

# Imágenes radiográficas de bienes culturales obtenidas con un sistema portátil de fluorescencia de rayos X modificado

Ariadna Mendoza Cuevas, Luis Ramón Velázquez Maldonado

Laboratorio de Arqueometría, Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana, Dirección de Patrimonio Cultural, Oficina del Historiador de la Ciudad (OHCH), Edificio Santo Domingo, calle Obispo e/ Mercaderes y San Ignacio, Habana Vieja, Cuba  
ariadna@mail.org

## Resumen

Se evalúa la suficiencia de la calidad de las imágenes radiográficas obtenidas con un espectrómetro portátil de Fluorescencia de rayos X modificado para este propósito, en el estudio de bienes culturales. El instrumento propuesto utiliza un tubo de rayos X con ánodo de Pd (2 mm) que alcanza un voltaje y corriente máximos de 50 kV y 1 mA respectivamente y un sistema de colimación que permite irradiar una región de forma cuadrada en el objeto analizado a través de la proyección de un haz de luz con igual forma sobre su superficie. La resolución espacial de las imágenes radiográficas obtenidas permitieron: localizar y definir bien figuras subyacentes en pinturas, identificar materiales de relleno en una pintura en proceso de restauración, la radiogrametría de huesos arqueológicos y la identificación de una esfera petrificada proveniente de un hallazgo arqueológico. Se propone el análisis radiográfico para estudios cubanos de antropología física.

*Palabras claves:* radiografía por rayos X, objetos culturales, equipo portátil, muestras arqueológicas

## RADIOGRAPHY IMAGING OF CULTURAL HERITAGE OBTAINED WITH A MODIFIED PORTABLE X-RAY FLUORESCENCE SYSTEM

### Abstract

The imaging quality of radiographies obtained with a modified portable X-ray fluorescence spectrometer was evaluated for the study of cultural heritage. The proposed instrument uses an X-ray tube with (2 mm) Pd anode allowing a 50 kV maximum voltage and 1 mA current. The instrument also equipped with a collimation system, allows to irradiate a square-shaped region in the analyzed object by projecting asquare light beam on its surface. The spatial resolution of the obtained radiographic image makes possible to locate and define perfectly well underlying paintings(pentimenti), to identify filling materials in a painting undergoing a restoration process, as well as radiogrametry of archaeological bone and the identification of a petrified sphere from an archaeological discovery. The radiographic analysis is proposed for the study of physical anthropology in Cuba.

*Key words:* X-ray radiography, cultural objects, portable equipment, archaeological specimens

## Introducción

La primera aplicación de la radiografía para el estudio de bienes culturales data de 1896, año en el que Walter Koning, alumno de Röntgen, estudió radiográficamente un grabado de Dürero para identificar la firma [1]. Con el transcurso de los años la radiografía ha seguido empleándose en los estudios del patrimonio cultural en combinación con otras técnicas. En el 2004 se estudió La Gioconda de Leonardo da Vinci a través de la radiografía en combinación con la reflectografía infrarroja, la fluorescencia de luz ultravioleta y el escáner de digitalización multiespectral de alta resolución [2]. Es una tendencia del siglo XXI el desarrollo de sis-

temas portátiles o móviles que combinan varias técnicas en un único instrumento [3] como fluorescencia de rayos X-espectrometría Raman, fluorescencia de rayos X-espectrometría UV-NIR [4] y fluorescencia de rayos X-difracción de rayos X [5,6], lo cual permite correlacionar diversos resultados en una misma región. Por ejemplo, la radiografía complementa los análisis espectrométricos de fluorescencia de rayos X al explicar la detección de elementos químicos provenientes de un dibujo subyacente e indicar toda su extensión en la pintura.

La calidad de la imagen radiográfica se determina fundamentalmente por las dimensiones del ánodo del tubo de rayos X, la energía de los rayos X y el medio de detección utilizado. Los tradicionales filmes radiográfi-

cos permiten obtener una óptima resolución espacial de la imagen radiográfica. Actualmente las cámaras de rayos X alcanzan similar resolución [7-9] y también se evalúan otros sistemas basados en arreglos de detectores sensibles a posición [10], lo cual posibilita la implementación de radiografía digital. La realización de radiografías in situ, directamente en los museos extiende las aplicaciones de esta técnica, ya que la mayor parte de las obras pictóricas por su valor, dimensiones o estado de conservación, no se deben trasladar.

El espectrómetro portátil de fluorescencia de rayos X del Laboratorio de Arqueometría es un prototipo desarrollado expresamente para estudiar bienes culturales [11,12], el cual se ha modificado para realizar análisis de difracción de rayos X y de radiografía [6,13]. El empleo de tubo de rayos X de un espectrómetro de fluorescencia de rayos X para obtener radiografía no se ha reportado con anterioridad. Este tubo es de baja potencia y por tanto, emite un haz policromático diferente de los tubos de rayos X que se encuentran en los sistemas de radiografía convencionales utilizados en bienes culturales. El objetivo de este trabajo es evaluar y demostrar que la calidad de las imágenes radiográficas obtenidas con un sistema de FRX de baja potencia es la necesaria para el estudio de pinturas y huesos arqueológicos (con ello se evita el traslado de las obras de arte a los hospitales), y proponer el análisis radiográfico de huesos arqueológicos como otra perspectiva para estudios de antropología física en Cuba.

## Métodos experimentales

El sistema instrumental utilizado consta (respecto a la técnica de radiografía) de un tubo de rayos X miniaturizado con ánodo de Pd (max. voltaje anódico: 50 kV max. corriente anódica 1 mA, 2 mm ánodo spot) y una unidad de alimentación y control para el tubo de rayos X. Para obtener radiografías se inserta un colimador con abertura cuadrada (1,5 x 1,5 cm) que da esta forma al haz con el propósito de irradiar una región de las dimensiones de una cabeza humana (para caracterización de retratos) y posteriormente obtener la radiografía total de la pintura mediante la suma de las radiografías locales. Un emisor de luz intensa (neón) se acopla al sistema en posición perpendicular a la salida de los rayos X y la luz emitida se refleja en un espejo de alto índice de reflexión ubicado en una pieza (figura 1, Rayos X / Espejo) que alterna en su funcionamiento dos posiciones, la de hueco que permite el paso a los rayos X, y la de espejo. El haz de luz reflejado pasa a través del colimador emitiendo una luz con la misma forma del haz de rayos X que se utiliza para seleccionar la región a irradiar sobre la superficie de la pintura con el tubo de rayos X apagado, evitando el uso de pantalla fluorescente con este propósito y la exposición a radiaciones del operador. Las condiciones de irradiación empleadas para cada pieza estudiada se muestran en la tabla. Las radio-

grafías se registraron usando un filme de rayos X (tipo de mamografías) y convertidas a imagen digital, utilizando un escáner de diapositiva. También si estuviera disponible una cámara de rayos X se puede utilizar ventajosamente en lugar del filme para obtener una radiografía digital en tiempo real.

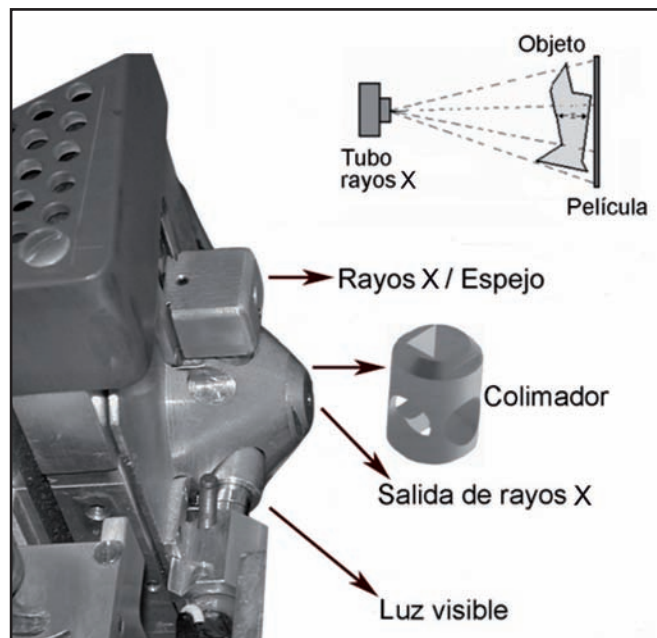


Figura 1. Sistema utilizado para obtener imágenes radiográficas en el Laboratorio de Arqueometría de la Oficina del Historiador de La Habana.

### Condiciones de irradiación

Estudio	I (mA)	U (kV)	t (s)	d (cm)	Chasis
Pintura rinoceronte	0,5	50	30	100	No
Pintura rinoceronte	0,5	50	60	100	No
Pintura rinoceronte	0,5	50	120	100	No
Pintura rinoceronte	0,8	50	120	100	No
Hueso	0,8	50	60/120	40	No
San Gerónimo	0,8	40	240	100	No
Ponce	0,8	40	120	100	No
Recaudadores de impuestos	0,5	30	40	100	No
Esfera petrificada	0,8	50	120	40	No

La radiogrametría es un método que permite determinar la cantidad de huesos a través de la medición del espesor del hueso cortical en la imagen radiográfica [14]. Para ello se realiza una radiografía posteroanterior de determinados huesos (segundo metacarpo, húmero y fémur), caracterizados anteriormente [15-18] y se mide en el punto medio del hueso con instrumentos de precisión, el diámetro exterior (D) y el ancho del espacio medular (d), calculándose el espe-

sor del espesor cortical y el área cortical ( $\Pi/4 (D2-D2)$ ) que determinan el índice cortical, el cual representa el porcentaje de ancho de hueso ocupado por la corteza y se define por:

$$\text{Índice cortical} = [(D-d)/D] \times 100$$

## Resultados y Discusión

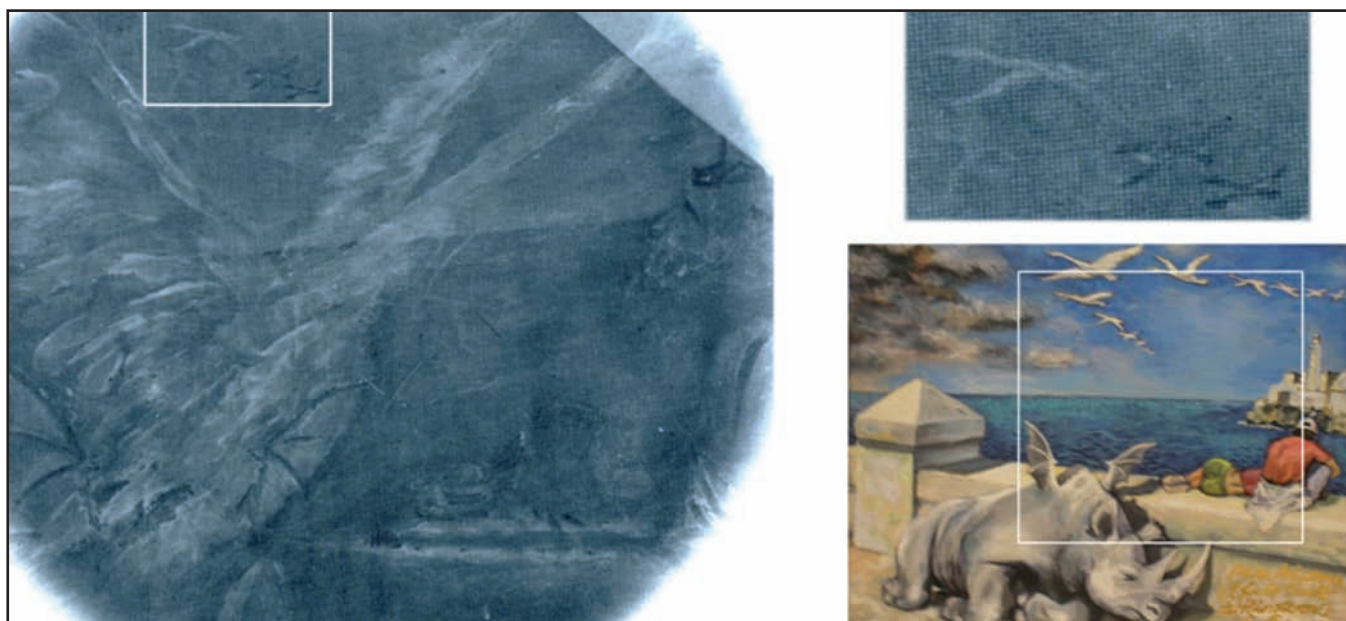
### Pintura

La posibilidad de revelar imágenes en pinturas ocultas a la luz visible de un modo no destructivo se utiliza frecuentemente en los estudios de atribución y restauración de pinturas. En este caso, la resolución espacial de las imágenes radiográficas obtenidas de pinturas es crucial para determinar la eficacia de un sistema radiográfico, ya que las figuras aparecidas deben estar bien definidas para permitir una interpretación histórico-artística o para decidir un criterio de restauración. La radiografía permitirá elucidar la existencia de otra pintura subyacente, mostrar su apariencia y delimitar su región, permitiendo la interpretación de los análisis de FRX en los casos en que se detecten elementos químicos sistemáticamente no asociados al color del punto analizado ni a los materiales de las capas preparatorias de la pintura. Para evaluar la calidad de las radiografías obtenidas se solicitó la colaboración del artista Oscar Ascencio (Prof. de pintura de San Alejandro), quien realizó una pintura de pequeño formato (28 x 17 cm), dibujando una figura subyacente, la cual debíamos reconocer en la imagen radiográfica. Esta pintura jugó el rol de nuestro fantón, ya que era conocida la estructura (inicialmente por el artista) y composición por FRX. En la figura 2 se presenta la radiografía de esta pintura obtenida con el analizador de rayos X propuesto, donde se observa un gran cisne, la figura oculta por el artista

(lo que se conoce según el término italiano como un *pentimento*: un arrepentimiento) y la pintura visible a la luz natural, donde se reconocen sus detalles, por ejemplo las alas de murciélago del rinoceronte y los cisnes pequeños en el cielo. Se define incluso la fina trama del lienzo usado (25 x 22 hilos/cm<sup>2</sup>, grosor del hilo: 0,3 mm) lo que demuestra la adecuada resolución espacial para el estudio de pinturas si se compara con la trama observada en las radiografías de pinturas del Caravaggio con el propósito exigente de definir las pinceladas [19]. La posibilidad de observar la trama permite realizar estudios de técnicas en tapices y el conteo de los hilos de la urdimbre, lo que se utiliza frecuentemente en las caracterizaciones de pinturas en lienzo para estudios de autenticación.

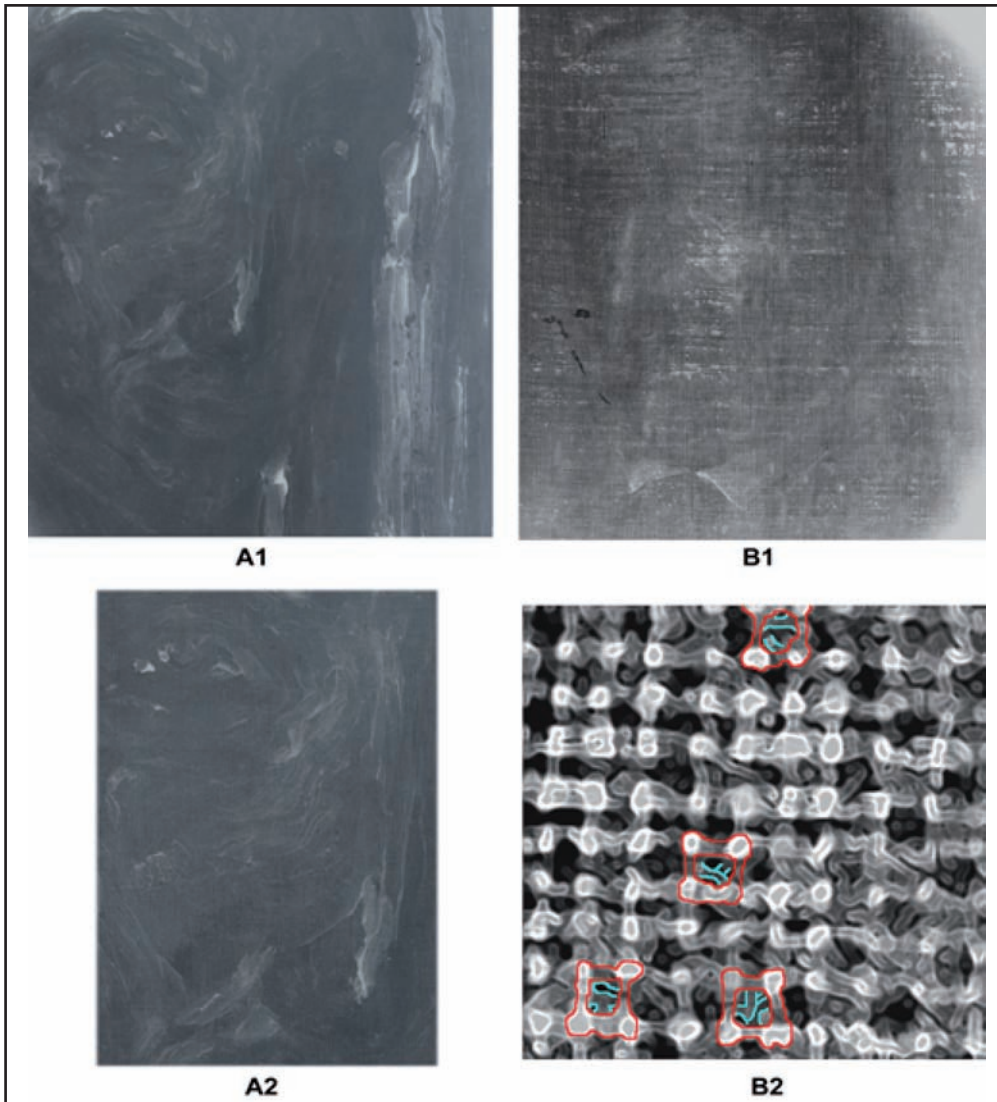
La figura 3A-1 expone una radiografía obtenida a partir del estudio de un cuadro de posible atribución al pintor cubano Fidelio Ponce de León. El estudio radiográfico de esta obra aporta imágenes claras de los trazos del autor que pueden servir para caracterizar el estilo del pintor a través de determinadas estructuras del dibujo del rostro y utilizar en exámenes de autenticación.

En el caso del cuadro representado en la figura 3B-1, Retrato de Gerónimo Valdés, perteneciente al Colegio Universitario San Gerónimo de La Habana, se investigaron por radiografía de rayos X tres regiones, el rostro y las esquinas inferiores en busca de una posible firma subyacente la cual no se encontró. En la radiografía del rostro se observa el trazado que caracteriza la pincelada del pintor, el deterioro del lienzo original, donde se evidencian faltantes y la doble trama por la presencia del re-entelado. La toma de radiografía al retirar el re-entelado podrá aportar otras evidencias de *pentimenti* o firmas subyacentes, ya que al efecto de un doble tejido se suma una espesa capa de preparación a base de blanco de plomo que absorbe las radiaciones (como un blindaje) de las capas pictóricas, efecto que se trató de reducir mediante la toma de radio-

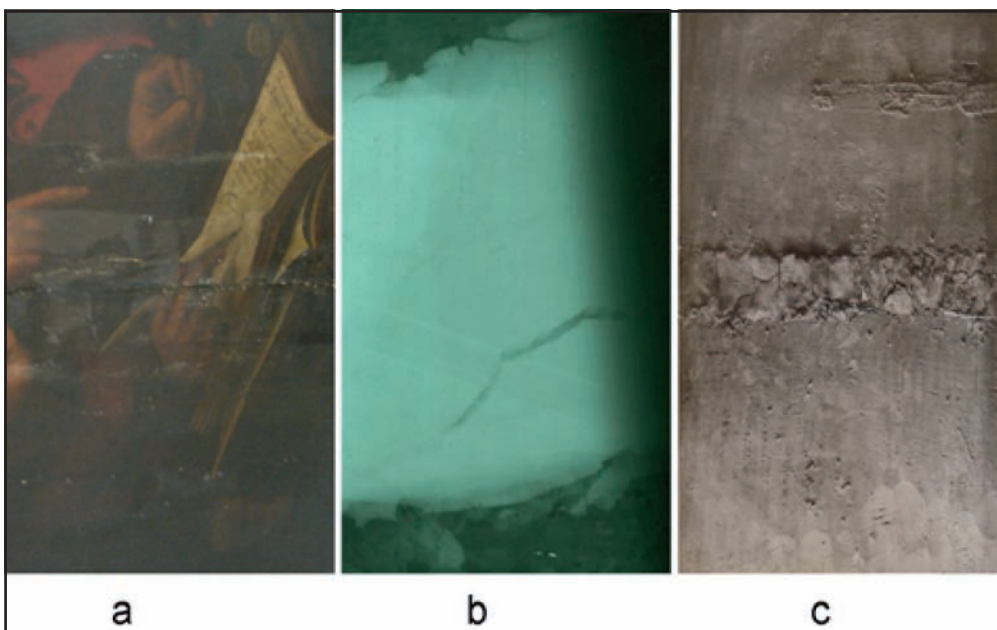


**Figura 2.** Radiografía con alta resolución obtenida con el analizador de rayos X propuesto de la pintura "El sueño oculto del rinoceronte".





**Figura 3.** Imágenes radiográficas obtenidas para el estudio de pinturas de caballete. A1: obra atribuida a Fidelio Ponce de León, A2: detalle de la obra, destaca los trazos de la nariz y el ojo, B1: Retrato de Gerónimo Valdés, B2: detalle de la obra, destaca la trama del lienzo en el doble entelado.



**Figura 4.** Fotografía de la capa pictórica (a) y el soporte (c) de la pintura flamenca “Los recaudadores de impuestos”(b), imagen radiográfica.

grafías por la parte posterior de la pintura.

Esta técnica también se puede aplicar a una pintura de caballete con el fin de valorar el estado de conservación de los estucos añadidos en restauraciones anteriores.

Tal es el caso de la imagen radiográfica que se muestra en la figura 4b, realizada para la pintura flamenca “Los recaudadores de impuestos” (figura 4a y 4c) del Museo Nacional de Bellas Artes. En la radiografía se aprecia que la placa de estuco añadido al soporte tiene una grieta extensa, así como varios desprendimientos periféricos, evidenciándose su deterioro.

### Huesos arqueológicos

Las técnicas de rayos X pueden ser particularmente útiles en la determinación de la densidad ósea para obtener un cuadro completo de la pérdida ósea en las poblaciones pasadas o determinar la densidad de diferentes elementos esqueléticos de animales y su probabilidad de subsistencia. Estudios recientes han demostrado que los cambios estructurales y de composición en huesos arqueológicos pueden afectar las interpretaciones acerca de la edad, estado de salud o dietas realizadas a partir del examen de la superficie externa del hueso [20-22].

Se puede obtener mediante la implementación descrita en este trabajo una radiografía de hueso arqueológico, por ejemplo del segundo metacarpo,

el cual se ha utilizado como referencia en estudios arqueológicos y antropológicos para evaluar la pérdida mineral ósea. La figura 5 presenta una radiografía de un segundo metacarpo obtenida con el tubo de rayos X del sistema portátil de FRX. Se seleccionó este hueso, entre los usados como patrón de referencia, debido a sus reducidas dimensiones, lo que permite valorar al máximo la resolución espacial de la imagen radiográfica a través de la visualización de su estructura y morfología interior. Se observó la estructura en fibrillas de este hueso y se pudo determinar el diámetro exterior e interior para el cálculo del índice cortical. La imagen presenta similar calidad y resolución espacial comparada con estudio reportado. Una de las ventajas de radiografiar huesos arqueológicos es que las dosis de radiaciones son pequeñas, lo que significa que la selección de la película puede ser amplia y se pueden usar las películas lentas con buena resolución para optimizar la calidad de la imagen.

### Esfera petrificada del Convento de San Francisco de Asís

La alta definición de las imágenes radiográficas obtenidas permite también su aplicación para resolver interrogantes de antropología desde el análisis de la morfología interior de los hallazgos arqueológicos. La figura 6 expone las imágenes radiográficas de una esfera petrificada encontrada en un enterramiento europeo del Convento de San Francisco de Asís. Por su apariencia y características físicas esta esfera se describió como posible moñinga, cuerpo de naturaleza orgánica, cuyo interior está lleno de pelos, que se forma en el estómago de las vacas y que se utiliza en cultos africanos, por lo que podría tener implicaciones antropológicas. Para el estudio se analizó también la morfología de una moñinga mediante la imagen radiográfica. Como se observa, en la radiografía de la esfera petrificada existe en la imagen un patrón de estructuras anilladas (figura 6b y 6c), característico de los organismos de naturaleza vegetal. De esta manera el elemento de estudio se caracteriza como posible fruto petrificado.

### Conclusiones

La definición y resolución espacial de las imágenes radiográficas presentadas demuestra que es posible utilizar el haz policromático de un tubo de

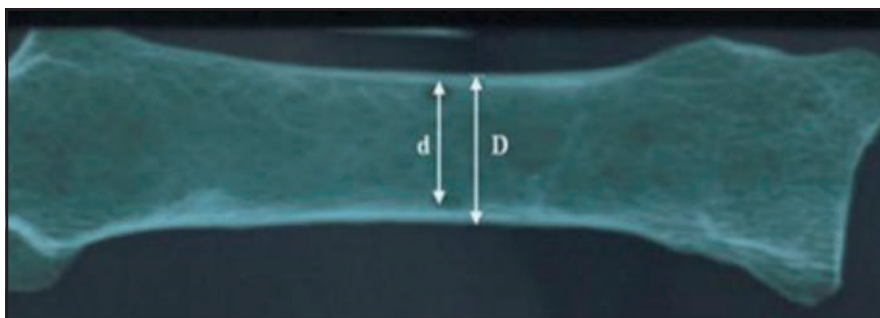


Figura 5. Radiogrametría de un hueso arqueológico (segundo metacarpo) en radiografía obtenida con el analizador propuesto.

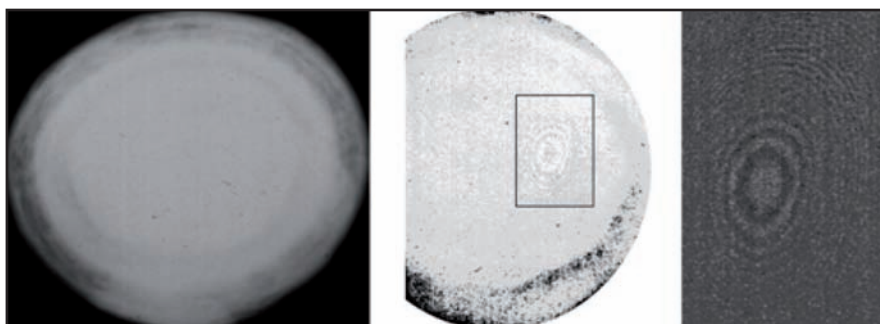


Figura 6. Radiografía de una esfera petrificada; a: imagen radiográfica de la esfera, b: imagen radiográfica trabajada en software de procesamiento de imágenes, c: detalle en el que se aprecian claramente las estructuras anilladas.

rayos X de baja potencia de un sistema portátil de fluorescencia de rayos X para exámenes de pinturas de interés para la historia del arte, la museología y la restauración. Así como estudiar huesos arqueológicos, según la técnica de radiogrametría, lo que se propone para estudios de antropología física en Cuba en la determinación de la pérdida mineral ósea o el análisis morfológico de hallazgos arqueológicos. Estos resultados se lograron, utilizando el tubo de rayos X de baja potencia de un sistema portátil de FRX, lo que permite realizar las radiografías in situ. El trabajo representa una contribución al desarrollo actual de sistemas portátiles multitécnicos compactos para el análisis in situ: directamente en el lugar donde los bienes culturales se conservaron y un ahorro económico, por lo que representaría la adquisición de dos equipamientos independientes para realizar ambas técnicas.

### Referencias bibliográficas

- [1] Testing pictures by the Roentgen rays. *Electrical review*. 1897; 40: 607.
- [2] MOHEN JP, MENU M, MOTTIN B. Au coeur de La Joconde: Léonard de Vinci decode. París: Gallimard, 2006. p.121.
- [3] CASTELLUCI E. MicroRaman e XRF: Progetto Europeo PRAXI Lo strumento. In: L'Archaeometria in Italia: La Scienza per i beni culturali. III Congresso Nazionale. 2004. p. 176.
- [4] MILAZZO M. XRF e spettrometria UV-Near IR. In: L'Archaeometria in Italia: La Scienza per i beni culturali. III Congresso Nazionale. 2004. p. 43.
- [5] GIANONCELLI A, CASTAING J, ORTEGA L, et. al. A portable instrument for in situ determination of the chemical and phase compositions of cultural heritage objects. *X-Ray Spectrom*. 2008; 37(4): 418-423.

- [6] MENDOZA CUEVAS A, PEREZ GRAVIÉ H. Portable Energy Dispersive X-ray fluorescence and X-ray diffraction and radiography system for archaeometry. *Nucl Inst. and Methods in Phys Res A*. 2011; 633(1): 72-78.
- [7] DIPAOLA G, URBANO M. De la radiología tradicional a la radiología digital: evolución de la especie TSPM. ASL, BA2, Barletta, Italy. [artículo en línea]. <<http://www.akisrx.com/spagnolo/htr/raddig.htm>> [consultado: 27 mayo 2010].
- [8] SMOYER EPM, TAPLIN LA, BERNIS RS. Experimental evaluation of museum case study digital camera systems. Rochester : Institute of Technology. [artículo en línea] <[http://www.art-si.org/PDFs/Metric/Archi-ve05\\_Smoyer.pdf](http://www.art-si.org/PDFs/Metric/Archi-ve05_Smoyer.pdf)> [consultado: 26 mayo 2010].
- [9] MULLIKIN JC, van VLIET LJ, NETTEN H, et. al. Methods for CCD Camera Characterization. In: *Image Acquisition and Scientific Imaging Systems*. SPIE Proceedings vol. 2173. 1994. p. 73-84.
- [10] SPIELER H. *Introduction to Radiation Detectors and Electronics*. VI. Position-Sensitive Detectors. 1998.
- [11] MENDOZA A. Proyecto Regional. Oficina Historiador Ciudad Habana, 1999-00.
- [12] Development of portable XRF spectrometer for in-situ study of works of arts. XRF Newsletter. Seibersdorf: IAEA's laboratory, 2001.
- [13] MENDOZA CUEVAS A. Modificaciones del Art-FRX para realizar radiografía de pinturas. *Práctica: radiografía industrial*. Informe de notificación emitido al CNSN. La Habana, 2006.
- [14] GARCÍA CRIADO E, GALÁN SÁNCHEZ B, CARPINTERO BENÍTEZ P. Osteoporosis en atención primaria (II). Revisión. *Semergen*. 1998; 24(2): 123-129. [artículo en línea] <http://www.semergen.es/semergen/cda/documentos/revistas/pdf/numero2-98/123-129.pdf>. [consultado: 2 junio 2010].
- [15] MAYS SA. Age-dependent cortical bone loss in medieval population. *Int J Osteoarch*. 1996; 6(2): 144-154.
- [16] MAYS S. *The Archaeology of Human Bones*. London: Routledge, 1998.
- [17] ERICKSEN MF. Cortical bone loss with age in three native American populations. *Am J Phys Anthropol*. 1976; 45(3): 443-452.
- [18] BURTON H, PRICE TD. The ratio of barium to strontium as a paleodietary indicator of consumption of marine resources. *J Archaeol Sci*. 1990; 17(5): 547-557.
- [19] CARDINALE M, De RUGGIERI MB, FALCUCCI C. *Diagnostica artistica. Tracce materiali per la storia dell'arte e per la conservazione*. Roma: Palombi Editori, 2002.
- [20] BELL LS. Palaeopathology and diagenesis: an SEM evaluation of structural changes using backscattered electron imaging. *J Archaeol Sci*. 1990; 17(1): 85-102.
- [21] LAMBERT JB, SIMPSON SB, SZPUNAR CB, BUIKSTRA JE. Bone diagenesis and dietary analysis. *J Human Evolut*. 1985; 14(5): 477-482.
- [22] THOMPSON DD. Age changes in bone mineralization, cortical thickness and Haversian canal area. *Calc. Tissue Int*. 1980; 31(1): 5 -11.

Recibido: 12 de junio de 2011

Aceptado: 27 de octubre de 2011