



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

LABORATORIO DE FÍSICA CONTEMPORÁNEA I. GRUPO: 8290.

PROFESOR: DR. OSCAR GENARO DE LUCIO MORALES

Análisis radiográfico de dos pinturas sobre vidrio

ANDRÉS GÓMEZ ARIAS
ANDRESGZ@CIENCIAS.UNAM.MX

STEFAN DANIEL NELLEN MONDRAGÓN
STEFAN_NELLEN@CIENCIAS.UNAM.MX

26 de enero de 2021

RESUMEN

1. Introducción

Se obtuvieron radiografías de dos pinturas de Juan Nepomuceno de Saénz¹, realizadas en la segunda mitad del siglo XVIII, llamadas *Facultas Sacra* y *Facultas Ynclita*. Consisten en pinturas sobre vidrio basadas en dos grabados del mismo nombre, realizados por los hermanos Joseph Sebastian Klauber y Johann Baptist Klauber² y diseñadas por Johann Wolfgang Baumgartner³. Era común durante la colonia, mientras se formaban escuelas de arte nativas, que los artistas replicaran o se basaran fuertemente en obras de autores europeos, en particular de regiones católicas de Europa, sobre todo Iberia y Flandes, pero también Francia, Italia y el sur de Alemania (incluyendo Austria). **CITAR TODO ESTO**



(a) Primera pintura estudiada: *Facultas Sacra* de Juan Nepomuceno de Saénz.



(b) Grabado original *Facultas Sacra* realizado por Joseph Sebastian Klauber y Johann Baptist Klauber.

Figura 2: *Facultas Sacra* de Juan Nepomuceno es una realización fuertemente inspirada en el grabado de Joseph Sebastian Klauber y Johann Baptist Klauber. Imágenes obtenidas de [citar](#).

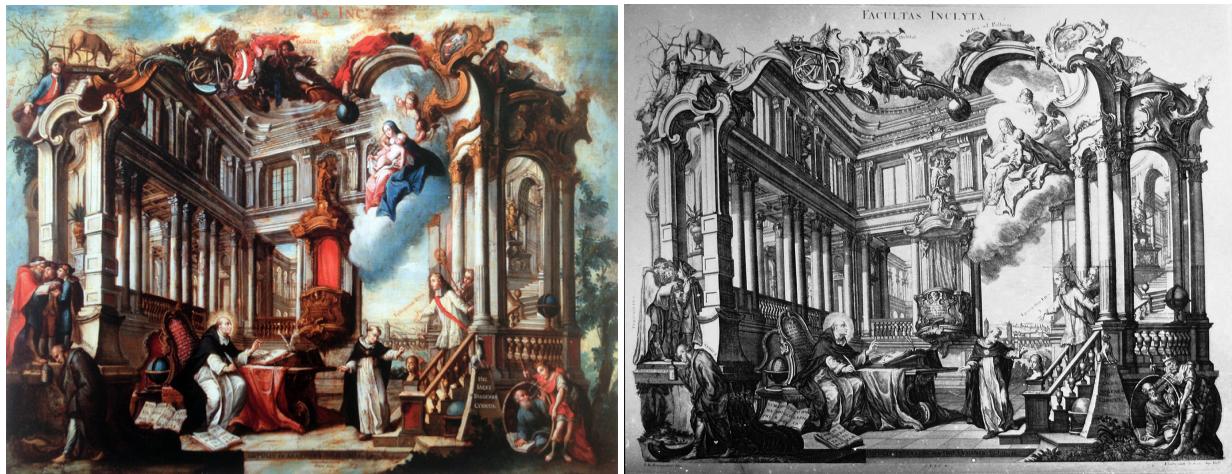
La pintura *Facultas Sacra* y el grabado original se pueden observar en la figura 2. Así también, la pintura *Facultas Inclyta* y el grabado original se pueden observar en la figura 3. Se puede observar que las figuras principales están reproducidas con detalle a partir de las originales (a excepción de la base en *Facultas Sacra*). El autor además se tomó la libertad de agregar un fondo con cielo en ambas pinturas.

Porqué *Facultas Sacra* aparece como la figura 2 si es la primera figura? *Facultas Sacra* (fig. 2) describe a la facultad sagrada de Santo Tomás de Aquino, uno de los 36 Doctores de la Iglesia y probablemente el filósofo europeo de la Edad Media con mayor impacto en el pensamiento occidental. En la obra, él es la figura central y se encuentra sentado, leyendo un manuscrito. Detrás de Santo Tomás se observa un crucifijo. La facultad consiste de un edificio en estilo barroco con arcos grandes de piedra blanca y una cúpula abovedada. Se observan libreros en distintas partes de la pintura. En la sección izquierda existe un altar a la Virgen y en la derecha una escena del Nuevo Testamento. En el

¹Juan Nepomuceno de Saénz (★17?? - †1???), muchas veces referido únicamente como Juan Saénz, fue un pintor novohispano activo en la segunda mitad del siglo XVIII, durante la transición del barroco colonial al neoclásico. Fue uno de los primeros integrantes de la Academia de San Carlos, fundada en 1783, habiendo sido discípulo de uno de sus miembros españoles más prominentes, Rafael Ximeno y Planes, con quién colaboró en distintas obras, como por ejemplo en la cúpula de la Catedral Metropolitana de la Ciudad de México. Como era común para pintores novohispanos de la época, gran parte de su obra es arte litúrgico e imitaciones de arte europeo.

²La familia Klauber era una familia de grabadores de arte católico en Augsburgo, en Suabia, al sur de Alemania, cuya obra transcurre varias generaciones durante el siglo XVIII. Se dedicaban principalmente a la calcografía, que se realiza mediante el grabado sobre una placa de cobre para luego poder usar la placa en una imprenta.

³Johann Wolfgang Baumgartner (★1712 - †1761) fue un pintor austro-alemán, activo en Augsburgo, cuya obra es característica del Rococó.



(a) Pintura 2 estudiada: *Facultas Inclita* de Juan Nepomuceno de Saénz.
 (b) Grabado original *Facultas Inclita* realizado por Joseph Sebastian y Johann Baptist.

Figura 3: *Facultas Inclita* de Juan Nepomuceno es una realización fuertemente inspirada en el grabado de Joseph Sebastian Klauber y Johann Baptist Klauber. Imágenes obtenidas de [citar](#).

primer plano se observan distintos instrumentos científicos (o así considerados durante el medievo) que, de izquierda a derecha, consisten en un reloj de sol, un báculo con astrolabio, una regla y una escuadra, así como varios libros. El fondo es un cielo azul nuboso, dando la impresión que el edificio se encuentra en las nubes. Además, en la parte superior se encuentra inscrito *Facultas Sacra* (en itálicas). El estilo de la pintura es principalmente barroco.

Facultas Inclita (fig. 3) describe a la facultad ilustre de San Alberto Magno, también un Doctor de la Iglesia, maestro de Santo Tomás de Aquino, influyente filósofo medieval y el santo patrón de los científicos naturales. Al frente se encuentra San Alberto Magno, sentado con un libro abierto y observando a una aparición de la virgen. A su derecha se encuentra otro santo en atuendo dominicano, el sujeto de la pintura anterior, Santo Tomás de Aquino. A la derecha de ambos santos se encuentra una figura en un atuendo blanco, posiblemente un obispo. Se encuentran dentro de un edificio barroco. El edificio tiene proporciones fantásticas, pues en el fondo de este se ve que a través de un arco hay un río que cruza por una ciudad, cortando un ala del edificio. En el fondo exterior al edificio se ven árboles y un cielo nublado. En la parte superior del cielo se observan letras itálicas, de las cuales solo es legible *u as Inc.* En el primer plano a la derecha, se encuentra Diógenes conversando con Alejandro Magno, a su izquierda su lápida, inscrita *HIC IACET DIOGENES CYNICUS* (aquí yace Diógenes el cínico). A la izquierda, también en el primer plano, se encuentra también Diógenes, caminando con una lámpara. En la parte izquierda superior del edificio hay un burro y a lo largo del friso de los arcos distintos personajes. El estilo de la pintura es principalmente barroco.

2. Marco teórico

En la sección 2.1 se presentan las bases físicas de la producción de rayos X. En la sección 2.2 se analizan los distintos tipos de interacción de rayos X con la materia, y se concluye con una descripción macroscópica de utilidad para el análisis de materiales con rayos X. En la sección 2.3 se hace una descripción del procesamiento digital en imágenes obtenidas a partir de rayos X. En la sección 2.4 se describen detalles técnicos de las pinturas estudiadas, tales como la técnica de realización y el tipo de pigmentos utilizados en la época.

2.1. Generación de rayos X

Las partículas eléctricamente cargadas, al frenarse, emiten ondas electromagnéticas. Es decir, emiten radiación. Una forma sencilla de entender esto es mediante la conservación de la energía. La partícula cargada es frenada dentro de un campo electromagnético. Así se transforma energía cinética en energía potencial. En este caso la energía potencial es electromagnética, por lo que la partícula cargada debe “crear” campo electromagnético.

Esta creación de energía electromagnética se manifiesta como la producción de fotones, es decir, de radiación electromagnética. Se puede obtener que la potencia radiada P por una partícula con carga q , aceleración \mathbf{a} y velocidad \mathbf{v} está dada por [1]

$$P = \frac{\mu_0 q^2 \gamma^6}{6\pi c} \left(\mathbf{a}^2 - \frac{1}{c^2} |\mathbf{v} \times \mathbf{a}|^2 \right), \quad (1)$$

donde $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$. La derivación de esta fórmula es bastante engorrosa, aunque se pudo obtener de manera sistemática de los potenciales de Liénard-Wiechert. El cálculo se simplifica un poco en la norma de Lorentz.

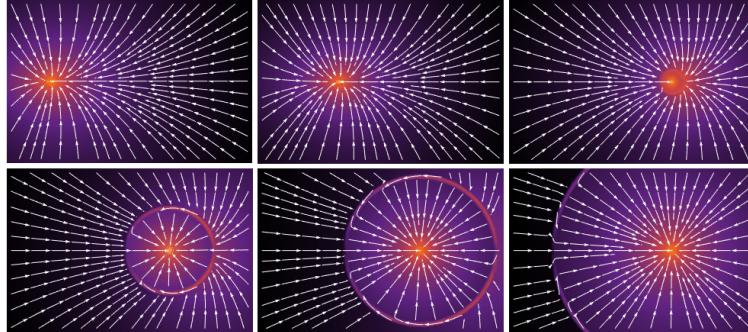


Figura 4: Esquema del campo eléctrico en un proceso de Bremsstrahlung: Una partícula cargada, inicialmente viajando a velocidad constante, se frena súbitamente, emitiendo radiación. Imágenes obtenidas de [2].

Si suponemos que la velocidad y la aceleración son colineales. Es decir, el movimiento ocurre completamente en una recta, entonces

$$P = \frac{\mu_0 q^2 \gamma^6 a^2}{6\pi c}. \quad (2)$$

Que en esencia, para velocidades no relativistas ($v \ll c$ y $\gamma \approx 1$), va como la aceleración al cuadrado. De esta forma, cuando una partícula cargada viaja a velocidad constante y súbitamente colisiona con un medio material, se desacelera y emite radiación. A este proceso se le denomina *Bremsstrahlung* ("braking radiation", o radiación de frenado). Un esquema del campo eléctrico de este proceso se muestra en la figura 4.

Este fenómeno se aprovecha para producir rayos X de manera controlada como en la figura 5. Se tiene un filamento calentado mediante el paso de una corriente eléctrica. Esto hace que se desprendan electrones en la vecindad del filamento. Estos electrones se aceleran por un alto voltaje en el otro extremo del aparato. Al chocar con el aparto, estos se desaceleran, emitiendo radiación electromagnética en forma de rayos X [3]. En algunos casos, si la energía es suficientemente grande, los electrones pueden desprender a los de las capas interiores de los átomos, de manera que al ser ocupadas nuevamente, se emite una radiación característica (ver efecto fotoeléctrico en siguiente sección).

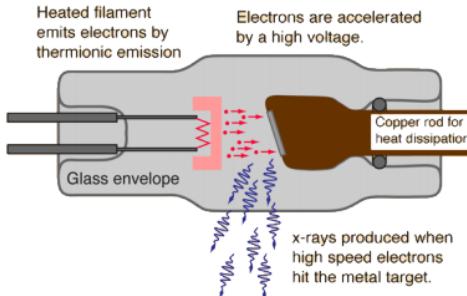


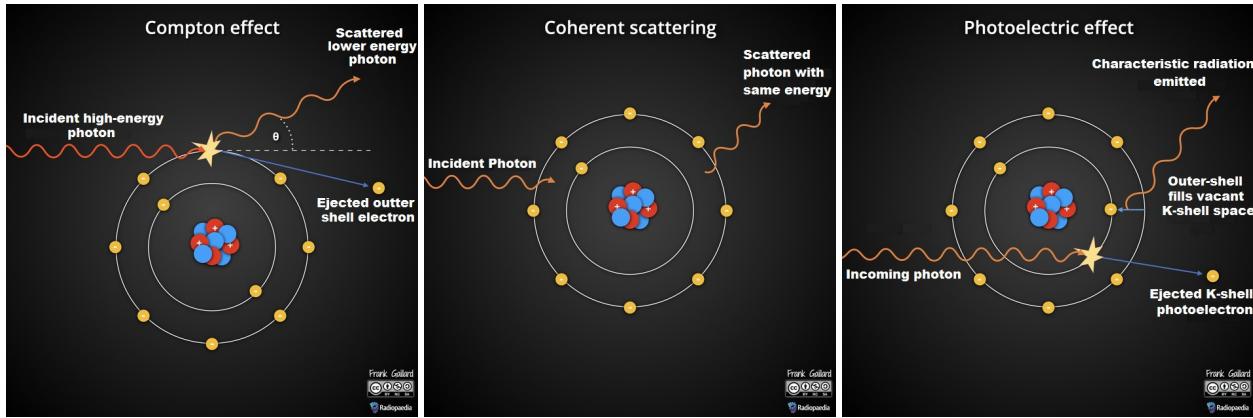
Figura 5: Esquema de la generación de rayos X mediante el proceso de Bremsstrahlung. Imagen obtenida de [3].

2.2. Interacción de rayos X con la materia

Como la materia está compuesta de átomos, basta con analizar los diferentes tipos de interacciones que los rayos X pueden tener con un átomo en general.

La primera posibilidad es que los rayos no interactúen con ningún átomo. Esta probabilidad aumenta con materiales menos densos y delgados. Es decir, la probabilidad de que un rayo de luz interactúe con la materia aumenta con la densidad y el grosor del material.

Cuando el haz sí interactúa con un átomo, se tienen tres posibles mecanismos [4]:



(a) Efecto Compton.

(b) Dispersión coherente (o de Rayleigh).

(c) Efecto foteléctrico.

Figura 6: Interacciones de rayos X con la materia. Imágenes obtenidas de [4].

i. Efecto Compton: Ilustrado en la figura 6a. Se produce cuando un fotón de alta energía (radiación ionizante, como los rayos X) empuja a un electrón de una de las capas externas y lo saca de su órbita. Esto ioniza al átomo y produce un fotón dispersado con energía menor al incidente.

ii. Dispersión coherente, o dispersión de Rayleigh: Mostrada en la figura 6b. Se produce cuando el fotón no cambia la estructura del átomo, pero es dispersado debido a su presencia. El fotón dispersado permanece con la misma energía incidente, y el átomo no sufre ningún cambio.

iii. Efecto foteléctrico: Mostrado en la figura 6c. Consiste en la eyección de un electrón, pero ahora de una capa interna. Esto hace que un electrón de una capa superior presente un decaimiento de órbita para llenar ese espacio libre. En el proceso, ese electrón produce un fotón con una frecuencia característica definida por la diferencia de energías entre las dos capas. Al final se produce un electrón y un fotón con una frecuencia característica.

En conjunto estos mecanismos hacen que de manera macroscópica cuando un haz de luz incida a través de un material, ésta se vea modificada (en general atenuada). Si suponemos un elemento de volumen homogéneo del material, podemos utilizar la Ley de Lambert. Esta afirma que *distancias iguales en el mismo medio absoredor atenúan fracciones iguales de radiación* [5]. Matemáticamente, para una longitud de camino dx , la fracción de reducción de intensidad dI/I es proporcional a dx . Es decir,

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx, \quad (3)$$

donde μ , denominado factor de atenuación, depende del material y de la energía del rayo de luz. Para un elemento homogéneo del material y un haz de luz monoenergético, se tiene que

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

con I_0 la intensidad incidente en el material.

Distintos materiales tienen distintos factores de atenuación, lo que hará que, al incidir un rayo de luz energético (como rayos X), los rayos de luz que atraviesen tendrán distintas intensidades. Así también, debido a la dependencia (decreciente exponencialmente) en x , distintos grosores de material generarán distintas intensidades finales. Estas dos propiedades en conjunto permiten observar un contraste en la imagen, con el cual se puede analizar la composición y estructura de un material al incidir y medir rayos X.

2.3. Análisis radiológico y procesamiento digital

La obtención de una imagen digital radiográfica permite la manipulación digital de la misma, con la finalidad de facilitar la descripción y análisis de esta. Por ejemplo, usando técnicas de mejoramiento (*enhancement*, en inglés) se puede mejorar la calidad general de la imagen, pero también se pueden usar métodos más específicos para mejorar o estudiar algún aspecto en particular. También se pueden usar técnicas de segmentación, en las que se separa la imagen en regiones o segmentos mediante algún método numérico. Se describen únicamente las técnicas que se emplearon para el análisis final de las pinturas. Todos los métodos descritos se implementaron a través del programa *ImageJ*.

2.3.1. Técnicas de mejoramiento

Hay dos técnicas que se usan comúnmente [6]. La primera es la mejora de contraste. Es común que las imágenes radiográficas tengan mal contraste, en particular tienden a ser muy obscuras (o claras en la escala invertida). Los métodos de mejora de contraste pretenden mitigar este problema al transformar el contraste de la imagen. Un método básico de mejora de contraste es la igualación de histogramas (*histogram equalization*), también conocido como *contrast stretching*. Se tienen los valores G de 0 a 255 (o mayor para un caso con más de 8 bits) en la escala de grises. Se mapea linealmente de un gris G a un gris G' mediante la fórmula⁴

$$G' = G'_{min} + (C'_{max} - G'_{min}) \frac{H(G)}{N}. \quad (5)$$

Donde G'_{min} y C'_{max} son parámetros definidos por el usuario, $H(G)$ es el valor que tiene G en el histograma cumulativo de las intensidades y N es el número de píxeles sobre el cual se realiza el histograma, es decir $H(G)/N$ es un histograma cumulativo normalizado. Una mejora sencilla a este método es *adaptive histogram equalization (AHE)* que es la implementación local del método anterior. Aquí el muestreo para el histograma se realiza en la vecindad de cada punto, por ejemplo en una región de 8×8 píxeles, de tal forma que el mapeo varía de punto a punto aunque ambos píxeles tengan el mismo valor (de ahí surge el adaptive). Una última mejora es *contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE)*. CLAHE es esencialmente AHE en el cual se cortan los histogramas a un límite dado, basado en la pendiente del resultado. Es decir, no se permiten variaciones de contraste mayores a un número dado. Esto tiene como efecto que la variación de contraste sea menor, así se reduce el ruido inducido por variaciones locales. En la figura 7 se puede observar el efecto de los métodos mencionados. En este trabajo se empleó CLAHE para mejorar las pinturas.

Una segunda técnica es la reducción de ruido [6]. Se reduce el ruido de la imagen, lo que permite usar otras técnicas de mejora de manera más eficiente. Así, es común que se emplee como técnica de pre-procesamiento. Existen muchas técnicas para la reducción de ruido, por ejemplo pasar la imagen por un filtro gaussiano (por una operación de convolución con una aproximación matricial bidimensional discreta a una gaussiana). También existen métodos no lineales, por ejemplo el filtro mediano. El filtro mediano mapea el valor del gris G en un punto a la mediana de su vecindad (casi siempre una región de 3×3 o 5×5 píxeles), es decir se mapea $G \rightarrow G'$ mediante

$$G'(x, y) = \text{mediana}\{G(x_1, y_1) | (x_1, y_1) \in N(x, y)\}, \quad (6)$$

con $N(x, y)$ una vecindad alrededor de (x, y) . Se experimentó tanto con un filtro gaussiano como con un filtro mediano, donde se optó usar el mediano para el análisis, pues el filtro gaussiano, aunque proporcionaba un buen filtrado del ruido, difunde demasiado a la imagen, es decir el resultado es algo borroso.

2.3.2. Segmentación

Dos técnicas que se emplean en la segmentación son la detección de bordes y el *thresholding* (umbralización en español). La detección de bordes es, como dice el nombre, una familia de algoritmos que buscan segmentar la imagen al encontrar bordes dentro de esta. Los bordes son generalmente fronteras entre objetos, pero el término borde es ambiguo. Se experimentó con detección de bordes mediante gradientes (donde se usan gradientes grandes como bordes) y el *Canny Edge Detector*, pero no se obtuvieron resultados satisfactorios (en parte por la complejidad de las pinturas), por lo que ninguno de los dos se utilizó en el análisis final. Se usaron solo técnicas de thresholding.

El método de thresholding (para un canal) consiste en transformar los valores de intensidades. Originalmente estos tienen valores de 0 a 255, con una distribución completamente dependiente de la imagen. El algoritmo entonces elige un valor intermedio, de manera que todas las intensidades menores a este se van a cero, y todas las mayores a este se van a 255, obteniendo así una imagen binaria segmentada [7]. El objetivo de cualquier algoritmo de thresholding es encontrar el valor en la distribución que haga que la segmentación produzca una imagen fiel a los objetos representados en ella (dentro de las necesidades particulares del usuario).

⁴En la implementación de esta fórmula se usa un redondeo para el resultado final, debido a que la tonalidad en escala de grises debe de ser un número entero.

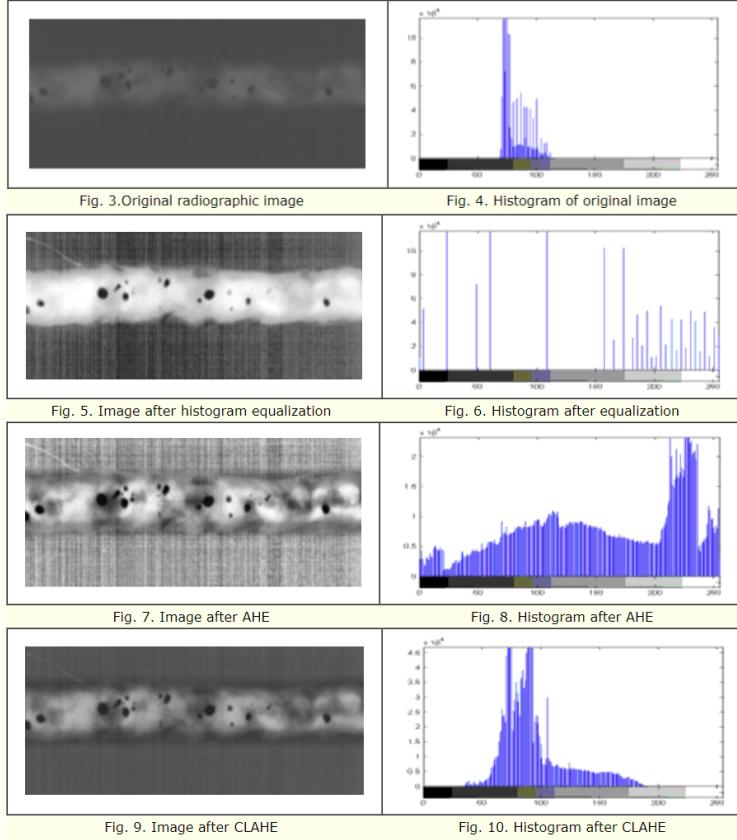


Figura 7: Efectos de la aplicación de *histogram equalization* y sus derivados a una imagen radiográfica [6].

Inicialmente se intentaron utilizar métodos de segmentación automáticos, tales como *Max Entropy*, *Otsu's method* u otros [8], que, a partir de la información estadística de las distribuciones, encuentran el valor de segmentación. Por ejemplo, Otsu [9] toma la segmentación que maximiza la varianza conjunta entre las clases; Max Entropy realiza algo similar [10], pero maximizando la entropía entre las clases. Sin embargo, estos métodos (y en general muchos de los implementados en ImageJ) no segmentaban la imagen de la manera requerida: Partes oscuras quedaban con huecos, o de plano la segmentación cubría casi toda la imagen (o casi nada de esta). La razón es que estos métodos funcionan mejor cuando se tienen distribuciones bimodales (o multimodales), para las cuales las cantidades que optimizan tienen un significado estadístico. Nuestra distribución de intensidades era, sin embargo, unimodal (tanto para la original como para la procesada, en donde en esta última la distribución era básicamente la suavizada).

Existen otros métodos de segmentación automáticos implementados para distribuciones unimodales [11], pero a nuestro juicio consideramos que son muy rudimentarios (varios involucran simples ajustes a rectas en las colas de la distribución). En realidad lo que dio mejores resultados fue una elección manual del valor de segmentación. Se optó por segmentar la imagen en 3 casos: Tomando el 33 % de los valores más claros, el 33 % de los valores medios, y el 33 % de los valores más oscuros. Esto es sistemático, con relevancia estadística para distribuciones unimodales, aplicable a ambas imágenes, y tiene sentido físico al segmentar claramente los tintes transparentes, medios y opacos, sin involucrar ajustes dependientes del método de segmentación.

2.4. Antecedentes técnicos de las obras estudiadas

Para este trabajo es de gran relevancia describir los pigmentos utilizados en el contexto histórico en el cual fueron realizadas las obras, y la técnica de realización de estas.

2.4.1. Pigmentos utilizados en la época virreinal

La identificación de los pigmentos utilizados en la época virreinal constituye un tema de investigación en la actualidad [12]. Debido a que en el Nuevo Mundo no se disponían de los mismos materiales que en Europa, los tintes usuales

debían ser importados, o se debían desarrollar nuevas técnicas para fabricarlos. Así también se podían desarrollar nuevos pigmentos a partir de ingredientes locales, o se podían adaptar los pigmentos previamente utilizados por las culturas prehispánicas. Dicho esto, se conocen algunos de los pigmentos utilizados en la época virreinal para la elaboración de pinturas [12]. Algunos de estos son:

- i) **Carmín:** Pigmento orgánico de color rojo brillante fabricado a partir de insectos escamosos como la cochinilla [13]. Su fórmula química es $C_{22}H_{20}O_{13}$, que en términos de masa está conformado por un 53,65 % de Carbono, 42,28 % de Oxígeno y 4,07 % de Hidrógeno. Tiene una densidad de 1,87 g/cm³ y es soluble en agua [14].
- ii) **Oropimente:** Pigmento mineral con color anaranjado amarillento [15]. Es un mineral cristalino compuesto de Arsénico y Azufre. Se han encontrado minas de este en el territorio mexicano [12]. Su fórmula química es As_2S_3 , que en términos de masa está conformado por un 60,91 % de Arsénico y 39,09 % de Azufre. Tiene una densidad de 3,53 g/cm³ y es insoluble en agua [16].
- iii) **Malaquita:** Pigmento mineral de color verde azulado [17]. Usado en la antigüedad como pigmento, y en la actualidad como piedra semipreciosa. Su fórmula química es $Cu_2CO_3(OH)_2$, que en términos de masa está conformado por un 57,47 % de Cobre, 36,20 % de Oxígeno, 5,43 % de Carbono y 0,90 % de Hidrógeno. Tiene una densidad de 3,80 g/cm³ y es insoluble en agua [18].
- iv) **Índigo:** Pigmento orgánico de color azul oscuro cristalino originado de las plantas de género Indigofera [19]. Originario del subcontinente Índico, pero subsecuentemente exportado al mundo occidental. Su fórmula química es $C_{16}H_{10}N_2O_2$, que en términos de masa está conformado por un 73,28 % de Carbono, 12,21 % de Oxígeno, 10,69 % de Nitrógeno y 3,82 % de Hidrógeno. Tiene una densidad de 1,20 g/cm³ y es insoluble en agua.
- v) **Azurita:** También conocida como chesilita o malaquita azul, es un pigmento mineral de color azul oscuro pálido [20]. Es un pigmento inestable, que al reaccionar con contaminantes del aire, tiende a ennegrecer o verdear según las condiciones. Sin embargo, al mezclarse con blanco de plomo (como para pintar un cielo) se tiene un efecto estabilizador [21]. Es asociado a la Malaquita debido a que tienen composiciones químicas muy parecidas. La fórmula química de la Malaquita se muestra en su descripción, y la de la Azurita es $Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$. En términos de masa está conformada por un 55,30 % de Cobre, 37,16 % de Oxígeno, 6,96 % de Carbono y 0,58 % de Hidrógeno. Tiene una densidad de 3,77 g/cm³ y es insoluble en agua.
- vi) **Plomo:** Conocido como Albayalde, o blanco de plomo. Pigmento mineral a base de plomo utilizado desde la antigüedad⁵ hasta el siglo XIX, cuando se restringió por su toxicidad [22]. Por varios siglos fue el único pigmento blanco utilizado, y en su restricción fue sustituido por el blanco de zinc y el blanco de titanio⁶. Su fórmula química es $2PbCO_3 \cdot Pb(OH)_2$. En términos de masa está conformado por un 80,12 % de Plomo, 16,52 % de Oxígeno, 3,10 % de Carbono y 0,26 % de Hidrógeno. Tiene la peculiaridad de que tiende a oscurecer con el paso del tiempo debido a que algunos contaminantes del aire [24] pueden reaccionar con él para producir sulfuro de plomo negro. Tiene una densidad de 6,70 – 6,86 g/cm³, es insoluble en agua, pero soluble en ácidos [25].
- vii) **Blanco de zinc:** Pigmento mineral de color blanco que se empezó a usar a mediados del siglo XVIII [26]. Su fórmula química es ZnO . En términos de masa está conformado por 80,34 % de Zinc y 16,66 % de Oxígeno. Tiene una densidad de 5,61 g/cm³ y es insoluble en agua.

Algo importante a considerar es que los pigmentos minerales tienden a tener una mayor densidad, y por ende a ser radio-opacos, mientras que los pigmentos orgánicos no. Un caso notable es el blanco de plomo que, a pesar de tener un color blanco en el visible, es muy denso y radio-opaco (el plomo es incluso utilizado para protección radiológica).

2.4.2. Técnica de realización de las obras

Ambas pinturas estudiadas son realizadas con la técnica de *pintura inversa sobre vidrio*. Esta técnica consiste en realizar una pintura sobre una pieza de vidrio para luego observar la pintura desde la parte inversa del vidrio [27]. Esta técnica tiene la particularidad de que lo que se pinta se observa por capas; lo primero que se pinta es lo que se observa al frente, y lo último se observa por detrás. Esto obliga a al pintor a tener que realizar su obra en orden inverso [28]: primero los detalles de los objetos (rasgos, decoraciones, luces y sombras), luego los objetos mismos, y al final el fondo. Otra peculiaridad es que los objetos plasmados se invierten. Es decir, la parte derecha de la pintura se hace la parte izquierda y viceversa. De manera que si se quiere plasmar a alguien escribiendo con la mano derecha, se tiene que pintar escribiendo con la mano izquierda. Además, si se comete cualquier error no se puede pintar encima de este para corregirlo como en una pintura de óleo, pues lo primero que se pinta es lo que se aprecia. Todos estos detalles hacen

⁵De hecho se considera que es el primer pigmento inorgánico sintético utilizado en la antigüedad [22].

⁶No se describirá al dióxido de titanio debido a que se empezó a producir en masa hasta 1916 [23], por lo que es improbable que haya sido utilizado en las obras estudiadas.

que la realización de obras con esta técnica sea sumamente laboriosa. En particular es impresionante darse cuenta que para una obra en la cual se quiere plasmar un objeto de otra obra, como en las estudiadas, se debe plasmar el inverso de este objeto, para así conservar su orientación.

Las pinturas con esta técnica sufren de daños y deterioro especialmente cuando la parte inversa del vidrio (sobre la cual se deposita la pinutra) es expuesta al aire [28]. Esto debido a que en la parte frontal el mismo vidrio actúa como protector contra el ambiente. Aún así, el deterioro con el tiempo es posible, y en general se caracteriza por desprendimientos de las capas de la pintura con formas irregulares.

3. Objetivo

El objetivo de este trabajo es hacer un análisis de las pinturas Facultas Sacra y Facultas Inclyta mediante una comparación cualitativa entre las imágenes de rayos X, las imágenes a color de las pinturas y las imágenes de los grabados originales. Se plantean utilizar los filtros mencionados en el marco teórico, a manera de que se pueda hacer un análisis claro de los detalles que estos filtros muestren. Así también, se propone integrar la descripción de los detalles encontrados con la técnica de realización, los posibles pigmentos utilizados, el contexto histórico y el tipo de daños posibles.

4. Desarrollo experimental: Procesamiento de imágenes

Las radiografías originales de ambas pinturas se muestran en la figura 8.



Figura 8: Radiografías originales.

AUN ASI PONER COMO SE OBTUVIERON IE DE RADIOGRAFIAS TOMADAS CON UNA MAQUINA etc

Se procesan digitalmente las radiografías de los cuadros usando ImageJ. Ambas radiografías se procesan de la misma manera. Primero se invierte la imagen (ver figura 9). La finalidad de esto es que se tenga correspondencia de la imagen con la física (es decir oscuro corresponda a mayor absorción y claro a menor).

Luego se pasa la imagen por un filtro mediano de 3×3 . Se puede considerar este paso como pre-procesamiento de la imagen y se realiza para reducir el ruido y mejorar la eficacia de los siguientes pasos. Después se le aplica CLAHE a la imagen con los siguientes parámetros: tamaño de bin - 127; ancho de histograma - 256; pendiente máxima - 4. El resultado de este proceso para ambas pinturas se muestra en la figura 10. Este paso mejora el contraste considerablemente, por lo que no se usaron otros filtros.

Con esto se procede al análisis en sí. Lo primero que se hace es thresholding con los tres umbrales (discutido en la sección 2.3.2). Estos son el 33 % más oscuro (o mayor), el 33 % medio y el 33 % más claro (o menor). Esto se hizo sobre la imagen procesada debido a que se había normalizado localmente el histograma, de manera que las variaciones de intensidad corresponden a variaciones locales, y no globales que pueden corresponder al brillo de la toma de la imagen, que afecta negativamente a la segmentación.

De manera adicional se analizó manualmente (es decir, observando cualitativamente sin ayuda de algún otro método) la imagen procesada con CLAHE, donde se enfatizó el análisis de zonas dañadas y zonas de alto detalle. Tanto en el



(a) Facultas Sacra.

(b) Facultas Ynclita.

Figura 9: Radiografías invertidas.



(a) Facultas Sacra.

(b) Facultas Ynclita.

Figura 10: Radiografías invertidas, con filtro mediano y CLAHE.

thresholding como en el análisis manual se apoyó de la imagen a color y del grabado en el que esta basada esta para hacer comentarios y conclusiones. Los resultados de este paso se muestran y se discuten en la sección 5. Las imágenes a color están a una escala mucho menor a las radiografías y por ende una resolución peor. Se usó un algoritmo de reescalación bicúbico para tener la radiografía y la imagen a color a la misma escala. Esto suaviza también el pixelado de la imagen de menor tamaño. Sin embargo, es imposible mediante únicamente interpolación recrear el detalle que se observa en la radiografía.

5. Resultados

Se reportan los análisis realizados para ambas pinturas. Primero se presentan los resultados del thresholding, luego el análisis de detalles, donde se puede deducir un poco sobre la técnica empleada y las peculiaridades de esta, y finalmente se analiza el daño que ha sostenido la pintura.

5.1. Facultas Sacra

5.1.1. Thresholding

Tanto para esta pintura como para Facultas Inlyta, lo discutido en esta subsección será muy similar. De todos modos se volverán a hacer las menciones necesarias por claridad y completez. Los resultados del thresholding a la imagen procesada de Facultas Sacra se muestra en la figura 11.

Se observa que los blancos son principalmente los pigmentos más radio-opacos (Figura 11a). Esto se observa de comparar las nubes, los pilares iluminados, la piel y túnica blanca de Santo Tomás y los libros y pergaminos blancos con las secciones opacas en la radiografía. Eso es indicador de que el pigmento blanco utilizado en la pintura es de origen mineral, lo que tiene sentido, ya que en esa época era utilizado el blanco de plomo o el blanco de zinc (discutido mas adelante). Como será discutido mas adelante, las zonas de alto de detalle destacan por tener pigmentos radio-opacos. En parte por el uso del blanco de origen mineral, o por la mezcla de este con otros tintes (como el rojo en el altar a la virgen, discutido mas adelante).

Para los tonos menos radio-opacos (Figura 11c) se observa que estos corresponden a azules, negros, grises y marrones. Por ejemplo en las sombras de las columnas y personas, y en textiles pintados (como la túnica oscura de Santo Tómas). Esto colores probablemente son de origen orgánico, por ejemplo índigo o carmín. El caso notable de los azules en el cielo es discutido en la subsección del análisis de daños. En zonas donde hay blanco estos colores ya no se ven en el thresholding y probablemente se debe a que hay capas de blanco que no se observan en el visible. Asimismo, para los tonos más claros de los colores mencionados se observa mayor radio-opacidad. Esto se explica fácilmente, pues probablemente el color se debe a la mezcla del pigmento orgánico con el blanco mineral.

Del thresholding para la media de las intensidades (Figura 11b) se puede observar que hay una variedad de zonas con radio-opacidades medias, a excepción del cielo, que es o muy radio-opaco en las nubes, o menos radio-opaco en el cielo (discutido en el análisis de daño). En lo demás se muestra la composición compleja de la imagen. Se observa que casi toda la estructura y objetos en el primer plano tienen partes que pasan que no pasan. Esto sugiere una elaboración detallada y con diversas capas de pintura para los distintos detalles presentes.

5.1.2. Análisis de detalles

La pintura en general es altamente detallada, pero hay algunos lugares que destacan por tener particularidades notables.

Dado es el caso del báculo y la escuadra (ver figura 12), posicionados en la parte inferior centro-izquierda y derecha de la pintura respectivamente. Se puede apreciar que estos son objetos cuyos tintes son notablemente mas claros en la radiografía con respecto al fondo sobre el cual están pintados. Usualmente en una pintura de caballete lo mas práctico es pintar primero el fondo, y sobre él los objetos en primer plano, ya que así se tiene una transición clara del objeto al fondo sin que uno se tenga que preocupar por el contorno. Las imágenes de rayos X del báculo y la escuadra nos dicen que este no fue el caso, debido a que de haber pintado un fondo detrás del báculo (escuadra), el pigmento de este bloquearía los rayos X incidentes en el báculo (escuadra). Estas peculiaridades fueron una de las razones por las cuales se concluyó que la técnica de realización de las obras fue la de pintura inversa sobre vidrio. Con esto en mente, tiene más sentido este detalle, puesto que con esta técnica se necesitaba primero pintar al báculo (escuadra), y después al fondo. Aún así se podría haber pintado el fondo completamente por detrás del báculo, pero el artista decidió no hacerlo. Esto probablemente permitía poder apreciar el báculo del otro lado del vidrio sin que este fuera tapado, y así tener una mejor noción del arreglo espacial de la pintura en su proceso de realización.

Otras zonas de interés son la zona central de la pintura y la columna izquierda donde se aprecia un altar a la virgen (ver figura 13). En la zona central aparece Santo Tomás de Aquino con un manuscrito, la paloma del espíritu santo sobre su cabeza, y un crucifijo al fondo. Aquí es apreciable a simple vista que los tintes más opacos a los rayos X coinciden con los tintes blancos, como se puede observar en la túnica blanca y el rostro de Santo Tomás, en las páginas de los libros, la paloma y la piel del Cristo. Por otro lado, el altar a la virgen destaca por otro tipo de tintes asociados a zonas opacas en la radiografía (además de los tintes blancos ya mencionados). Tal es el caso de los tintes rojos en el altar, y en arreglo floral de la estatua en la columna derecha.

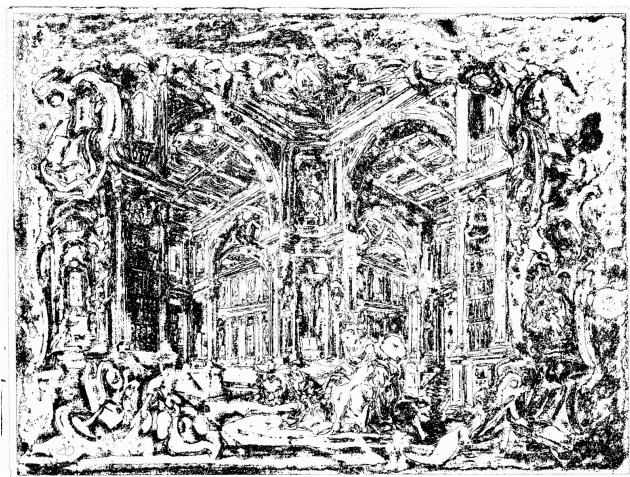
5.1.3. Análisis de daño

Por daño se tomarán todo tipo de tonalidades anómalas o decoloraciones distinguibles en la radiografía o en la pintura a color, pero enfocándonos principalmente en la primera. Como se mencionó anteriormente, la técnica de estas pinturas ocasiona daños muy particulares.

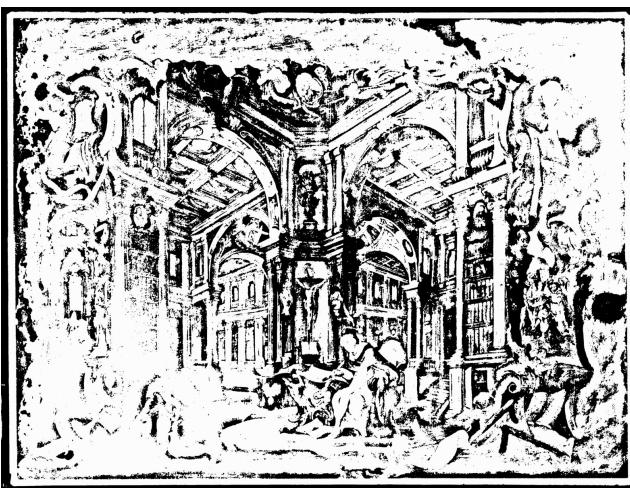
En la figura 14 se puede observar una decoloración notable en la radiografía de la parte central del arco. Aunque no es particularmente irregular, si es un patrón que no coincide con la estructura de la imagen a color. La restauración,



(a) Thresholding para el 33 % de tonalidades mas oscuras y la selección del histograma.



(b) Thresholding para el 33 % de tonalidades medias y la selección del histograma.



(c) Thresholding para el 33 % de tonalidades menores y la selección del histograma.

Figura 11: Thresholding manual de *Facultas Sacra* (procesada) para las tonalidades mas oscuras, las medias, y las menores.



(a) Radiografía con CLAHE.



(b) Pintura.



(c) Radiografía con CLAHE.



(d) Pintura.

Figura 12: Radiografía procesada y comparación con la pintura del báculo (a), (b) y de la escuadra (c), (d) en Facultas Sacra.



(a) Radiografía con CLAHE.



(b) Pintura.



(c) Radiografía con CLAHE.



(d) Pintura.

Figura 13: Radiografía procesada y comparación con la pintura del centro (a), (b) y de la virgen (c), (d) en Facultas Sacra.

imperceptible a simple vista en la pintura original, fue realizada con un tinte mas transparente para los rayos X, probablemente con el propósito de que sea fácilmente identificable para un análisis histórico de la evolución de la pintura.



(a) Radiografía con CLAHE.



(b) Pintura.

Figura 14: Radiografía procesada y comparación con la pintura del daño en un arco en Facultas Sacra.



(a) Radiografía con CLAHE.



(b) Pintura.

Figura 15: Radiografía procesada y comparación con la pintura del daño en las nubes de arriba en Facultas Sacra.

Son de particular interés las decoloraciones a lo largo del cielo en esta pintura, apreciables en las figuras 15 y 16. Una comparación cuidadosa con respecto a la pintura a color revela que hay una fuerte correlación entre estos descoloramientos y las regiones azules del cielo. Uno podría pensar en primera instancia que entonces estas regiones no corresponden a daños, sino que las decoloraciones se deben a que los tintes azules del cielo son más transparentes que los blancos de las nubes. Sin embargo, la alta regularidad de varias de las manchas, como las de la figura 16(a), descartan esa posibilidad: Las decoloraciones (al menos en su mayoría) sí corresponden a daño. La correlación entre las decoloraciones y los tintes azules en el cielo se puede deber a diferentes factores. Es posible que se haya pintado la capa del cielo sobre las nubes, de manera que estas quedan protegidas en contra del ambiente. Si alguna capa del cielo que coincidía con una nube se desprende por daño (sin desprenderse toda la pintura), entonces esto no será observable ni en la pintura (debido a que es una capa oculta) ni en la radiografía (debido a que es un tinte transparente). Puede ser también que los tintes azules sean más propensos a deteriorarse, debido a que absorben una mayor cantidad de luz ultravioleta (proveniente de luz solar) que daña a la pintura.

Un detalle muy notable es el daño en un libro en la parte inferior izquierda de la obra (ver figura 17). En la radiografía se puede observar una clara decoloración con respecto al tinte opaco que conformaba las páginas del libro. Además, bajo una cuidadosa comparación entre la pintura a color y el grabado original se puede observar que, mientras que el libro del grabado tiene una inscripción en las dos páginas, en la pintura a color se observa un claro deterioro en una de ellas. A pesar de una posible restauración en la página del libro, no fue posible (o no se quiso) restaurar la inscripción en esa página. Esto está directamente relacionado con la técnica de realización de la obra, puesto que dicha inscripción debe estar pintada directamente sobre el vidrio para aparecer en primer plano. El daño sobre la página del libro podría haber dificultado o imposibilitado la restauración de la inscripción.

5.2. Facultas Inclyta

5.2.1. Thresholding

Los resultados del thresholding a la imagen procesada de Facultas Inclyta se muestra en la figura 18.



Figura 16: Radiografía procesada y comparación con la pintura del daño en el cielo de la esquina superior izquierda (a), (b) y en la derecha (c), (d) en Facultas Sacra.



Figura 17: Radiografía procesada y comparación con la pintura del daño en un libro en Facultas Sacra y el grabado original.



(a) Thresholding para el 33 % de tonalidades mas oscuras y la selección del histograma.



(b) Thresholding para el 33 % de tonalidades medias y la selección del histograma.



(c) Thresholding para el 33 % de tonalidades menores y la selección del histograma.

Figura 18: Thresholding manual de Facultas Inclyta (procesada) para las tonalidades mas oscuras, las medias, y las menores.

Al igual que en *Facultas Sacra* se observa que principalmente los blancos son los colores más radio-opacos (Figura 11a). Se observa esto principalmente en el piso del edificio, en las partes iluminadas de las columnas, las caras de las personas y el cielo. Esto sugiere que el blanco es un pigmento mineral, posiblemente blanco de plomo o blanco de zinc. En zonas de alto detalle, que se describen con mayor profundidad en la siguiente subsección se encuentra también considerable radio-opacidad. Esto es porque se han sobrepuerto capas de blanco y mezclado el blanco con otros colores para llenar detalles, por ejemplo de iluminación.

Para los tonos menos radio-opacos (Figura 11c) se observa que estos corresponden a azules, negros, grises y marrones. Por ejemplo en las sombras de las columnas y personas, y en textiles pintados. Estos colores probablemente son de origen orgánico, por ejemplo índigo o carmín. En zonas donde hay blanco estos colores ya no se ven en el thresholding y probablemente se debe a que hay capas de blanco que no se observan en el visible. Asimismo, para los tonos más claros de los colores mencionados se observa mayor radio-opacidad. Esto se explica fácilmente, pues probablemente el color se debe a la mezcla del pigmento orgánico con el blanco mineral.

Del thresholding para la media (Figura 11b) de las intensidades no se puede concluir mucho sobre la radio-opacidad de los tonos. Sin embargo, muestra la composición compleja de la imagen. Se observa que casi toda la imagen (la excepción siendo el piso en la zona inferior) tiene partes que pasan que no pasan. Esto sugiere una elaboración detallada y con diversas capas de pintura para los distintos detalles presentes.

5.2.2. Análisis de detalles

Al igual que la pintura anterior esta pintura es altamente detallada. Se describen algunos detalles que sobresalen.

En el centro de la imagen se observa a San Alberto Magno y Santo Tomás de Aquino (ver figura 19). La radiografía procesada muestra, como era de esperar, que los blancos son los tonos más opacos. Lo mismo ocurre en la imagen de la virgen (figura 19), donde los tonos blancos son los con mayor radiopacidad. Así mismo, se puede notar que los marrones y rojos son menos radiopacos. Sin embargo, se observa tanto en la radiografía que los santos, tanto como la virgen, tienen un rango de contraste bastante amplio, así como parte de las regiones más oscuras del cuadro. Esto es indicativo de que en estas zonas hay varias capas de pintura. El hecho de que hayan varias capas de pintura y que el rango de contraste sea extenso es indicativo de que esta zona fue pintada en muchos pasos y con mucha atención a detalles y colores, que tiene sentido, ya que se trata de las figuras centrales de la pintura.

En la figura 20 se observan un burro y un árbol seco en la esquina superior izquierda del cuadro. El burro y el árbol tienen colores similares (marrón), aunque el árbol es más oscuro y por ende no sobresale particularmente en la radiografía. De hecho, es difícil distinguirlo del fondo. El burro sobresale un poco más. Sin embargo, ambos objetos son menos radiopacos que el fondo. Esto es indicativo de que se pintaron primero esto y luego el fondo. Esto es típico de la técnica empleada por el autor, pues se deben dibujar primero detalles y luego el fondo (ya que se verá el reverso de la imagen a través del vidrio). El autor optó no pintar el fondo sobre estas figuras, de la misma manera que lo hizo para el báculo y la escuadra en *Facultas Sacra*. Que al haber analizado ese cuadro era de esperar, pues se puede suponer que se dibujaron ambos cuadros en períodos de tiempo similares, de tal forma que el estilo y técnica del artista no hayan variado significativamente. El efecto de esto es que en el reverso del cuadro (sobre el cual se dibujó) sean visibles los contornos del burro y árbol. **No sé si poner algo de que esto permite que en el espectro visible se vean mas brillantes pues la luz no es completamente absorbida por la capa del fondo**

5.2.3. Análisis de daño

Al igual que para *Facultas Sacra*, por daño se tomarán todo tipo de tonalidades anómalas o decoloraciones distinguibles en la radiografía o en la pintura a color, con un enfoque en anomalías claras en la radiografía. Como se mencionó anteriormente, la técnica de estas pinturas ocasiona daños muy característicos.

En la figura 21a se observa daño en la columna que soporta al burro, así como a la derecha del burro. Este daño es invisible en la pintura a color, pero se vuelve claro en la radiografía. Lo mismo se observa en la figura 21c, pero ahora en las columnas detrás de San Alberto Magno. Dado que el daño se ve blanco en la radiografía, uno esperaría que se vea transparente en el visible (es decir, que no haya ningún pigmento). Sin embargo, el daño no se observa, por lo que se concluye que estas secciones de la pintura fueron exitosamente restauradas con algún pigmento que no es radio-opaco. Esto se hace para que mediante una radiografía se pueda observar que zonas han sido restauradas, pero también pudo haber sido simplemente que el restaurador carecía de los pigmentos históricos.

En la figura 22 se tiene una imagen del daño al árbol que se encuentra a la derecha de la pintura y el daño en la esquina inferior izquierda, donde Diógenes camina con una lámpara. El daño que se observa en la sección de Diógenes se ve extenso en la radiografía, sin embargo en el visible no se observa daño. Entonces, se puede concluir, al igual que en la figura 21, que el daño se restauró exitosamente con un pigmento menos radio-opaco que el original. Esto es distinto



(a) Radiografía con CLAHE.



(b) Pintura.



(c) Radiografía con CLAHE.



(d) Pintura.

Figura 19: Radiografía procesada y comparación con la pintura del centro (a), (b) y de la virgen (c), (d) en Facultas Inclyta.



(a) Radiografía con CLAHE.



(b) Pintura.

Figura 20: Radiografía procesada y comparación con la pintura de la parte superior izquierda en Facultas Inclyta.

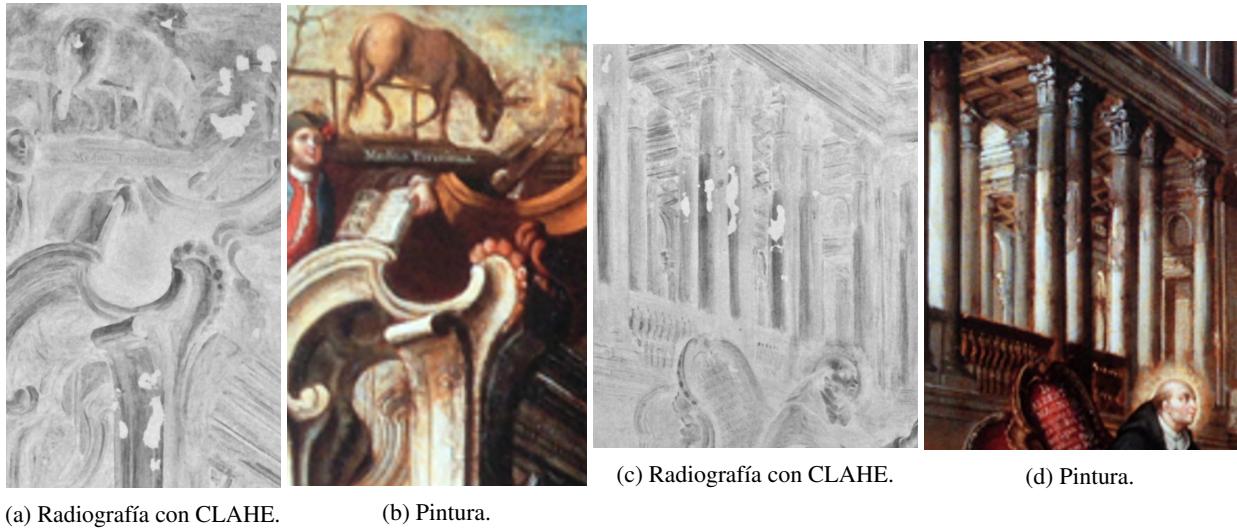


Figura 21: Radiografía procesada y comparación con la pintura del daño en una columna con burro (a), (b) y de columnas en el centro (c), (d) en Facultas Inclyta.

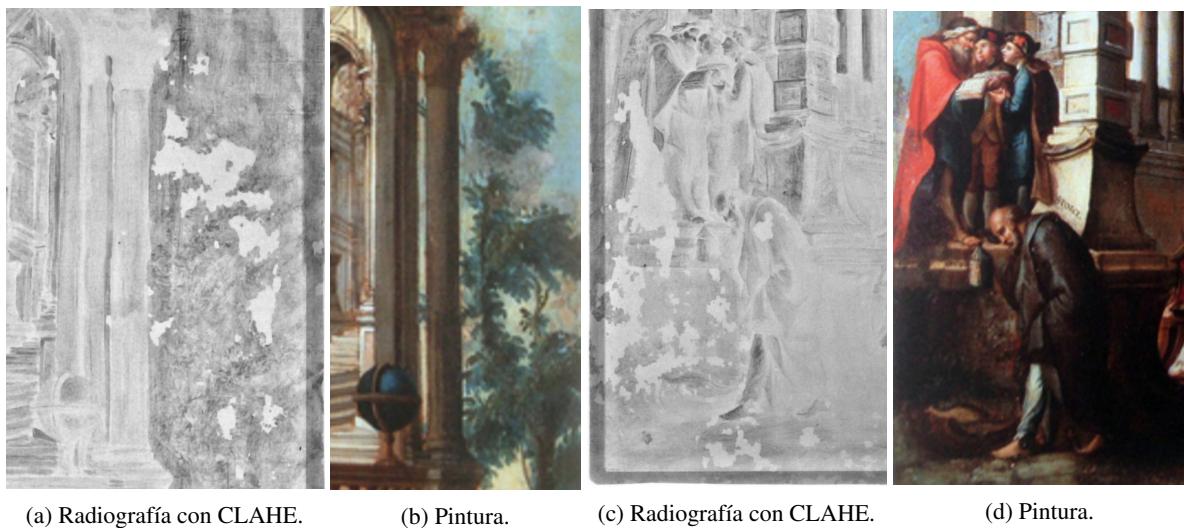


Figura 22: Radiografía procesada y comparación con la pintura del daño en un árbol de la derecha (a), (b) y de túnicas en la esquina inferior izquierda (c), (d) en Facultas Inclyta.

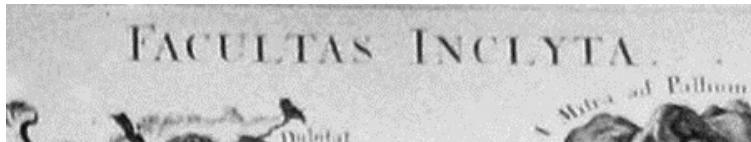
para el árbol, donde partes blancas en la radiografía corresponden a manchas grises en el visible. Eso se puede deber en parte la reacción del blanco de plomo (si es que se usó) con contaminantes del aire, comentada en la sección 2.4.1. Otra posibilidad es que por la técnica de pintado reverso fue imposible restaurar el daño completamente (pues los detalles no se pueden volver a pintar completamente) y se enmascaró el daño con el gris. En la misma región, pero fuera del árbol el daño en la radiografía corresponde a un marrón lavado en la pintura, que podría también explicarse mediante la restauración con pigmentos distintos a los originales.



(a) Radiografía con CLAHE.

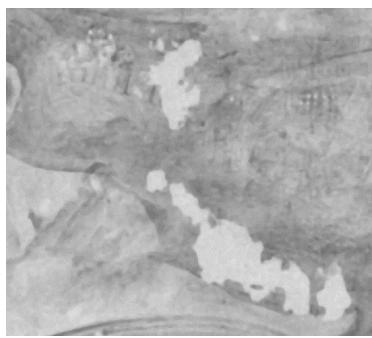


(b) Pintura.



(c) Grabado original.

Figura 23: Radiografía procesada y comparación con la pintura del daño en las letras del título en *Facultas Inclyta* y el grabado original.



(a) Radiografía con CLAHE.



(b) Pintura.

Figura 24: Radiografía procesada y comparación con la pintura del daño la parte superior derecha en *Facultas Inclyta*.

Por último, en la figura 23 se observa que las letras de *Facultas Inclyta* están detrás de algo que parece unas nubes. Al comparar con la radiografía es claro que estas nubes corresponden a daño. El hecho de que no se haya logrado restaurar las letras es indicativo del método de elaboración de la pintura, al igual que el árbol, las letras se pintaron antes que el fondo, por lo que es difícil restaurarlas sin borrar todas las capas de pinturas (que se puede argumentar es peor para la restauración de la pintura que un poco de daño). A parte de la radiografía, se puede deducir que las letras están dañadas, pues en el grabado en el que está basado el cuadro se observan claramente las letras. Algo similar ocurre con las letras a la derecha de un hombre sentado en la parte superior derecha del cuadro. Las letras están claramente dañadas y no se lograron restaurar (o no se ha hecho). Lamentablemente, debido a la mala calidad de la imagen de la pintura no se pueden descifrar las letras.

6. Discusión

En general se encuentra que Facultas Inclytá está peor conservado que Facultas Sacra. El daño es más extenso y los márgenes se encuentran menos restaurados. Un ejemplo claro es el daño que han sufrido las letras del título de la obra.

Un detalle que comparten ambas pinturas es que al margen se encuentra un cuadro oscuro con una diagonal más clara en las esquinas. Esto se debe a que probablemente el vidrio es biselado. Es decir, se ha cortado el vidrio en los bordes en un corte oblicuo, generando esos bordes uniformes caracterizados por las diagonales en las esquinas.

En ambas pinturas se observa, tanto en la imagen procesada, como en la segmentación al 33 % de tonalidades mas oscuras, que los pigmentos radio-opacos corresponden principalmente a tonalidades blancas. En Facultas Sacra esto se ve notablemente en las nubes del cielo, mientras que en Facultas Inclytá la correlación no es tan clara (en general el cielo es radio-opaco con excepción del daño). Esto se puede deber a que en Facultas Sacra se pintaron primero las nubes, y posteriormente el cielo (como fue discutido en la sección 5.1.3), mientras que en Facultas Inclytá el orden fue opuesto: Primero se pintó el cielo, y luego se pintaron las nubes con una capa que cubría al azul completamente por detrás.

En ambas pinturas se encontró que el daño en el centro de la pintura fue restaurado con bastante éxito (con algunas excepciones como el libro de Facultas Sacra). Sin embargo, en el fondo el daño es más extenso y en general la restauración es peor. Esto se puede deber a que en los bordes la pintura, por el reverso, puede estar mas expuesta con el aire (a través de las uniones de alguna capa protectora en el inverso), lo que para la técnica es deteriorante.

Mientras que en Facultas Sacra se observa una correlación muy clara entre el daño en el cielo, y los tintes azules (discutida ya en la sección 5.1.3), en Facultas Inclytá la correlación no es tan clara. Se tienen coincidencias entre partes oscuras o grises de las nubes y el daño observado en la radiografía, pero esta correlación no es total (se tienen partes grises sin daño en la radiografía y viceversa). Una posibilidad ya discutida es que este daño se deba al deterioro del blanco de plomo al sulfuro de plomo negro. Sin embargo, esto no es tan factible debido a que el sulfuro de plomo sigue siendo un material radio-opaco, por lo que en estas manchas grises no se deberían de observar huecos en la radiografía. Se pueden tener otras explicaciones. La primera es que hubo un desprendimiento de pigmento, y el restaurador restauró con colores marrones para que parecieran nubes distintas a las originales. La segunda es que no se haya restaurado la pintura y que lo que se observe sea simplemente el fondo del cuadro (por ejemplo si este es madera o algún papel marrón) o una capa interna de color oscuro. Debido a que las imágenes de las pinturas a color son de baja calidad y no se encontraron otras de mejor calidad, no se puede concluir cual de estas opciones es la correcta.

Dado el contexto histórico no se puede afirmar con seguridad a partir del análisis radiológico que el tinte blanco utilizado es blanco de plomo, puesto que en ese periodo es en el que se empezó a utilizar el blanco de zinc, que también es radio-opaco. No se encontraron deterioros posibles del blanco de plomo al sulfuro de plomo negro. Las regiones grises en las nubes de Facultas Inclytá son descartables, como se discutió anteriormente (deberían de seguir siendo radio-opacas⁷). Por ello, sería necesario otro tipo de análisis para obtener resultados mas concluyentes.

7. Conclusiones

Se hizo un análisis radiológico exitoso en ambas pinturas, utilizando los métodos de mejora de imagen de ImageJ. Principalmente, CLAHE y thresholding, donde el primero mejoró notablemente el contraste de la imagen, y el segundo segmentó los tintes radio-opacos en distintos niveles.

Se encontraron múltiples detalles en ambas pinturas, en conjunto con el contexto histórico y la técnica de realización. Algunos detalles notables son el uso de pigmentos minerales para las tonalidades blancas (en donde no se pudo concluir si el utilizado es el blanco de plomo, o el blanco de zinc), el orden inverso del pintado en Facultas Sacra para el cual se evitó pintar sobre el primer plano (como el báculo, las escuadras y las nubes), el daño en los bordes de las pinturas (con una fuerte correlación en los azules del cielo en Facultas Sacra, para la cual se tienen algunas hipótesis), el daño no reparado de las letras en ambas pinturas (como el libro en Facultas Sacra y el título en Facultas Inclytá, relacionados con la técnica de realización), y el biselado en los bordes de ambas pinturas.

Se espera que con otro tipos de análisis complementarios (como análisis químicos para los pigmentos) se pueda hacer una buena caracterización de ambas pinturas.

⁷Otro punto en contra de este argumento es que estas tonalidades marrones solo aparecen en las nubes, cuando todas las otras tonalidades blancas de la pintura parecen mantener su coloración

Referencias

- [1] D.J. Griffiths. *Introduction to Electromagnetism*. 3.^a ed. Prentice Hall, 1999. Cap. 11.2: “Power radiated from a point charge”, págs. 460-463.
- [2] Desconocido. *Bremmstrahlung*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung>. (última visita: 9.01.2021).
- [3] R. Nave. *X-ray Production*. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/xtube.html>. (última visita: 25.01.2021).
- [4] A. Murphy e Y. Maharaj et al. *X-ray interaction with matter*. URL: <https://radiopaedia.org/articles/photoelectric-effect?lang=us>. (última visita: 08.01.2021).
- [5] R. González. *Caracterización de un sistema de radiografía digital con aplicaciones en el estudio del patrimonio cultural (Tesis de Licenciatura)*. Facultad de Ciencias, UNAM, 2018, pág. 14.
- [6] X. Wanga y B. S. Wongk. *Image Enhancement for Radiography Inspection*. URL: <https://www.ndt.net/article/icem2004/papers/64/64.htm>. (última visita: 10.01.2021).
- [7] Desconocido. *Thresholding (image processing)*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Thresholding_\(image_processing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Thresholding_(image_processing)). (última visita: 26.01.2021).
- [8] Gabriel Landini. *Auto Threshold*. URL: https://imagej.net/Auto_Threshold. (última visita: 26.01.2021).
- [9] Desconocido. *Otsu's method*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Otsu%27s_method. (última visita: 26.01.2021).
- [10] Jerek Sacha. *Maximum Entropy Threshold*. URL: https://imagej.net/Maximum_Entropy_Threshold. (última visita: 26.01.2021).
- [11] Desconocido. *Unimodal thresholding*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Unimodal_thresholding. (última visita: 26.01.2021).
- [12] S. Setina y col. *La dimensión material del arte novohispano*. URL: <http://www.scielo.org.mx/pdf/inter/v5n10/v5n10a5.pdf>. (última visita: 9.01.2021).
- [13] Desconocido. *Carmine*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Carmine>. (última visita: 10.01.2021).
- [14] Desconocido. *Carmine Properties*. URL: <https://www.worldofchemicals.com/chemicals/chemical-properties/carmine.html>. (última visita: 10.01.2021).
- [15] Desconocido. *Orpiment*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Orpiment>. (última visita: 10.01.2021).
- [16] Desconocido. *Arsenic trisulfide*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Arsenic_trisulfide. (última visita: 10.01.2021).
- [17] Desconocido. *Malaquita*. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/Malaquita>. (última visita: 10.01.2021).
- [18] Desconocido. *Basic copper carbonate*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Basic_copper_carbonate. (última visita: 10.01.2021).
- [19] Desconocido. *Indigo dye*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Indigo_dye. (última visita: 10.01.2021).
- [20] Desconocido. *Azurita*. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/Azurita>. (última visita: 10.01.2021).
- [21] María Alonso Lobato. *Materiales y técnicas pictóricas (II): La azurita*. URL: <https://www.investigart.com/2014/09/26/materiales-y-tecnicas-pictoricas-ii-la-azurita/>. (última visita: 25.01.2021).
- [22] María Alonso Lobato. *Materiales y técnicas pictóricas (III): El blanco de plomo*. URL: <https://www.investigart.com/2014/10/27/el-blanco-de-plomo/>. (última visita: 25.01.2021).
- [23] Desconocido. *Titanium dioxide*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Titanium_dioxide. (última visita: 25.01.2021).
- [24] Desconocido. *Albayalde*. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/Albayalde>. (última visita: 25.01.2021).
- [25] Desconocido. *Lead carbonate, basic*. URL: http://cameo.mfa.org/wiki/Lead_carbonate,_basic. (última visita: 25.01.2021).
- [26] Desconocido. *Zinc oxide*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Zinc_oxide#Pigment. (última visita: 25.01.2021).
- [27] Desconocido. *Reverse glass painting*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Reverse_glass_painting. (última visita: 25.01.2021).
- [28] Katelyn Fagan. *Reverse Glass Painting with Mother of Pearl - A Restoration Project*. URL: <http://katelynfaganart.blogspot.com/2012/03/reverse-glass-painting-with-mother-of.html>. (última visita: 25.01.2021).