

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

“TERAHERTZ: NUEVA HERRAMIENTA PARA EL ESTUDIO DEL PATRIMONIO CULTURAL”

Alma Montserrat Gómez Sepúlveda
Alumna de 10º semestre/ ECRO

Introducción

El estudio de los bienes culturales es un tema que ha venido cobrando interés entre los investigadores científicos. En la actualidad, la tendencia se ha encaminado a desarrollar y poner a prueba nuevas tecnologías que permitan obtener la mayor cantidad de información, sin afectar de manera no destructiva a los bienes estudiados.

Entre ellas se encuentran las principales aplicaciones de las diferentes longitudes de onda que forman parte del espectro electromagnético son la espectroscopía y la formación de imágenes. En este sentido la radiación en terahertz (THz) no es la excepción, ya que permite obtener ambos resultados de manera no invasiva de forma simultánea (Fukunaga, 2009).

Radiación en terahertz

La radiación de terahertz (THz) es una radiación no ionizante que forma parte del espectro electromagnético y se encuentra entre la banda del infrarrojo lejano y las microondas (Castro, 2006). Las ondas electromagnéticas de THz, también conocidas como rayos T, tienen un intervalo de frecuencias de 30 GHz a 10 THz (1 cm^{-1} a 300 cm^{-1} , 10 mm a $30 \mu\text{m}$, o de 1 meV a 41 meV) (Castro, 2006), su ubicación dentro del espectro se puede observar en la Figura 1.

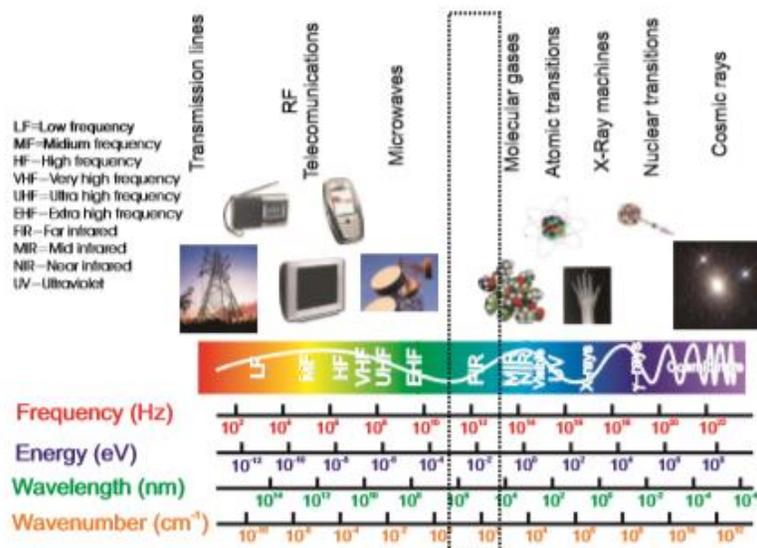


Figura 1

Ubicación de la banda de THz dentro del espectro electromagnético.

Fuente: Castro Camus, E. (2006).

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

A pesar de tener haber sido objeto de gran interés desde la década de 1920, la banda de frecuencias de terahertz se encontró entre las secciones menos estudiadas del espectro electromagnético debido a la poca disponibilidad de fuentes y detectores (Hejase, 2012). Por sus características, no era posible acceder a ella ni por el lado de la óptica, ni de la electrónica por separado. Solamente hasta hace algunas décadas se logró su detección a partir de la fusión entre ambos campos, gracias a David H. Auston quien en 1980 demostró por primera vez la posibilidad de producir, generar y detectar la radiación con frecuencia de THz (Wang y Zhang, 2004).

THz-FT y THz-TDS

La radiación de THz puede ser analizada en dos espacios: 1) En el dominio de la frecuencia (mediante la transformada de Fourier (THz-FT) y 2) en el Dominio del Tiempo (THz-TDS). La THz-FT es considerada una extensión en el infrarrojo lejano a los sistemas de FTIR de uso común y puede alcanzar de 0,1 a 20 THz, rango en el que es posible observar espectros característicos de distintos materiales (Fukunaga y Picollo 2009).

La THz-TDS alcanza de 0,1 a 3 THz y además de obtener la información de las longitudes de onda que absorbe un material al igual que los sistemas de FTIR comunes, permite obtener la forma temporal del campo eléctrico, permitiendo la reconstrucción de estratos y la obtención de sus espesores. El sistema puede ser alineado en modo transmisión (colocando el emisor frente al detector en línea recta) o en reflexión (colocando el emisor y el detector a 45°). (Fig. 2)

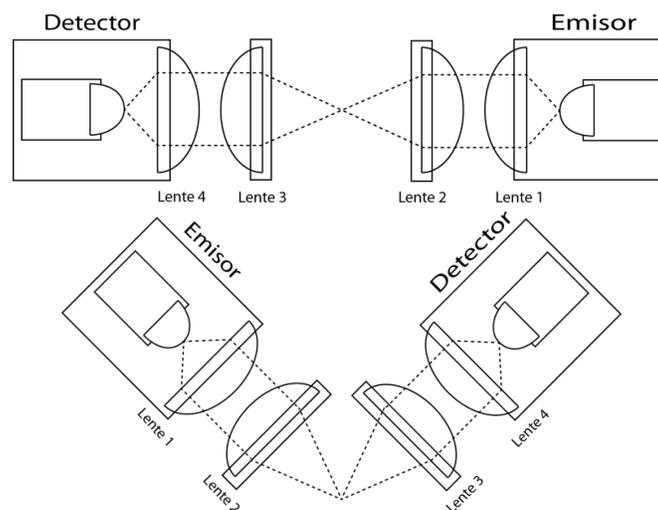


Figura 1
Arreglo del equipo THz-TDS
en trasmisión (superior) y en reflexión (inferior).

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

En el modo transmisión, por ejemplo, es posible medir directamente el índice de refracción complejo, información que es particular de cada material (Fukunaga y Picollo 2009), además de que en algunos casos es posible observar huellas espectrales características. Con el sistema TDS en el modo de reflexión, es además posible medir el tiempo de retraso entre las diferentes reflexiones del pulso en distintas capas. Si conocemos el índice de refracción de los pigmentos o materiales presentes es posible extraer el grosor de cada capa, permitiendo obtener imágenes estratigráficas, observar imágenes ocultas o realizar reconstrucciones de los estratos que conforman el objeto.

Aplicaciones en bienes culturales

En lo que respecta al uso de la radiación de THz en patrimonio cultural se han realizado diversas investigaciones para mostrar sus alcances, principalmente aplicado a materiales puros, mezcla de materiales y muestras patrón que emulan la técnica de factura típica de diversos objetos de interés cultural.

En cuanto a los análisis de materiales puros se han realizado trabajos sobre diversos tipos de maderas (Koch, Hunsche, Schumacher, Nuss, Feldmann, y Fromm, 1998), textiles (Molloy, Naftaly, Lanski, Kokh, y Andreev, 2013), carbonato de calcio de distintas procedencias (Mizuno, Fukunaga, Saito, y Hosako, 2009), polímeros naturales (Manceau, M., Nevin, Fotakis y Tzortzakis, 2008), pigmentos a base de carbón (Abraham, Younus, Delagnes, y Mounaix, 2010) y piedra (Schwerdtfeger, Castro-Camus, Krügener, Viöl, y Koch, 2013).

En lo que respecta a muestras patrón que emulan la técnica de factura típica de objetos de interés cultural se han realizado probetas de papiro (Labaune, Jackson, Pages-Camagna, Duling, Menu y Mourou, 2010), sellos de cera (Mounaix, Younus, Delagnes, Abraham, Canioni, y Fabre, 2011) y lacas Danesas (Dandolo y Jepsen, 2013).

También hay algunas investigaciones en casos de estudio real, tal como los vendajes que envolvían una momia humana (Fukunaga, Cortes, Cosentino, Stuenkel, Leona, Duling III y Mininberg, 2011), una pintura mural danesa (Corinna, Dandolo y Jepsen, 2013), pinturas sobre lienzo (Seco, López, Arauz, Redo, Palacios y Tejada, 2013), pinturas sobre tabla (Skryl, Jackson, Bakunov, Menu, y Mourou, 2014), tintas de manuscritos medievales sobre piel de oveja o pergamino (Fukunaga, Ogawa, Hayashi, y Hosako, 2008a) y esculturas de madera (Gallerano, Doria, Giovenale, Messina, Petralia, Spassovsky, Fukunaga, Hosako, More, Seracini y Bisceglia, 2011).

Antecedentes para la obtención de análisis espectroscópicos

la mayoría de los trabajos mencionados en la sección anterior se llevaron a cabo por medio de sistemas de THz-TDS, sin embargo, la espectroscopia por transformada de Fourier THz-FT se ha utilizado en mayor medida para el análisis de materiales, ya que suele tener un mayor ancho de banda que va de 0,1 a 20 THz. En esta región, casi todos los materiales muestran sus propias características espectrales (Fukunaga, Hosako, Duling, y Picollo, 2009).

Desde 2007, en colaboración con distintas instituciones, Fukunaga y Picollo han establecido una base de datos que contiene aproximadamente 500 espectros obtenidos por THz-FT y THz-TDS. Los materiales analizados han sido usados por artistas a través de

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

diversos los siglos e incluyen pigmentos, aglutinantes naturales y sintéticos, así como varias mezclas (www.thzdb.org).

El objetivo de Fukunaga y Picollo es que dicha base de datos contribuya a la identificación espectroscópica mediante la comparación de las huellas espectrales en casos de estudio real, aunque todavía son pocos los usuarios de THz y aún no hay protocolos de medición bien establecidos. Sin embargo, los autores hacen hincapié en que son muchos los factores que afectan los espectros, entre ellos el grosor de las pinturas y el tamaño de las partículas de pigmento por ello aún es necesario establecer protocolos de preparación de muestras y de medición para hacer válida la comparación de espectros (Fukunaga y Picollo, 2009).

En cuanto a la aplicación de esta base de datos Gallerano et al.(2011) y Fukunaga, Sekine, Hosako, Oda, Yoneyama, y Sudou, (2008), realizaron probetas de estratos complejos que simulaban pinturas sobre lienzo tradicionales en los que lograron identificarse los pigmentos y materiales presentes mediante la comparación de las huellas espectrales obtenidas. La mayoría de los trabajos reportados respecto a la caracterización de materiales por huellas espectrales con THz se han realizado sobre pigmentos o materiales puros y no sobre casos de estudio real. Esto ha sido debido principalmente a que los casos reales implican una enorme complejidad pues durante su realización se usaron pigmentos puros y mezclados con cantidades de aglutinante desconocidas, logrando grosores homogéneos y heterogéneos, además del envejecimiento de los materiales y el desconocimiento de la manera en que dichas huellas espectrales cambian a través del tiempo. Es necesario, entonces comenzar a aplicar esta metodología de identificación de los materiales en casos de estudio reales.

Antecedentes para la obtención de imágenes

Para la obtención de imágenes en THz se utilizan sistemas TDS en modo de transmisión o reflexión y los objetos son colocados en una plataforma XY para ser escaneados. Mediante el procesamiento de las señales obtenidas se pueden extraer distintos tipos de imágenes: por amplitud, falso color, secciones transversales, capas pictóricas ocultas y reconstrucción de capas en 3D.

Imágenes por amplitud

Las imágenes por amplitud se obtienen mediante la representación gráfica del valor de la amplitud del campo eléctrico medido para cada coordenada x, y (pixel) escaneada en la obra, asignando un tono único de color a cada pixel para la visualización bidimensional de la superficie del objeto. Es decir, las zonas con mayor reflexión corresponderán a las zonas más claras, mientras que las de menor amplitud corresponderán a las zonas más oscuras de la imagen (Dandolo y Jepsen, 2013).

Este tipo de imágenes son muy útiles cuando se quieren observar las zonas donde ha sido colocada hoja de oro debajo de capas pictóricas, ya que el oro presenta una alta reflectividad (Fukunaga y Picollo 2009). Además, permite observar relieves y texturas en las obras, similar a las imágenes con luz rasante.

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

Imágenes en falso color

Las imágenes de falso color se pueden lograr de distintas maneras, una de ellas fue realizada por Dandolo y Jepsen (2013) quienes dividieron el espectro en veinticinco diferentes frecuencias, calculando la integral de la amplitud espectral sobre cada intervalo de frecuencias para formar imágenes. Este tipo de imágenes dan una mejor impresión visual de contraste y permiten distinguir entre materiales y texturas (Véase: Fig. 3).

Otra manera de realizar imágenes en falso color fue reportada por Fukunaga, Ogawa, Hayashi, Hosako (2007) en donde realizaron imágenes para la identificación de materiales. Para esto se apoyaron en la base de datos (www.thzdb.org) asignando valores RGB a distintas huellas espectrales (Fukunaga *et al.*, 2007).

Imágenes de secciones transversales

Cundo se obtiene una imagen THz-TDS en modo de reflexión, los impulsos reflejados dentro de la muestra llevan información sobre la estructura interna (secciones transversales). Los impulsos son reflejados por la diferencia en el índice de refracción de cada capa, los cuales tendrán una separación temporal entre sí. Mediante ecuaciones matemáticas es posible obtener el grosor y separación de cada estrato ya que la separación temporal es directamente proporcional al grosor o separación de cada estrato, para esto es necesario conocer la información del índice de refracción de los materiales que componen el objeto. Este principio es aplicado para la obtención de imágenes ocultas y reconstrucción de capas, temas que serán abordados a detalle más adelante.

Uno de los primeros trabajos para la obtención de imágenes de secciones transversales sobre un caso de estudio real fue reportado por Fukunaga *et al.*, (2009), cuando analizó el “Polittico di Badia”, pintura al temple sobre tabla realizada por Giotto en el año 1300.

Imágenes ocultas

Las imágenes ocultas han sido uno de los principales temas tratados en términos de obtención de imágenes con THz-TDS. Diversos ejemplos se reportan en los que se han realizado muestras patrón en donde toda la zona de la imagen, o una parte de ella, ha sido cubierta por gruesas capas de yeso (Jackson, Mourou, Whitaker, Duling III, Williamson, Menu, y Mourou, 2008; Doria, Gallerano, Giovenale, Messina, Spassovsky, More y Petralia, 2012; Jackson *et al.*, 2008) o plomo (Adam, Planken, Meloni y Dik, 2009). En todos los casos han podido observar sin ningún problema las imágenes ocultas e incluso dibujos preparatorios de grafito (Jackson *et al.*, 2008).

Reconstrucción de capas

El trabajo de Dandolo y Jepsen titulado “Characterization of European Lacquers by terahertz (THz) reflectometric imaging” publicado en 2013, es una interesante referencia para la obtención de los distintos tipos de imágenes mencionados en párrafos anteriores. En su trabajo, Dandolo y Jepsen muestran ejemplos de los distintitos tipos de imágenes que es posible obtener por medio el procesamiento de las señales, este es además el único trabajo en el que

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

hasta ahora se había reportado la posibilidad de reconstruir las capas que constituyen el sistema estratigráfico de un objeto además de estimar los grosores de cada una de ellas (Ver figura 3).

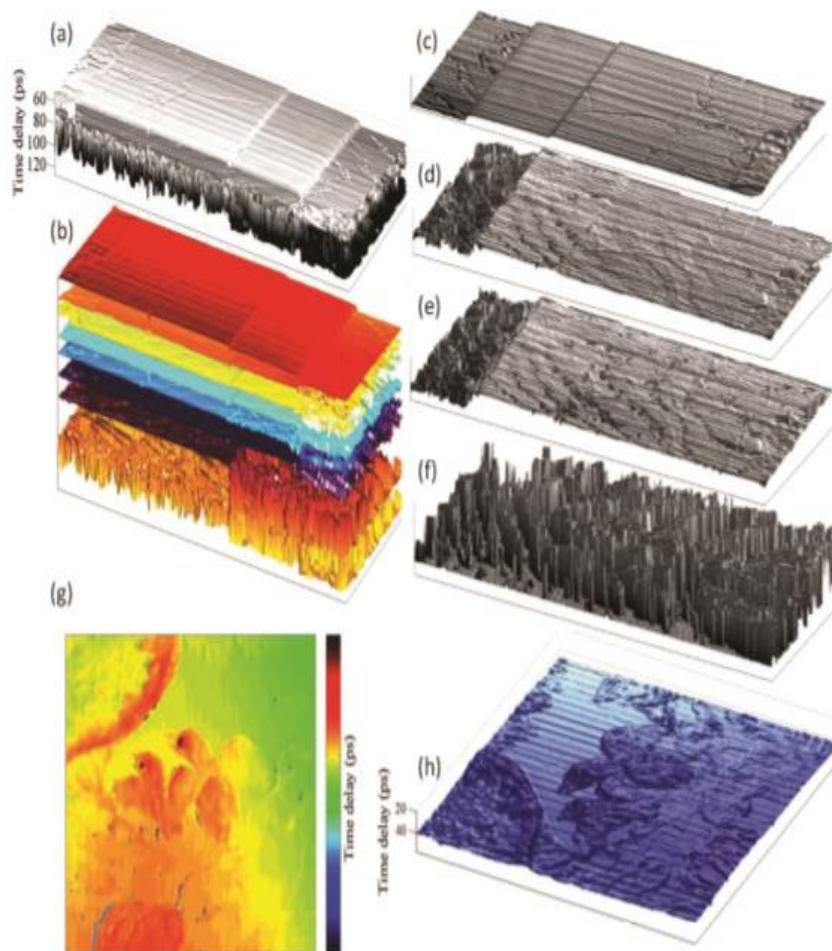


Figura 3

Reconstrucción de los estratos que conforman una imitación de laca danesa en donde: (a) muestra la separación real entre las capas y (b) las capas han sido separadas de manera arbitraria para una mejor visualización. De (c) a (f) se pueden observar por separado cada una de las capas que conforman el objeto. Finalmente, (g) es la imagen reconstruida en falso color mediante reflexión y (h) permite observar el relieve de la obra.

Fuente: Dandolo, C. L. K., y Jepsen, P. U. (2013)

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

El Centro de Investigaciones en Óptica A.C, pionero en el uso de THz en México

El Centro de Investigaciones en Óptica A.C (CIO), fue fundado en la ciudad de León, Gto., el 18 de Abril de 1980, por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. La línea de investigación en terahertz en el CIO nace en enero de 2009 cuando el doctor Enrique Castro Camus se incorpora como investigador en este centro.

La línea de investigación de THz formó parte del grupo de Propiedades Ópticas de Nanoestructuras, Superficies e Interfaces hasta diciembre de 2013, cuando el grupo de investigación se independizó para formar el Grupo de Ciencia y Aplicaciones de Terahertz.

El interés de este grupo incluye el desarrollo de fuentes y detectores de THz y de dispositivos cuasi-ópticos para esta banda, así como estudio de sistemas biológicos y bioquímicos, semiconductores, aplicaciones médicas e industriales, objetos de valor cultural, etcétera.

En marzo de 2014, como parte de mi incorporación al grupo como tesista, se abrió una línea de investigación especialmente enfocada en los bienes culturales patrimoniales, con el objetivo de obtener imágenes de la distribución estratigráfica, imágenes ocultas y resultados de la composición química de los elementos o compuestos que forman parte de una pintura de caballete sin realizar toma de muestra.

En este proyecto de carácter interinstitucional, colaboran El Colegio de Michoacán a través de su Laboratorio de Investigaciones del Patrimonio (Ladipa) y la Escuela de Conservación y Restauración de Occidente (ECRO). El proyecto está dividido en dos etapas: en la primera se estudiaron muestras patrón realizadas con materiales comúnmente utilizados por artistas de los siglos XVI al XIX, las cuales fueron preparadas en laboratorio con el objetivo de obtener sistemas estratigráficos donde la concentración y grosor fueran conocidos y controlados para formar una base de datos referencial de los índices de refracción de cada material.

Posteriormente, se realizó una probeta experimental que emuló los sistemas estratigráficos típicos de una pintura de caballete, con el objetivo de obtener imágenes ocultas e imágenes estratigráficas mediante las reflexiones de los distintos estratos que la conforman.

En la segunda etapa del proyecto se aplicó esta misma metodología a dos obras del siglo XVIII tituladas *El lavatorio de pies* y *La institución de la eucaristía*, pertenecientes al retablo lateral de la Parroquia de Nuestra Señora de la Purísima Concepción, que se encuentra en Purísima del Rincón, Gto. Dichas obras fueron retocadas en el año de 1903, por el pintor mexicano Hermenegildo Bustos. El objetivo de esta etapa fue comprobar si es posible obtener imágenes de la distribución estratigráfica, encontrar imágenes ocultas y obtener resultados de la composición química en casos de estudio real.

Dicho proyecto actualmente se encuentra en la etapa final, por lo que los resultados serán reportados en la tesis intitulada “Aplicación de la técnica de terahertz para la obtención de imágenes estratigráficas, imágenes ocultas y análisis espectroscópicos de pintura de caballete. Evaluación de una técnica de análisis no invasiva”, la cual será defendida en la ECRO para la obtención del grado de Licenciado en Restauración de Bienes Muebles.

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

Bibliografía

- Abraham, E., Younus, A., Delagnes, J. C., y Mounaix, P. (2010). "Non-invasive investigation of art paintings by terahertz imaging". *Applied Physics A*, 100(3), 585-590.
- Adam, A. J., Planken, P., Meloni, S., y Dik, J. (2009). "TeraHertz imaging of hidden paint layers on canvas". *Optics Express*, 17(5), 3407-3416.
- Castro Camus, E. (2006). *Polarisation resolved terahertz time domain spectroscopy*. Department of Physics Condensed Matter Physics University of Oxford, Oxford, Reino Unido. Tesis de doctorado.
- Caumes, J. P., Younus, A., Salort, S., Chassagne, B., Recur, B., Ziégélé, A., Dautant, A., y Abraham, E. (2011). "Terahertz tomographic imaging of XVIIIth Dynasty Egyptian sealed pottery". *Applied Optics*, 50(20), 3604-3608.
- Corinna, L., Dandolo, K., y Jepsen, P. (2013). "THz reflectometric imaging of medieval wall paintings". *International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, doi: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665839.
- Dandolo, C. L. K., y Jepsen, P. U. (2013). "Characterization of European Lacquers by terahertz (THz) reflectometric imaging". *Digital Heritage International Congress. The Eurographics Association*, 89-94. (Dandolo y Jepsen, 2013)
- Doria, A., Gallerano, G. P., Giovenale, E., Messina, G., Spassovsky, I. P., More, A. C., y Petralia, A. (2012). "Phase-Sensitive Reflective Imaging in the Terahertz and mm-Wave Regions Applied to Art Conservation". *EAI Speciale. Knowledge, Diagnostics and Preservation of Cultural Heritage.2*. 155-161.
- Freeman, R., Beere, H., y Ritchie, D. (2013). "Generation and Detection of Terahertz Radiation". *Springer Series in Optical Science*, 17 -28.
- Fukunaga, K. (2009). "Innovative terahertz spectroscopy and imaging technique for art conservation science". *E-Conserv Mag*, 10, 30-42.
- Fukunaga, K., Cortes, E., Cosentino, A., Stuenkel, I., Leona, M., Duling III, I. N., y Mininberg, D. T. (2011). "Investigating the use of terahertz pulsed time domain reflection imaging for the study of fabric layers of an Egyptian mummy". *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 6.
- Fukunaga, K., Hosako, I., Duling, N., y Picollo, M (2009). "Terahertz imaging systems: a non-invasive technique for the analysis of paintings". *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology II*, 7391, 1-9. doi:10.1117/12.827452.
- Fukunaga, K., Ogawa, Y., Hayashi, S. I., y Hosako, I. (2008a) "Application of terahertz spectroscopy for character recognition in a medieval manuscript". *IEICE Electronics Express*, 5 (7), 223-228.
- Fukunaga, K., Ogawa, Y., Hayashi, y SHosako, I. (2007). "Terahertz spectroscopy for art conservation". *IEICE Electronics Express*, 4 (8), 258-263. doi: 10.1587/elex.4.258.
- Fukunaga, K., y Picollo, M. (2009). "Terahertz spectroscopy applied to the analysis of artists' materials". *Applied Physics A*, 100 (3), 591-597. doi:10.1007/s00339-010-5643-y.
- Fukunaga, K., Sekine, N., Hosako, I., Oda, N., Yoneyama, H., y Sudou, T. (2008). "Real-time terahertz imaging for art conservation science". *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 3. 1-4.

XI FORO ACADÉMICO

RESULTADOS DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL

- Gallerano, G., Doria, A., Giovenale, E., Messina, G., Petralia, A., Spassovsky, I., Fukunaga, K., Hosako, I., More, A., Seracini, M., y Bisceglia, B. (2011). "Thz Applications in Art Conservation at ENEA". *Italian National Agency for New Technologies Energy and Sustainable Economic Development*. 1-7.
- Hejase, J. (2012). *Terahertz Time Domain methods for material characterization of layered dielectric media*. Michigan State University, East Lansing, Michigan. . Tesis de doctorado.
- Jackson, J. B., Mourou, M., Whitaker, J. F., Duling III, I. N., Williamson, S. L., Menu, M., y Mourou, G. A. (2008). "Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings". *Optics Communications*, 281(4), 527-532.
- Koch, M., Hunsche, S., Schumacher, P., Nuss, M. C., Feldmann, J., y Fromm, J. (1998). "THz-imaging: a new method for density mapping of wood". *Wood Science and Technology*, 32(6), 421-427.
- Labaune, J., Jackson, J. B., Pages-Camagna, S., Duling, I. N., Menu, M., y Mourou, G. A. (2010). "Papyrus imaging with terahertz time domain spectroscopy". *Applied Physics A*, 100(3), 607-612.
- Manceau, M., Nevin, A., Fotakis, C., y Tzortzakis. (2008). "Terahertz time domain spectroscopy for the analysis of cultural heritage related materials". *Applied Physics B, Lasers and Optics*. 90 (3-4), 365-368. doi: 10.1007/s00340-008-2933-6.
- Mizuno, M., Fukunaga, K., Saito, S., y Hosako, I. (2009). "Analysis of calcium carbonate for differentiating between pigments using terahertz spectroscopy". *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 4.
- Molloy, J. F., Naftaly, M., Lanskii, G. V., Kokh, K. A., y Andreev, Y. M. (2013). "Terahertz time-domain characterization of various fabrics". *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2013 38th International Conference on. IEEE. 1-1.
- Mounaix, P., Younus, A., Delagnes, J. C., Abraham, E., Canioni, L., y Fabre, M. (2011). "Spectroscopy and terahertz imaging for sigillography applications". *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 6. doi: 10.2971/jeos.2011.11002.
- Peiponen, K., y Gornov, E. (2013). "Complex Refractive Index of Media in the THz Spectral Range". *Springer Series in Optical Science*, 57-79.
- Schwerdtfeger, M., Castro-Camus, E., Krügener, K., Viöl, W., y Koch, M. (2013). "Beating the wavelength limit: three-dimensional imaging of buried subwavelength fractures in sculpture and construction materials by terahertz time-domain reflection spectroscopy". *Applied Optics*, 52 (3), 375-380.
- Seco-Martorell, C., López-Domínguez, V., Arauz-Garofalo, G., Redo-Sanchez, A., Palacios, J., y Tejada, J. (2013). "Goya's art work imaging with Terahertz waves". *Optics Express*, 21(15), 17800-17805.
- Skryl, A. S., Jackson, J. B., Bakunov, M. I., Menu, M., y Mourou, G. A. (2014). "Terahertz time-domain imaging of hidden defects in wooden artworks: application to a Russian icon painting". *Applied Optics*, 53(6), 1033-1038.
- Wang, S., y Zhang, X. C. (2004). "Pulsed terahertz tomography". *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(4), R1.