

---

# Proyección de Franjas con Corrimiento de Fase: Aplicación a las Ciencias Forenses

Oscar J. Rincón<sup>a</sup>, John J. Nicholls<sup>b</sup> y Patricia Gaviria<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Grupo de Óptica Aplicada, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá; <sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Autónoma de Colombia;

<sup>c</sup> Especialista en Ciencias Forenses y Documentología de la Universidad de Antioquia, Departamento de Grafología Documentología del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses

---

## RESUMEN

Uno de los problemas comunes en varias ramas de la investigación forense es la necesidad de realizar mediciones y comparaciones que involucran superficies microscópicas. Por lo general la tecnología disponible para este tipo de medidas está limitada por el elevado costo de los equipos comerciales y también por sus estrechos rangos de aplicación. En este trabajo se propone utilizar técnicas de proyección de franjas con corrimiento de fase para reconstruir la topografía de pequeñas superficies; se muestra además cómo se aborda la determinación del portador y el problema del desenvolvimiento de fase. La utilidad de esta técnica se ilustra con varios ejemplos particulares propios de la actividad forense de nuestro país.

**Palabras Clave:** Corrimiento fase, proyección franjas, interferómetro Mach-Zehnder.

## ABSTRACT

One common problem for several branches of the forensic investigation group is the need to make measurements and comparisons involving microscopic surfaces. The technology available for such measurements is limited by the high price of commercial equipment and also for their narrow ranges of application. In this paper we propose to use projection techniques with phase shifting to find the topography of small surfaces; moreover, we show our treatment to determine the carrier and the problem of phase unwrapping. This technique is illustrated with several examples of particular forensic case work in our country.

**Keywords:** Phase shifting, Fringe projection, Mach-Zehnder interferometer.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

Dada la importancia legal de la investigación científica forense <sup>1</sup> se utilizan cada vez más una variedad de procedimientos de precisión que involucran componentes ópticas: láseres, sistemas microscópicos y de análisis espectral<sup>2</sup>. Adicionalmente en los últimos años han cobrado gran importancia para la investigación forense el registro digital de imágenes así como las técnicas de procesamiento de las mismas<sup>3</sup>.

En este artículo se ilustran las posibles aplicaciones forenses de una técnica perfilométrica conocida como proyección de franjas. En dicha técnica se reconstruye la información de topografía de un objeto a partir de la deformación de un sistema periódico de franjas que son proyectadas sobre él.

A continuación, en la primera parte del artículo se examina el principio físico para el funcionamiento del método de corrimiento de fase y los pasos necesarios para generar la *imagen de fase* del objeto. Todos los pasos se ilustran con un ejemplo de aplicación en odontología forense. En la siguiente parte se muestran las condiciones experimentales utilizadas para el registro y por último se hace una exploración sobre la posible aplicación de la técnica de proyección de franjas en otras áreas distintas de las ciencias forenses.

## 2. PROCESO PARA OBTENER LA INFORMACIÓN DE FASE

La técnica perfilométrica utilizada consiste en proyectar un patrón de franjas periódicas sobre la superficie del objeto. Luego, a partir de la imagen del objeto, se interpretan las deformaciones del sistema de franjas como variaciones topográficas de la superficie.

El montaje experimental que se utilizó para implementar esta técnica se muestra en la figura 1. Las franjas se están generando a partir de la interferencia entre los haces de los dos brazos de un interferómetro de Mach-Zehnder. La imagen del objeto con las franjas proyectadas sobre su superficie se registra por medio de una CCD convencional y un sistema formador de imagen. Es este caso la óptica del montaje corresponde al sistema de lentes de un estereo-microscopio (ver figura 1c). Las imágenes que se registran del objeto tienen la apariencia que se muestra en la figura 2b, en donde se utiliza como objeto un modelo dental elaborado en yeso y la *región de interés* corresponde a la zona de la ruga palatina<sup>4</sup>.



**Figura 1.** a) Esquema del montaje experimental para el registro de las imágenes de proyección de franjas. Aquí *FE* es un filtro espacial, *LC* una lente colimadora y *DH* es un divisor de haz. b) Detalle del montaje físico del interferómetro. c) El sistema de magnificación utilizado corresponde a la óptica de un estereo-microscopio en cuya base se proyectan las franjas. En el ocular se adapta el CCD.

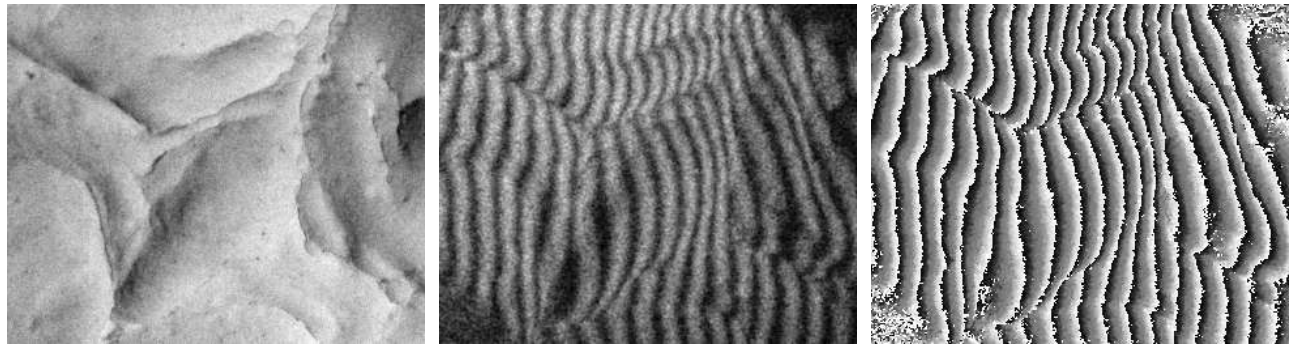
### 2.1. Generación de la imagen de fase

Un registro digital de la imagen del objeto sobre el que se han proyectado franjas, se puede describir matemáticamente por medio de la expresión:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos(\phi(x, y) + \delta) \quad (1)$$

donde el primer término  $A(x, y)$  representa una intensidad de fondo en la imagen, el segundo término  $B(x, y)$  se puede entender como un factor que determina la visibilidad de las franjas observadas,  $\phi(x, y)$  es la fase del campo óptico que queremos reconstruir y  $\delta$  es el valor que da cuenta de posibles desplazamientos en la fase de las franjas que iluminan la muestra.

La topografía de un objeto resulta ser directamente proporcional al término de fase  $\phi(x, y)$  que aparece en la ecuación (1). Para poder hallar este término existen actualmente varios métodos de transformada de Fourier<sup>5,6</sup>. Otro de los métodos consiste en generar un sistema de ecuaciones que permita hallar las tres variables desconocidas:  $A(x, y)$ ,  $B(x, y)$  y  $\phi(x, y)$ .



a

b

c

**Figura 2.** a) Fotografía de una región de la ruga palatina. Esta fotografía fue tomada utilizando luz blanca. b) Franjas proyectadas sobre la zona de la fotografía mostrada en a. c) Información de fase reconstruida a partir de la aplicación del *algoritmo de los cuatro pasos*.

Una de las técnicas más simples para despejar  $\phi(x, y)$  utiliza 4 registros con desplazamientos en  $\delta$  que tienen los valores:  $\delta_i = 0, \pi/2, \pi, \text{ y } 3\pi/2$ , es decir que se tienen las ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 I_1(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\phi(x, y)) \\
 I_2(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\phi(x, y) + \pi/2) \\
 I_3(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\phi(x, y) + \pi) \\
 I_4(x, y) &= A(x, y) + B(x, y) \cos(\phi(x, y) + 3\pi/2)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Es posible verificar que la información de fase se obtiene al encontrar el argumento de la expresión compleja

$$U(x, y) = I_1(x, y) - I_3(x, y) - i(I_4(x, y) - I_2(x, y))
 \tag{3}$$

Experimentalmente uno de los caminos para controlar el desplazamiento de la fase  $\delta$ , requiere controlar con mucha precisión el movimiento axial de uno de los espejos del interferómetro. Lograr estos desplazamientos axiales con fases del orden del periodo de las franjas, es una tarea para la que conviene usar actuadores piezoeléctricos<sup>7</sup>.

La *imagen de fase* que se obtiene luego de hallar el argumento de la expresión (3) contiene términos de fase adicionales denominados *frecuencias portadoras*. Para el caso que compete a la proyección de franjas rectas, se espera que estos términos portadores tengan un comportamiento lineal<sup>8</sup>.

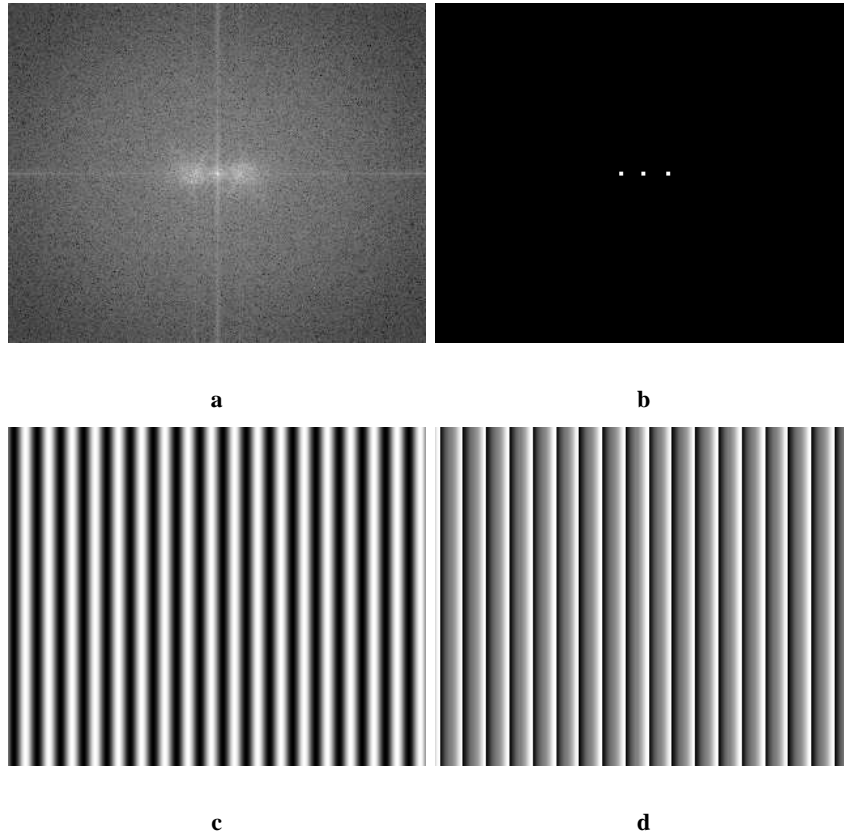
## 2.2. Procedimiento automático para la detección de la frecuencia portadora

Para abordar el problema de la *frecuencia portadora* (ver imagen 2c), se ha establecido un procedimiento de filtrado en el espacio de frecuencias de la imagen. La idea de este procedimiento consiste en ubicar las posiciones de los picos de frecuencia principales y a partir de ellas construir una imagen para la *frecuencia portadora* lineal.

En la figura 3 se ilustra el proceso de filtrado de la imagen. Este proceso se puede resumir así:

1. Se halla la transformada de Fourier de la imagen de proyección de franjas (figura 2b) y se grafica su intensidad (figura 3a).
2. Se ubican la posiciones de los picos correspondientes al orden cero y a los dos órdenes principales (figura 3a).
3. Se genera una máscara que admita únicamente las frecuencias que corresponden a estos picos (figura 3b).
4. Se halla la transformada inversa de Fourier, obteniendo una imagen sinusoidal cuyas franjas tienen la frecuencia promedio de las franjas de la imagen del objeto (figura 3c).

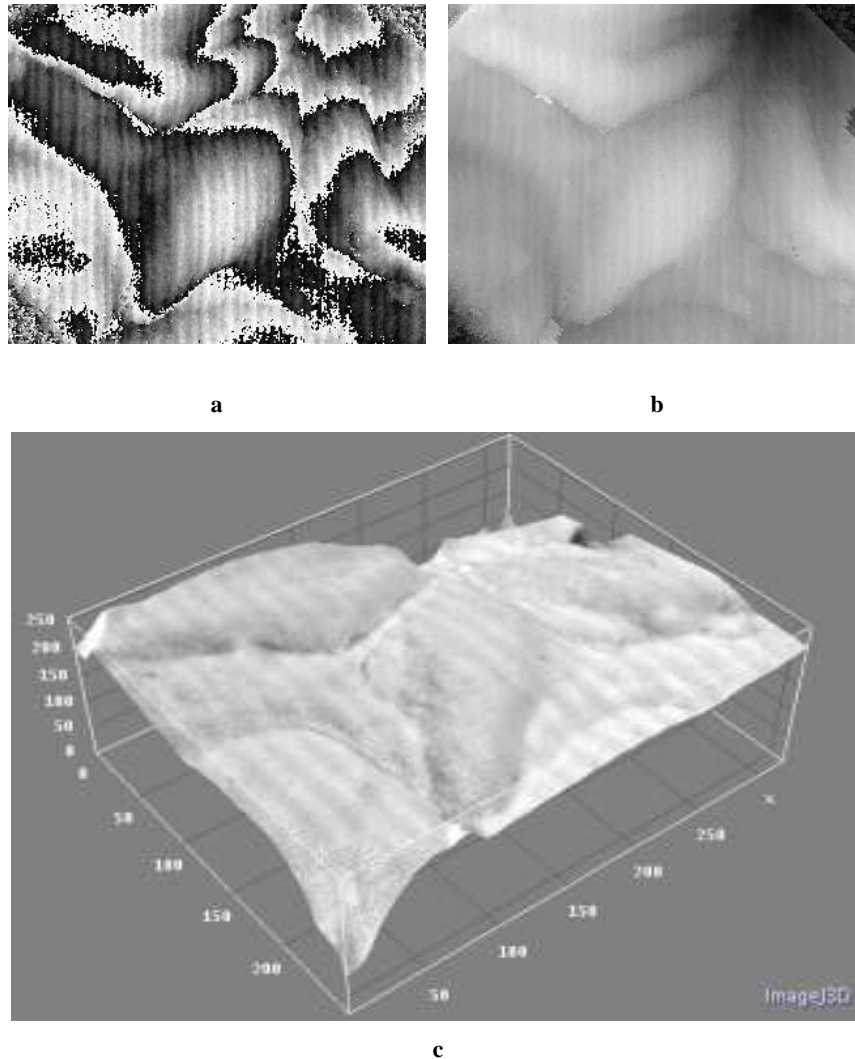
5. Se repite el proceso por cada una de las cuatro imágenes de proyección de franjas que se han desplazado en fase.
6. Se aplica el método de los cuatro pasos para reconstruir la *imagen de fase de la frecuencia portadora* (figura 3d).



**Figura 3.** Imágenes que ilustran el proceso de obtención de la imagen de fase de la frecuencia portadora. a) Espectro de frecuencias para la imagen con proyección de franjas de la figura 2b. b) Posiciones de los picos de frecuencia. c) Transformada inversa de la imagen anterior. d) Al realizar el mismo procedimiento para las cuatro imágenes, se reconstruye la *imagen de fase de la frecuencia portadora*.

Al identificar esta frecuencia portadora, es posible restarla a la información de la fase del objeto de la figura 2c que tiene términos portadores. El resultado es una imagen de fase que puede o no tener ciertas discontinuidades (figura 4a). Estas discontinuidades tienen origen en el hecho de que la máxima longitud axial que puede ser registrada con la proyección de franjas es más pequeña que la máxima altura del objeto. Esta altura máxima conocida como *sensitividad*<sup>9</sup> depende de las direcciones de iluminación y observación de la superficie.

Para obtener una fase continua, es necesario hacer un procedimiento adicional de desenvolvimiento de fase<sup>10</sup>, con el cual se obtiene una imagen de fase que resulta ser proporcional a la topografía del objeto (ver figura 4b).

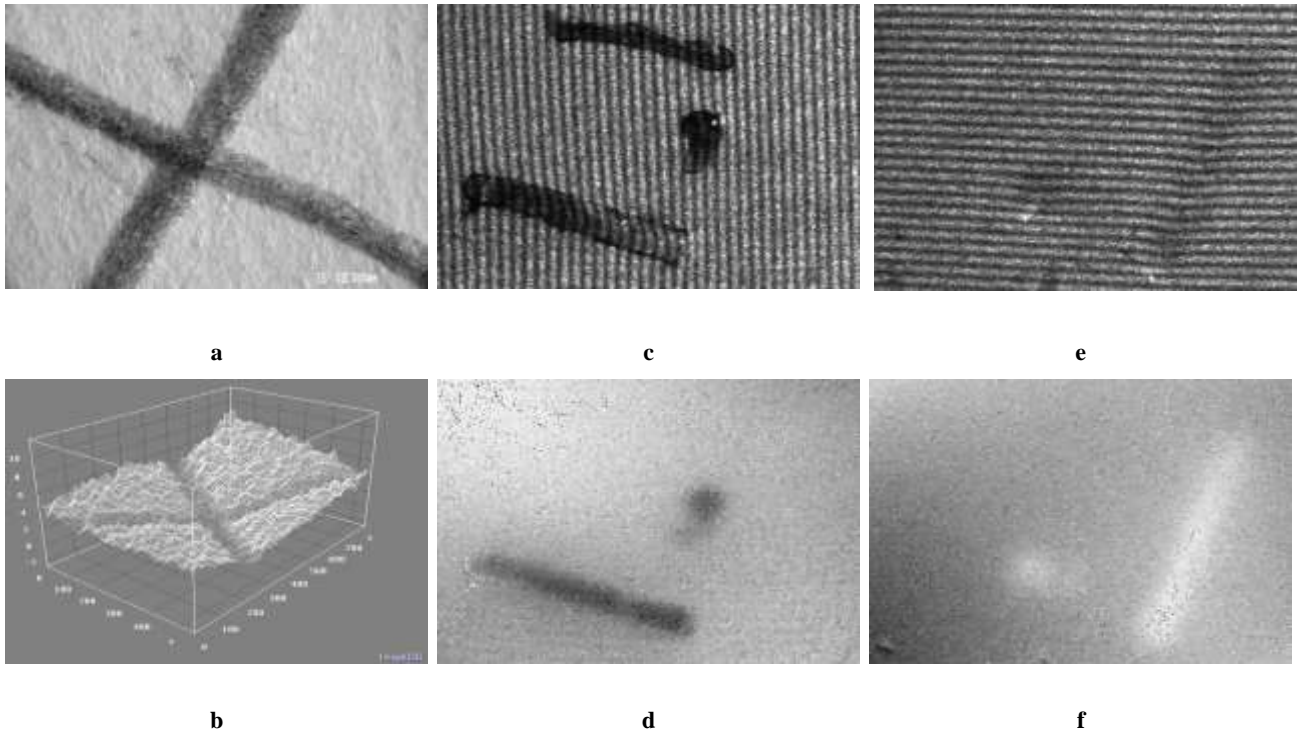


**Figura 4.** a) Imagen de diferencia de fase. Nótese la eliminación de la frecuencia portadora y la aparición de otras discontinuidades. b) Imagen de fase. Para obtener esta imagen se aplicó un proceso de desenvolvimiento. c) Representación tridimensional de la ruga palatina. La escala axial da cuenta de los tonos de gris. Las escalas del plano están en píxeles.

### 3. EXPLORACIÓN DE LA TÉCNICA EN OTROS CAMPOS FORENSES

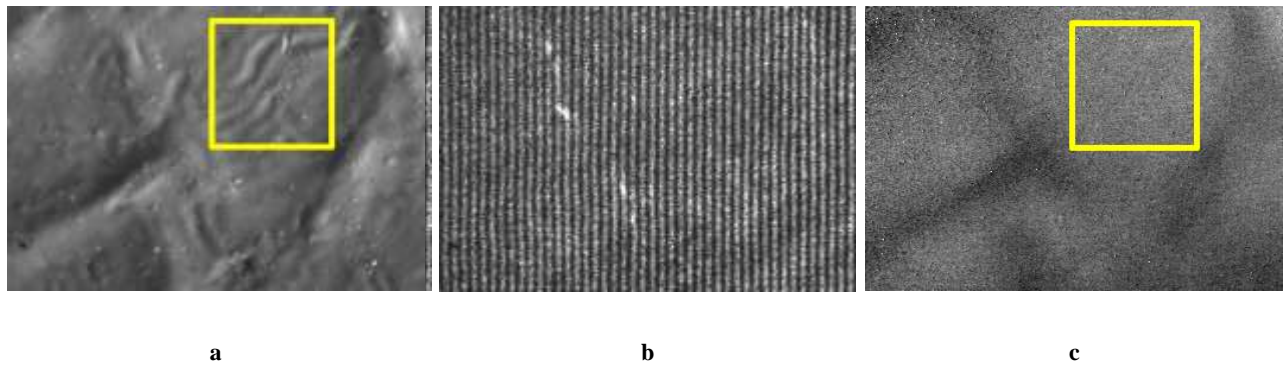
No es la primera vez que se utiliza la técnica de proyección de franjas en los laboratorios forenses del país. Hace unos años, mediante el uso de la técnica de proyección de franjas se había explorado, entre otras, la posibilidad de establecer cuál era el orden de escritura de dos trazos que se entrecruzan <sup>11</sup> (ver figuras 5a y 5b).

A pesar de las limitaciones del instrumento para determinar la secuencia de trazos, este ha mostrado su efectividad en otras situaciones diferentes. En la figura 5c se expone el caso de dos trazos que se realizaron sobre el mismo tipo de papel. Aquí es posible hablar de una diferencia de profundidad entre ambos trazos, que se pone en evidencia a partir de los contrastes de la *imagen de fase* (figura 5d). El trazo superior no presenta ninguna diferencia de contraste mientras que el trazo inferior tiene un gradiente de contrastes asociado a la presión ejercida sobre el bolígrafo. Otro caso lo constituye el anverso del papel sobre el que se realizó un trazo. En la figura 5f se muestra el mapa de fase para el anverso del trazo del caso anterior.

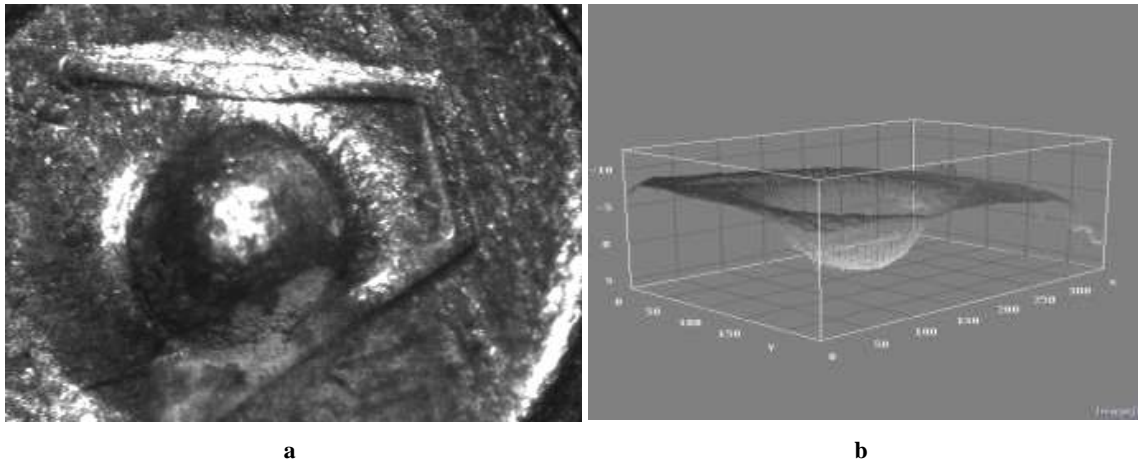


**Figura 5.** Algunas aplicaciones del método de proyección de franjas en el campo de la documentología. a). Fotografía correspondiente al cruce de dos trazos b). *Imagen de fase* de los trazos. c) Imagen con proyección de franjas de trazos realizados sobre el mismo papel para los cuales se evidencian diferencias de presión, se observa aquí el contraste de las tintas sobre el papel. d) Imagen de fase de los trazos anteriores. e) Imagen de intensidad del anverso del papel sobre el que se realizaron varios trazos, nótese que no hay tintas sobre el papel. f) imagen de topografía correspondiente a la imagen e.

El método de proyección de franjas también puede aplicarse para caracterizar superficies. En particular, las imágenes de la figura 6 muestran la superficie de una muestra de pintura aplicada sobre madera. La imagen 6b ilustra una de las desventajas de este método perfilométrico: las frecuencias del objeto que sean del orden de las frecuencias del patrón de franjas no presentan contrastes de fase apreciables en la *imagen de fase*. Para esto basta observar la presencia de líneas superficiales en la fotografía del objeto que prácticamente desaparecen en la imagen de fase.



**Figura 6.** Aplicaciones del método de proyección de franjas para la caracterización de superficies. a) fotografía de la superficie con luz rasante. b) Franjas proyectadas sobre la muestra. c) Imagen de fase generada.



**Figura 7.** Posible aplicación de la técnica para comparaciones del origen de dos proyectiles distintos. a) Muestra patrón del cartucho de un proyectil que ha sido disparado. b) y c) Imagen de fase correspondiente.

Otra de las potenciales aplicaciones de la técnica de proyección de franjas en el campo forense lo constituye el cotejo de casquillos percutidos. Uno de los métodos de identificación balística lo constituye el estudio que se hace de las marca características que la aguja percutora imprime sobre el culote de los casquillos en el momento del disparo. Esta comparación se realiza generalmente con ayuda de imágenes del culote (figura 7a). La técnica de proyección de franjas puede permitir encontrar nuevos elementos de comparación, pues gracias a las imágenes de fase es posible establecer un protocolo para la comparación axial de los agujeros entre casquillos diferentes.

## CONCLUSIONES

En este artículo se han ilustrado posibles aplicaciones de técnicas perfilométricas ópticas en el campo de las ciencias forenses. A partir de la aplicación de un interferómetro de Mach-Zehnder como instrumento proyector de franjas se obtienen imágenes a partir de las cuales es posible reconstruir imágenes de fase y de topografía de las muestras bajo estudio. En este caso particular se adaptó un estereo-microscopio como instrumento de observación el cual permite un amplio rango de aplicaciones.

La técnica de proyección de franjas se ilustró con aplicaciones potenciales en la generación de registros tridimensionales de la ruga palatina, los cuales serían de gran ayuda en los procesos de identificación de personas. También se muestran aplicaciones en el campo de la documentología, donde los contrastes de las imágenes de fase evidencian los trazos inventados o las huellas latentes de trazos. Otra de las aplicaciones potenciales la constituye la posibilidad de establecer criterios de precisión en la comparación axial de las huellas del percutor sobre los casquillos de las balas.

El desarrollo de este artículo está enmarcado en el proyecto No. 434 de la División de Investigación Científica del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses: *Exploración de las aplicaciones en Documentología y otras áreas forenses y optimización del interferómetro de Mach-Zehnder (Dispositivo óptico de proyección de franjas)*.

## REFERENCIAS

1. Barbara, J.J. *Handbook of Digital and Multimedia Forensic Evidence*. (Humana Press: 2007).
2. Wilkinson, T.J. et al. Physics and forensics. *Physics World* (2001).
3. Johnson, M.K. *Lighting and Optical Tools for Image Forensics*. (2007).
4. Zhang, L. & Alemzadeh, K. A 3-dimensional vision system for dental applications. *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE* 3369-3372(2007).
5. Deck, L.L. Fourier-transform phase-shifting interferometry. *APPLIED OPTICS* **42**, 2354-2365(2003).

- 
6. Qian, K. Windowed Fourier transform method for demodulation of carrier fringes. *Optical Engineering* **43**, 1472(2004).
  7. PI: Piezo Motion Control, Designing with Piezoelectric Actuators, Piezo Nanopositioning Tutorial | Piezoelectrics in Positioning. at <[http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo\\_tutorial.php](http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo_tutorial.php)>
  8. LI, J. et al. Removal of carrier frequency in phase-shifting techniques. *Optics and lasers in engineering* **30**, 107-115(1998).
  9. Yamaguchi, I., Ohta, S. & Kato, J. Surface contouring by phase-shifting digital holography. *Optics and Lasers in Engineering* **36**, 417-428(2001).
  10. HUANG, M. & LAI, C. Phase unwrapping based on a parallel noise-immune algorithm. *Optics and laser technology* **34**, 457-464(2002).
  11. A. Golovin et al. Diseño y construcción de un sistema de interferometría para el análisis pericial de documentos . *Revista del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses* **17**, 3-8(2002).