en las posibilidades del programa Matlab en nuestro campo de trabajo, que hasta la fecha es bastante escaso.

Este estudio, se fundamenta en cinco casos de estudio de radiografías de pinturas sobre cobre. En ellas se señala como la diferencia de espesores de los diferentes procesos de manufactura son un elemento distintivo. Por otro lado se determina donde se encuentran los puntos de mayor interés para el estudio de las láminas de cobre como soporte para pintura.

Esto se lleva a cabo mediante Matlab, este *software* matemático, nos ofrece la posibilidad de procesar imágenes haciendo una lectura objetiva de ellas. Este procesado de la imagen radiográfica permite su conversión a caracteres de tipo matemáticos a través del análisis de sus píxeles. Esto posibilita entre otras, la detección de puntos característicos de la imagen y generar gráficos de sus diferentes niveles de espesor y altura. En definitiva, el tratamiento de la imagen radiográfica, a través del *software* Matlab, refiere información cuantitativa y cualitativa de ésta. Información que queda oculta al ojo humano.

Matlab es un *software* que se encuentra en desarrollo y ya proporciona más de 657 funciones, de las cuales 283 están destinadas al procesado digital de imágenes. Este trabajo ha indagado en todas ellas para poder determinar las que mejor se podrían adaptar a nuestros objetivos. De todas ellas se han seleccionado tres, que son: *contour3*, *meshc* y *extractFeatures*. Con la primera función, *contour3*, el objetivo era dibujar una trama de contorno de la matriz Z, donde esta se interpreta como alturas respecto a al plano x-y,Z, para observar las diferencias en el espesor de las imágenes. Con la segunda función, *meshc*, la meta era generar una matriz de color es proporcional a la altura de la superficie, para ver las diferencias de espesor entre las imágenes para enfatizar más los resultados obtenidos con la primera función. Y por último con la tercera la función, *extractFeatures*, se buscaba representar los píxeles con el fin de encontrar características específicas de una ubicación marcando puntos de interés para el estudio de cada una de las imágenes.

Como antecedente más próximo de este trabajo de investigación es la motivación ya emprendida en mi Trabajo Final de Grado donde ya usé este programa para la realización de la simulación grafica del coeficiente de atenuación lineal del lino y el algodón.

Nuevamente lo que permite que este trabajo se ha llevado a cabo son las nuevas posibilidades que nos ofrece la radiografía digital frente a la analógica, ya que esta ofrece además de la inmediatez en su obtención por la reducción de tiempos, ofrece la posibilidad de realizar mejoras en el contraste, manipulación, etc.

Para el desarrollo del trabajo se han establecido unos objetivos y una metodología. En primer lugar se ha realizado un estado de la cuestión, donde se constata las escasas referencias del uso de Matab en el ámbito de la conservación y restauración. Así mismo, la búsqueda bibliográfica se ha extendido a todo lo referente al uso de las láminas de cobre como soporte pictórico. Esta búsqueda tiene la finalidad de ayudarnos en la comprensión de estas pinturas realizadas sobre soporte de cobre, se ha estudiado brevemente el cobre como material y los orígenes, evolución y uso de la pintura sobre lámina de cobre.

Seguidamente, se han expuesto las diferentes técnicas de fabricación de las láminas de cobre, siendo tres las principales, el vertido fundido de metal, el batido a martillo y el laminado. Del mismo modo se ha hablado de la preparación de estas para recibir la pintura a través de las recomendaciones de diferentes tratadistas.

Otra parte importante para posterior interpretación de los resultados ha sido el comprender como estos se alteran. En este sentido, las alteraciones más comunes se pueden agrupar en, las debidas al comportamiento mecánico de las láminas de cobre, las cuales pueden provocar tensiones o desprendimientos de película pictórica, o la importancia del control de la humedad relativa y la temperatura a la hora de su conservación.

Dentro de este trabajo, igual de importante ha sido poder comprender la complejidad del uso del la técnica radiográfica sobre piezas metálicas. Su homogeneidad, además del elevado nivel de absorción, que presentan en este caso las láminas de cobre siempre ha ofrecido una imagen radiográfica muy pobre en el registro tradicional, que ha mejorado algo con la incorporación del sistema digital. Dentro de este último, gracias al sistema de rango dinámico en la imagen somos capaces de ver diferencias en la superficie que siguen siendo imperceptibles al ojo humano, pero que no se escapan al software empleado en este trabajo.

Los cobres seleccionados como caso de estudio proceden de colecciones particulares presentan una temática religiosa. En ellos encontramos que se representan diferentes santos y escenas de la iconografía cristiana, como la Sagrada Familia, San Leandro, María Magdalena, San Juan y San Pedro. A excepción de la esta última obra, que presenta unas medidas superiores, el resto de cobres son de pequeño formato. Los cinco casos de estudio han sido caracterizados y también se ha explicado de forma breve los estudios que se han realizado sobre ellos, además de ser sometidos a la radiografía.

En el trabajo también se recogen las características del equipo de rayos X del Laboratorio de inspección Radiológica del Instituto de Restauración del Patrimonio (IRP) de la Universitat Politècnica de València (UPV). A continuación, se han detallado los parámetros utilizados para realizar las radiografías y se han descrito los resultados obtenidos.

Previo a la interpretación de los resultados obtenidos del procesado de las imágenes se ha hecho un breve resumen de las posibilidades que ofrece Matlab. Y como ya se ha señalado, han sido tres las funciones utilizadas para llevar a cabo esta prueba de concepto. Como ya se ha dicho, la lectura que ofrecen estos tres tratamientos sobre la imagen radiográfica nos deberán permitir ver detalles que no son perceptibles al ojo humano. La representación en distintos niveles a través de la imagen tridimensional ofrecida por Matlab en las funciones *contour3* y *meshc* nos darán esas posibilidades. En caso de la función *extractFeatures* la información será la extracción de puntos de interés de la imagen.

El trabajo termina con la muestra de una discusión de los resultados obtenidos en la comparación de las distintas imágenes de cada uno de los casos de estudio y su comparativa entre los tres sistemas empleados. Ofreciendo al final las conclusiones a las que se ha llegado.

## 2. OBJETIVOS

Para la consecución de este Trabajo Final de Máster, se han planteado los siguientes objetivos.

Como objetivos generales:

- Aportar una visión objetiva de un proceso subjetivo, mediante el uso de un *software* matemático como es, Matlab en una prueba de concepto en láminas de cobre utilizadas como soporte pictórico.
- Potenciar el uso del *software* matemático Matlab en el campo de la conservación y restauración como herramienta de los procesos conservativos restaurativos.
- Favorecer la interdisciplinariedad en el ámbito de la conservación y restauración para obtener mejoras en nuestro conocimiento sobre el patrimonio.

De forma paralela a estos objetivos generales también se han planteado una serie de objetivos específicos que son:

- Señalar como las diferencias de espesores derivadas de los distintos procesos de manufactura de las láminas de cobre son un elemento distintivo.
- Determinar los puntos de interés para el estudio que de los distintos procesos de fabricación empleados en las planchas de cobre como soporte pictórico.
- Estudiar las características y problemáticas que ofrece el cobre utilizado como soporte pictórico.

### 3. METODOLOGÍA

Para llevar a término este trabajo y lograr con ello la consecución de los objetivos planteados, se ha utilizado la siguiente metodología. En primer lugar se han estudiado las radiografías de los cinco casos de estudio. Estas radiografías se hicieron en Laboratorio de Rayos X del IRP, como ya se ha mencionado en el apartado de introducción. Se trabajó con el de formato de imagen DICOM, formato en el que es obtenida la radiografía y que permite que esta lleve aparejados los datos del objeto que va a ser radiografiado.

De manera paralela a estos primeros pasos, se ha efectuado una búsqueda bibliográfica a través de la consulta de fuentes documentales de diferente tipo tales como monografías, artículos de revista o recursos web. La finalidad de esta búsqueda va dirigida a aportar información para conocer más sobre la manufactura de las láminas de cobre como soporte pictórico, su historia, su técnica, su alteración y su conservación. También se ha buscado toda la información posible sobre el uso de los rayos X sobre el metal, así como también, se ha buscado información sobre las posibilidades Matlab para la consecución de los objetivos trazados en este trabajo.

Como ya se ha mencionado, tras el examen de la entre las 283 funciones reativas al tratamiento de imagen, de las 657 que ofrece Matlab nos ofrece se han probado tres: *contour3*, *meshc* y *extractFeatures*. El objetivo de la primera la función *contour3*, la cual dibuja una trama de contorno de la matriz Z, donde esta se interpreta como alturas respecto a al plano x-y,Z. La segunda, *meshc*, donde se genera una matriz de color que es proporcional a la altura de la superficie. Y por último *extractFeatures*, donde los pixeles representan características específicas de una ubicación marcando puntos de interés. La razón de la elección de estas, es debido a que son las que mejor se adaptaban a los objetivos que planteamos para el estudio de las imágenes, dado que son capaces de mostrar las diferencias en los espesores de forma tridimensional, las funciones *contour3* y *meshc*, según la manufactura de las láminas, que a simple vista no se ven, y que zonas son las que presentan un mayor interés para su estudio, la función *extractFeatures*.

Se ha valorado el realizar el procesado de las imágenes mediante el formato DICOM, y en caso de que los resultados, los tiempos de ejecución o los problemas que puede generar este procesado, se puede plantear realizar la conversión de la imagen DICOM a BMP y escoger un fragmento significativo para un mejor análisis de los resultados.

Por último se han evaluado los resultados cotejándolos con el análisis previo de las radiografías y del artículo de referencia para el proceso de manufactura de las láminas de cobre. Para exponer los resultados obtenidos. Finalmente se extraerán las conclusiones sobre el trabajo.

## 4. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En este apartado se ha realizado una búsqueda acerca de las funciones que nos ofrece software matemático Matlab. Este programa matemático, es utilizado en otras áreas del conocimiento, como el campo de la medicina, o la ingeniería. En el campo de la conservación y restauración, han sido pocas las referencias encontradas sobre la utilización de este software.

En el campo de la medicina encontramos estudios sobre la segmentación de células como es el caso del estudio *CellSegm- a Matlab toolbox for high throughput 3D cell segmentation*<sup>1</sup> realizado en 2013 por los investigadores, del Departamento de Biomedicina de la Universidad de Bergen, Noruega, Erlend Hodneland, Tanja Kögel, Dominik Michael Frei, Hans-Hermann Gerdes y Arvid Lunde. En este estudio los investigadores argumentan que la segmentación de células enteras permite la detección y análisis de celdas individuales, que de ser realizadas de forma manual supone una gran cantidad de tiempo. Y es a través de Matlab como logran disminuir los tiempos, gracias a la creación de *CellSegm* que es un software llamado el cual se basa en las herramientas aportadas por Matlab. Con este software se pueden realizar vistas en 3D de las células.

Otro estudio en este mismo campo es *Segmentación de Imágenes medicas para detección de detalles*<sup>2</sup> que realizaron en 2009 los investigadores de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación de Guayaquil, Ecuador, Joseph Matias, Carlos Becilla, y Patricia Chávez, en él buscaron través de la segmentación de imágenes, el poder analizar o visualizar detalles de la imagen radiológica que no se perciben a simple vista y que pueden ser decisivos en el diagnóstico de enfermedades.

Es en el caso de la ingeniería donde vamos a encontrar como el reconocimiento de puntos significativos es importante para este estudio, resaltamos el Trabajo Final de Grado, *Sistema de identificación de personas mediante reconocimiento facial aplicado a videovigilancia*<sup>3</sup> que Nerea Cañego presentó en 2017 y donde propone un método de reconocimiento facial aplicado a sistemas de videovigilancia. Para ello, desarrolla un software propio creando un código través de Matlab para la lectura de las base de datos. Otro ejemplo dentro de este campo es el Trabajo Final de Carrera de Alba María Mancebo, realizado en 2012 con el título de *Desarrollo de una interfaz gráfica en MatLab para la aplicación de detección de humos*

---

<sup>1</sup> HODNELAND,E; KÖGEL,T; FREI,D.M; GERDES, H.H; LUNDERVOLD,A. CellSegm- a Matlab toolbox for high throughput 3D cell segmentation. En: *Source Code for Biology and Medicine* 2013.

<sup>2</sup> MATIAS, J; BECILLA,C; CHAVEZ, P. *Segmentación de Imágenes medicas para detección de detalles*, 2009

<sup>3</sup> CAÑEGO, N. *Sistema de identificación de personas mediante reconocimiento facial aplicado a videovigilancia*, 2017

mediante procesamiento digital de imágenes<sup>4</sup>, donde propone el desarrollar en profundidad esta interfaz gráfica para mejorar un trabajo de similares características realizado por un compañero en años anteriores.

Un artículo de gran interés y que ha actuado como uno de los referentes para este trabajo ha sido *Visualizing pentimenti: revealing the hidden history of paintings*<sup>5</sup> (2007) de Amy A. Gooch del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Victoria, Canada y Jack Tumblin del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de Northwestern, Estados Unidos. En este estudio hablan de la exposición de obras de arte a los rayos X con el fin de ver arrepentimientos, pero ya señalan que la interpretación de estos resultados es difícil, debido a la acumulación de varios elementos dentro de la imagen obtenida. Para ello proponen un método para encontrar zonas significativas a través de la combinación de la radiografía y fotografías en color. Y aunque es un buen método, no llega a profundizar tanto como se puede llegar a hacer en Matlab.

Otro estudio, que hemos encontrado como referente, es el Trabajo Final de Máster de Ingeniería de Telecomunicación de María del Mar Velasco<sup>6</sup>. En él se intentaban sacar los patrones de una serie de teles de cuadros del siglo XVII a partir de sus registros radiográficos a través de la implementación de un algoritmo diseñado en Matlab. Concluyendo en la importancia de seleccionar bien la zona de sobre la que se va a realizar el procesado de la imagen. También habla de la dificultad en la extracción de patrones, así como su desconocimiento sobre las telas empleadas como soportes en obras de arte.

Después de la revisión bibliográfica, se ha visto que dentro del campo de la conservación y restauración, son escasos los estudios realizados con Matlab. Esto no sorprende dado que en los antecedentes de este trabajo está mi Trabajo Final de Grado<sup>7</sup>. Trabajo en el que ya quisimos hacer una aproximación a lo que se ha establecido en los objetivos específicos e este trabajo. En este antecedente usamos Matlab como herramienta para realizar un acercamiento a la simulación gráfica del coeficiente de atenuación lineal del lino y el algodón, mediante el procesado de las radiografías de unas probetas de cinco niveles de dichos materiales. En él

---

<sup>4</sup> MANCEBO, A.M. *Desarrollo de una interfaz gráfica en MatLab para la aplicación de detección de humos mediante procesamiento digital de imágenes*, 2012

<sup>5</sup> GOOCH, A; TUMBLIN, J. *Visualizing pentimenti: revealing the hidden history of paintings*. En: *Journal of Mathematics and the Arts*, 2007

<sup>6</sup> VELASCO, M.M. *Extracción de patrones en telas de cuadros del siglo XVII a partir de placas de rayos X*, 2016

<sup>7</sup> PÉREZ, P. *Simulación gráfica del valor del coeficiente de atenuación lineal del lino y el algodón*, 2017

perseguimos mostrar las diferencias de espesor de las citadas probetas para así demostrar que podemos obtener detalles que en la imagen radiográfica son imperceptibles, además de abrir la línea de investigación. En él se concluye que esta línea de investigación era viable y que los resultados que obtuvimos en Matlab fueron satisfactorios, ya que conseguimos alcanzar los objetivos propuestos.

Pero lo que si se tiene claro es que la implicación de este software en esta área está en sus comienzos y que queda mucho por recorrer. Prueba de este interés la encontramos en el curso de Matlab aplicado al patrimonio cultural organizado por el Youth in Conservation of Cultural Heritage (YOCOCU), en colaboración con la Universidad Complutense de Madrid (UCM), en 2016.

## 5. PINTURA SOBRE COBRE

El cobre (Cu), es un elemento químico de número atómico 29. Es uno de los pocos metales que se puede encontrar en estado nativo, esto es, que se trata de un mineral que se haya constituido por átomos de un solo elemento, en estado de oxidación cero, que incluyen el mercurio y ciertas aleaciones metálicas naturales<sup>8</sup>. El cobre es obtenido fundamentalmente a través de la extracción de minerales, carbonatos, óxidos o sulfuros. Entre los carbonatos más conocidos y habituales están la azurita y la malaquita<sup>9</sup>.

Es precisamente por la facilidad con la que se encuentra este metal en su estado nativo, por lo que fue uno de los primeros metales utilizados por la humanidad, la cual también descubrió que se podía martillar de manera sencilla en láminas, a las que se les podía dar la forma deseada<sup>10</sup>.

Son estas características, junto a su maleabilidad, resistencia y dureza, las que hicieron que el cobre se convirtiera en soporte para el arte. El uso no solo de cobre sino de otros metales como soporte pictórico, es conocido desde la antigüedad, como así atestiguan tratados medievales, donde se habla de pinturas sobre oro, plata o estaño. Estos metales se trabajaban hasta ser convertidos en finas láminas que se utilizaban de recubrimiento para soportes de madera<sup>11</sup>

Las pinturas sobre soporte metálico son muy antiguas. De hecho, en el siglo VIII, contaban con una técnica que se usaba para colorear láminas de estaño con un barniz de aceite que era mezclado con azafrán y *oropimente* para imitar el oro<sup>12</sup>.

Más tarde la pintura al óleo sobre soporte cobre deriva de la técnica del esmalte translucido, la cual consistía en colocar el esmalte en bajorrelieves de oro o plata. Esta técnica esta datada en el siglo XV en Limoges, Francia<sup>13</sup>. El proceso se iniciaba con la incisión sobre la lamina de cobre del motivo, a continuación se aplicaban colores vitrificables, a los que se añadía<sup>14</sup> una capa de esmalte translucido antes del cocido.

---

<sup>8</sup> <https://www.uhu.es/museovirtualdeminerologia/galerias/clase1.html>

<sup>9</sup> SÁNCHEZ, A.J; PRADO, B. "Pintura sobre cobre: Estudio técnico-material, indicadores de alteración y conservación". 2014. p.139

<sup>10</sup> <https://copperalliance.es/cobre/historia-cobre/>

<sup>11</sup> SÁNCHEZ, A.J; PRADO, B. Op.cit, 2014. p. 139

<sup>12</sup> GÉNÉREUX,A. *Les huiles sur cuivre en nouvelle-france au xvoe siècle: circulation et usages*, 2010, pp.12-13

<sup>13</sup> Ibid, pp.12-13

<sup>14</sup> SÁNCHEZ, A.J; PRADO, B. Op.cit, 2014. p. 139

Ya en el siglo XVI, el aguafuerte progresa como técnica y las láminas de cobre se convirtieron en el material idóneo para su desarrollo. El cobre como soporte parecía dar solución a los problemas de conservación de las obras, ya que estaba menos expuesto al deterioro que las pinturas sobre tabla o lienzo. Otro factor que jugaba a favor del cobre como soporte era la simpleza de su preparación, ya que éste era idóneo para la pintura al óleo, por ser un soporte no absorbente, rígido, suave y de trabajar, además su color rojizo era muy similar a las preparaciones a la almagra.

Fue también a mediados del siglo XVI, cuando la pintura sobre cobre experimentó su gran auge debido a un cambio en la clientela, la clase media se decantó por este tipo de obras para engalanar sus casas. La explotación minera también vio mejoras sustanciales con la invención del molino, capaz de elaborar planchas reduciendo costes de producción.

## 5.1. FABRICACIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS LÁMINAS DE COBRE

Como se ha señalado anteriormente, el cobre cuenta entre sus propiedades la de poder ser deformado en frío, tal y como se empezó a trabajar por la humanidad. Las diferentes técnicas de fabricación de las láminas de cobre influyen tanto en la apariencia estética de la lámina como en su comportamiento mecánico. Las tres principales técnicas de fabricación de láminas de cobre<sup>15</sup>:

- Vertido fundido del metal, con esta técnica se consiguen placas y lingotes con diferente tipo de espesor, para ello se vertía el metal ya fundido en una cama de arena, la cual se colocaba en pendiente. Para la obtención de los diferentes tamaños y grosores se procedía al martilleo de la placa obtenida.
- Batido a martillo, esta es la técnica primigenia para el procesado del metal. Con este tipo de trabajo se consigue una lámina muy rígida y de escasa homogeneidad, en ellas es frecuente ver anillos concéntricos fruto del uso del martillo así como deformaciones de la superficie.
- Laminado, esta técnica se comenzó a difundir en el siglo XVI, en ella se placa es introducida entre dos rodillos, lo cual proporciona una lámina más uniforme y

---

<sup>15</sup> Íbidem. p. 140

plana sin presencia de marcas concéntricas o concavidades como en el caso de las anteriores técnicas.

- Un dato significativo en los procesos de producción de láminas de cobre es que, hasta finales del siglo XVIII, la mayoría de láminas de cobre se seguían obteniendo por martilleo, aunque de forma ocasional desde principios del siglo XVII, las láminas eran enrolladas<sup>16</sup>.

Sea cual fuese la técnica con la que se había manufacturado la lámina de cobre, esta había de ser preparada de forma adecuada para recibir la pintura. En el caso de la preparación de las láminas de cobre, estas no necesitan una preparación al uso como si de una tabla o un lienzo se tratara, sino que gracias a las características de las láminas de cobre estas ya presentaban una superficie homogénea. La lámina se trabajaba en primer lugar alisándola mediante diferentes abrasivos, como la piedra pómez y cenizas, con esto se conseguía ver los posibles defectos de fabricación. A continuación, se realizaba el desengrasado de la lámina y se procedía a su lijado para una mejor adhesión de la pintura.

Entre los tratadistas europeos, que también han escrito sobre este tema, encontramos a Cenino Cennini, quien en su libro *El arte de la pintura*, escribe sobre la posibilidad del cobre para poder ser pintado con óleo, hablando de un jugo que no resistía la humedad y que era adecuado para tablas y metales protegidos con barniz líquido.<sup>17</sup> Giorgio Vasari, quien menciona en su libro *Las vidas de los más excelentes pintores, esultores y arquitectos* (1550) a Sebastiano del Piombo, ya que fue este, quien demostró cómo se debía de pintar sobre cobre, plata y otros metales, a pesar de esta mención, no se indica como del Piombo ejecutaba la técnica<sup>18</sup>. En Francia, ya en el siglo XVIII el alquimista, bibliotecario y escritor Antoine Joseph Pernety en su *Dictionnaire portatif de peinture, sculpture et gravure*, habla de una imprimación de oleo de dos o tres capas, siendo la última golpeada cuando se encuentre mordiente para así conseguir un mejor agarre de la pintura<sup>19</sup>. Mientas Watin, también francés, proponía en su

---

<sup>16</sup> HOROVITZ, I. "Paintings on copper: A brief overview of their conception, creation and conservation". En *Paintings on copper and other metal plates. Production, Degradation and Conservation Issues*. Valencia, 2017.pp. 19-20.

<sup>17</sup> Ibidem, p. 141

<sup>18</sup> VEGA,D; POMBO,I; CARLYLE,L. *Pintura sobre cobre: investigación sobre materiales y técnicas de aplicación de la capa de preparación a través de los tratados tradicionales y estudio analítico de dos obras atribuidas a las escuelas portuguesa y flamenca*, 2018, p.45

<sup>19</sup> SÁNCHEZ, A.J, PRADO, B. Op.cit, 2014. p. 139

tratado *L'art du peintre, doreur vernisseur*, dos capas de blanco de plomo y aceite, aplicados con aceite de trementina para una mejor penetración del aceite<sup>20</sup>.

Como se ha señalado debido a las características de las láminas de cobre son muy particulares por lo que en su preparación no se utilizaban cargas inertes, sino que se sustituían por pigmentos y los aglutinantes orgánicos de tipo higroscópico se reemplazaban por aceites secantes. Muestra de ello se hace patente en libros y tratados de diferentes autores como en el *Arte de la Pintura* de Francisco Pacheco (1649), el tratado de Antonio Palomino, *El Museo Pictórico y Escala Óptica* (1797), o en el *Tratado de pintura general* de Vicente Poleró y Toledo (1886)<sup>21</sup>, donde cada uno de ellos daba unas pautas en la preparación de las láminas. Pacheco recomendaba el blanco de plomo, junto con pigmentos sombra y aceite de linaza. Palomino proponía el remolido de los pigmentos, el uso de ajo para facilitar el agarre y el secado homogéneo. Por último, Poleró también proponía el uso de ajo como imprimación seguido de una ligera mano de color.

Una vez preparada la superficie se procedía a pintar la lámina, en el caso de la pintura sobre cobre el procedimiento pictórico más adecuado es el graso ya que es el más compatible con la capa preparatoria. Con la preparación de blanco de plomo, también conocido como albayalde, se conseguía un soporte de color blanco, el cual tenía también la función de aislar el estrato pictórico de la lámina de cobre y a su vez actuaba como inhibidor de la corrosión. No obstante, hay también algunas fuentes que también hablan de de una preparación similar a la que se realizaba en las placas de grabado, matizando que estas no se pulían hasta el final dejando así la superficie rugosa para una mejor unión de la pintura con el soporte<sup>22</sup>.

Las pinturas sobre cobre se caracterizan por ser delicadas, con unas temáticas que van desde escenas a paisajes y retratos cargados de detalles. En numerosas ocasiones se trabajaba mediante veladura. Es también usual encontrar huellas dactilares, ya que los pintores las utilizaban para conseguir transparencia y dar la sensación de ligero<sup>23</sup>. El barnizado que se daba a estas pinturas era a modo de protección, ya que la pintura tenía brillo propio tras su ejecución.

En ocasiones puede observarse, desde la distancia, como la lámina de cobre presenta ligeras ondulaciones debido al método de fabricación de la lámina. Estas láminas destinadas a ser

---

<sup>20</sup> Ibidem, p. 141

<sup>21</sup> Ibidem

<sup>22</sup> HOROVITZ, I. Op.cit, 2017, pp.19-20

<sup>23</sup> SÁNCHEZ, A.J; PRADO, B. Op.cit, 2014,. p. 142

soporte pictórico llegaron a equipararse a los paneles de roble en cuanto a sus costes de producción, tal como señalan los estudios realizados por Jorgen Wadum, cuando habla sobre la producción de láminas de cobre en Amberes durante los siglos XVI y XVII<sup>24</sup>.

## 5.2. ALTERACIÓN Y CONSERVACIÓN DE LA PINTURA SOBRE COBRE

Las pinturas realizadas sobre cobre presentan en general buena resistencia a los agentes de deterioro, no obstante como cualquier objeto están expuestas al paso del tiempo se envejecen y se degradan. El que su deterioro sea más lento o sus efectos sean menos evidentes viene dado por las características del soporte y por la preparación a la que este es sometido, esta es fundamental y cualquier fallo durante su aplicación puede causar la aparición de daños considerables.

El que el paso del tiempo sea apenas imperceptible en este tipo pinturas es fruto de la delgadez de las diferentes capas, y del coeficiente de dilatación del óleo que presenta similitud al del cobre. La aparición de daños está relacionada con el secado y el envejecimiento del aglutinante, por lo que es muy importante tener presente el índice de absorción de los diferentes pigmentos.<sup>25</sup> De esta forma las zonas que muestran una mayor fragilidad son aquellas en las que interacciona el aglutinante de la capa pictórica con la lámina de cobre. Y por ello también es en estas zonas donde se puede producir la pérdida de policromía o la aparición de levantamientos de la capa pictórica.

Los óleos sobre cobre están expuestos a diferentes procesos de degradación, entre las causas de degradación más comunes se encuentran las que son debidas a factores de tipo mecánico. Este tipo de degradación son los desprendimientos de la capa pictórica, los cuales vienen dados por las tensiones que pueden producirse en el soporte o por la dilatación de este. La dilatación suele producirse cuando la pintura está expuesta al calor, lo cual conduce a que el soporte se deforme. Otro factor que influye en este tipo de degradación es la manipulación incorrecta de la obra, que puede conllevar daños en las zonas de mayor exposición como son los bordes las esquinas.

---

<sup>24</sup> HOROVITZ, I. Op.cit, 2017, p. 19

<sup>25</sup> SÁNCHEZ, A.J.; PRADO, B. Op.cit, 2014,. p. 142

Por otro lado, los movimientos derivados de las tensiones mecánicas pueden ser de diferentes tipos, por un lado se puede dar de forma corta y débil comportándose de forma flexible, por otro puede la obra se puede ver sometida a una tensión prolongada en el tiempo y se flexibiliza volviendo a su forma primigenia cuando esta tensión desaparece. No obstante si se somete el a una tensión de forma repetitiva, la lámina se vuelve dura y pierde elasticidad y flexibilidad pudiéndose producir su rotura.

Los fenómenos químicos también son causantes de procesos de degradación. Estos se producen cuando el cobre interacciona con diferentes agentes atmosféricos. De esta manera cuando entra en contacto con el agua y el oxígeno se produce un proceso de corrosión, el cual lleva a que se generen sales de tipo insoluble, como los carbonatos, que cristalizan sobre el soporte. Las zonas más expuestas a este tipo de procesos son aquellas donde no hay película pictórica, como sería el soporte por su anverso o lagunas y grietas que se hayan podido producir.

El uso de pigmentos con componentes metálicos, que no sean cobre, puede generar fenómenos de corrosión galvánica<sup>26</sup>. Esta se produce cuando entran en contacto dos metales cuyo potencial eléctrico es diferente. Y es ahí donde el metal que tenga un potencial más bajo se convertirá en el ánodo y se oxidará, mientras que el metal con mayor potencial se convertirá en el cátodo y no oxidará.

Otros tipos de corrosión a los que se puede encontrar sometida este tipo de pintura son la corrosión uniforme, que no es otra que la producida cuando el metal entra en contacto con el ambiente y oxida de forma homogénea por toda la superficie del metal. Se puede generar también una corrosión más localizada.

De todos modos, la degradación que se suele dar con mayor frecuencia en las pinturas sobre cobre es el fallo en la adhesión de la capa de pintura al soporte.<sup>27</sup> esto puede conducir a que se generen fisuras en la lámina de cobre, produciéndose así la exposición de esta a fenómenos de corrosión. Los productos de corrosión aumentan su volumen y ejercen presión sobre la película pictórica, lo cual genera pérdidas. Esto se da de manera especial en las zonas donde predominan los colores oscuros debido al comportamiento mecánico de los pigmentos tierra. Para que esto no suceda la capa de preparación ha de crear una buena adhesión con el sustrato que aisle el soporte del ambiente.

---

<sup>26</sup> SÁNCHEZ, A.J.; PRADO, B. Op.cit, 2014. P. 143

<sup>27</sup> BROERS, N. "Preparation techniques and their impact in the conservation of copper paintings". En: *Paintings on copper and other metal plates. Production, Degradation and Conservation Issues*. Valencia, 2017. p. 79.

Para evitar que todos estos factores de degradación puedan afectar a este tipo de obras sobre soporte metálico, es importante tener en cuenta ciertos factores que siendo controlados pueden minimizar los efectos nocivos sobre las obras y por tanto reducir o evitar daños mayores. El primero de esta serie de factores es poder, como siempre, controlar es la humedad relativa ya que esta puede conducir a que se produzcan fenómenos de corrosión en contacto con el aire. Para ello los estándares recomendados para este tipo de obras es de 35% - 55% de humedad relativa para aquellas que no sufran una corrosión activa e inferior al 35% si están sometidas a un proceso de corrosión activa<sup>28</sup>. Junto a la humedad relativa otro factor importante es la temperatura a la que está expuesta o almacenada la obra.

No obstante, el cobre, es un material, que como se ha señalado tiene ventajas particulares sobre el lienzo o la tabla, ya que las láminas de cobre no suelen ser sensibles a cambios dimensionales a causa de la humedad relativa, ya que estas no son higroscópicas y por lo tanto no esperan experimental ningún cambio referente a las fluctuaciones de la humedad relativa<sup>29</sup>. Por lo que en condiciones normales la lamina de cobre no sufrirá un proceso de corrosión hasta llegar a alcanzar una humedad relativa por encima del 65%<sup>30</sup>.

Respecto a la temperatura se ha observado que el diferentes pinturas sobre cobre, que no son propensas a agrietarse a causa de la temperatura, ya que el cobre tiene un bajo coeficiente termal (0,000017) lo cual indica que no se producen cambios significativos de las dimensiones en función de la temperatura.<sup>31</sup>

La iluminación es otro factor importante a tener en cuenta, a pesar de que las obras sobre cobre se ven menos afectadas por este debido a su naturaleza inorgánica, la radiación incide sobre los pigmentos los cuales se ven afectados ya que pueden sufrir variaciones en su tono, produciendo su pérdida de tonalidad original. El efecto que puede causar una mala iluminación es acumulativo siendo el aporte de luz ultravioleta el más nocivo de todos, llegando a producir daños estructurales. Es por ello que una buena iluminación es aquella que no sobrepasa os 50 lux. Por último la contaminación es otro de los factores a controlar, ya que esta puede llegar a desencadenar procesos de corrosión sobre el metal por la interacción de agentes atmosféricos. En definitiva, debido a la complejidad, tanto estructural como química, de las

---

<sup>28</sup> SÁNCHEZ, A.J; PRADO, B. Op.cit, 2014. P. 143

<sup>29</sup> FUSTER, L; MECKLENBURG,M. "A look into some factors influencing the film forming properties of oil paint films in copper paintings and the effects of environment in their structural behavior". En: *Paintings on copper and other metal plates. Production, Degradation and Conservation Issues*. Valencia, 2017. p.98

<sup>30</sup> HOROVITZ,I. Op.cit, 2017, p. 22.

<sup>31</sup> FUSTER, L; MECKLENBURG,M. Op.cit, 2017, p. 101

pinturas sobre cobre, o sobre cualquier soporte metálico, hace necesaria la correcta comprensión que juega este tipo de soportes en su interacción con la película pictórica para conocer su comportamiento mecánico y dimensional para poder trazar las estrategias adecuadas para su conservación<sup>32</sup>.

---

<sup>32</sup> Ibidem, p.101

## 6. RADIOGRAFIAR METALES

La técnica de los rayos X ofrece la posibilidad de poder ver más allá de lo que permite el ojo humano y gracias a esto poder extraer datos de relevancia en la formación, y degradación de un objeto artístico, pudiendo comprender la estructura interna de este y revelando importantes informaciones sobre su estado de conservación.

Desde que fue inventada en el año 1895 por William Roetgen, la técnica radiográfica ha experimentado una importante evolución de unas primeras radiografías obtenidas mediante un proceso de revelado analógico el cual suponía también un tiempo considerable. Hasta hoy en día donde la radiografía digital ha supuesto grandes avances, como es la inmediatez de la obtención de los resultados y las múltiples opciones que otorga esta técnica digital a la radiografía, como mejoras en su contraste, mayor nivel de precisión del análisis de las radiografías. Esta digitalización del proceso, es como se ha señalado anteriormente, lo que ha posibilitado la realización de este trabajo. Además, se ha podido constatar que la radiación necesaria para formar la imagen utilizando el registro digital ha descendido en torno al 1000%, lo cual ha mejorado la seguridad del operador, ya que esto supone la reducción de los tiempos de exposición a la radiación<sup>33</sup>.

Otro factor importante de la radiografía digital es la rentabilidad, ya que los costes de realizar una radiografía son mucho menores a los que suponía la radiografía analógica. Esta última además suponía una limitación en cuanto a las obras que podían ser radiografiadas<sup>34</sup>, ya que había que decidir y seleccionar aquellas que se consideraban más relevantes, debido al coste de su ejecución, problema que como se ha señalado ha sido superado con el uso de la radiografía digital.

El uso de la técnica radiográfica, también da la posibilidad de observar intervenciones anteriores, posibles puntos de fractura e incluso, permite diferenciar piezas originales de falsificaciones. A estas posibilidades se une también la de poder llevar a cabo reconstrucciones del objeto, ya que gracias a la mejor comprensión de su estructura interna se pueden realizar reposición de piezas faltantes.

---

<sup>33</sup> MADRID, J. Dos décadas de inspección radiográfica en España: retrospectiva y horizontes futuros en un contexto de cambio tecnológico, 2014, pp. 85-92

<sup>34</sup> Íbidem pp. 85-92

Cada objeto a radiografiar tiene unos materiales constituyentes que son diferentes lo cual, hace que para la obtención de su radiografía se trabaje en un rango u otro. A continuación se adjunta una tabla (tabla 1) diferentes rangos de potencial según las características del objeto<sup>35</sup>.

Tabla 1. Rango de potenciales según las características del objeto.

<b>Rango de potenciales utilizados en función de las características del objeto.</b>	
<b>5 - 30 kV.</b>	Estampas, billetes, papeles, dibujos, acrílico y pintura pastel, ambos sobre cartón, lino o soporte de lona, con capa preparatoria de gesso. La radiografía de estos objetos necesita generadores que tengan ventana de Berilio en el tubo.
<b>30 - 80 kV.</b>	Pintura de caballete con soporte leñoso con estrato preparatorio espeso, escultura sobre madera, cerámica, momias, etc... Con 80 kV se pueden atravesar espesores de 40 cm.
<b>80 - 350 kV.</b>	Piezas de madera con altos espesores, así como piezas de metal.

En la inspección radiológica de metales en el campo de la conservación y restauración de bienes culturales, lo más usual es el estudio de piezas metálicas arqueológicas. Este tipo de materiales han estado expuestos a unas condiciones medioambientales particulares, ya que en numerosas ocasiones estos objetos han permanecido enterrados durante años, en los cuales han sufrido diferentes procesos de corrosión, que han llevado en la mayor parte de los casos a la generación de grandes bloques compactos amalgamados por esta corrosión con la tierra, en los que el objeto de no ser radiografiado, es imposible conocer su estado original. Los datos obtenidos en las radiografías muestran las diferentes técnicas de elaboración, las decoraciones y las inscripciones.

Como se señalará en el siguiente punto, los voltajes utilizados para llevar a cabo la realización de las radiografías de las láminas de cobre pintadas, casos de estudio de este trabajo, distan de los valores de voltaje señalados en la tabla anterior. Para el estudio de estas láminas se han utilizado voltajes entre 47 kV y 52 kV, voltajes que encajen mas en procesos de radiografiado de pinturas de caballete. El uso de voltajes más bajos viene dado por el espesor de las láminas de cobre los cuales se encuentran en torno a los 0,38 y 0,45 milímetros, motivo por el cual los rayos X no han de traspasar piezas de alto espesor. Además los resultados obtenidos con estos voltajes muestran con suficiente claridad los datos más relevantes de las pinturas sobre cobre para el estudio de las mismas.

<sup>35</sup> MADRID, J. Aplicación de la técnica radiográfica en la Conservación y Restauración de Bienes Culturales.,2006, p. 41.

## 7. RADIOGRAFÍAS DE LAS PINTURAS SOBRE COBRE

El estudio de estas pinturas sobre lámina de cobre realizado mediante el uso de la técnica de Rayos X, puede mostrar las diferencias en la densidad de la lámina de cobre, derivado esto de la desigualdad en su grosor. Son estas diferencias en su grosor las cuales van unidas a su proceso de manufactura las que también conducen a la aparición de patrones fácilmente identificables. La identificación de estas particularidades es más sencilla hoy en día tal y como se ha señalado en el punto anterior, debido a la aparición de la radiografía digital, más inmediata y con mayor rango dinámico.

A continuación se ha realizado una descripción de las cinco obras utilizadas como objeto de estudio para la realización de este trabajo para posteriormente, especificar los diferentes parámetros y condiciones en los que se han realizado cada una de las cinco radiografías, además de exponer las observaciones extraídas tras el estudio de las mismas.

### 7.1. RELACIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

En este punto se muestran brevemente las características técnicas de cada una de las cinco pinturas sobre cobre, casos de estudio de este trabajo (tablas 2, 3, 4, 5 y 6). Estas obras ya han formado partes de otros estudios en mayor profundidad, por lo que aquí se señalarán algunas de las técnicas a las que también han sido sometidas.

Tabla 2. Características técnicas del caso de estudio 1.

Caso de estudio	1
Título	<i>San Leandro</i>
Autor	Desconocido
Dimensiones	16,4 × 12,8 cm
Espesor	Entre 0,38 y 0,42 mm
Época	Siglo XVII
Procedencia	Colección particular
Núm. de referencia Rx	Ref.-587



Tabla 3. Características técnicas del caso de estudio 2.

Caso de estudio	2
Título	<i>Sagrada Familia</i>
Autor	Desconocido
Dimensiones	24,2 × 19,1 cm
Espesor	Entre 0,32 y 0,42 mm
Época	Siglo XVII
Procedencia	Colección particular
Núm. de referencia Rx	Ref.-654



Tabla 4. Características técnicas del caso de estudio 3.

Caso de estudio	3
Título	<i>María Magdalena</i>
Autor	Desconocido
Dimensiones	16,3 × 11,8 cm
Espesor	Entre 0,40 y 0,45 mm
Época	Siglo XVI - XVII
Procedencia	Colección particular
Núm. de referencia Rx	Ref.-586

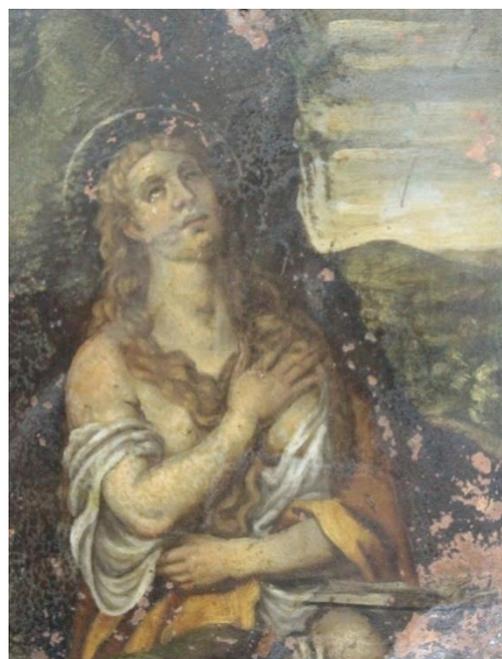


Tabla 5. Características técnicas del caso de estudio 4.

Caso de estudio	4
Título	<i>San Juan</i>
Autor	Desconocido
Dimensiones	Falta cm
Espesor	Falta mm
Época	Falta
Procedencia	Colección particular
Núm. de referencia Rx	Ref.-738



Tabla 6. Características técnicas del caso de estudio 5.

Caso de estudio	5
Título	<i>San Pedro</i>
Autor	Desconocido
Dimensiones	49'7 x 38'2 x 5 cm
Espesor	Entre 0,38 y 0,42 mm
Época	Último tercio del S. XVIII
Procedencia	Colección particular
Núm. de referencia Rx	Ref.-739



Con respecto a los diferentes análisis y técnicas aplicadas al estudio de las diferentes obras, en los casos de *San Leandro*, *Sagrada Familia* y *María Magdalena*, además de haber sido radiografiados también se propuso también un estudio de materiales, Fotografía Infrarroja (IR), estudios de análisis tridimensional (3D) y examen con Fluorescencia de Luz Ultravioleta (UV) de estos únicamente se realizó el estudio de materiales y las radiografías, ya que eran necesarios para obtener conclusiones relevantes<sup>36</sup>.

Para el estudio de materiales, del *San Leandro* y la *Sagrada Familia*, se tomaron muestras que fueron expuestas a la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido- Microanálisis de Rayos X (SEM-EDX), realizado en un Bruker –Quantax X Flash, acoplado a un microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3400N. previo estudio mediante microscopio estereoscópico Nikon SMZ1000. Además también se les realizó un estudio estratigráfico, mediante microscopio óptico Nikon ECLIPSE80i con cámara Nikon DS-Fil1 con luz reflejada y polarizada e iluminación UV<sup>37</sup>.

En el caso de la obra de *San Pedro*, esta fue tema de estudio del Trabajo Final de Máster de Celia Luque<sup>38</sup>, quien además de contar con las radiografías también realizó diferentes pruebas. Con el objetivo de la identificación de pigmentos, extrajo muestras de los diferentes pigmentos y los analizó mediante microscopia óptica, con un microscopio Leica MZ APO, posteriormente realizó un análisis de SEM-EDX con el modelo LEOL JSM 5410 LV Scanning Electron Microscope.

En lo referente a las obras de *María Magdalena* y *San Juan*, no han sido objeto de estudio más allá del estudio de su estado de conservación así como también de su estudio radiográfico.

## 7.2. EQUIPO DE RAYOS X

Las radiografías de las láminas de cobre, objetos de este trabajo, han sido realizadas por el profesor José A. Madrid García responsable de la instalación del Laboratorio de Inspección Radiológica del Instituto Universitario para la Restauración del Patrimonio de la Universitat Politècnica de València. Este laboratorio cuenta con un equipo de rayos X, TRANSPORTIX 50,

---

<sup>36</sup> CHULIÁ, I. SARRIÓ, M<sup>a</sup> F. FERRAZZA, L. MADRID, J.A. PÉREZ, J. "Valoración científico técnica de la pintura sobre cobre: Casos de estudio". *En Painting on copper and other metal plates. Production, Degradation and Conservation Issues*. Valencia, 2017. p. 137.

<sup>37</sup> Íbidem, p.139

<sup>38</sup> LUQUE, C. *Un "San Pedro" italiano del s.XVIII sobre lámina de cobre. Estudio histórico-técnico y proceso de intervención*. [Trabajo final de máster]. València: Facultat de Belles Arts. Universitat Politècnica de València, 2018

de la empresa General Electric, con un tubo de rayos X de 3 kW y un foco de 2,3 con sólo una filtración total de 2 mm de aluminio, características que le permiten trabajar en voltajes muy bajos con un rango de 20 a 110 kV. Con placas digitales CR MDT4.0T de la empresa Agfa.

El estudio radiográfico se ha basado en la obtención de la superficie completa de las láminas de cobre en placas de 35 × 45 cm, salvo en el caso de la pintura de *San Pedro* (ref.739) en la que fueron necesarias dos placas con el tamaño referenciado anteriormente, ya que es mayor en sus dimensiones que las otras obras. Respecto a su procesado se realizó a través de un digitalizador CR 30-X de la empresa Agfa.

En relación con los voltajes, el caso de estudio que obtuvo un mayor rango fue la obra de *María Magdalena* (ref.- 586) con 52 kV (tabla 9), siguiendo con el caso de la pieza del *Sagrada Familia* (ref.- 654) que fueron de 51 kV (tabla 8). El rango de más común de voltaje se establece en la plancha de *San Leandro* (ref.- 587), la pieza de *San Juan* (ref.- 783) y nuevamente en el último caso de estudio de la obra de *San Pedro* (ref.- 739), con un valor 47 kV (tablas 7, 10 y 11). La intensidad de corriente en todos los casos fue de 20 mA y el tiempo de exposición en 3 segundos. La distancia entre el foco y el plano donde se forma la imagen se ha mantenido en 100 cm, excepto en la de *San Pedro* que fueron 150 cm.

Tabla 7. Datos técnicos del caso de estudio 1.

Caso 1.- <i>San Leandro</i> (ref.-587)
1 placa de 35 × 45 cm
Voltaje empleado 47 kV
Intensidad en cada uno de los disparos de 20 mA,
Distancia entre fuente y objeto de 100 cm
Una exposición de 3" en cada una de las exposiciones efectuadas



Tabla 8. Datos técnicos del caso de estudio 2.

Caso 2. <i>Sagrada Familia</i> (ref.-654).
1 placa de 35 × 45 cm
Voltaje empleado 51 kV
Intensidad en cada uno de los disparos de 20 mA
Distancia entre fuente y objeto de 100 cm
Una exposición de 3" en cada una de las exposiciones efectuadas.

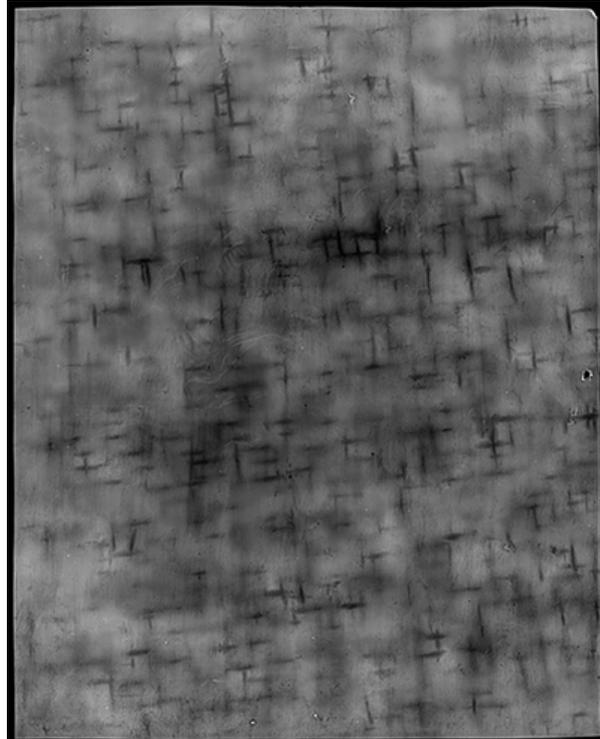


Tabla 9. Datos técnicos del caso de estudio 3.

Caso 3. <i>María Magdalena</i> (ref.- 586).
1 placa de 35 × 45 cm
Voltaje empleado 52 kV
Intensidad en cada uno de los disparos de 20 mA
Distancia entre fuente y objeto de 100 cm
Una exposición de 3" en cada una de las exposiciones efectuadas.



Tabla 10. Datos técnicos del caso de estudio 4.

Caso 4. <i>San Juan</i> (ref.-738)
1 placa de 35 × 45 cm
Voltaje empleado de 47 kV.
Intensidad en cada uno de los disparos de 20 mA
Distancia entre fuente y objeto de 100 cm.
Una exposición de 3" en cada una de las exposiciones efectuadas.

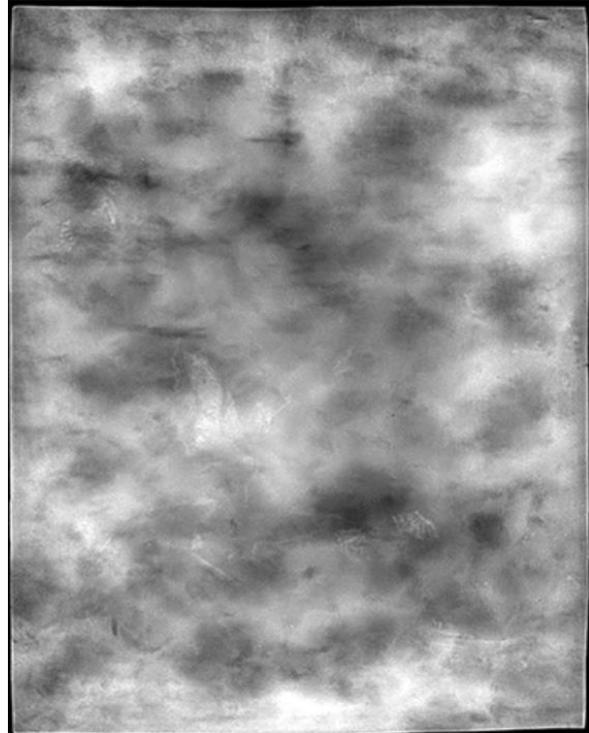
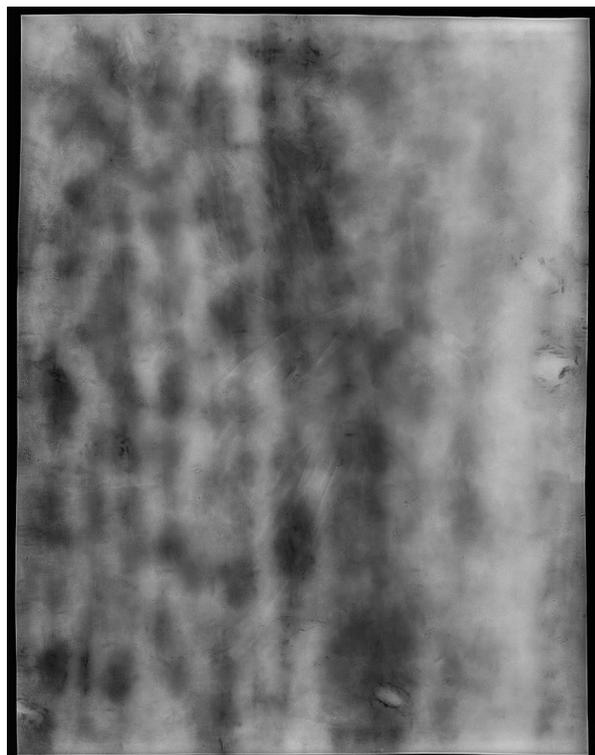


Tabla 11. Datos técnicos del caso de estudio 5.

Caso 5. <i>San Pedro</i> (ref.-739)
2 placas de 35 × 45 cm
Voltaje empleado de 47 kV.
Intensidad en cada uno de los disparos de 20 mA
Distancia entre fuente y objeto de 150 cm
Una exposición de 3" en cada una de las exposiciones efectuadas



Tras la realización de las radiografías, estas son las observaciones extraídas de las mismas. Se pueden observar diferencias debido a los tipos de manufactura empleados en la realización de las láminas de cobre. Las 'manchas', son producto de la diferencia de densidad en la superficie de cada una de las láminas, que tal y como se ha señalado con anterioridad, son producidas en su realización y por ello muestran patrones distintos. Las partes más oscuras, son producto de una tensión reiterada y muestran las zonas donde el endurecimiento de la placa es mayor y es ahí donde hay más riesgo de rotura. A continuación, se analizan cada uno de los casos de forma individual:

- Caso 1, *San Leandro* (ref.- 587). Es muy probable que el proceso de manufactura de esta obra se realizara mediante el laminado de la plancha de cobre, lo que produce un patrón de manchas que se repite a lo largo de toda su superficie de forma longitudinal.
- Caso 2, *Sagrada Familia* (ref. - 654). En este caso también se muestran las marcas propias del proceso de manufactura mediante la técnica del laminado. No obstante, se observa un mayor nivel de fisuras que en el Caso 1, quizás debido a un posterior batido por un martillo un con boca fresada.
- Caso 3, *María Magdalena* (ref.- 586). En esta obra el sistema de manufactura de la lámina de cobre es diferente al de las dos obras anteriores, ya que tras el examen de la radiografía, esta muestra las marcas propias del batido a martillo, con apariencia de círculos concéntricos.
- Caso 4. *San Juan* (ref.- 738). En esta obra de nuevo se puede ver como en la obra anterior, la de *María Magdalena*, unas marcas circulares concéntricas que se repiten a lo largo de la superficie de la lámina de cobre por lo que su proceso de manufactura fue el batido a martillo.
- Caso 5. *San Pedro* (ref.- 739). De similares características al caso anterior de *San Leandro*, el proceso de utilizado para conseguir la lámina de cobre de esta obra fue el proceso de de laminado. No obstante, este es también un caso particular, ya que se observan unas líneas paralelas que barren la imagen de izquierda a derecha, así como también algún pequeño golpe de martillo.

En las radiografías, también se pueden ver los deterioros propios de las láminas de cobre como soporte pictórico:

- Caso 1, *San Leandro* (ref.- 587). Las zonas de oxidación se concentran en los bordes superior e inferior de la pieza, así como en la parte central. No presenta una relación entre el grado de oxidación y las zonas que presentan menor densidad en la radiografía y por lo tanto con menor espesor.
- Caso 2, *Sagrada Familia* (ref.- 654). Presenta algún ataque en la parte inferior, pero lo que más llama la atención es la gran cantidad de fisuras en la parte interna de la plancha, como consecuencia del posterior trabajo de batido con un martillo de boca fresada, el cual ha reducido todavía más el escaso espesor de la lámina de cobre.
- Caso 3, *María Magdalena* (ref.- 586). Los puntos que presentan más ataque o deterioro producido por la oxidación del cobre se concentran en las zonas en las que se observa una menor densidad.
- Caso 4. *San Juan* (ref.- 738). La obra presenta zonas de baja sensibilidad a la radiación, lo cual indica una menor densidad, y es en estas zonas donde encontramos posibles procesos de corrosión de la lámina de cobre, que en este caso en particular son zonas de mayor tamaño que en los casos de estudio anteriores.
- Caso 5. *San Pedro* (ref.- 739). Este último caso, al igual que los anteriores, muestra zonas con una menor densidad, lo cual es indicador de procesos de oxidación de la lámina de cobre. Sobre todo destaca la mitad derecha de la imagen la cual presenta una mayor densidad y mayor espesor.

Por último, estos son los datos referentes a los estratos pictóricos de cada una de las láminas:

- Caso 1. *San Leandro* (ref.- 587). Tras el estudio de la radiografía, se ha observado que la obra muestra un estrato pictórico muy débil.
- Caso 2. *Sagrada Familia* (ref. - 654). Al igual que en el caso de estudio anterior, de nuevo se muestra un estrato pictórico muy débil.
- Caso 3. *María Magdalena* (ref.- 586). Este es un caso particular, ya que a diferencia de las dos obras anteriores en esta, se puede observar como su estrato pictórico es tan excesivamente fino que es casi inexistente.

- Caso 4. *San Juan* (ref.- 738). Como se ha señalado ya en los casos anteriores de las obras de *San Leonardo* y de la *Sagrada Familia* el estrato pictórico que se observa es nuevamente muy débil.
- Caso 5. *San Pedro* (ref.- 739). Este último caso de estudio, ha mostrado al igual que las obras anteriores, a excepción del cobre con la pintura de *María Magdalena*, que su estrato pictórico es muy débil.

## 8. PROCESADO MEDIANTE MATLAB

El *software* matemático Matlab, cuenta entre sus múltiples funciones y herramientas, con la posibilidad de poder procesar imágenes a sus caracteres matemáticos, lo cual da la posibilidad de obtener graficas tridimensionales o extraer puntos de interés mediante sus funciones. Este precisamente este el motivo que convierten a este programa en la herramienta idónea para la consecución de los objetivos planteados de este trabajo final de máster.

El procesado digital de imágenes (PDI) se basa en el almacenamiento, transmisión y representación de información de imágenes digitales a través de computadora digital. Gracias a esto se obtiene un mejor conocimiento e información sobre la imagen a estudiar favoreciendo así a la interpretación y tratamiento de los datos de esta. Matlab cuenta con un total de 283 funciones cuyo fin, es el procesado digital de imágenes. Una vez se introduce la imagen, esta es leída por Matlab como una función de tipo bidimensional de intensidad de luz  $f(x,y)$  donde  $x$  e  $y$  se convierten en las coordenadas y  $f$  se convierte en un valor que se encuentra en cualquier punto entre  $x$  e  $y$ . En el caso de una imagen en escala de grises, como son los casos de estudio de este trabajo, se conoce como nivel de gris. Mientras que las imágenes introducidas en color, no son más que la combinación de imágenes individuales, fruto de la combinación de tres componentes como son el rojo, verde y azul, lo que es conocido como el espacio RGB.

Las acciones realizadas en imágenes a escala de grises se pueden llevar a cabo también en las imágenes en color ya que este *software*, ofrece la posibilidad de poder procesar cada uno de los componentes de la imagen a color por separado. Digitalizada la imagen, se digitalizan también las coordenadas de estas a través de su muestreo y de sus los valores de amplitud gracias a la cuantificación, lo que da como resultado una matriz de números reales. Tras este proceso de análisis de la imagen la información extraída es de tipo cuantitativo y da como resultado la obtención de una tabla de datos, una gráfica o una representación numérica.

Las herramientas del procesado digital de imágenes, cuentan con un conjunto de funciones que se han diseñado específicamente para desarrollar aplicaciones y algoritmos para procesar y analizar las imágenes, esto conlleva diferentes procesos que otorgan una visión general y estructurada, y que además, pueden ser clasificados en tres categorías con algoritmos diferentes.

La primera de estas categorías está relacionada con la mejora o realce de la imagen, actuando sobre la nitidez o el ruido de la imagen. La segunda a esta ligada a la restauración de la imagen dañada debido a factores desconocidos, eliminando así el movimiento, distorsiones, interferencias o desenfoques. Por último, la segmentación de imágenes, la cual divide la imagen aislando fragmentos o dividiéndola en partes, en función de las diferentes formas de la imagen. Es por ello por lo que la complejidad de la acción que se va a acometer en el procesado digital de la imagen es la que va a determinar el número de acciones necesarias para una correcta resolución del problema.

La lectura de imágenes en Matlab, se realiza a través del uso de líneas de comando. La función utilizada para la introducción de la imagen es *imread*, la cual se utiliza de la siguiente manera:

```
>> I= imread ('nombre_archivo.jpg')
```

Las herramientas destinadas al procesado digital de imágenes de Matlab tienen la capacidad de poder soportar imágenes obtenidas mediante diferentes dispositivos y diferentes formatos tales como cámaras digitales, microscopios o imágenes de rayos X, entre otras. Respecto a los diferentes formatos de imágenes, puede leer desde imágenes en TIFF, PNG, JPEG, BMP.

En cuanto al formato DICOM, debido a sus características cuenta con su propia función de introducción, aunque no difiere mucho de la función de introducción del resto de formatos, esta es:

```
>> I= dicomread ('nombre_archivo.dcm')
```

La introducción de imágenes en este formato permite que lleven aparejadas especificaciones como por ejemplo los metadatos, que son leídos mediante la función *dicominfo*.

Una vez explicado brevemente el funcionamiento de Matlab y algunas de sus funciones y herramientas más relevantes, se va a proceder describir los pasos realizados mediante Matlab en cada uno de los cinco casos de estudios de este trabajo así como los resultados obtenidos tras su procesado Como ya se ha descrito en anteriores apartados, se ha optado por tres funciones.

- **contour 3**
- **meshc**
- **extractFeatures**

Estas han sido seleccionadas por su adecuación a los objetivos planteados para realizar esta prueba de concepto, por lo que ahora se van a explicar en mayor profundidad las funciones para una mejor comprensión de los resultados obtenidos al procesar las imágenes con diferentes formatos de archivo.

En primer lugar se ha trabajado con la imagen en formato DICOM de cada una de las cinco imágenes. Las funciones que se han utilizado son, la función *contour3* y *meshc*. Con ellas se ha obtenido las diferencias de espesor derivado del proceso de manufactura empleado para la obtención de la lámina de cobre.

### **Contour3**

Con la función *contour3*, se ha creado un trazado de contorno en 3D que contiene las isocurvas de la matriz Z, donde Z es la que contiene los valores de altura del plano x – y, que a su vez son también las coordenadas de este mismo plano. Con ello Matlab muestra las líneas de contorno seleccionadas. Estas líneas de contorno varían en su rango de tonalidad de un azul oscuro al amarillo, estableciéndose por tanto una relación de espesor de frío a cálido, siendo las zonas frías, las azules y verdes, las menos densas, y por tanto las que más radiación han absorbido al contar con un menor espesor de la lámina. Las más cálidas, naranjas- amarillas, por tanto son las más densas y por tanto son las que menos han absorbido la radiación al ser las que muestran un mayor espesor de la lámina.

Para la introducción de la imagen en Matlab, se ha utilizado la función propia de las imágenes en formato DICOM, `>> I =imread ('nombre_archivo.dcm')`. Una vez la imagen es leída y procesada por el programa se ha pasado a utilizar la función *contour3*, para la obtención de la gráfica, del siguiente modo:

```
>> contour3(I)
```

En cada uno de los casos de estudio se tuvo en cuenta el tiempo de procesamiento de la imagen, como así se indica en la tabla adjunta, alcanzando los 15 minutos (tabla 12).

En la imagen (fig.1) se muestra resultado del procesamiento del *Caso 1, San Leandro* (ref.-587), en ella, apenas se observan datos significativos más allá de la división de la imagen en tres niveles, lo cual es indicativo de un proceso de manufactura de la lámina de cobre, mediante la técnica de laminado mucho más sofisticada y cuyo resultado es una lámina más fina y uniforme. Muestra de ello es que apenas ha absorbido radiación debido a su densidad y espesor.

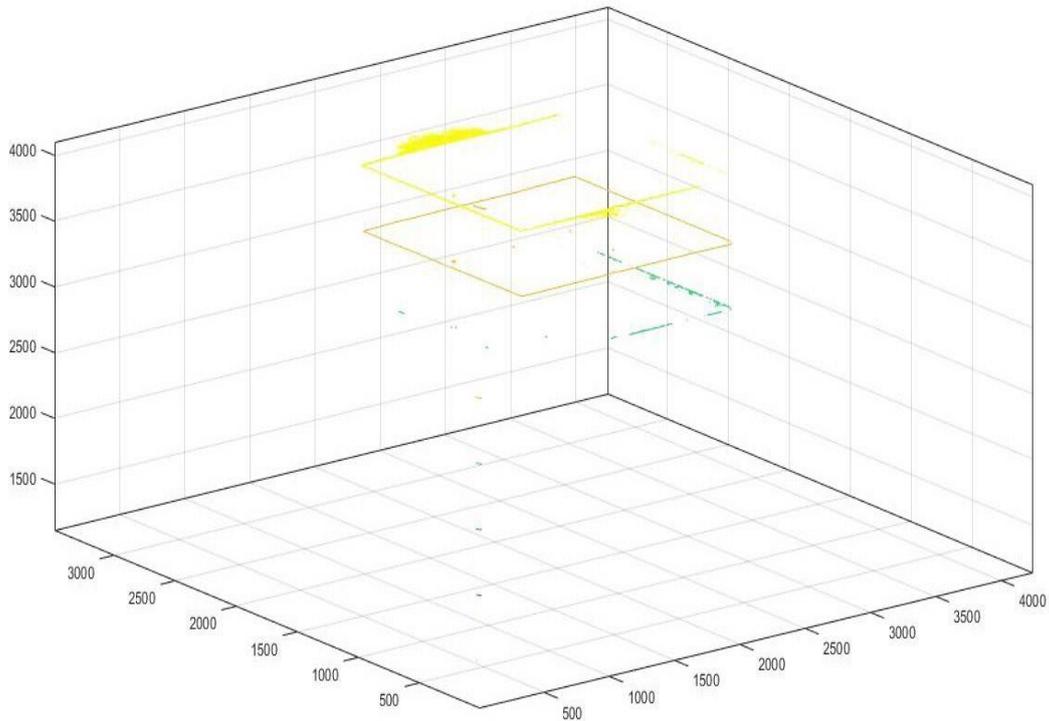


Figura 1. Imagen obtenida del procesado mediante la función `contour3` de la radiografía en formato DICOM del *Caso 1, San Leandro* (ref.-587).

La imagen obtenida de la radiografía del *Caso 2 Sagrada Familia* (ref.- 654), difiere bastante del caso de estudio anterior, ya que como se puede observar, se distinguen cuatro niveles (fig.2). Tanto en los dos primeros, como son el amarillo y el naranja que corresponden a un rango de valores más densos, así como el último simulado en color azul y que corresponde con el nivel más profundo determinado en el valor menos denso, apenas se observan datos de relevancia. No obstante, como se ve en el tercer nivel, en verde, se hace evidente un mayor nivel de trabajo de la lámina. Esto es fruto del trabajo mediante un martillo de boca fresada sobre la lámina de cobre, la cual muestra que había sido obtenida mediante laminado. Es en esta zona donde se ha absorbido una mayor radiación al ser la menos espesa y por tanto se convierte en la zona más débil de la lámina de cobre.

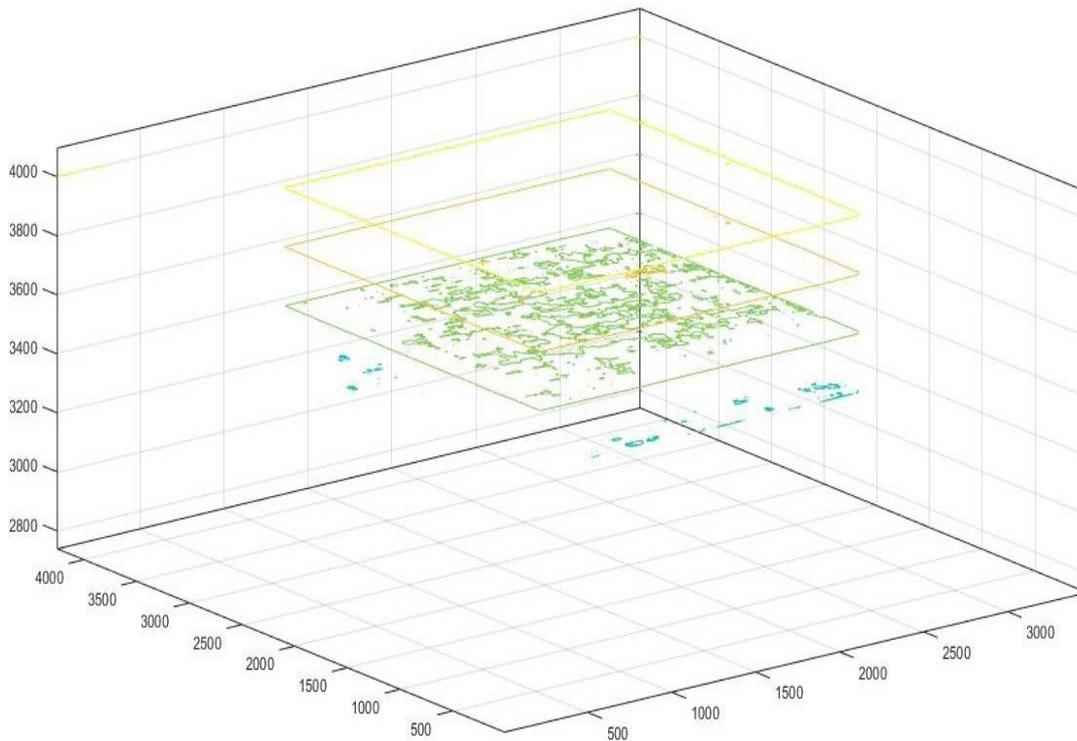


Figura 2. Imagen obtenida del procesado mediante la función contour3 de la radiografía en formato DICOM del Caso 2 Sagrada Familia (ref.-654).

En el *Caso 3* el cobre de *María Magdalena* (ref.- 586), se pueden ver seis niveles, siendo el quinto nivel donde se observa el trabajo realizado en la lámina mediante el martillado de la misma (fig.3). Es este el que más radiación ha recibido por tanto, con lo que se evidencia que es en esta zona donde la lámina muestra un menor espesor.

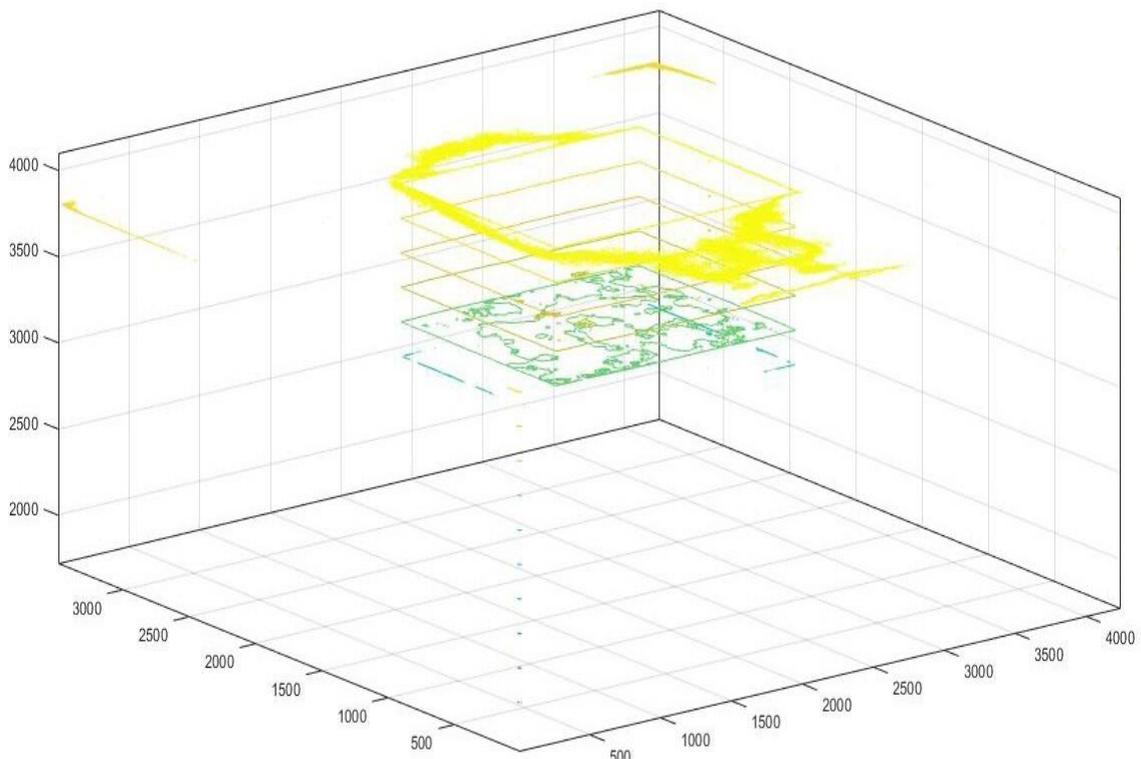


Figura 3. Imagen obtenida del procesado mediante la función contour3 de la radiografía en formato DICOM del Caso 3 *María Magdalena* (ref.-586).

El *Caso 4 San Juan* (ref.- 738), presenta cinco niveles siendo evidente que el último de ellos ha recibido la mayor cantidad de radiación, lo cual indica las zonas con un menor espesor de la lámina de cobre (fig.4). Como en el caso anterior su técnica de fabricación es mediante el martillado de la lámina de cobre. Esto se puede observar en el plano verde de la imagen del *Caso 3* donde se concentra la mayor cantidad de líneas de referencia. Lo mismo pasa en esta imagen, que en el rango de valores donde se establece el azul esta la máxima cantidad de información de contorno.

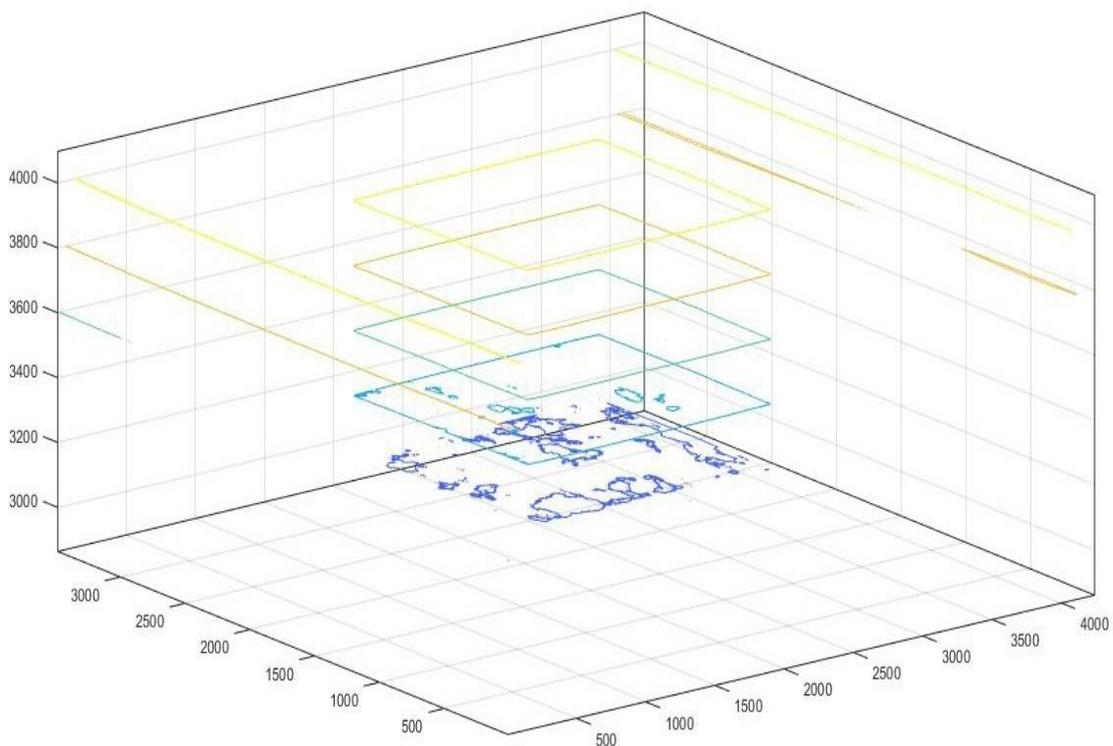


Figura 4. Imagen obtenida del procesado mediante la función `contour3` de la radiografía en formato DICOM del caso 4 de estudio, *San Juan* (ref.-738).

Por último, el *Caso 5 San Pedro* (ref.- 739), presenta como el *Caso 1* un menor número de niveles, en este caso cuatro (fig.5). Esto es debido a que la técnica de manufactura es la misma, no obstante, en este caso la lámina ha sido también trabajada mediante un martillo de ahí que los últimos niveles, recuerden a los tres casos anteriores, ya que muestra un menor espesor en los últimos niveles.

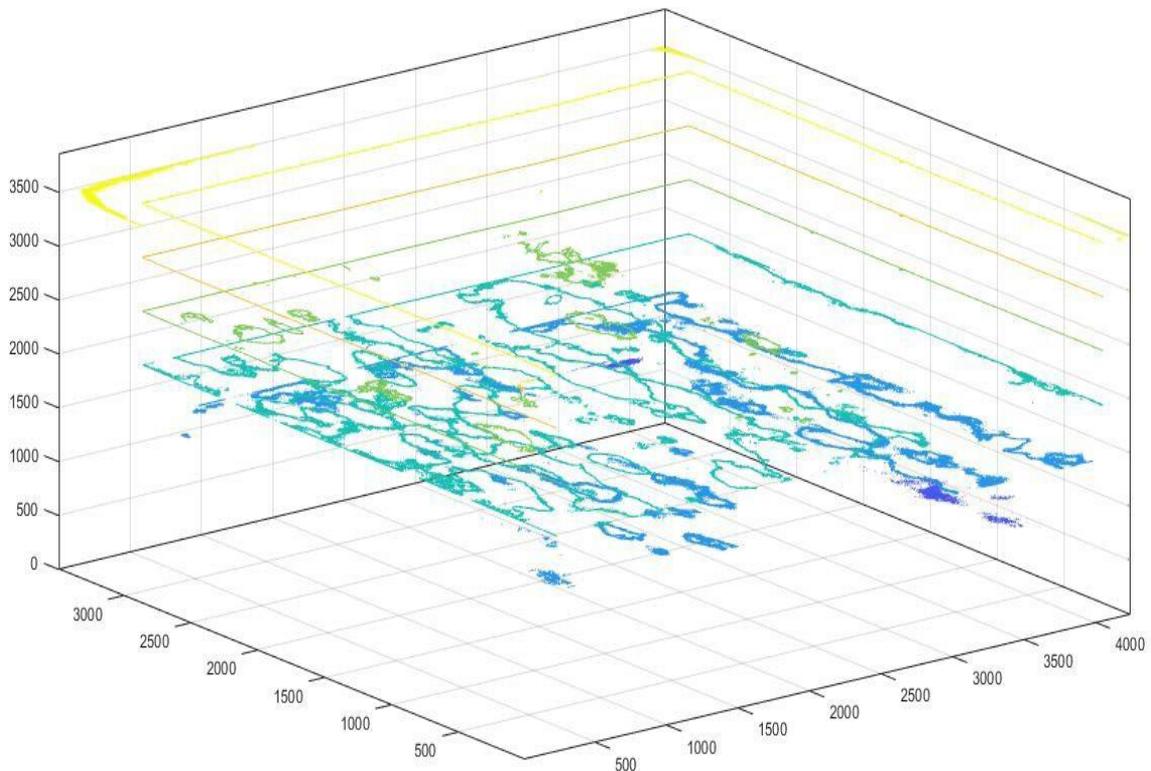


Figura5. Imagen obtenida del procesado mediante la función *contour3* de la radiografía en formato DICOM del caso 5 de estudio *San Pedro* (ref.-739).

Tabla 12. Tiempos de ejecución de la función *contour3* en los diferentes casos

Nombre	Tamaño	Tiempo de ejecución (min.)
<i>San Leandro</i> (ref. -587)	28,1 MB	10 a 15 minutos
<i>Sagrada Familia</i> (ref. -654)	28,1 MB	10 a 15 minutos
<i>María Magdalena</i> (ref.-586)	28,1 MB	10 a 15 minutos
<i>San Juan</i> (ref. -738)	28,1 MB	10 a 15 minutos
<i>San Pedro</i> (ref.-739)	28,2 MB	10 a 15 minutos

### *meshc*

La siguiente función seleccionada ha sido *meshc*, dibuja una malla de alambre, en este caso no es tal ya que se ha formado una masa de colores sólidos, y una trama de contorno debajo de esta. El color viene determinado por Z, la cual es proporcional a la altura, en este caso espesor de la imagen. Los vectores X e Y son los que forman las diferentes intersecciones con Z.

Como en el caso anterior, la relación de espesores se mide con el mismo criterio de colores fríos a cálidos, siendo los fríos los menos densos y por tanto con menor espesor de la lámina de cobre y los cálidos los de mayor densidad con lo que son las zonas con un mayor espesor de la lámina de cobre.

Para la introducción de cada una de las imágenes se ha utilizado igual que en el caso anterior la función *dicomread*, pero esta vez utilizando el siguiente comando, `>>I=dicomread('nombre_archivo.dcm')` y a continuación una vez leída la imagen la función utilizada ha sido:

```
>> meshc (I)
```

En todos y cada uno de los tratamientos de imagen se tuvo muy presente el tiempo de procesado, pues en todos los casos es un valor considerable, dado que alcanzaba los 30 min (tabla 13).

Las imágenes obtenidas tras el procesado de los cuatro primeros casos de estudio con esta función, no han sido tan destacables como en el caso de la función anterior (fig. 6,7, 8 y 9). No obstante es sobre todo en la imagen obtenida del *Caso 5 San Pedro* (ref.-739,) donde mejor se observan los diferentes espesores de la lámina de cobre (fig.10). Esta es también la lámina con un mayor tamaño, y tuvo que ser realizada con dos placas, de ahí que el amarillo este en menor presencia que en el resto de imágenes.

Tabla 13. Tiempos de ejecución para el procesado de la función *meshc*.

Nombre	Tamaño	Tiempo de ejecución (min.)
<i>San Leandro (ref. - 587)</i>	28,1 MB	20 a 30 minutos
<i>Sagrada Familia (ref. - 654)</i>	28,1 MB	20 a 30 minutos
<i>María Magdalena (ref.- 586)</i>	28,1 MB	20 a 30 minutos
<i>San Juan (ref. - 738)</i>	28,1 MB	20 a 30 minutos
<i>San Pedro (ref.- 739)</i>	28,2 MB	20 a 30 minutos

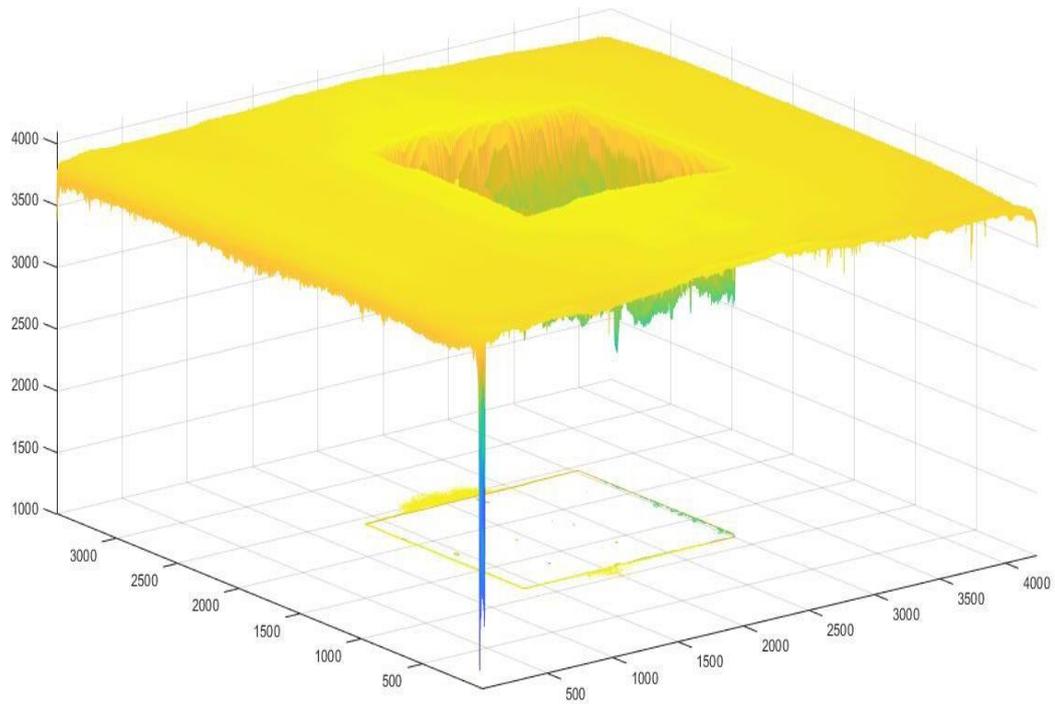


Figura 6. Imagen obtenida del procesado mediante la función *meshc* de la radiografía en formato DICOM de *San Leandro* (ref.-587).

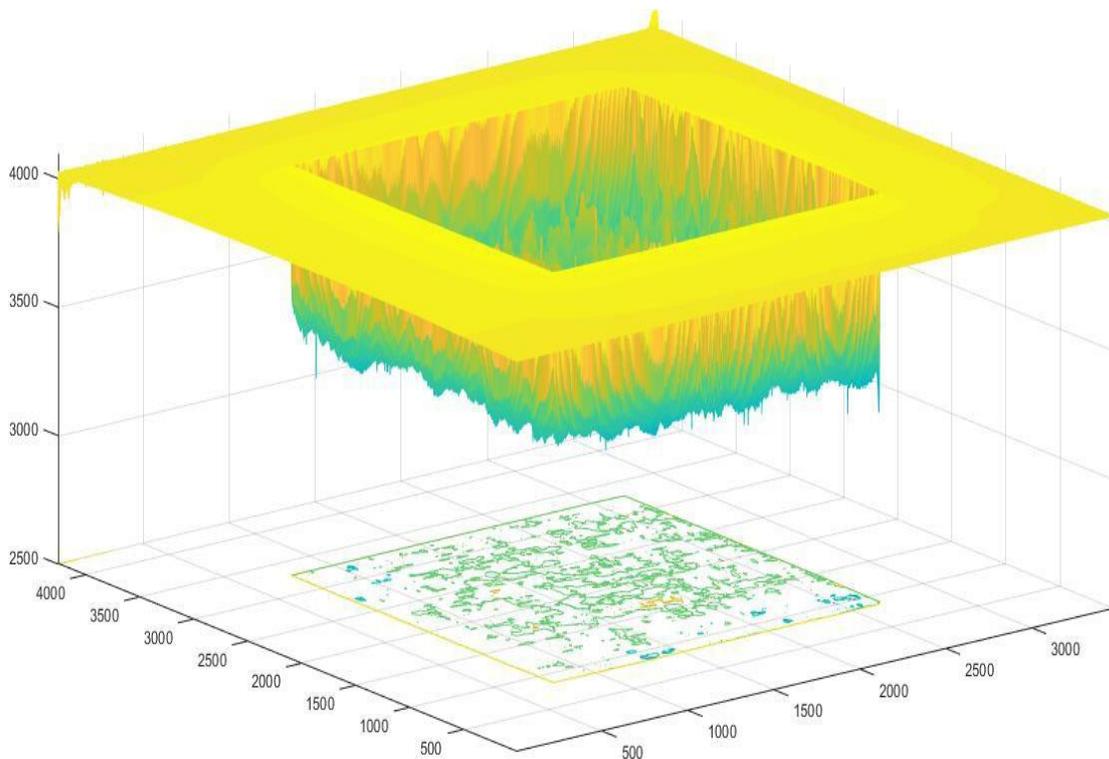


Figura 7. Imagen obtenida del procesado mediante la función *meshc* de la radiografía en formato DICOM de *La Sagrada Familia* (ref.-586).

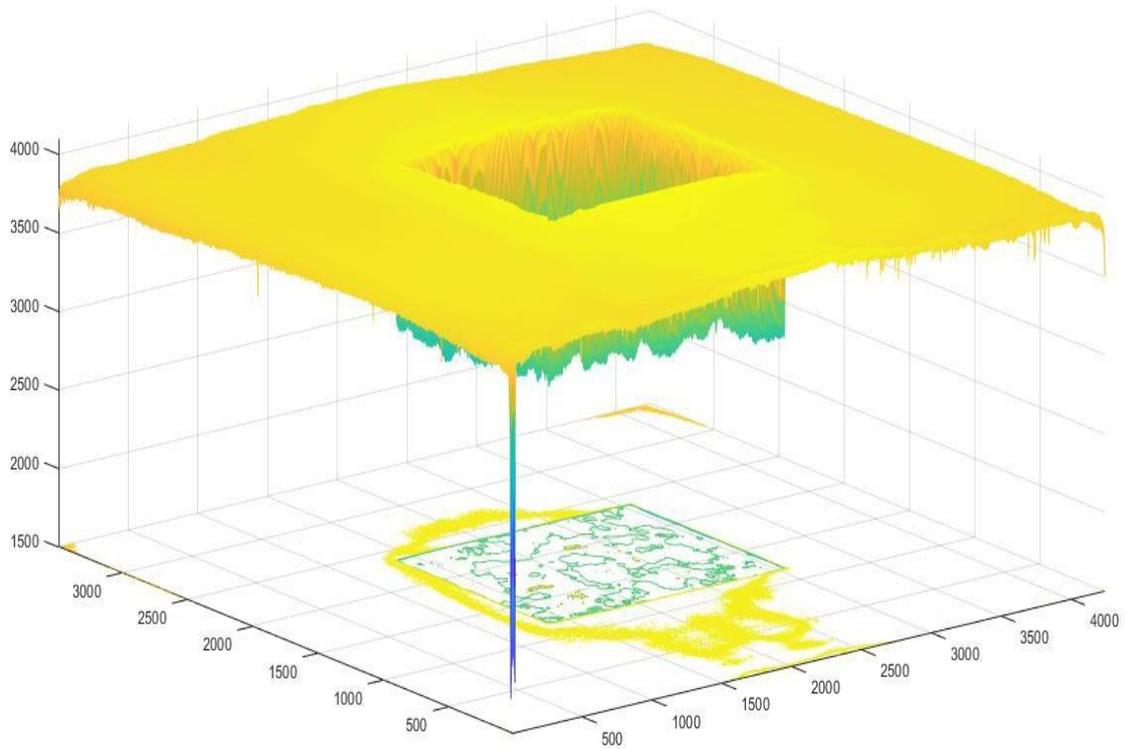


Figura 8. Imagen obtenida del procesamiento mediante la función *meshc* de la radiografía en formato DICOM de *María Magdalena* (ref.-586).

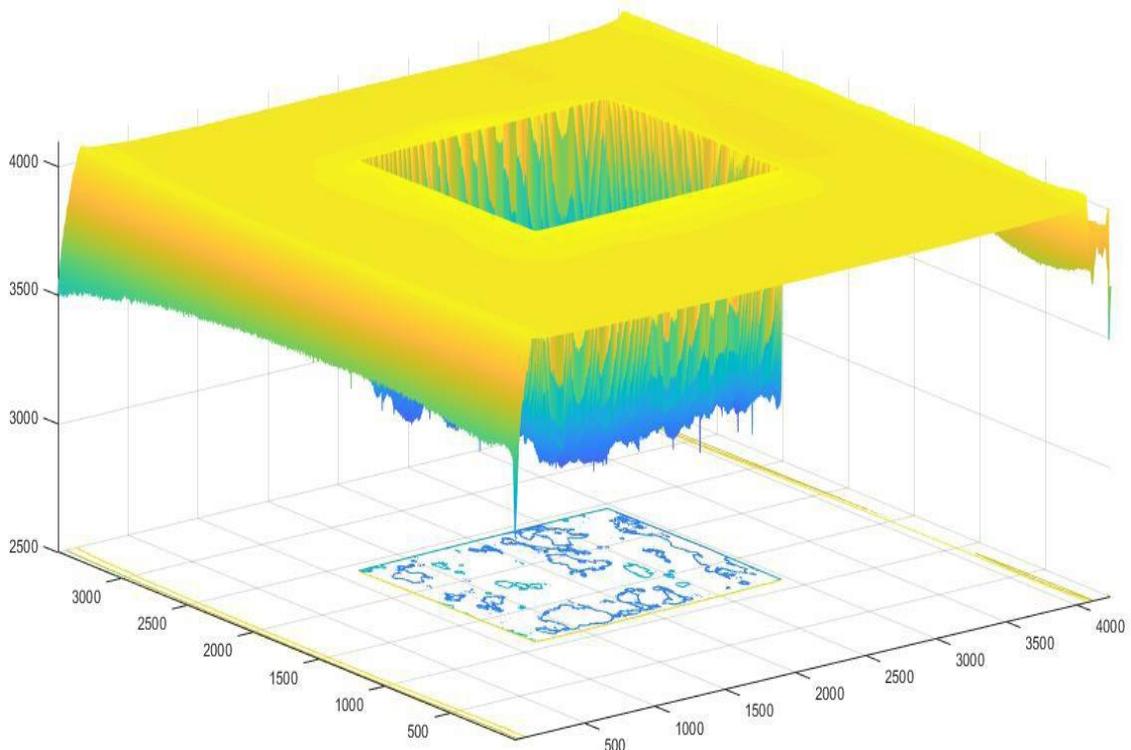


Figura 9. Imagen obtenida del procesamiento mediante la función *meshc* de la radiografía en formato DICOM de *San Juan* (ref.-738).

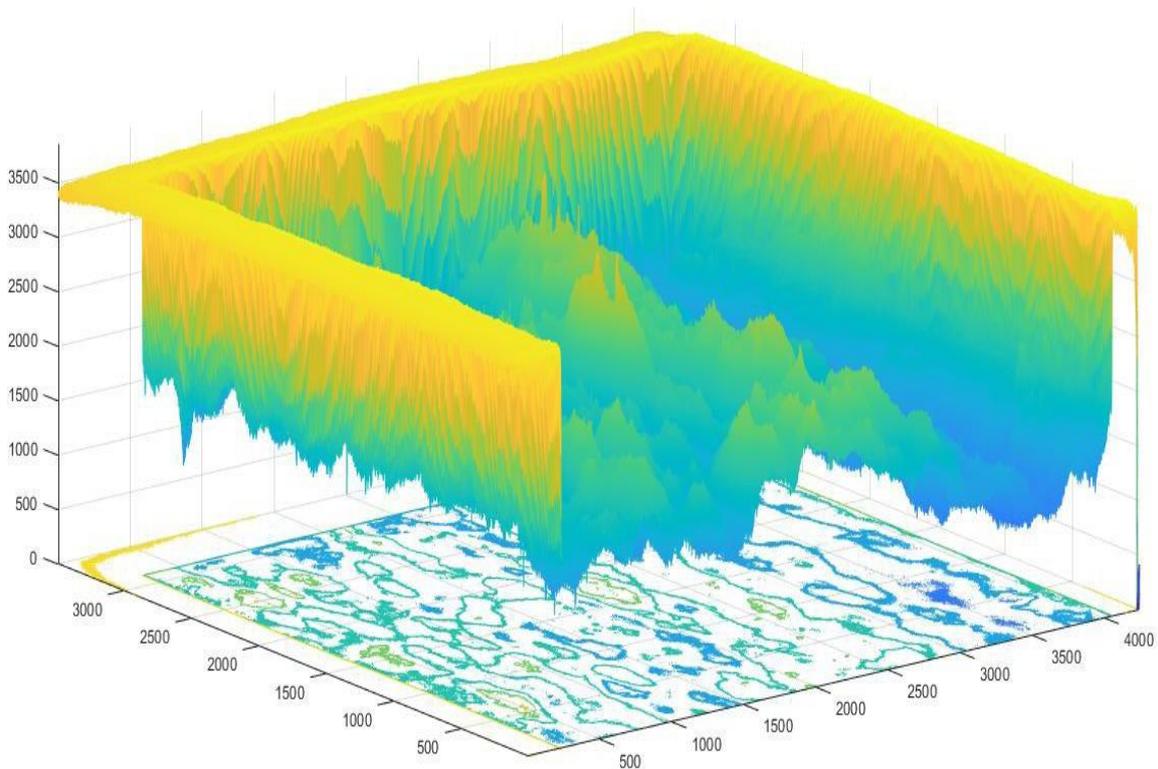


Figura 10. Imagen obtenida del procesado mediante la función *meshc* de la radiografía en formato DICOM de *San Pedro* (ref.-739).

Debido al elevado peso que suponen las imágenes en formato DICOM, estas, tardan un tiempo considerable en su procesado. Además en ocasiones se ha tenido que interrumpir el procesado de alguna de las imágenes, sobre todo al trabajar con la función *meshc*, ya que el ordenador se quedaba bloqueado dada la cantidad de operaciones que debe ejecutar Matlab para conseguir la gráfica.

Es por ello que se ha decidido trabajar en un formato de archivo de imagen diferente, siendo elegido el BMP a 8 bits. La elección de este formato, viene motivada porque la compresión de la imagen a este tipo de archivo no pierde calidad.

Dado que, aún reduciendo su peso las imágenes seguían teniendo un peso elevado, y con la finalidad de no perder calidad, ya que este trabajo propone una prueba de concepto sobre el uso de Matlab, se ha decidido trabajar únicamente con un trozo significativo de cada una de las imágenes. Además, el trabajar con únicamente con un trozo de la imagen permite un mejor análisis del resultado obtenido tras el procesado de la imagen. A continuación, se muestra la

selección de las zonas escogidas de cada una de las radiografías para su procesado y análisis (fig.11, 12, 13,14 y 15).

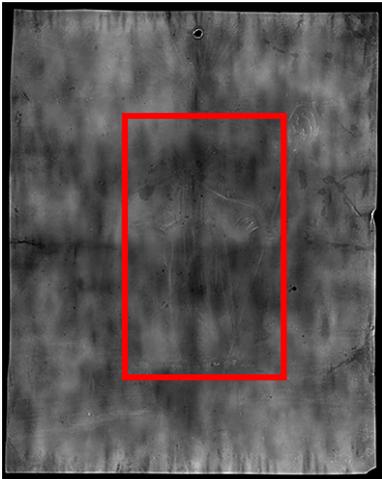


Figura 11. Fragmento seleccionado para *Caso 1* (ref.-587).

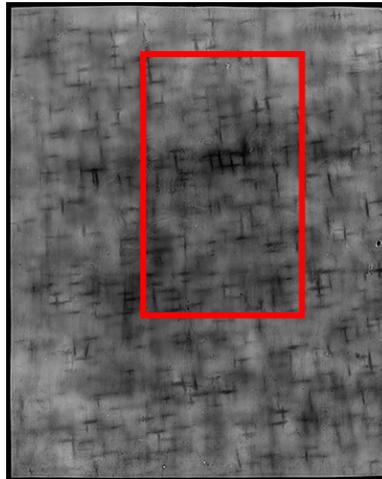


Figura 12. Fragmento seleccionado para *Caso 2* (ref.-654) .

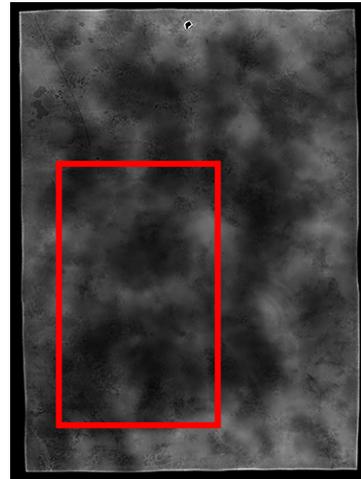


Figura 13. Fragmento seleccionado para *Caso 3* (ref.-586) .

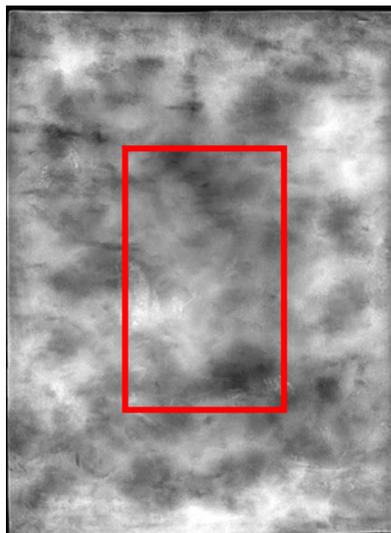


Figura 14. Fragmento seleccionado para *Caso 4* (ref.-738) .

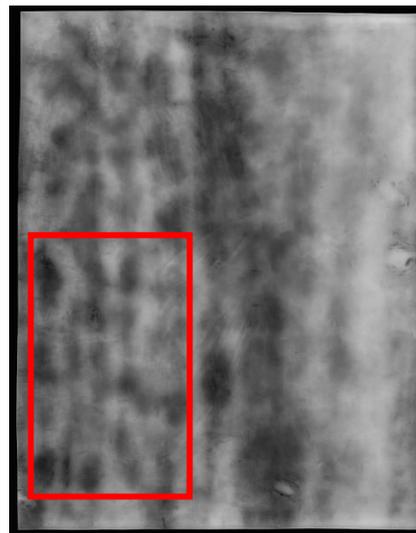


Figura 15. Fragmento seleccionado para *Caso 5* (ref.-739).

En este caso la introducción de las fragmentos de las imágenes se ha realizado a través de la función `>> I= imread ('nombre_archivo.bmp)`, ya que el formato de imagen, como se ha señalado, se ha cambiado de DICOM a BMP, con lo cual se puede utilizar el comando para la introducción de imágenes sin características especiales.

### Contour3

En primer lugar se han procesado las imágenes mediante la función *contour3*. Para lo que se han seguido los pasos descritos anteriormente con la salvedad del cambio en el modo de introducción y lectura de la imagen. Estos han sido los resultados obtenidos y los tiempos necesarios para su procesado (tabla 14).

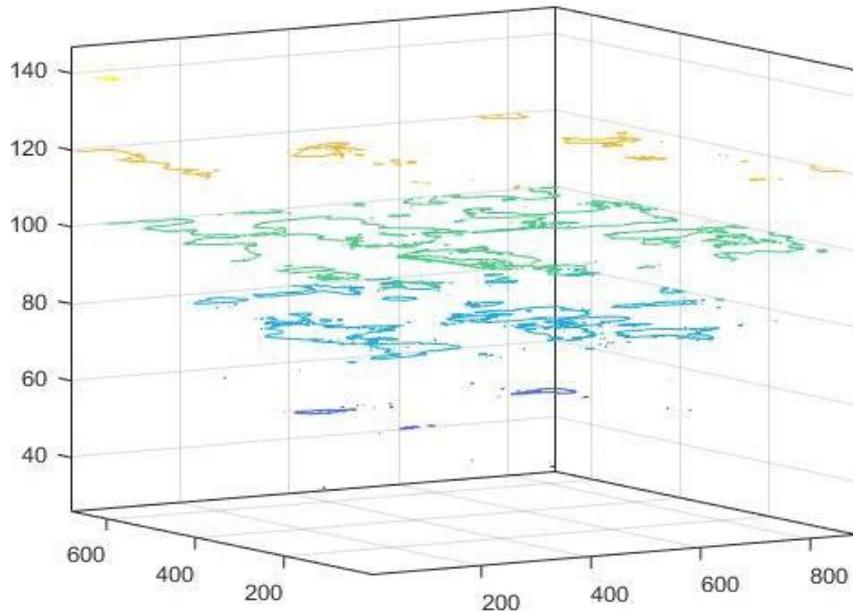


Figura 16. Resultado del estudio del fragmento del *Caso 1* con la función *contour3*.

En el *Caso 1 San Leandro* (ref.- 587), el trabajar con un fragmento de la imagen, ha aportado un mayor detalle, observándose más rango de tonalidades (fig.16). Pudiéndose ver mejor por tanto el nivel de espesor de la lámina. Lo cual sigue indicando que el trabajo de manufactura es el laminado, debido a este bajo rango de valores entre el amarillo y el azul que indican una lamina de mayor espesor.

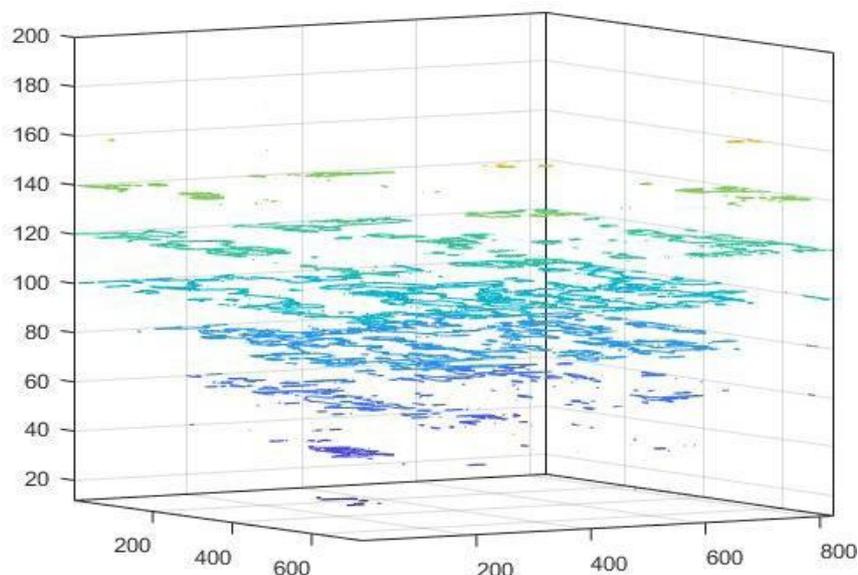


Figura 17. Resultado del estudio del fragmento del *Caso 2* con la función *contour3*.

El *Caso 2 Sagrada Familia* (ref.- 654), muestra todavía un mayor rango de colores, y muestra por tanto un mayor trabajo de manufactura de la de la lámina que en el caso precedente. El trabajo mediante un martillo de boca fresada queda aún más evidenciado que con la imagen en DICOM, como se ve en el protagonismo el azul, lo que marca una menor densidad y por tanto un menor espesor debido a la mayor absorción de la radiación (fig.17).

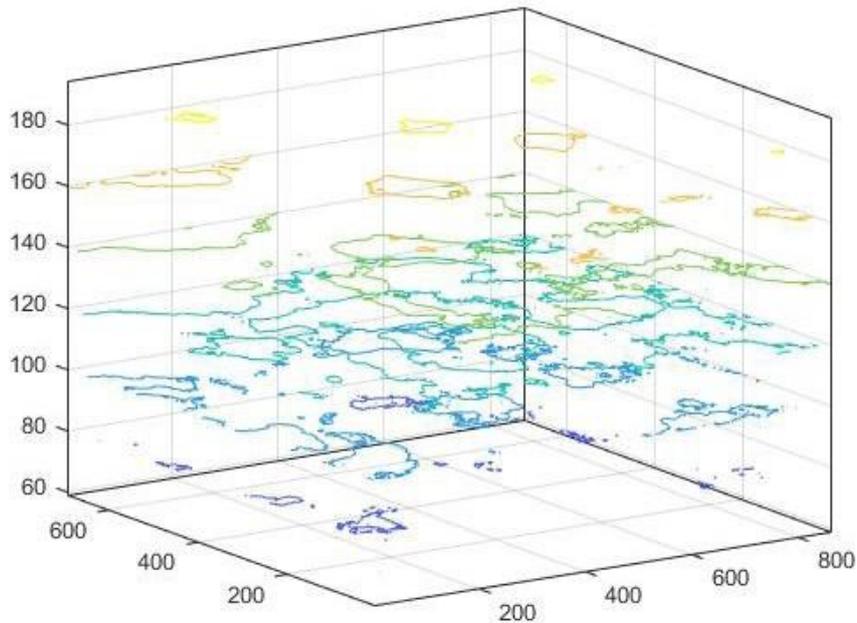


Figura 18. Resultado del estudio del fragmento del *Caso 3*, con la función *contour3*.

En el *Caso 3* de la pintura de *María Magdalena* (ref.- 654), sucede igual que en los casos anterior, el trabajar con mayor detalle permite observar mejor las diferencias de espesor en este caso las que derivadas de un trabajo de la lamina mediante martillado (fig.18). Como así se puede ver en las imágenes que se han obtenido, donde se puede distinguir los característicos círculos concéntricos de este tipo de manufactura. Incluso la diferencia en los rangos de color evidencia donde se martilleo con mayor o menor fuerza, según la tonalidad, siendo el amarillo las zonas más densas y por tanto con más espesor, y por ello sonda menos incidencia del martillo hay. En cambio en el azul se muestran las zonas de menor espesor.

El *Caso 4 San Juan* (ref.-738), los resultados son muy similares a los del *Caso 3*, ya que su técnica de manufactura es la misma, como así se observa en los diferentes rangos de color del azul al amarillo y la presencia de zonas circulares que marcan el trabajo característico del batido a martillo (fig.19).

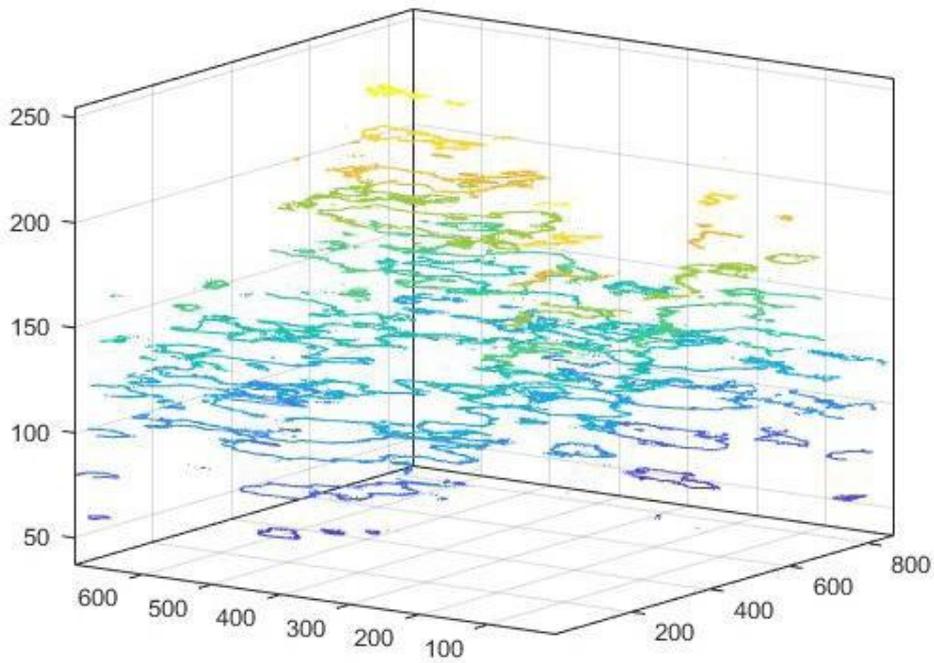


Figura 19. Resultado del estudio del fragmento del *Caso 4* con la función *contour3*.

Por último en el *Caso 5 San Pedro* (ref.-739), sucede como en el *Caso 1*, se ve un menor rango tonal entre el azul y el amarillo, lo cual indica que el proceso de manufactura es el mismo, el laminado, no obstante y como se ha señalado esta lámina presenta menor densidad y espesor en ciertas zonas, como ya se ha indicado debido a que la lamina de cobre también se trabajó dándole en alguna que otra zona con el martillo, como así se puede ver en la imagen donde se ven algunas marcas de forma circular que recuerdan a esta herramienta.

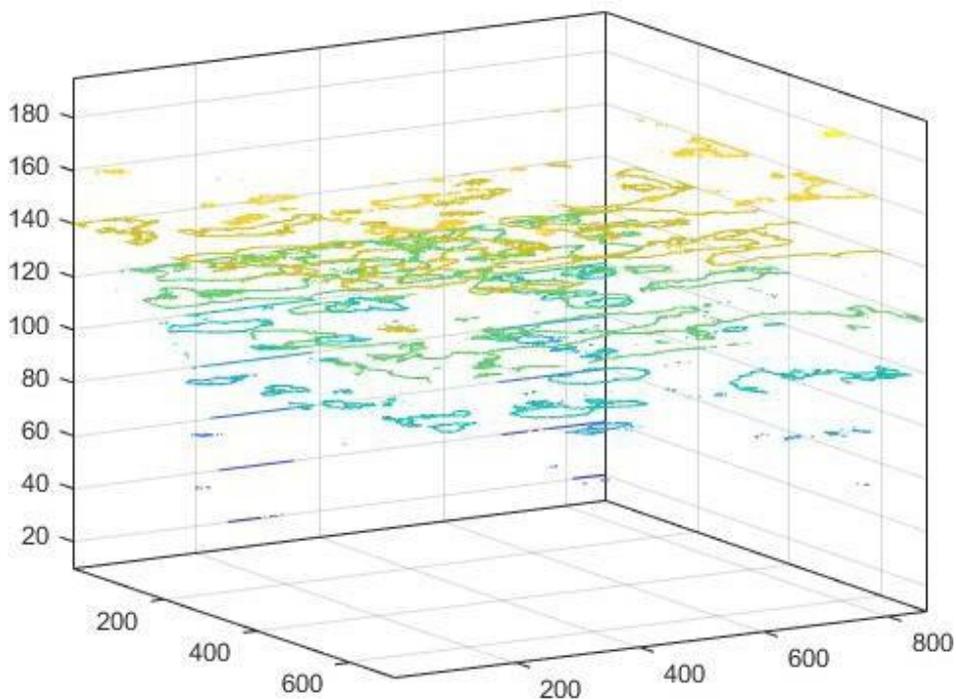


Figura 20. Resultado del estudio del fragmento del *Caso 5* con la función *contour3*.

Tabla14. Tiempos de ejecución para el procesado de los fragmentos con la función *contour3*.

Nombre	Tamaño	Tiempo de ejecución (min.)
<i>San Leandro (ref. -587)</i>	591 KB	3 a 5 minutos
<i>Sagrada Familia (ref.- 654)</i>	587 KB	3 a 5 minutos
<i>María Magdalena (ref.-586)</i>	588 KB	3 a 5 minutos
<i>San Juan (ref. -738)</i>	589 KB	3 a 5 minutos
<i>San Pedro (ref.-739)</i>	590 KB	3 a 5 minutos

### meshc

Se exponen ahora los resultados obtenidos mediante la función *meshc*, que como se ha señalado en el caso anterior, el cambio respecto al anterior procesado con esta función, es el modo de introducción y lectura de la imagen, cambiando la función *dicomread* por la de *imread*. Se incluye también la tabla de los tiempos necesarios para su ejecución en cada uno de los casos.

Las imágenes obtenidas de los fragmentos son mucho más claras y precisas que en el anterior análisis con esta misma función. En este caso se muestra de manera más clara el tipo de manufactura empleadas en cada una de ellas, ya que las imágenes obtenidas muestran grandes similitudes. Las pinturas realizadas sobre lámina de cobre realizada mediante la técnica de laminado, la de *San Leandro* (ref.-587) y la de *San Pedro* (ref.-739), muestran una mayor densidad y espesor como así se muestra con el predominio de la tonalidad amarilla, naranja y verde sobre las tonalidades azules (fig.21 y 25).

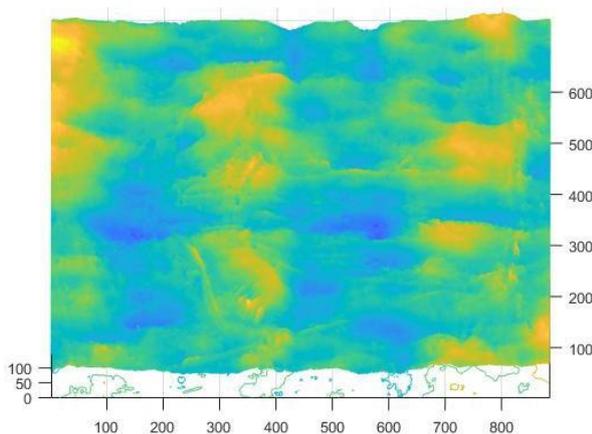


Figura 21. Resultado obtenido con la función *meshc*, del caso de *San Leandro* (ref.-587).

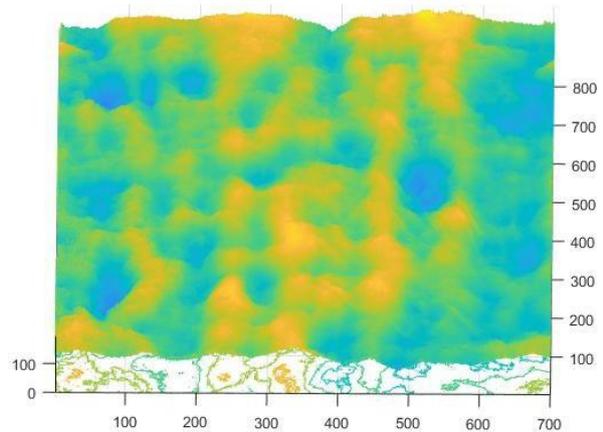


Figura 25. Resultado obtenido con la función *meshc*, del caso de la *San Pedro* (ref.-739).

Respecto a las láminas realizadas mediante batido a martillo como es el caso de *María Magdalena* (ref.-586) y la de *San Juan* (ref.-738). Indican zonas con una menor densidad y espesor debido al predominio de la tonalidad más fría. Siendo las zonas donde el azul adquiere su tonalidad más oscura aquellas zonas donde el espesor es menor y por tanto donde se podría evidenciar donde se dieron los golpes con mayor fuerza (fig.23 y 24).

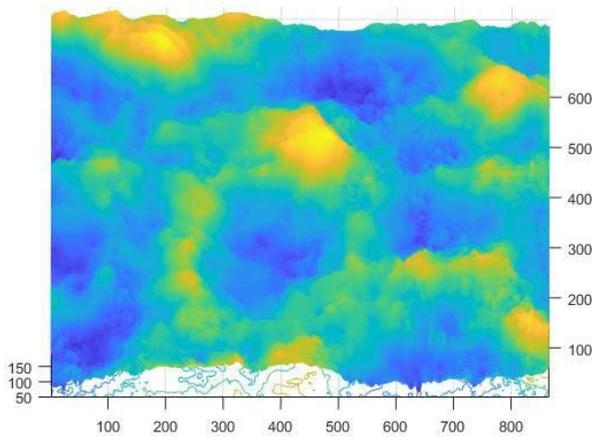


Figura 23. Resultado obtenido con la función *meshc*, del caso de la *María Magdalena* (ref.-586).

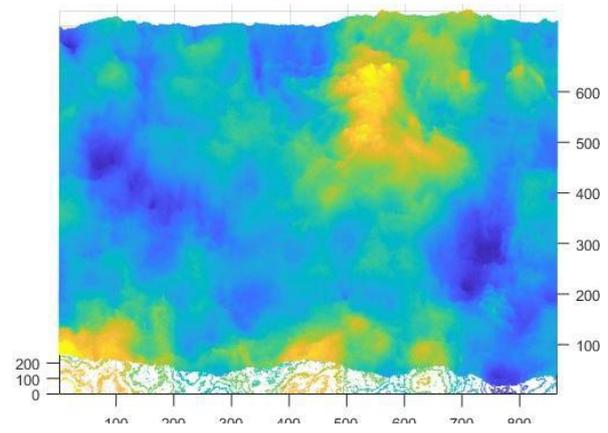


Figura 24. Resultado obtenido con la función *meshc*, del caso de la *San Juan* (ref.-738).

Por último la imagen obtenida del fragmento seleccionado de la obra de la *Sagrada Familia* (ref.-654), se muestran con total claridad las zonas donde se ha trabajado la lámina, mediante el martillo con boca fresada. Por el predominio de la tonalidad azul, se observa el menor espesor de esta lámina y lo frágil y expuesta que está a posibles roturas ,zonas donde el azul es más oscuro (fig.22).

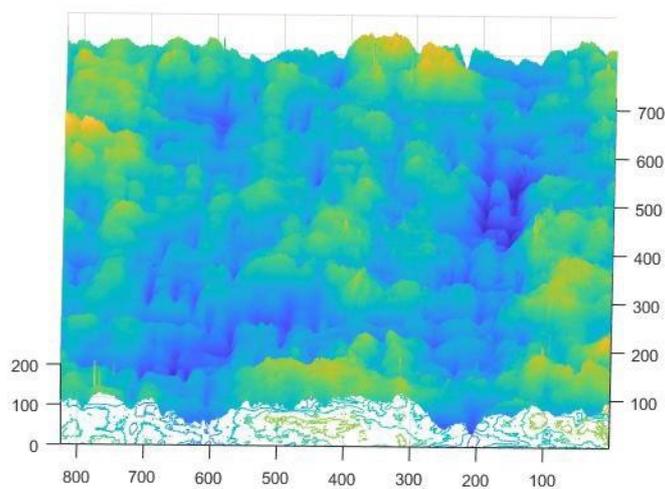


Figura 22. Resultado obtenido con la función *meshc*, del caso de la *Sagrada Familia* (ref.-654)

Tabla 15. Tiempos de ejecución al procesar los fragmentos seleccionados con la función *meshc*.

Nombre	Tamaño	Tiempo de ejecución (min.)
<i>San Leandro (ref. -587)</i>	591 KB	4 a 6 minutos
<i>Sagrada Familia (ref. -654)</i>	587 KB	4 a 6 minutos
<i>María Magdalena (ref.-586)</i>	588 KB	4 a 6 minutos
<i>San Juan (ref. -738)</i>	589 KB	4 a 6 minutos
<i>San Pedro (ref.-739)</i>	590 KB	4 a 6 minutos

Por tanto, con respecto a las funciones, la *contour 3* y la *meshc*, ayudan establecer de manera más objetiva, a través de su análisis derivado de los diferentes rangos en las tonalidades de colores, de fríos a cálidos, los procesos de manufactura estableciendo diferentes niveles y alturas, que ayudan a diferenciar diferencias en dichos procesos de manufactura y que en las radiografías no se pueden observar. Con esto se obtiene un mejor conocimiento sobre la radiografía ayudando a la interpretación de los resultados obtenidos y favoreciendo por consiguiente los procesos conservativos restaurativos de las obras y dotándolos de un carácter aún más científico y objetivo.

### ***extractFeatures***

En esta ocasión, además de utilizar las dos funciones anteriores, esta vez con un fragmento significativo y en formato BMP, también se han trabajado las imágenes con la función *extractFeatures*, la cual extrae los puntos de mayor interés de una imagen. Para ello, la función deriva los descriptores de los píxeles y los ubica alrededor de un punto de interés. Estos píxeles se encargan de representar y combinar las características especificadas por la ubicación de un solo punto, cada uno de estos puntos indica la ubicación de un centro. El método que se utiliza para extraer un descriptor depende de la clase de puntos de entrada.

Para esta función y su procesado se han seguido los siguientes pasos, en primer lugar se introduce la imagen `>> I=imread (nombre_archivo.bmp')`, una vez leída se encuentran y extraen las características de imagen del siguiente modo:

```
>> corners = detectHarrisFeatures (I)
```

```
>> [features, valid_corners] = extractFeatures (I,corners)
```

Por último, se muestra en pantalla el resultado obtenido a través de la última función, `>> plot (valid_corners)`. Se muestran a continuación los resultados que se han obtenido en cada uno de los fragmentos seleccionados. También se adjunta la tabla (tabla 16) con los tiempos de ejecución para cada una de las obras.

En el *Caso 1* de *San Leandro* (ref.-587), los puntos de interés de la imagen se han focalizado en mayor medida entorno al dibujo subyacente. Estos puntos además se focalizan en las zonas más oscuras por lo tanto con una menor densidad (fig.26).

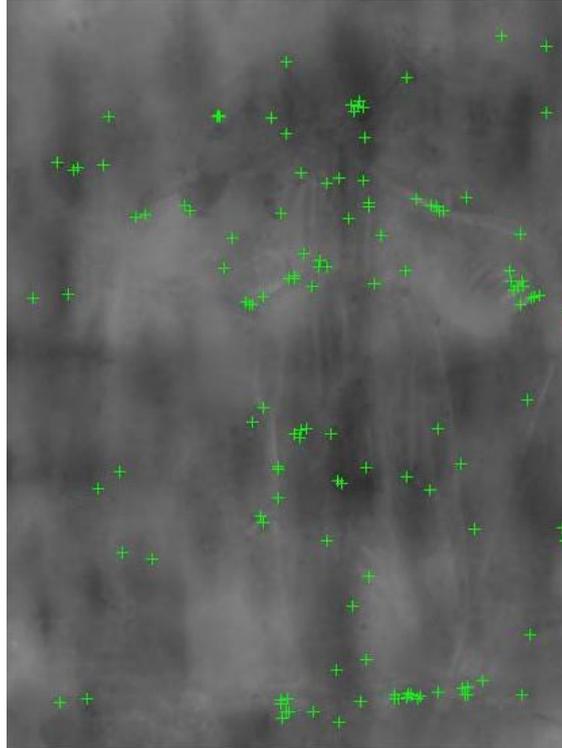


Figura 26. Resultado del caso de *San Leandro*, mediante la función `extractFeatures`.

El *Caso 2* de la *Sagrada Familia* (ref.-654), los puntos de interés extraídos por esta función se focalizan de nuevo, en su mayor parte, en zonas de menor densidad. No obstante se observa que también se han marcado puntos de interés en zonas más claras (fig.27). Para el *Caso 3* *María Magdalena* (ref.-586), las zonas en las que se agrupan los puntos con mayor interés son las zonas con menor densidad (fig.28).

Respecto al *Caso 4* de *San Juan* (ref.-738) es el más particular de todos ya que los puntos de interés se han ubicado en las zonas que han recibido una mayor radiación y por tanto son más densas y espesas (fig.29). En lo referente los resultados obtenidos de la imagen del *Caso 5* con la imagen de *San Pedro* (ref.-739) se asemeja de nuevo a los tres primeros casos, siendo las zonas con menor espesor las que destacan como puntos de interés de la radiografía (fig.30).

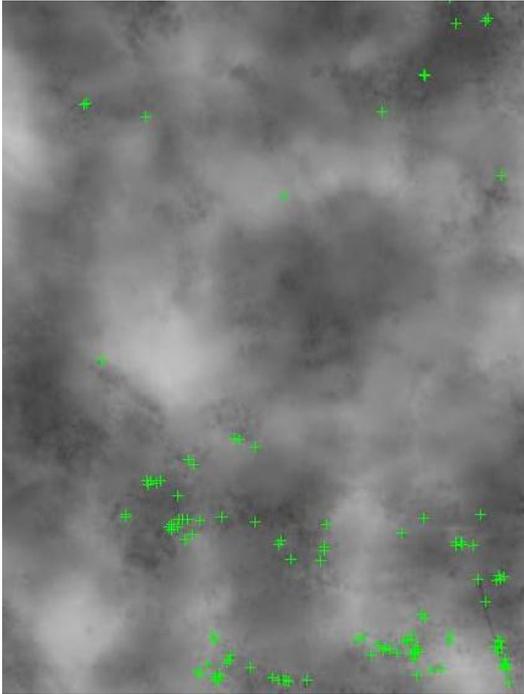


Figura 27. Resultado del caso de la *Sagrada Familia*, mediante la función `extractFeatures`.

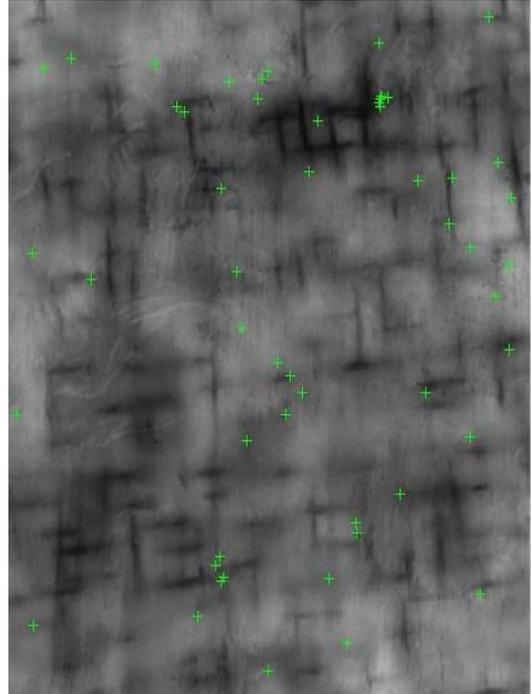


Figura 28. Resultado del caso de *María Magdalena*, mediante la función `extractFeatures`.

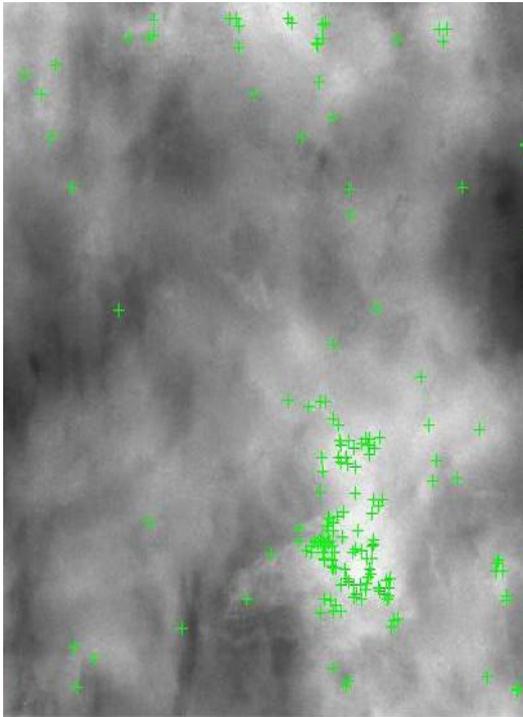


Figura 29. Resultado del caso de *San Juan*, mediante la función `extractFeatures`.

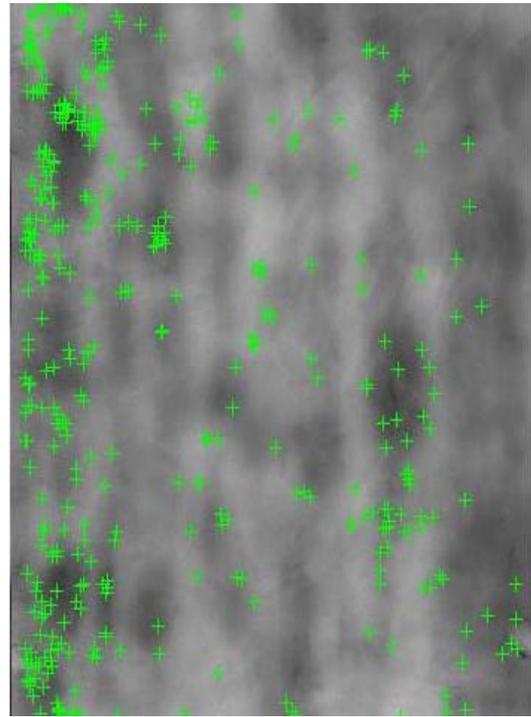


Figura 30. Resultado del caso de *San Pedro*, mediante la función `extractFeatures`.

Tabla 16. Tiempos obtenidos al trabajar los fragmentos de los cinco casos con la función *extractFeatures*

Nombre	Tamaño	Tiempo de ejecución (min.)
<i>San Leandro (ref. -587)</i>	591 KB	3 a 5 minutos
<i>Sagrada Familia (ref. -654)</i>	587 KB	3 a 5 minutos
<i>María Magdalena (ref.-586)</i>	588 KB	3 a 5 minutos
<i>San Juan (ref. 738)</i>	589 KB	3 a 5 minutos
<i>San Pedro (ref.739)</i>	590 KB	3 a 5 minutos

Mediante esta función basada en la detección de puntos de interés en una imagen radiográfica, se puede concluir que a excepción de un caso, el de *San Juan* (ref.738), la información de mayor importancia para un análisis más objetivo de los procesos de manufactura de las láminas de cobre se encuentra en las zonas de mayor densidad y de mas espesor.

## 9. CONCLUSIONES

Para finalizar este trabajo sobre la propuesta del *software* matemático Matlab como herramienta para la objetivación de los procesos de fabricación de láminas de cobre, se han extraído las siguientes conclusiones.

El estudio de las características de las pinturas realizadas sobre láminas de cobre, así como el estudio de sus alteraciones y factores de conservación han sido de gran utilidad a la hora de la interpretación de la imagen obtenida tras la obtención de cada una de las radiografías de los cinco casos de estudio de este trabajo.

Por otro lado el conocer los diferentes procesos de manufactura realizados de las láminas de cobre a lo largo de diferentes épocas, es también de gran ayuda para llevar a cabo la interpretación de los resultados obtenidos tras el procesado de la imagen mediante Matlab, ya que ayuda a distinguir los espesores y patrones mostrados en estas imágenes.

Es también interesante destacar como debido al reducido espesor de las láminas de cobre los parámetros que se aplican para la realización de radiografías a este tipo de obras no es el que se aplicaría al caso de otras piezas metálicas, ya que los voltajes utilizados se mueven entre los 80 kV y los 350 kV este mayor rango de potencial es debido al espesor que presentan ya que, además se suelen presentar compactados en bloques de tierra porque en la mayoría de los casos provienen de yacimientos arqueológicos. En el caso de las pinturas sobre cobre se utilizan rangos de potencial más bajos, entre los 30 kV y los 80 kV como si se tratara de soportes convencionales como los lienzos o las tablas. En los casos de estudio que ocupan este trabajo han realizado sus radiografías con voltajes de entre 47 kV y 52 kV.

Respecto a Matlab, es evidente el gran número de posibilidades que puede ofrecer como herramienta para el estudio del patrimonio. En este caso concreto, los resultados obtenidos para este trabajo, realizado bajo la premisa de ser una prueba de concepto, sobre el uso de este programa matemático para conseguir interpretaciones de las imágenes radiográficas desde una visión más objetiva, se han alcanzado. Ya que se ha mostrado de forma gráfica a través de las funciones, la *contour3* y la *meshc* como los diferencias en las tonalidades de color, variando del azul al amarillo, evidencian las diferencias en el proceso de manufactura de las láminas de cobre mostrando las diferencias de espesor en diferente altura. Esto es algo que no se puede observar en la radiografía y que gracias a Matlab se puede ver y analizar

Mediante la tercera función utilizada *extractFeatures*, se ha visto como en cuatro de los cinco casos de estudio los puntos de mayor interés para el estudio de la imagen son aquellos donde hay mayor densidad y espesor, estableciéndose unos patrones de repetición en forma de cruces verdes que se insertan en estas zonas.

Es por esto por lo que en este trabajo sobre las posibilidades que ofrece Matlab, no solo se ha querido potenciar y abrir más la vía de entrada de este programa como una herramienta más para el estudio de los bienes culturales, sino que también se ha querido dejar claro que el ámbito de la conservación y restauración siempre está abierto a nuevas posibilidades, profesionales y herramientas de otras disciplinas que ayuden a un mejor conocimiento de nuestro Patrimonio y su salvaguarda.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

CAÑEGO, N. *Sistema de identificación de personas mediante reconocimiento facial aplicado a videovigilancia*. [Trabajo final de grado]. València: Escuela Politècnica de Gandía.

Universitat Politècnica de València, 2017

FUSTER,L; CHULIÁ,I; SARRIÓ, M.F; VÁZQUEZ DE AGREDOS, M.L; CARLYLE, L; WDUM,J. *Paintings on copper and other metal plates. Production, degradation and conservation issues*. València: Comunica CC, 2017.

GÉNÉREUX,A. *Les huiles sur cuivre en nouvelle-france au xvoe siècle: circulation et usages* [Tesis]. Montréal: Université du Québec, 2010. [Consulta 2019-6-16] Disponible en:

<https://archipel.uqam.ca/2843/1/M11347.pdf>

GOOCH, A; TUMBLIN,J. Visualizing pentimenti: revealing the hidden history of paintings. En: *Journal of Mathematics and the Arts*. Wichita: Taylor & Francis, 2007,00. ISSN: 1751-3472.

HODNELAND,E; KÖGEL,T; FREI,D.M; GERDES, H.H; LUNDERVOLD,A. CellSegm- a Matlab toolbox for high throughput 3D cell segmentation. En: *Source Code for Biology and Medicine*. Plymouth: BioMed Central, 2013, num. 8:16. ISSN: 1751-0473

LAORDEN, E. *Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox de procesamiento digital de imágenes de Matlab* [Proyecto final de carrera]. Madrid: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación. Universidad Politècnica de Madrid, 2012.

LUQUE, C. *Un "San Pedro" italiano del s.XVIII sobre lámina de cobre. Estudio histórico-técnico y proceso de intervención*. [Trabajo final de máster]. València: Facultat de Belles Arts. Universitat Politècnica de València, 2018

MADRID, J.A. *Aplicación de la técnica radiográfica en la Conservación y Restauración de Bienes Culturales*. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2006.

MADRID, J.A. Dos décadas de inspección radiográfica en España: retrospectiva y horizontes futuros en un contexto de cambio tecnológico. En: *Intervención Revista Internacional de Conservación, Restauración y Museología* México: Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía-INAH, 2014, num. 10. ISSN 2007-249X

MANCEBO, A.M. *Desarrollo de una interfaz gráfica en MatLab para la aplicación de detección de humos mediante procesamiento digital de imágenes*, [Trabajo final de carrera]. València: Escuela Politècnica de Gandía. Universitat Politècnica de València, 2012

MATIAS, J; BECILLA,C; CHAVEZ, P. *Segmentación de Imágenes medicas para detección de detalles*. [Tesis de grado]. Ecuador: Facultad de Ingeniería Eléctrica y Computación, 2009

Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/28795055\\_Segmentacion\\_De\\_Imagenes\\_Medicas\\_Para\\_Deteccion\\_De\\_Detalles](https://www.researchgate.net/publication/28795055_Segmentacion_De_Imagenes_Medicas_Para_Deteccion_De_Detalles)

PÉREZ, P. *Simulación gráfica del valor del coeficiente de atenuación lineal del lino y el algodón*. [Trabajo final de grado]. València: Facultat de Belles Arts. Universitat Politècnica de València, 2017.

SÁNCHEZ, A.J; PRADO, B. “Pintura sobre cobre: Estudio técnico-material, indicadores de alteración y conservación”. En *Cuaderno de los Amigos de los museos de Osuna*, 2014, num. 16. Sevilla,. ISSN: 1697-1019 [consulta 2018-12-12] Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/317283894\\_Pintura\\_sobre\\_cobre\\_estudio\\_tecnico-material\\_indicadores\\_de\\_alteracion\\_y\\_conservacion](https://www.researchgate.net/publication/317283894_Pintura_sobre_cobre_estudio_tecnico-material_indicadores_de_alteracion_y_conservacion)

VEGA, D; POMBO, I; CARLYLE, L. Pintura sobre cobre: investigación sobre materiales y técnicas de aplicación de la capa de preparación a través de los tratados tradicionales y estudio analítico de dos obras atribuidas a las escuelas portuguesa y flamenca. En: *ARP- Associação Profissional de Conservadores-Restauradores de Portugal*. Portugal: ARP – Associação Profissional de Conservadores-Restauradores de Portugal, 2018,nº 27,ISSN: 2182-9942[consulta: 2019-1-18] Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/315939637\\_Painting\\_on\\_copper\\_Research\\_on\\_the\\_materials\\_and\\_techniques\\_used\\_on\\_ground\\_layer\\_according\\_to\\_historical\\_treatises\\_and\\_analytical\\_study\\_of\\_two\\_paintings\\_attributed\\_to\\_the\\_Portuguese\\_and\\_Flemish\\_school](https://www.researchgate.net/publication/315939637_Painting_on_copper_Research_on_the_materials_and_techniques_used_on_ground_layer_according_to_historical_treatises_and_analytical_study_of_two_paintings_attributed_to_the_Portuguese_and_Flemish_school)

VELASCO, M.M. *Extracción de patrones en telas de cuadros del siglo XVII a partir de placas de rayos X*. [Trabajo final de máster]. Sevilla: Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla, 2016. [consulta: 2019-1-23] Disponible en:

[https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/55754/TFM\\_Mar%\*c\*3%adadelMarVelascoMontero.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/55754/TFM_Mar%c3%adadelMarVelascoMontero.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

## Webs

MATHWORKS *Read image data from DICOM files* [consulta: 2019-3-22] Disponible en:

<https://es.mathworks.com/help/images/read-image-data-from-dicom-files.html>

MATHWORKS *contour3* [consulta:2019-3-24 ] Disponible en:

<https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/contour3.html>

MATHWORKS *meshcfiles* [consulta:2019-3-24 ] Disponible en:

<https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/meshc.html>

MATHWORKS *extractFeatures*[consulta:2019-3-27 ] Disponible en:

<https://es.mathworks.com/help/vision/ref/extractfeatures.html>

MATHWORKS *Porcesado digital de imagenes* [consulta:2019-3-28] Disponible en:

<https://es.mathworks.com/discovery/digital-image-processing.html>

MUSEO VIRTUAL DE MINERALOGÍA. UNIVERSIDAD DE HUELVA. *Clase I: Elementos nativos*

[consulta: 2019- 6-21] Disponible en:

<https://www.uhu.es/museovirtualdeminerologia/galerias/clase1.html>

INSTITUTO EUROPEO DEL COBRE. COPPER ALLIANCE. *Read El cobre en la*

*historia.* [consulta:2019-6-21 ] Disponible en <https://copperalliance.es/cobre/historia-cobre/>

## AGRADECIMIENTOS

A mi hermano y mis padres por ser mi pilar más fundamental, por aguantarme en tiempos de estrés y nervios sin desistir en el intento.

A mis abuelos por estar siempre atentos y orgullosos.

A todas aquellas personas que han mostrado su interés por este trabajo y por nuestra profesión.

A mis amigas y amigos, mi pequeña gran familia, en definitiva la Élite, por ser, por estar, por todas las risas y las no tan risas, por el apoyo, las fiestas, los viajes.... Seis años que han pasado como si hubiera sido uno y que siempre serán de los mejores años de mi vida. Laura, Tania, Óscar, Patri, Cris, Marina, Raquel, Mireia, Cati, Mayte, Lidia, Christian. Gracias.

Y como no a mi tutor, aquel que un día me propuso una locura llamada Matlab y de la que esperamos recoger muchos frutos. Gracias por todo.

