

# **DETECTANDO EL CONTACTO ÓPTICO EN LOS ESPACIOS CROMÁTICOS: APLICACIONES A LA PERFILOMETRÍA**

Jáder Guerrero Bermúdez  
Colaboración: Profesor, Arturo Plata Gómez

# Contenido de la presentación

- Percepción del color por el observador estándar
- El sistema CIE
- Interferometría con luz blanca
- Microscopía basada en interferometría con luz blanca
- Detectando el contacto óptico en el espacio RGB
- Detectando el contacto óptico en el sistema CIE
- Aplicaciones a la perfilometría
- Conclusiones

# Resumen

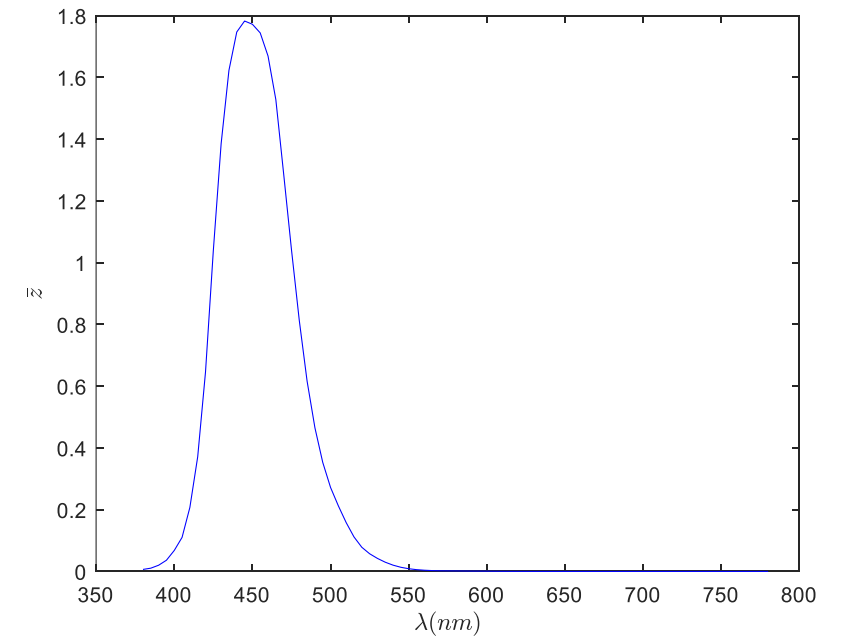
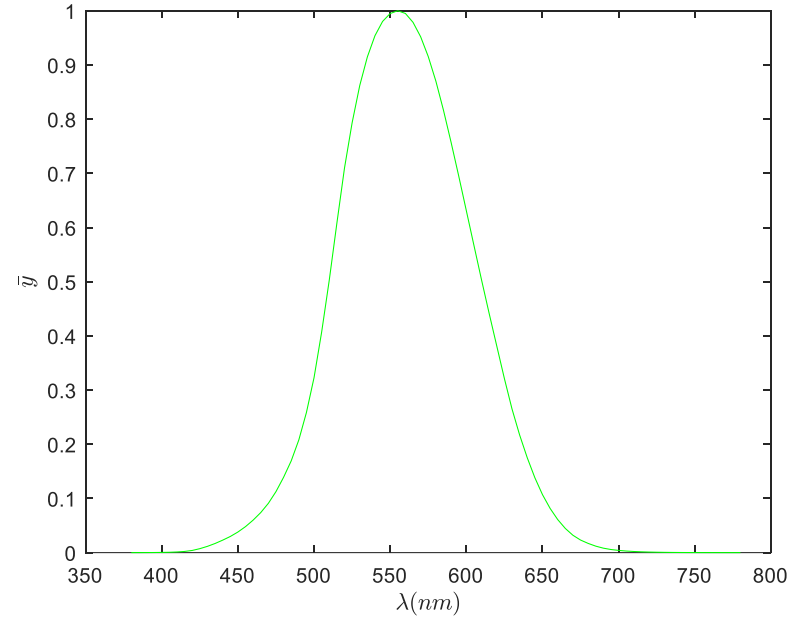
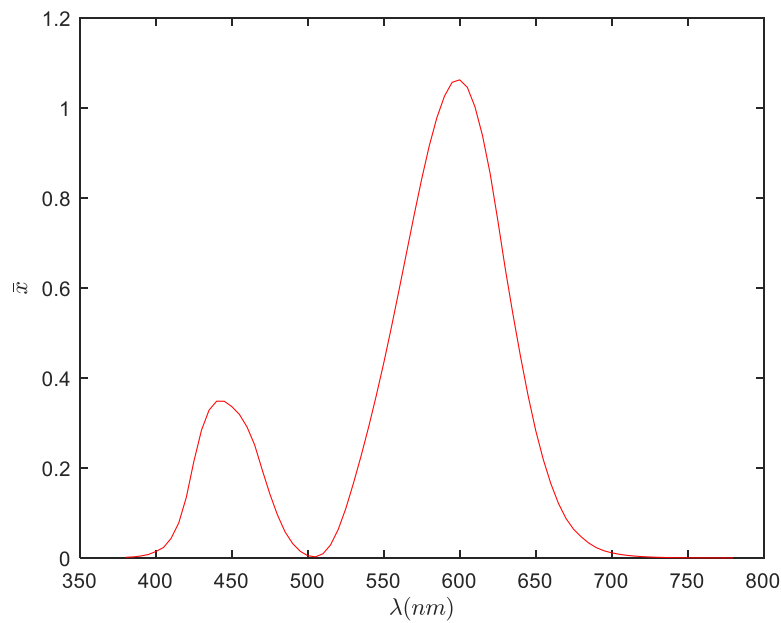
La luz blanca se caracteriza por su baja coherencia espacial y temporal. Es decir, el tiempo y la longitud en los que dos frentes de onda, emitidos de manera aleatoria, exhiben una correlación estadísticamente significativa es del orden  $10^{-14}$  s y  $10^{-6}$  m.

En microscopía por interferometría con luz blanca, se toma ventaja de esta escasa longitud de coherencia para muestrear la topografía de objetos, detectando el máximo de la envolvente de un patrón de interferencia o calculando la fase del sistema de franjas. El patrón resulta de la superposición de un haz objeto y un haz de referencia, utilizando un objetivo que ha sido diseñado como interferómetro.

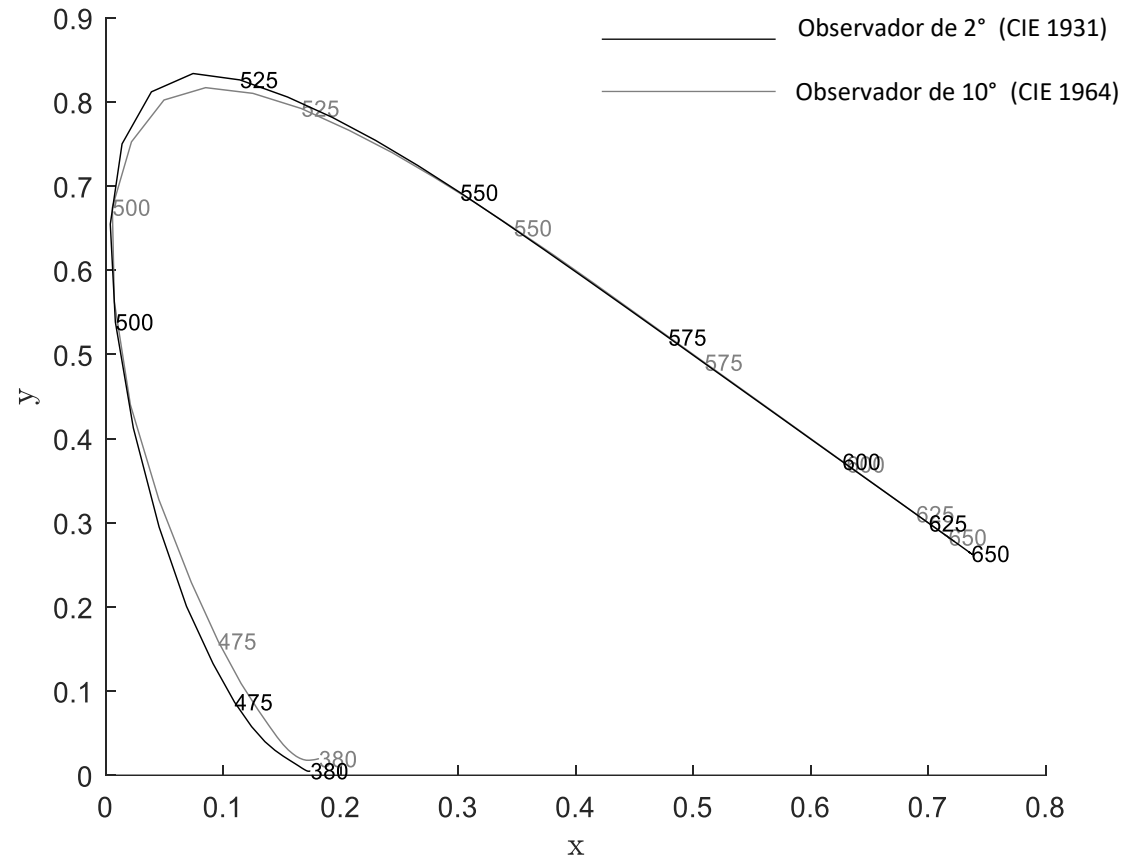
Generalmente la muestra (o el objetivo de microscopio) se somete a un barrido axial con el propósito de encontrar el contacto óptico o diferencia de trayecto óptico cero para un conjunto de puntos de la superficie objeto. Muy recientemente, se han elaborado propuestas para detectar el contacto óptico en los espacios cromáticos RGB (Rojo, verde y Azul) y en el sistema *CIExyz*.

# RESPUESTA DEL OBSERVADOR HUMANO A UN ESTÍMULO CROMÁTICO

Funciones de Correspondencia para los estímulos primarios en el sistema CIE (Commision Internationale de l'Eclairage)



## *Locus Espectral* en el Diagrama de Cromaticidad



# Cálculo de los valores triestímulos

$$X = k \sum_{\lambda=360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} E(\lambda) \bar{x}(\lambda) P(\lambda)$$

$$Y = k \sum_{\lambda=360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) P(\lambda)$$

$$Z = k \sum_{\lambda=360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} E(\lambda) \bar{z}(\lambda) P(\lambda)$$

La constante  $k$  es de normalización.

$$k = 100 / \sum_{\lambda=360 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} E(\lambda) \bar{y}(\lambda)$$

$E(\lambda)$ , potencia (o densidad) espectral del iluminante.

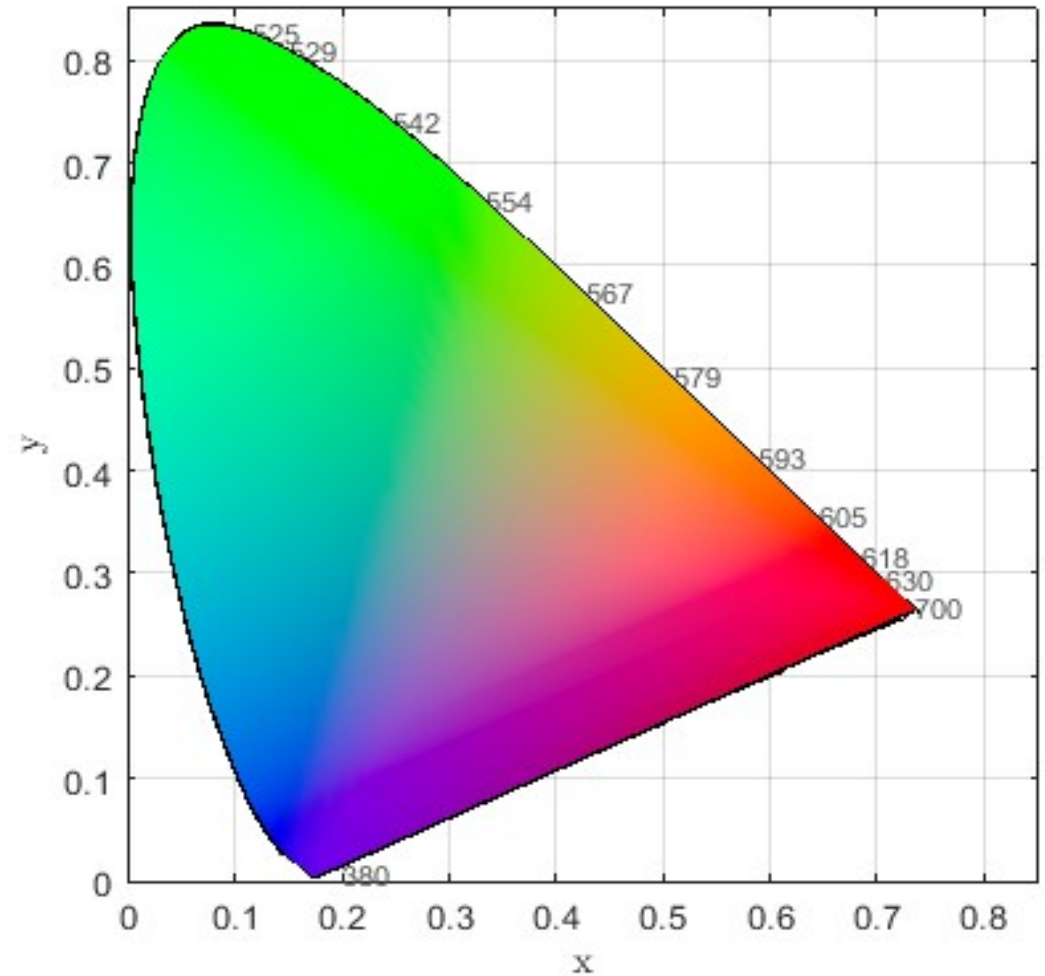
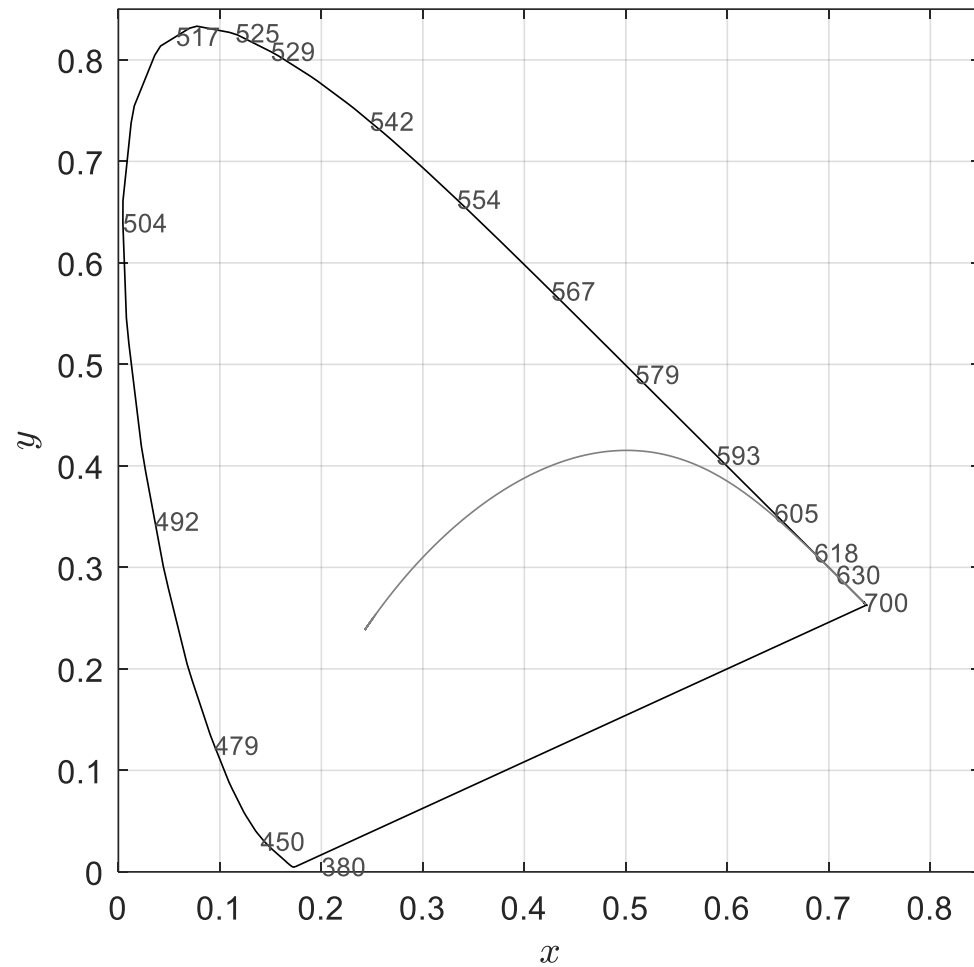
$P(\lambda)$ , reflectancia espectral de la superficie de un objeto.

En la práctica la suma se efectúa entre 380 nm y 780 nm

## Coordenadas cromáticas

$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{cases}$$

# Suela, lengua o Diagrama de Cromaticidad CIE





# Manejo del Color

Los dispositivos de imagen (para registro y despliegue) emplean los primarios RGB - Red, Green, Blue. Cada *píxel* es representado por la intensidad en el canal Rojo, Verde y Azul.

Estos primarios no son únicos. Existen diferentes propuestas tecnológicas para el despliegue de las imágenes, lo cual puede dar a una misma imagen una apariencia distinta. El manejo del color consiste en ajustar la información color de la escena de entrada estableciendo compromisos entre captura y exhibición.

$$M = \begin{bmatrix} 0.7164 & 0.1010 & 0.1468 \\ 0.2587 & 0.7247 & 0.0166 \\ 0.0000 & 0.0512 & 0.7740 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

$M$ , es la matriz de transformación de amplio *gamut* RGB al espacio XYZ (iluminante D50)



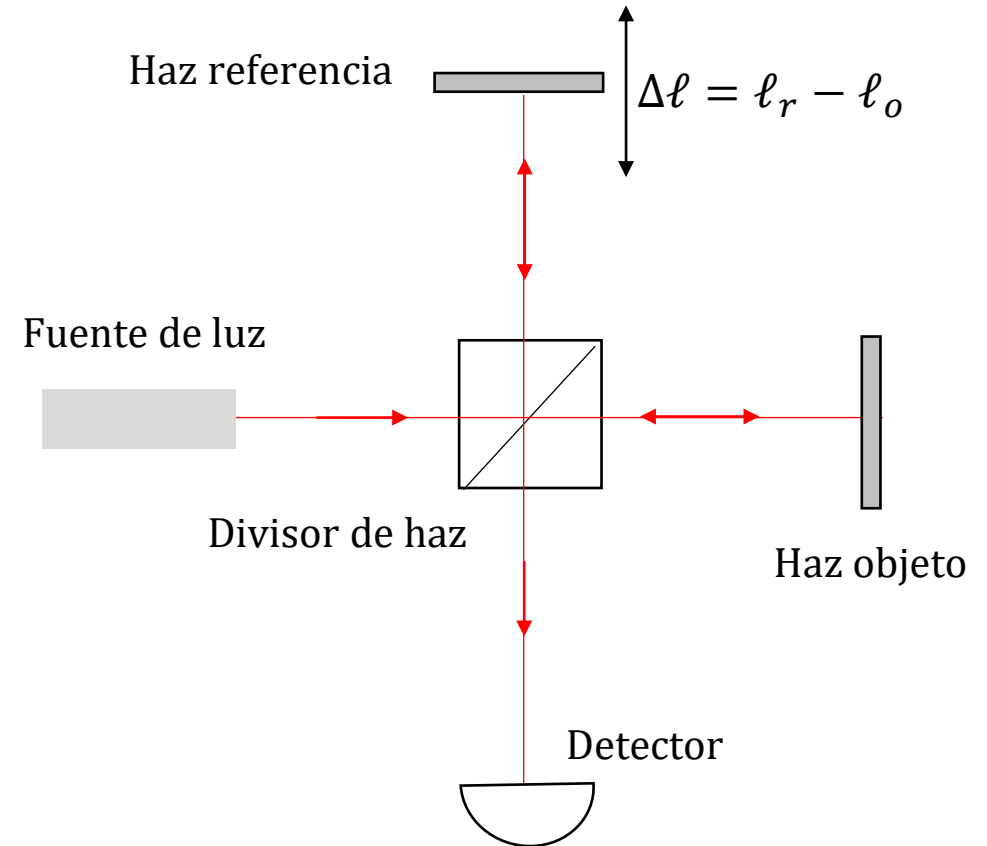
Adaptado de la pintura de  
Jean Baptiste Siméon Chardin

## LONGITUD DE COHERENCIA Y TIEMPO DE COHERENCIA

La longitud de coherencia de la luz,  $\ell_c$  se define como la **extensión espacial**, a lo largo de la dirección de propagación, sobre la cual el campo eléctrico exhibe una correlación significativa. Se relaciona con el tiempo de coherencia,  $\ell_c = c\tau_c$ , con  $c$  igual a la velocidad de la luz en el espacio libre o en el medio donde se propaga la onda.

La longitud de coherencia puede ser medida utilizando un interferómetro de Michelson. Es la diferencia de camino óptico de un haz de luz al interferir con sí mismo, correspondiente a una visibilidad (contraste) de las franjas,  $V$ , de su patrón de interferencia igual 0.37.

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$



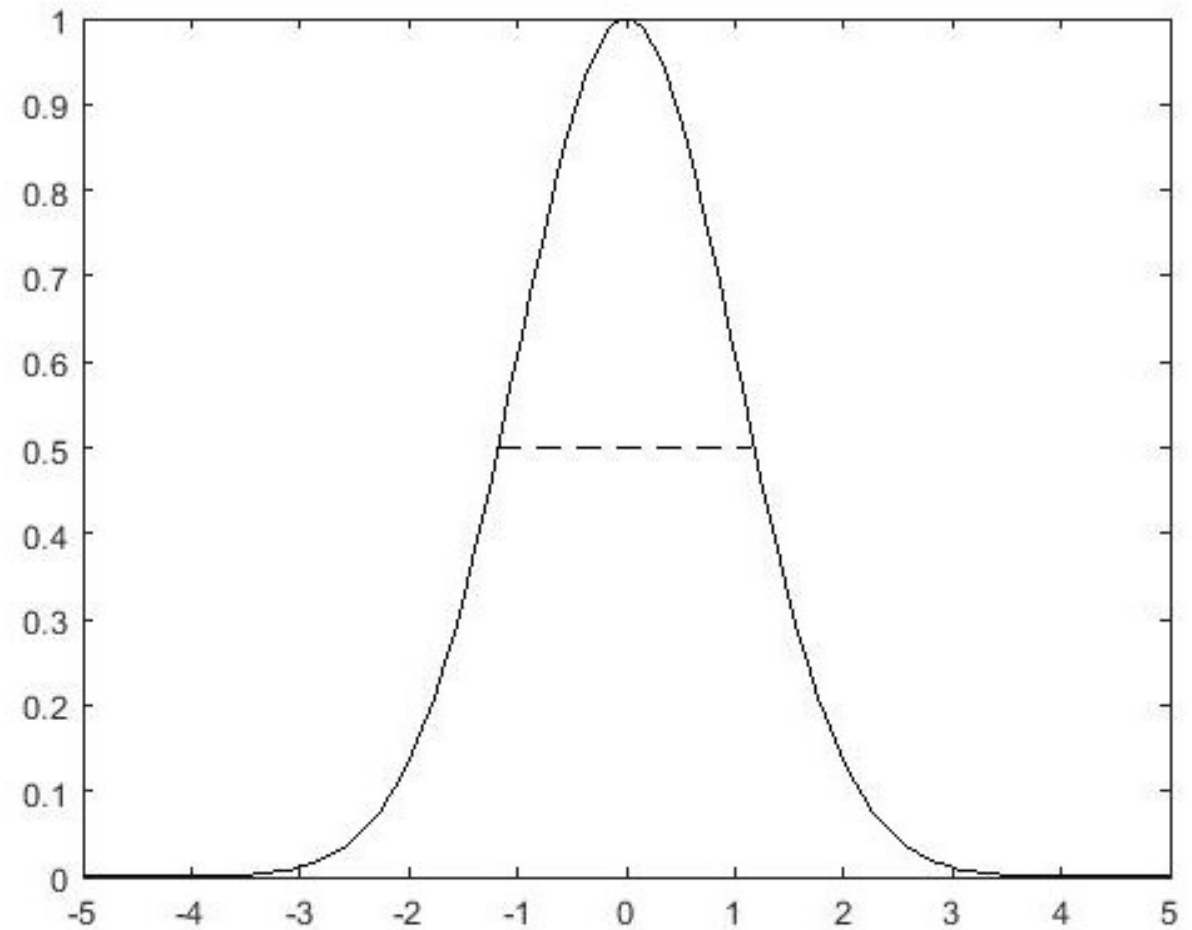
Para una densidad **espectral gaussiana**

$$\ell_c = c \Delta\tau = c 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma_\tau$$

$$\sigma_\tau = \frac{1}{\sigma_\omega}$$

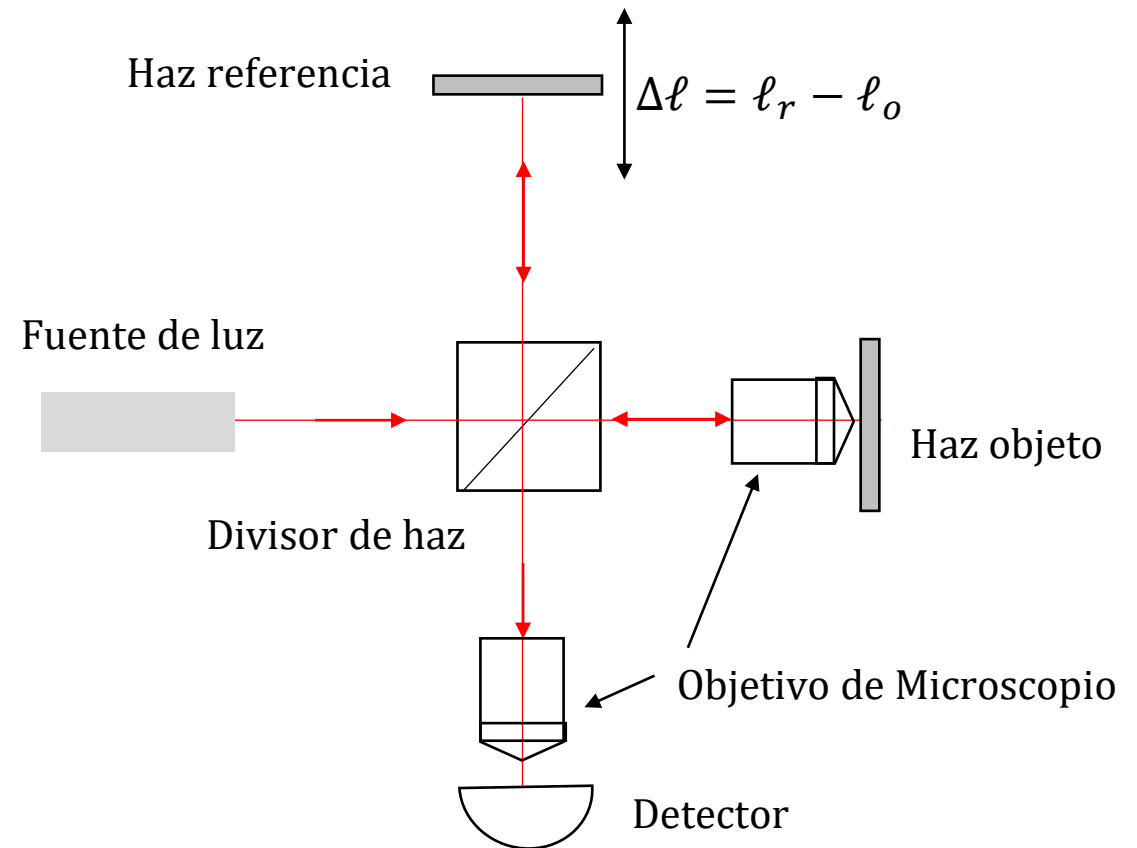
$$\sigma_\omega = \frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{\Delta\lambda}{2\sqrt{2 \ln 2}}$$

$$\ell_c = \frac{(4 \ln 2)}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$



## MICROSCOPIO DE INTERFERENCIA LINNIK

M. Davidson, I. Mazor, and S. Clara, “An application of interference microscopy to integrated circuit inspection and metrology,” in *SPIE*, 1987, vol. 775, pp. 233–247.

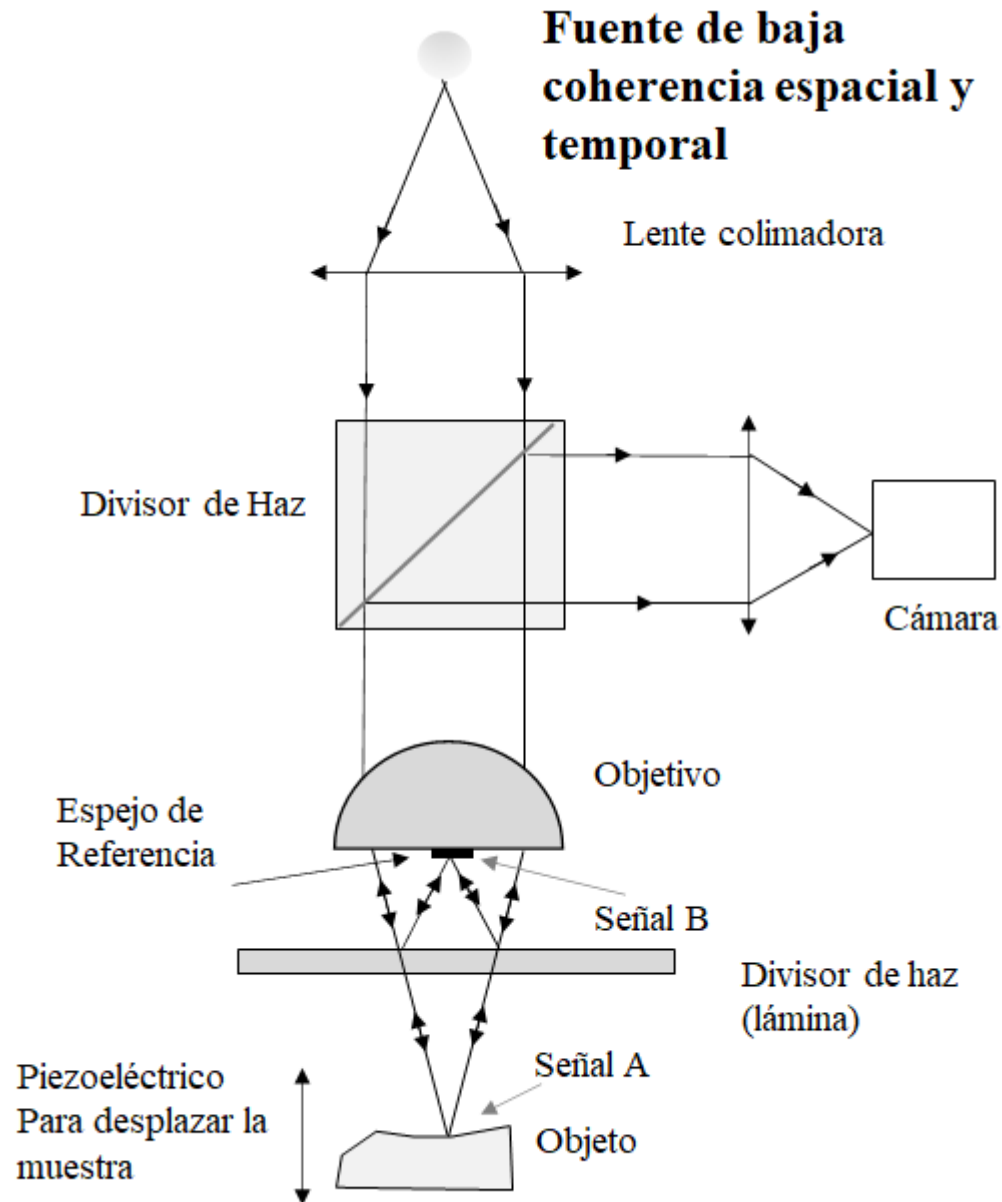


## MICROSCOPIO DE CORRELACIÓN MIRAU

S. S. C. Chim and G. S. Kino, "Correlation microscope," *Appl. Opt.*, vol. 29, no. 26, p. 3775, 1990.

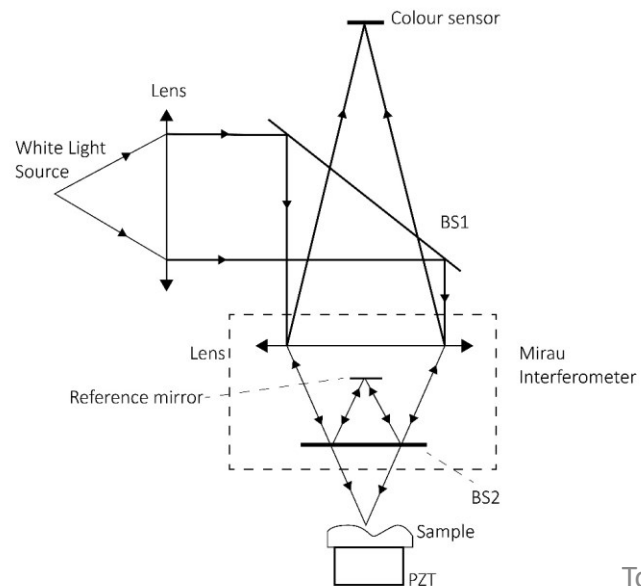
$$I = A^2 + B^2 + 2AB\gamma(z - z_0)$$

$\gamma(z)$  es la función autocorrelación de la fuente de luz de baja coherencia (espacial y temporal)





50X Nikon. Objetivo de Microscopio (NA: 0.55, Working Distance: 3.4 mm) .

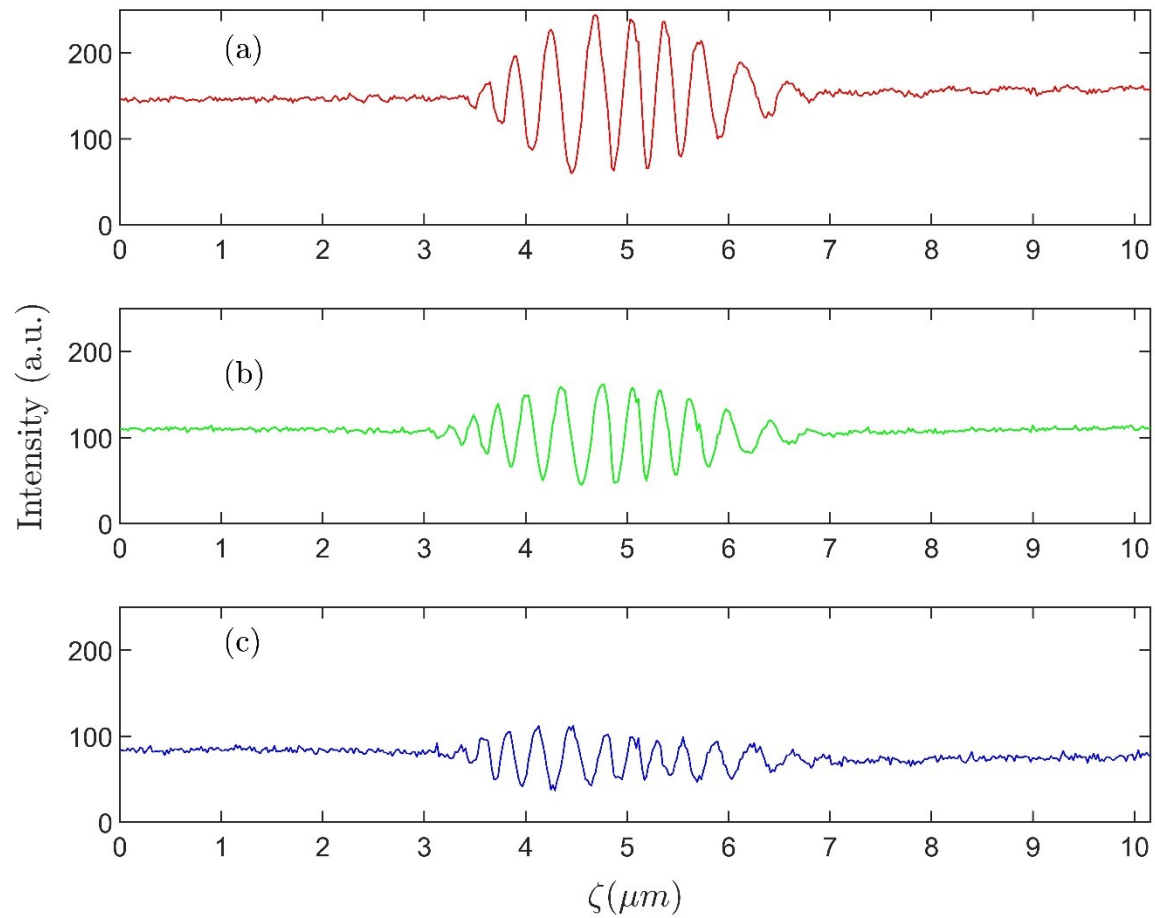


Zeiss Axio Imager Z1 (Carl Zeiss, Germany)

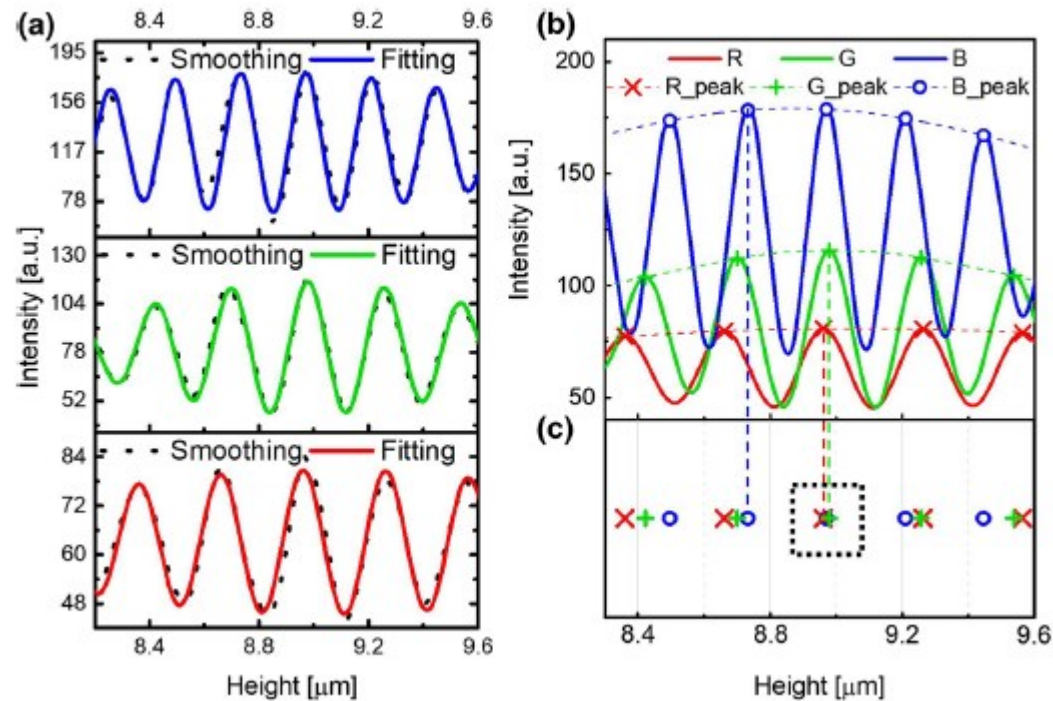
Correlogramas registrados con AxioCam HRc a 8 bits. Resolución 1388 x1040 pixels (1.4 Megapixels), pixel size: 6.45 microns (H), 6.45 microns (V), sensor size: 8.9 mm (H), 6.7 mm (V).







$$I_k(m, n, \zeta) = \alpha_k(m, n) + \beta_k(m, n) g \left( \frac{\zeta - h(m, n)}{\ell_{coh}} \right) \cos \left\{ \frac{4\pi}{\lambda_{ck}} (\zeta - h(m, n)) \right\}$$

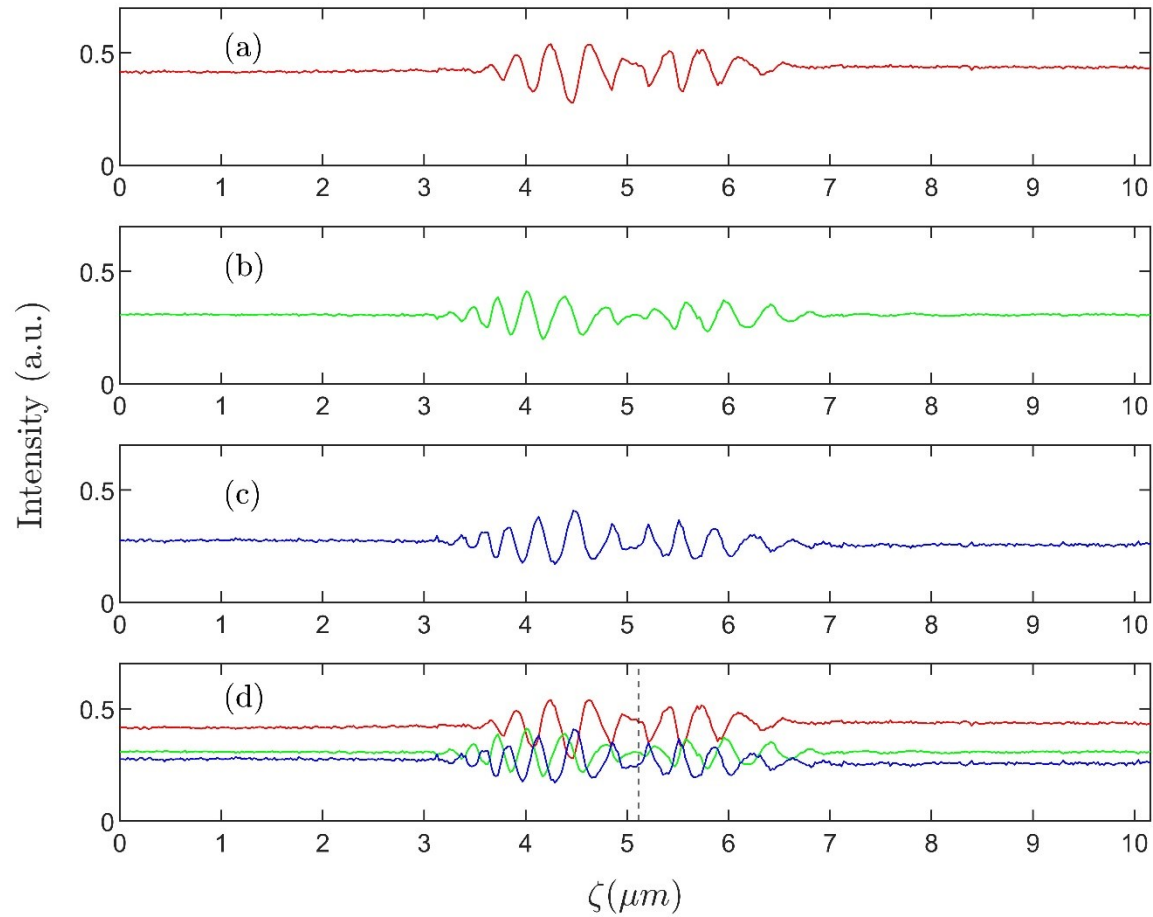


$$V_{ijk} = |R_i - G_j| + |R_i - B_k| + |G_j - B_k|$$

Sea  $R_{min}$ ,  $G_{min}$  y  $B_{min}$  los valores RGB donde  $V_{ijk}$  es mínimo. Entonces la altura del punto de la superficie objeto se calcula mediante:

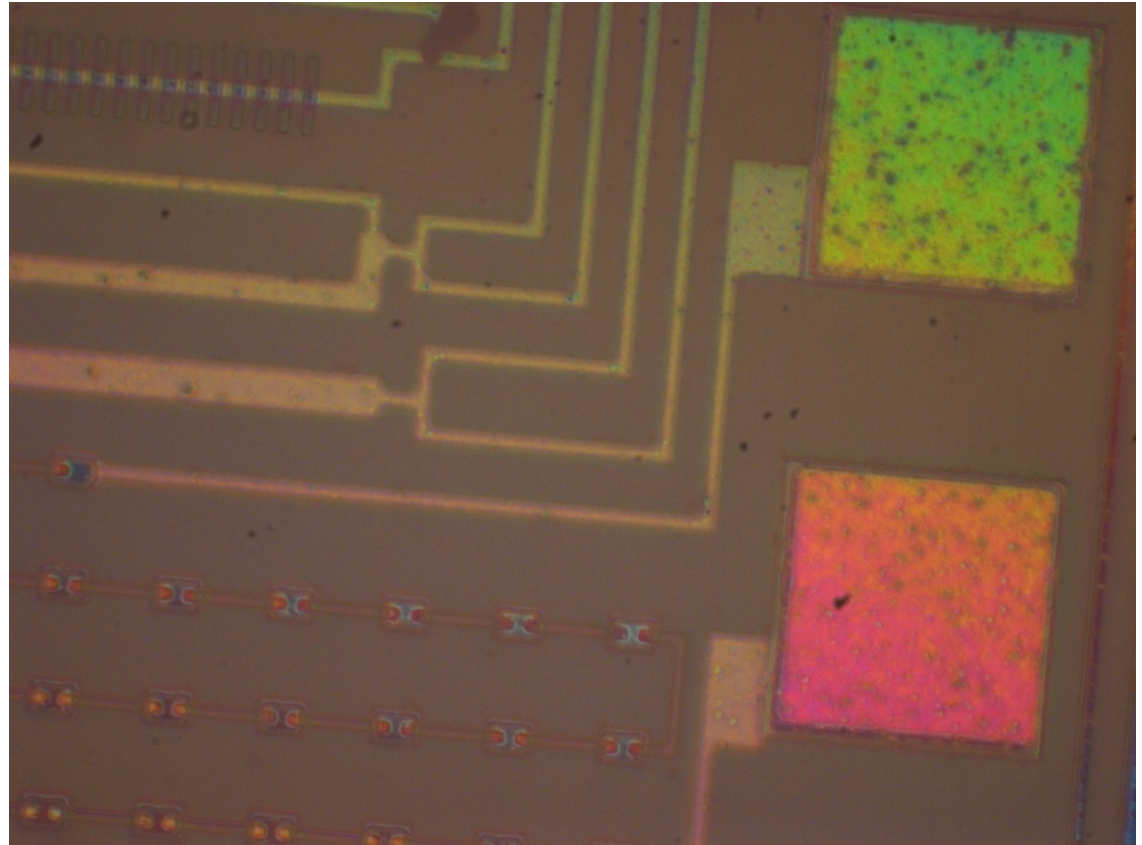
$$H = \frac{R_{min} + G_{min} + B_{min}}{3}$$

J. Im, H. Kim, W. Park, J. Sung, A. Byeongil, and L. Soobong, “High - precision white light interferometry based on a color CCD and peak matching algorithm,” *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 80, no. 7, pp. 599–605, 2022, doi: 10.1007/s40042-022-00421-1.

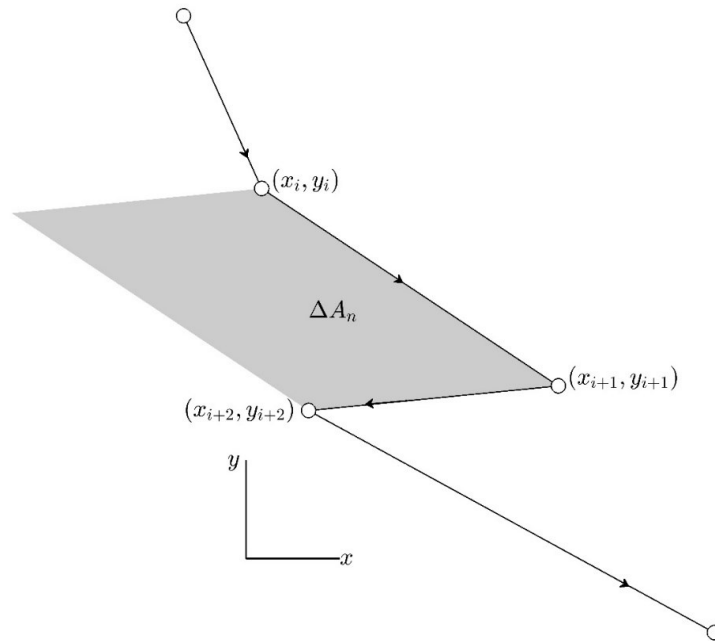


Correlogramas en coordenadas cromáticas  $x, y, z$  versus posición axial  $\zeta$ . La imagen del fondo corresponde a la superposición de las tres primeras curvas. El contacto óptico se muestra en línea de trazo.

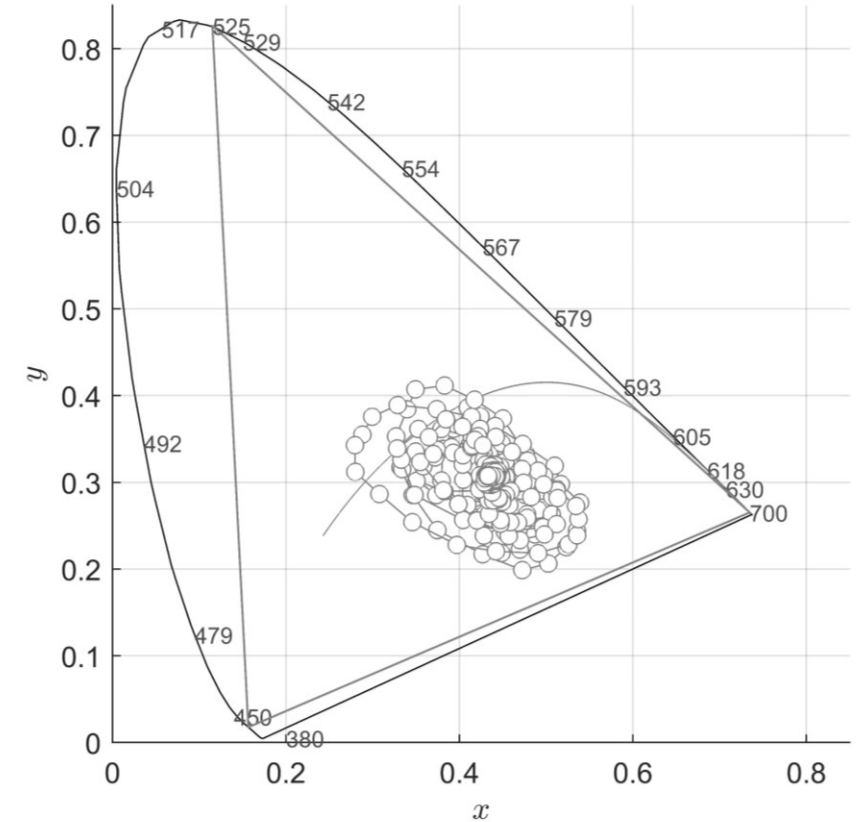
<https://youtu.be/XjgeJcJHVwo>



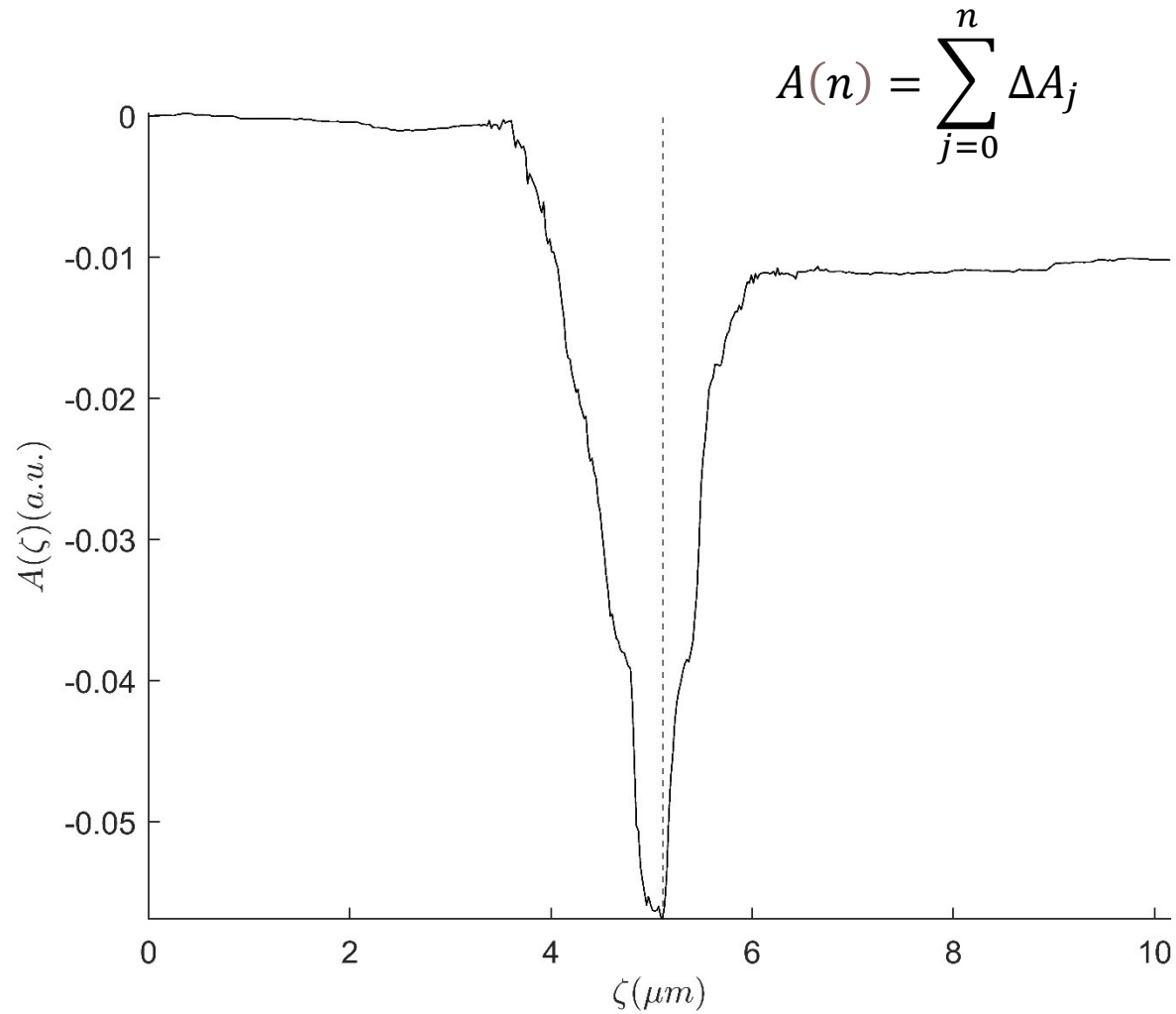
$$\Delta A_n = (x_i - x_{i+1})(y_{i+2} - y_{i+1}) - (x_{i+2} - x_{i+1})(y_i - y_{i+1})$$



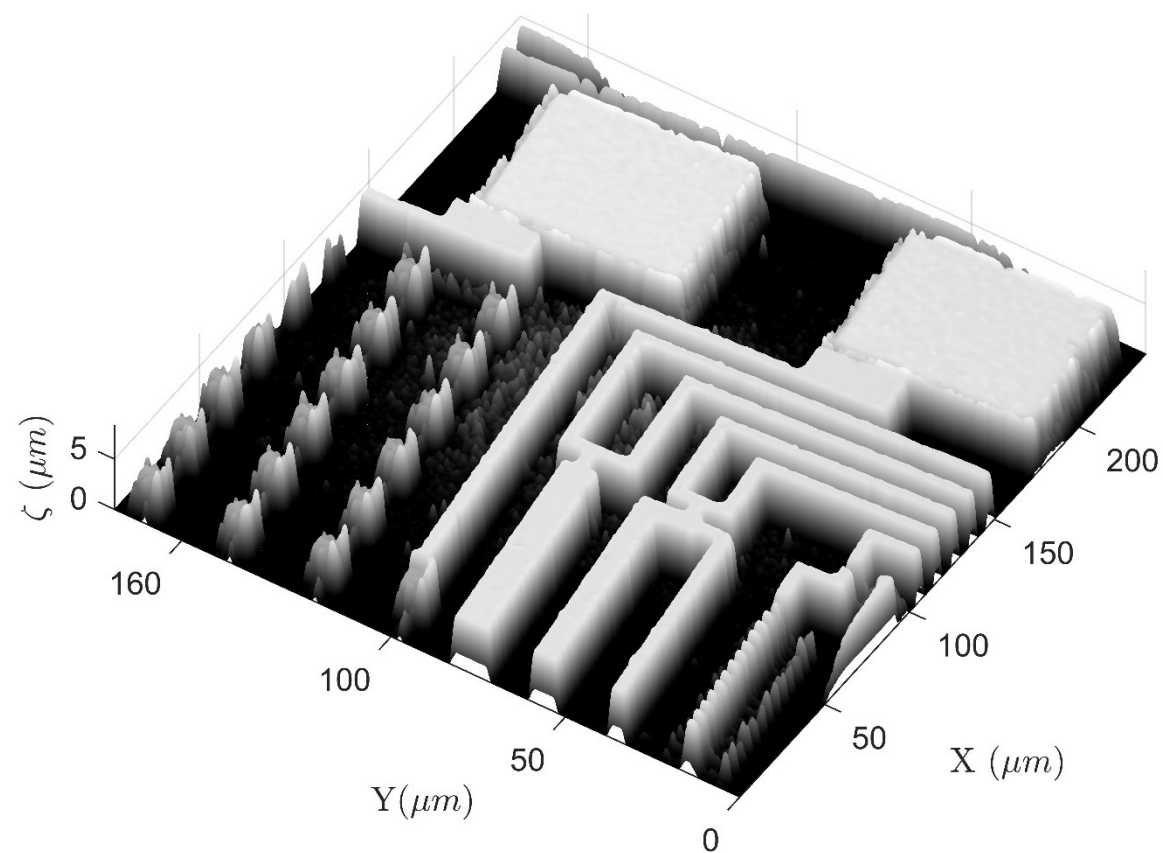
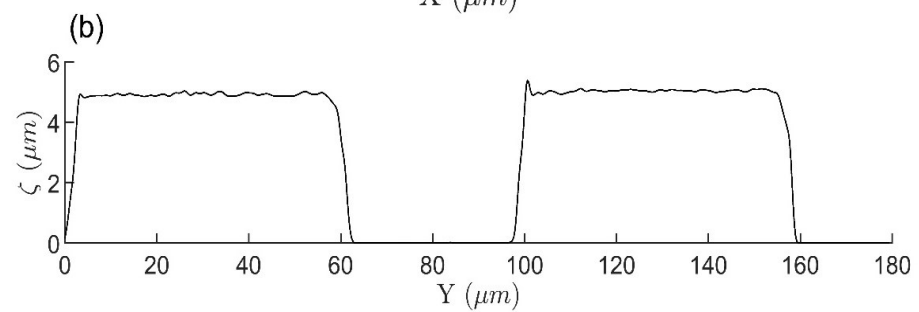
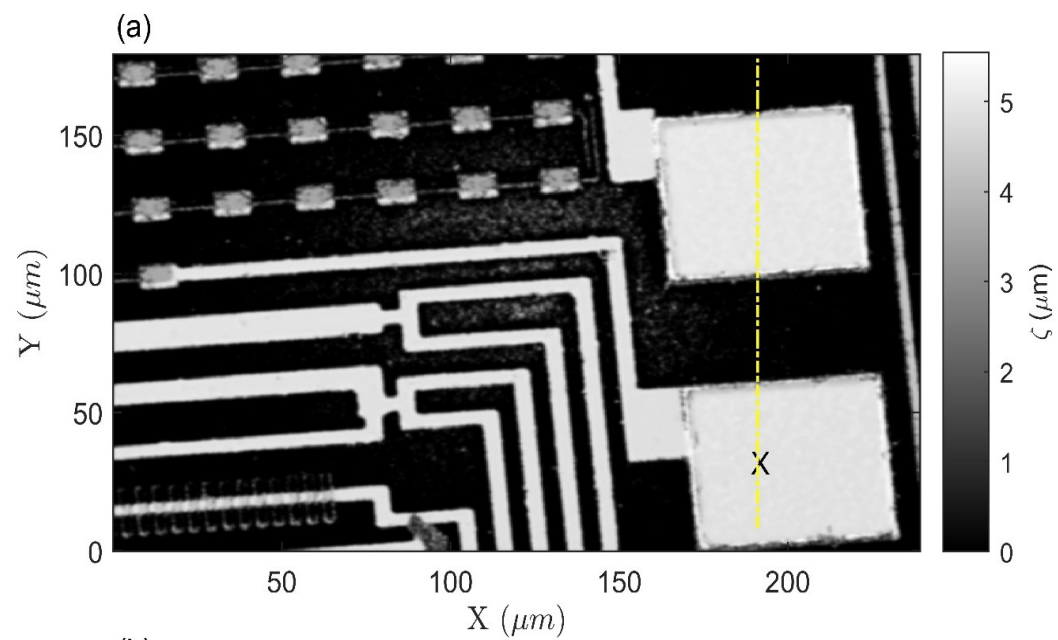
En el espacio CIExyz cada pixel en un interferograma es un punto con coordenadas cromáticas  $x, y$ . El análisis de interferogramas consecutivos es representado por una trayectoria. La suma acumulativa de elementos de área limitados por dos segmentos consecutivos de esta trayectoria exhibe un mínimo en la cercanía del contacto óptico.



<https://youtu.be/fFo7X9O-ELk>



La suma acumulativa de elementos de área limitados por dos segmentos consecutivos en el plano  $x, y$ , exhibe un mínimo que coincide con la posición del contacto óptico. En este caso  $\zeta$  cerca a  $5.1 \mu\text{m}$ .





# Conclusiones

Se ha mostrado que es viable detectar el contacto óptico en los espacios cromáticos RGB y el sistema CIE.

Se dispone así de una herramienta para reconstruir mediante microscopía con interferometría de luz blanca topografías en el orden de nanómetros.