ELEMENTOS ÓPTICOS HOLOGRÁFICOS:

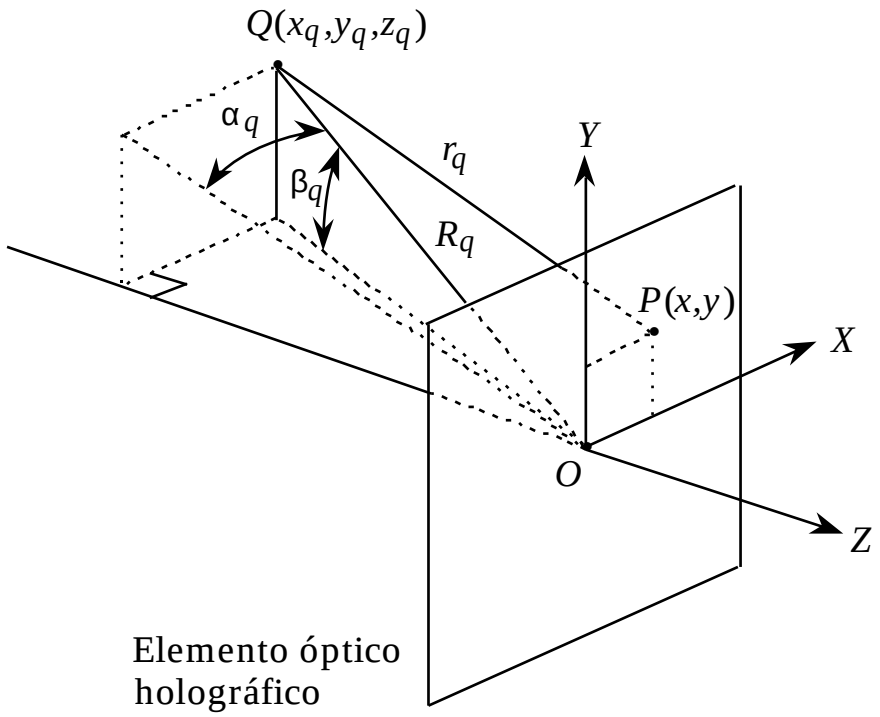
TEORÍA DIFRACCIONAL

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

Teoría difraccional

- Análisis de elementos ópticos holográficos utilizando la Teoría de la difracción: Aspectos teóricos y experimentales.
- Imagen difraccional de un punto **(PSF)**: Criterio utilizado para el estudio de la calidad de imagen.
- Hologramas por transmisión en los que el objeto es una fuente puntual: **lentes holográficas**.
- Distribución de intensidades en un plano imagen : **Figura de difracción**.
- Distribución de irradiancia a lo largo de un eje: **Irradiancia axial**.
- Existen aberraciones: **Teoría difraccional de aberraciones**.
- En ausencia de aberraciones y con pupila circular: **Figura de Airy**.
- Aumento de aberraciones: Deformación de la figura de difracción.
- El medio de registro no influye (salvo en una posible apodización).

Parámetros geométricos



$$R_q = signo(z_q)\sqrt{x_q^2 + y_q^2 + z_q^2}$$

$$sen\,\alpha_q = \frac{x_q}{R_q} \qquad sen\,\beta_q = \frac{y_q}{R_q}$$

$$r_q(x,y) = signo(z_q)\sqrt{(x - x_q)^2 + (y - y_q)^2 + z_q^2}$$

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

Aberración de fase, Δ

- **Fase del frente de onda imagen deseado:** $\varphi_i(x,y)$

- **Fase del frente de onda imagen:** $\varphi'_i(x,y)$

- **Aberración de fase:** $\Delta(x,y) = \varphi'_i(x,y) - \varphi_i(x,y)$

$$\boxed{\Delta(x,y) = \varphi_c(x,y) - \varphi_i(x,y) \pm [\varphi_o(x,y) - \varphi_r(x,y)]}$$

- **Ondas esféricas:**

$$\varphi_q(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda_q}\, r_q(x,y)$$

$$\boxed{\Delta(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda_c}\left\{ r_c(x,y) - r_i(x,y) \pm \mu[r_o(x,y) - r_r(x,y)] \right\}}$$

$$\mu = \lambda_c/\lambda_r$$

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

Punto imagen gaussiano

Desarrollando en serie $r_q(x,y)$

↓

Punto imagen gaussiano

↓

$$G(R_g, \alpha_g, \beta_g)$$

$$\frac{1}{f_g} = \frac{1}{f_c} \pm \mu\left(\frac{1}{f_a} - \frac{1}{f_1}\right)$$

$$\operatorname{sen} \alpha_g = \operatorname{sen} \alpha_c \pm \mu(\operatorname{sen} \alpha_a - \operatorname{sen} \alpha_1)$$

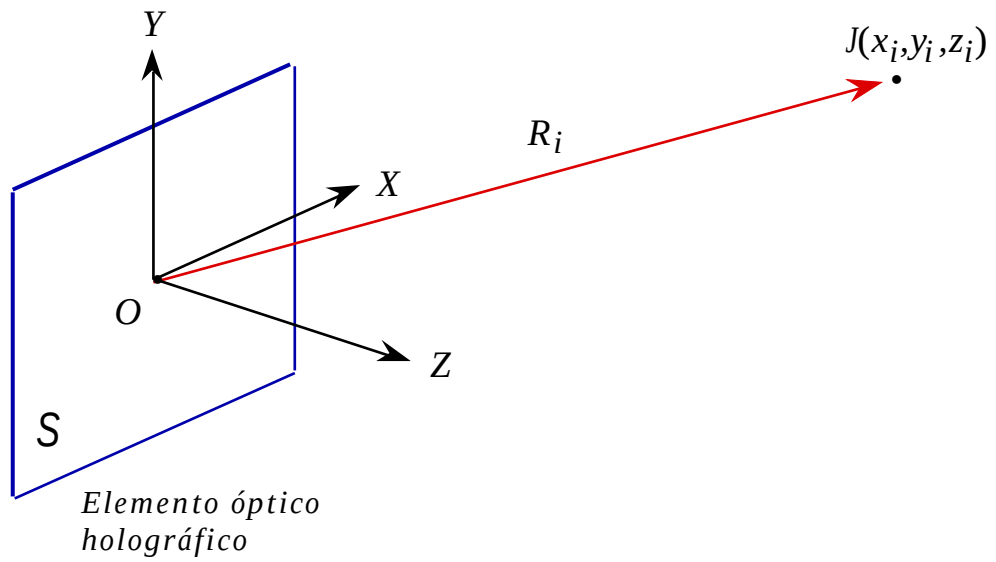
$$\operatorname{sen} \beta_g = \operatorname{sen} \beta_c \pm \mu(\operatorname{sen} \beta_a - \operatorname{sen} \beta_1)$$

$$\mu = \lambda_c/\lambda_r$$

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

Irradiancia en un punto del espacio

$$I(x_i, y_i, z_i) = \frac{P}{\lambda_c^2 R_i^2 S} \left| \iint_S A(x,y) \exp\left[i\,\Delta(x,y;x_i,y_i,z_i)\right] dx\, dy \right|^2$$



Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

Número de Fresnel elevado

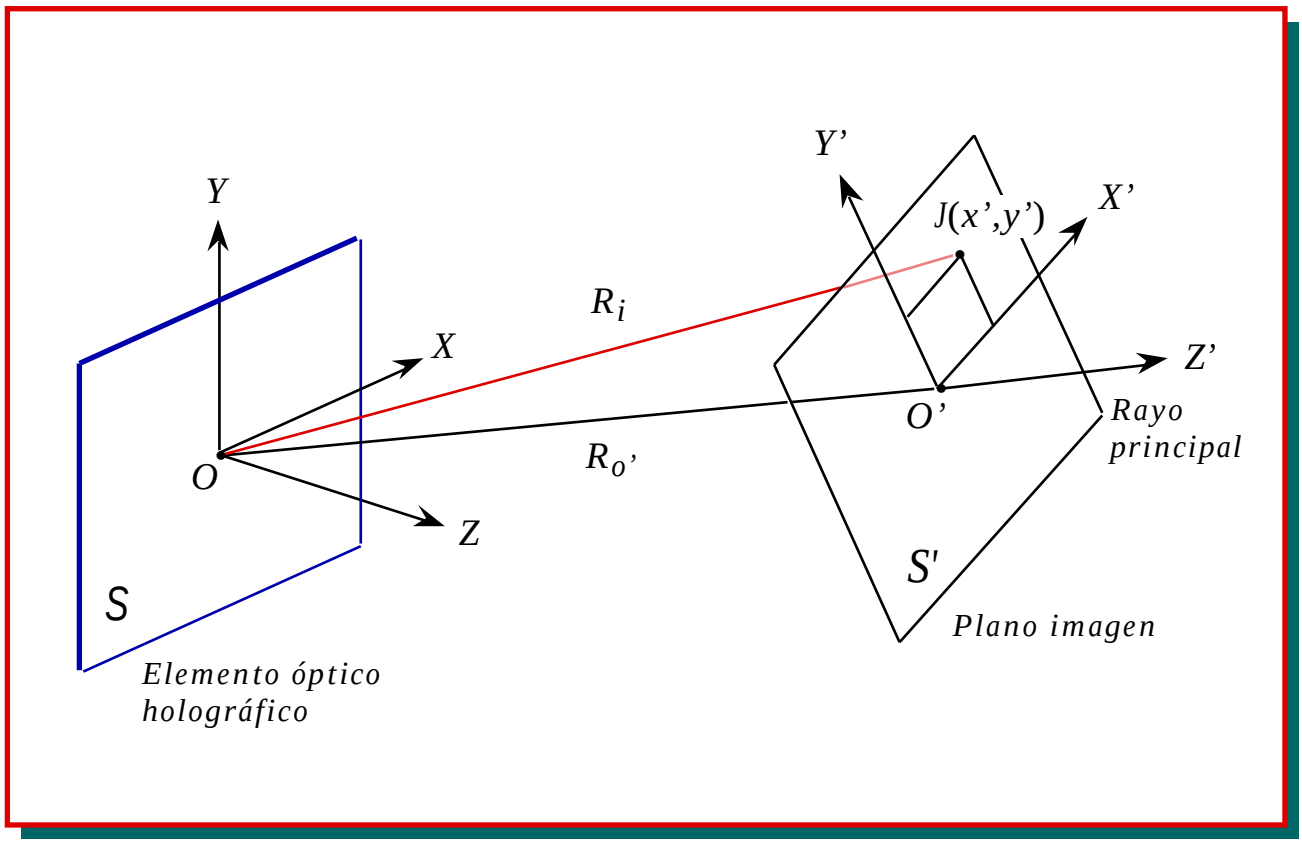
$$N_F = D^2/4\lambda_c R_g$$

$$\longrightarrow \quad R_i \approx R_g$$

- Normalizando al máximo de la PSF en ausencia de aberraciones:

$$\Delta(0,0;x_g,y_g,z_g) = 0$$

$$I(x_g,y_g,z_g) = \frac{P}{\lambda_c^2 R_g^2 S} \left| \iint_S A(x,y)\,dx\,dy \right|^2$$



$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{o'} \\ y_{o'} \\ z_{o'} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{o'}\Omega & -m_{o'}\, l_{o'}\Omega & l_{o'}\Omega \\ 0 & \Omega^{-1} & m_{o'} \\ -l_{o'}\Omega & -m_{o'} n_{o'}\Omega & n_{o'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

$$l_{o'} = \frac{x_{o'}}{R_{o'}} \qquad m_{o'} = \frac{y_{o'}}{R_{o'}} \qquad n_{o'} = \sqrt{1 - l_{o'}^2 - m_{o'}^2}$$

$$\Omega = (1 - m_{o'}^2)^{-1/2}$$

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

Irradiancia en el plano *X'Y' (con z' fijo)*

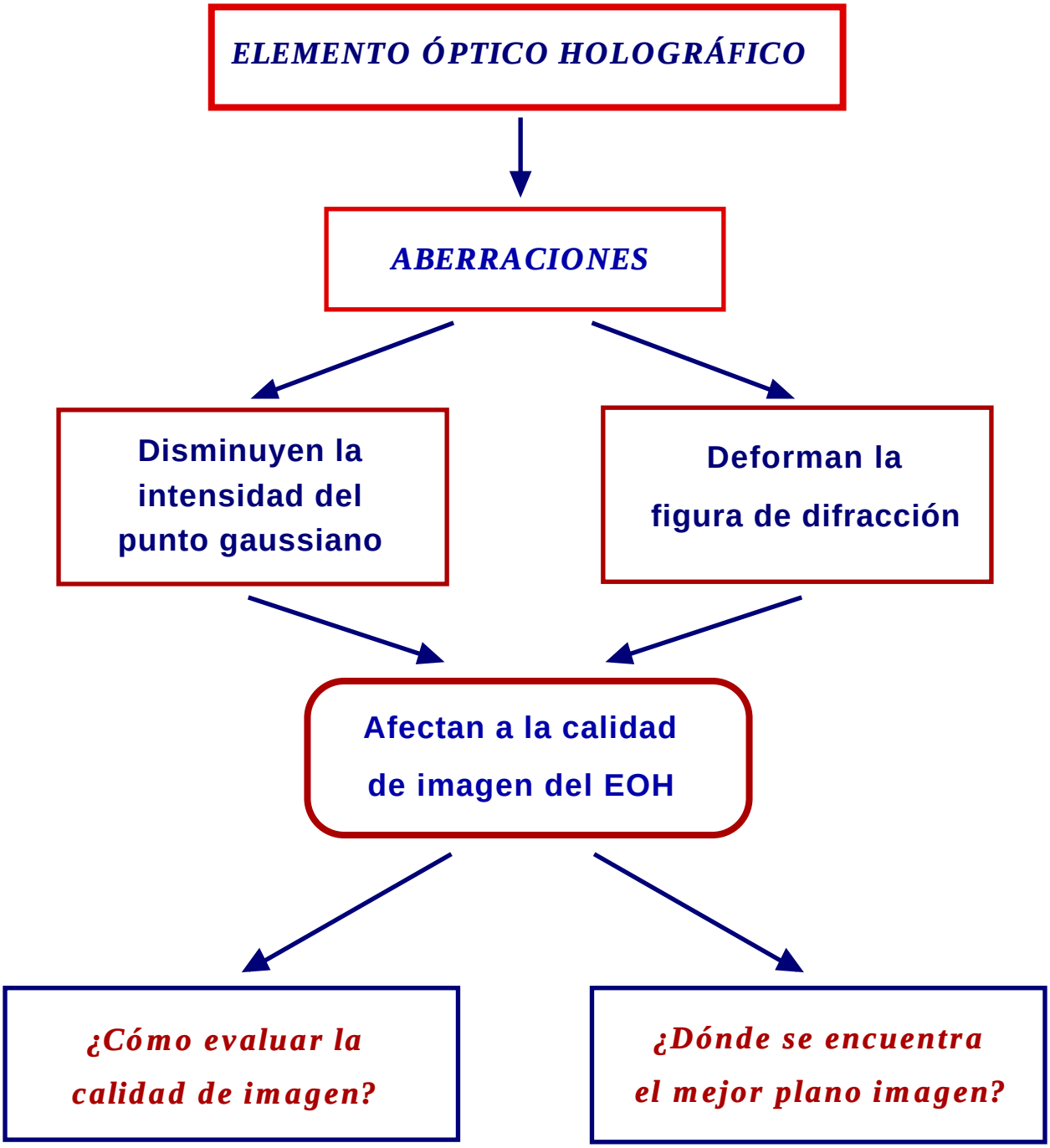
$$I(x',y') = \frac{\left| \iint_S A(x,y)\, exp\, [i\, \Delta(x,y;x',y')]\, dx\, dy \right|^2}{\left| \iint_S A(x,y)\, dx\, dy \right|^2}$$

Es posible desarrollar una *teoría difraccional de aberraciones* en elementos ópticos holográficos.

En ausencia de aberraciones:

- En el punto gaussiano se tiene $I(0,0) = 1$.
- Si la pupila de salida es circular se obtiene la **figura de difracción de Airy**.

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).


ELEMENTO ÓPTICO HOLOGRÁFICO
ABERRACIONES
Disminuyen la intensidad del punto gaussiano
Deforman la figura de difracción
Afectan a la calidad de imagen del EOH
¿Cómo evaluar la calidad de imagen?
¿Dónde se encuentra el mejor plano imagen?

Irradiancia axial

- Intensidad existente a lo largo de la línea que une el centro de la pupila de salida del EOH con el punto imagen gaussiano:

$$x' = y' = 0$$

- Normalizando al valor en el punto gaussiano en ausencia de aberraciones ***(Razón de Strehl)***:

$$I(z') = \frac{\left| \iint_S A(x,y)\, exp\, [i\, \Delta(x,y;0,0,z')]\, dx\, dy \right|^2}{\left| \iint_S A(x,y)\, dx\, dy \right|^2}$$

- En ausencia de aberraciones, con pupila circular de radio a y con $A(x,y) = 1$, la irradiancia axial es una función '***sinc***'.

Cálculo numérico

- Distribución de amplitudes en el plano imagen *X'Y'*: $(x,y) \rightarrow (r,\theta)$

$$U(x',y') = \frac{1}{B} \int_0^a \int_0^{2\pi} A(r,\theta) \exp\left[i\Delta(r,\theta; x',y') \right] r\, dr\, d\theta$$

$$B = \int_0^a \int_0^{2\pi} A(r,\theta)\, r\, dr\, d\theta$$

- Cambio de variables: $(r,\theta) \rightarrow (u,v)$

$$r = a\sqrt{u}$$

$$\theta = 2\pi v$$

- Distribución de amplitudes en el plano imagen *X'Y'*:

$$U(x',y') = \frac{1}{B'} \int_0^1 \int_0^1 A(u,v) \exp\left[i\Delta(u,v; x',y') \right] du\, dv$$

$$B' = \int_0^1 \int_0^1 A(u,v)\, du\, dv$$

- Subdominios $\boldsymbol{S_{jk}}$ de radio variable y sector angular constante:

$$U(x',y') = \frac{1}{B'} \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} \iint_{S_{jk}} A(u,v) \exp\left[i\Delta(u,v; x',y') \right] du\, dv$$

$$B' = \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} \iint_{S_{jk}} A(u,v)\, du\, dv$$

- Aproximaciones en cada subdominio S_{jk}:

$$A(u,v) \approx A(u_j,v_k)$$

$$\Delta(u,v) \approx \Delta(u_j,v_k) + (u - u_j)\frac{\partial\Delta}{\partial u}(u_j,v_k) + (v - v_k)\frac{\partial\Delta}{\partial v}(u_j,v_k)$$

- Puntos en los que se evalúan la amplitud A y la fase Δ:

$$u_j = \left(j - \frac{1}{2}\right)\Delta u \qquad v_k = \left(k - \frac{1}{2}\right)\Delta v$$

$$\Delta u = \frac{1}{J} \qquad \Delta v = \frac{1}{K}$$

$$U(x',y') = \frac{1}{B'}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} A(u_j,v_k)\exp\left[i\Delta(u_j,v_k;x',y')\right]$$

$$\mathrm{sinc}\left[\frac{1}{2J}\frac{\partial\Delta}{\partial u}(u_j,v_k;x',y')\right]\mathrm{sinc}\left[\frac{1}{2K}\frac{\partial\Delta}{\partial v}(u_j,v_k;x',y')\right]$$

$$B' = \sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K} A(u_j,v_k)$$

$$I(x',y') = |U(x',y')|^2$$

METODOS NUMERICOS

Método I $$U(x', y') = \frac{1}{B} \iint_S A(x, y) \exp[i\,\Delta(x, y; x', y')]\, dx\, dy$$

$$U(x', y') = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} \iint_{S_{jk}} A(x, y) \exp[i\,\Delta(x, y; x', y')]\, dx\, dy$$

$$x_j = -R + \left(j - \frac{1}{2}\right)\Delta x \qquad y_k = -R + \left(k - \frac{1}{2}\right)\Delta y \qquad x_j^2 + y_k^2 < R^2$$

$$U(x', y') = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} A(x_j, y_k) \exp[i\,\Delta(x_j, y_k; x', y')] \qquad B = \sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} A(x_j, y_k)$$

ANALISIS ESTADISTICO

$$m_{rs} = \frac{\sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} (x_p')^r \, (y_q')^s \, I(x_p', y_q')}{\sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} I(x_p', y_q')}$$

$$a_{rs} = \sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} (x_p')^r \, (y_q')^s \, I(x_p', y_q')$$

$$m_{rs} = \frac{a_{rs}}{a_{00}}$$

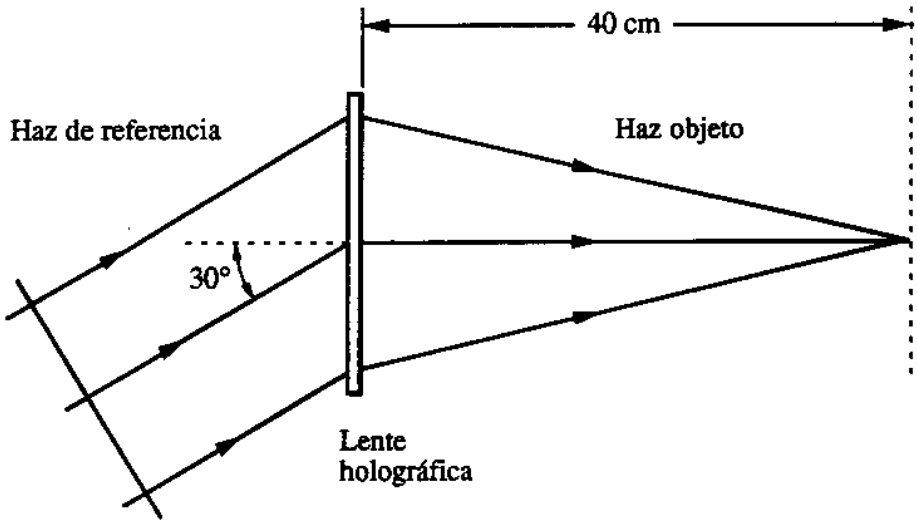
$$M_{rs} = \frac{\sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} (x_p' - \langle x' \rangle)^r \, (y_q' - \langle y' \rangle)^s \, I(x_p', y_q')}{\sum_{p=1}^{P} \sum_{q=1}^{Q} I(x_p', y_q')}$$

$$\sigma_x = \sqrt{M_{20}} \qquad \sigma_y = \sqrt{M_{02}}$$

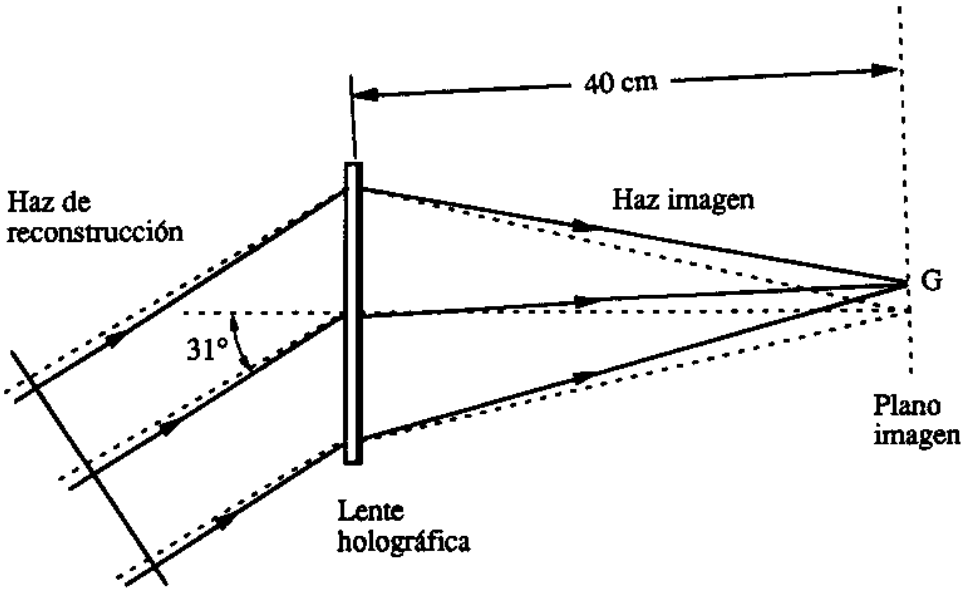
$$S_{30} = \frac{M_{30}}{\sqrt{M_{20}^3}} \qquad S_{03} = \frac{M_{03}}{\sqrt{M_{02}^3}}$$

$$S_{40} = \frac{M_{40}}{\sqrt{M_{20}^3}} \qquad S_{04} = \frac{M_{04}}{\sqrt{M_{02}^3}}$$

EJEMPLO NUMERICO



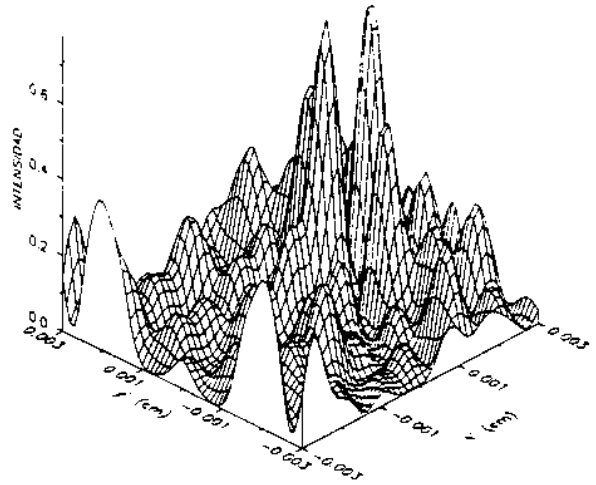
(a)



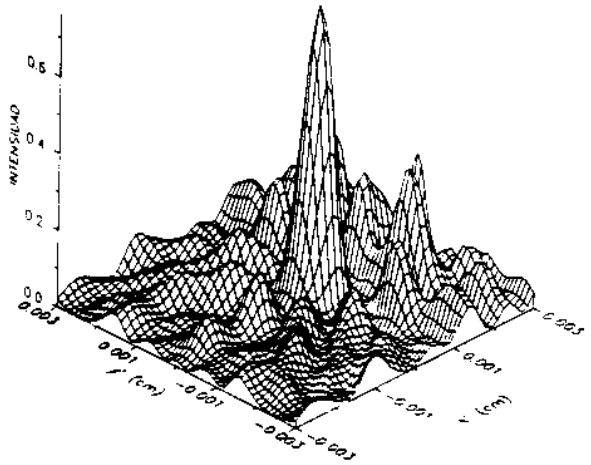
(b)

D = 4 cm

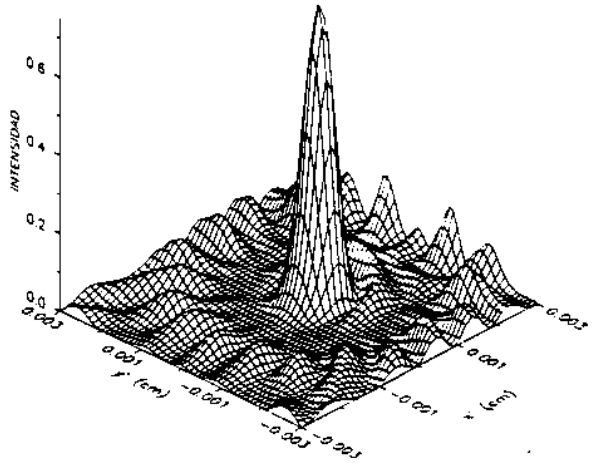
Método II



j x k= 9

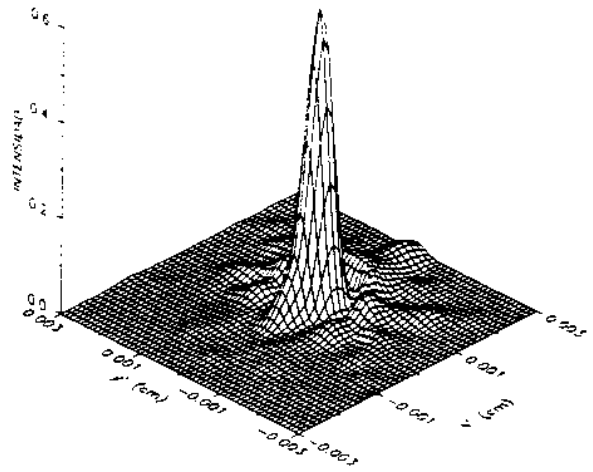


j x k= 25

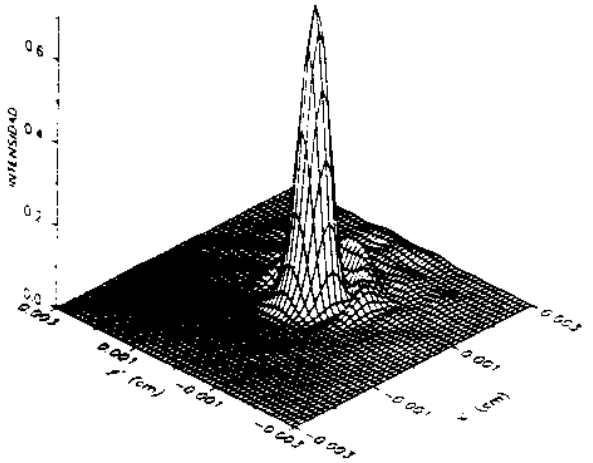


j x k= 100

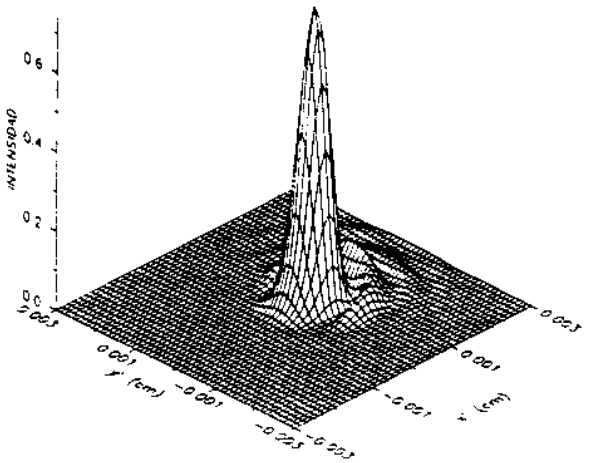
Método III



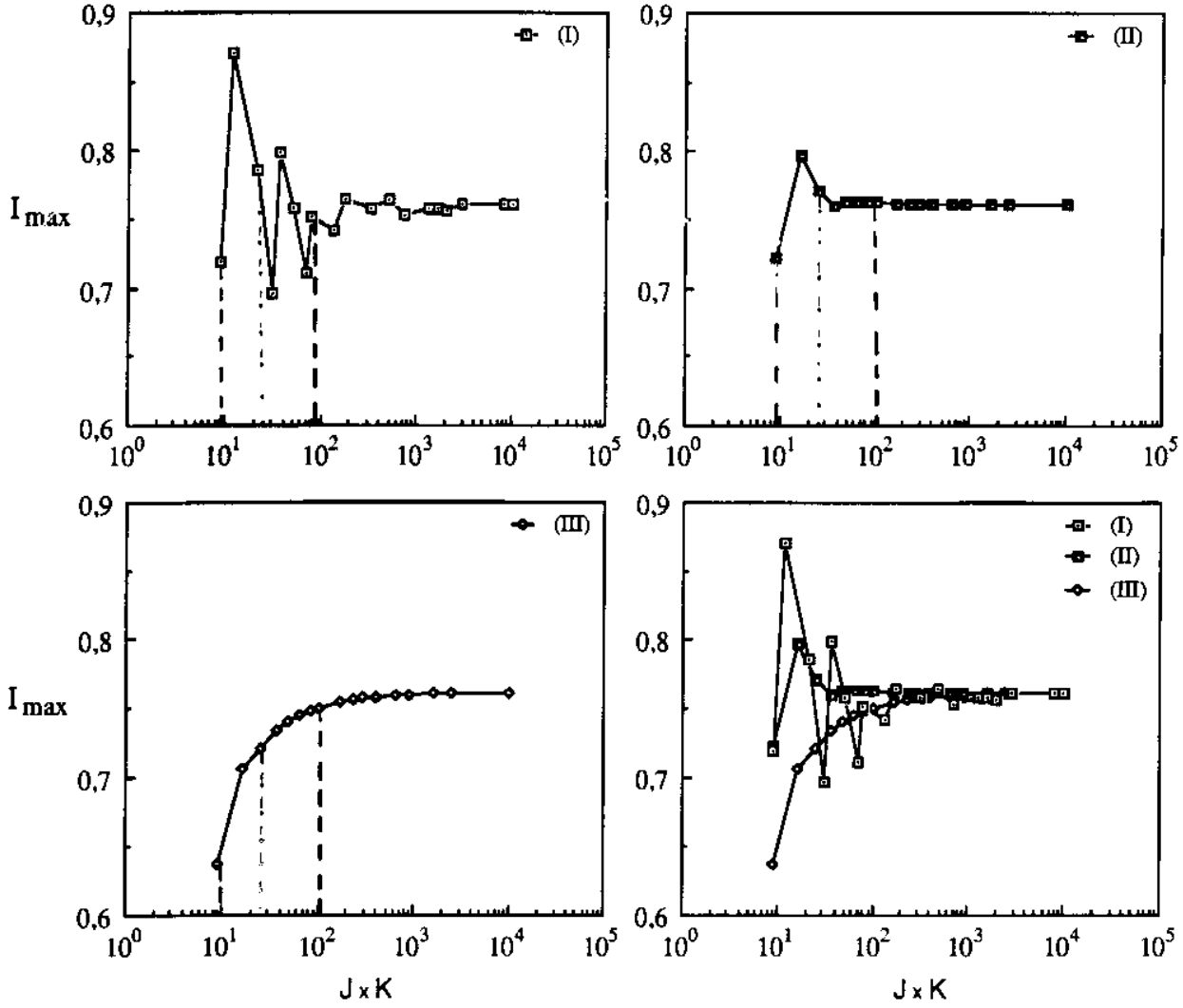
j x k= 9

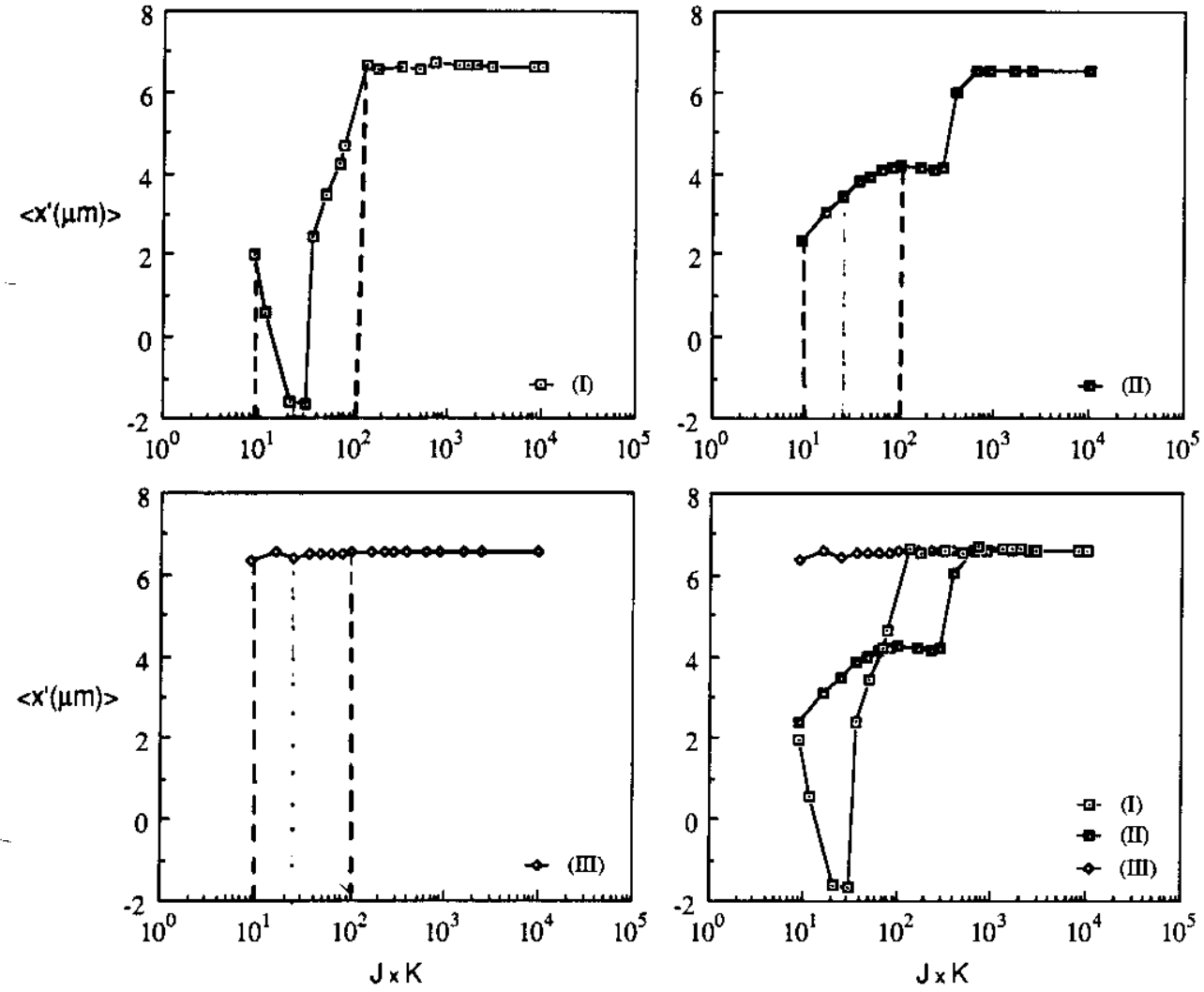


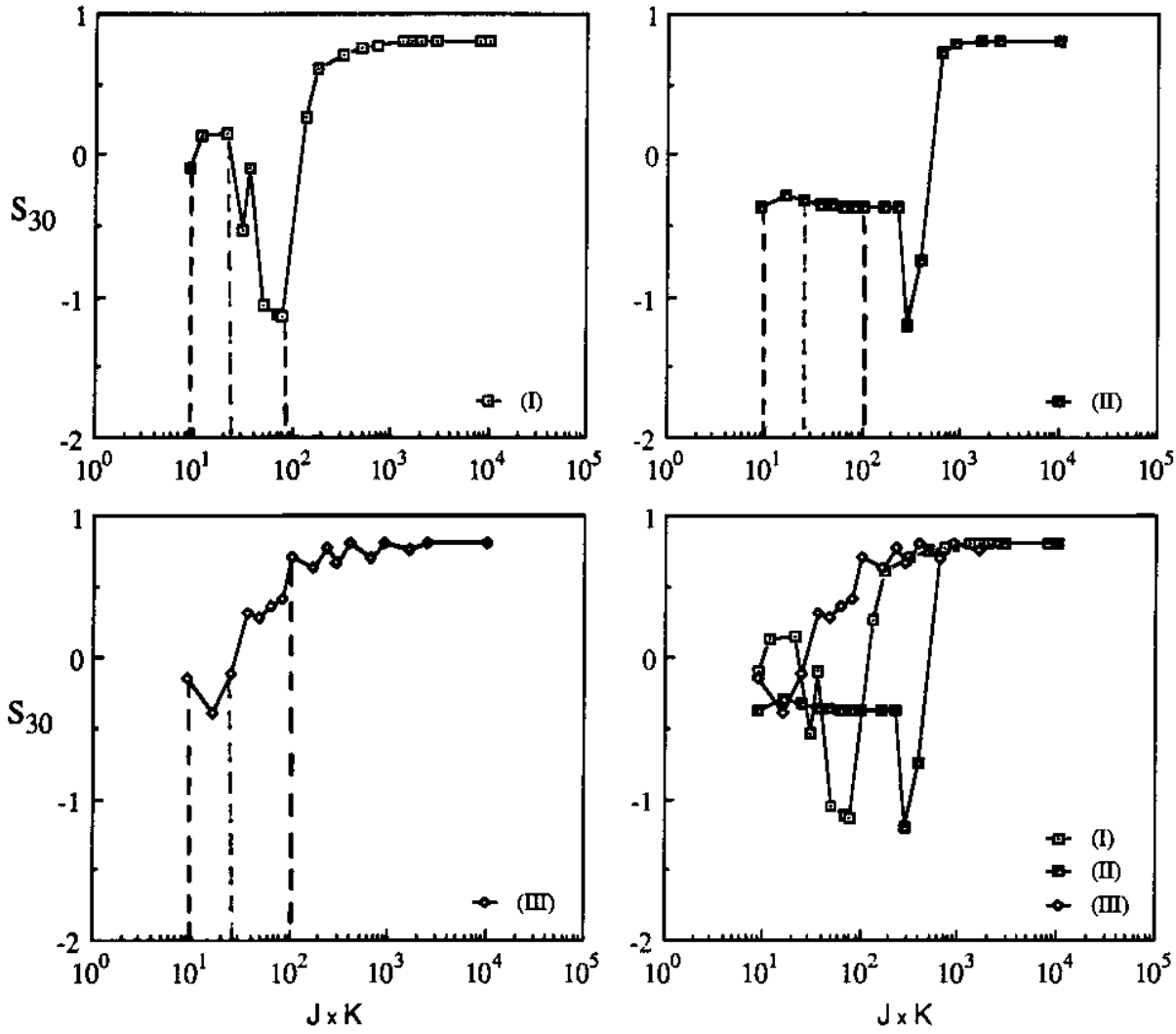
j x k= 25

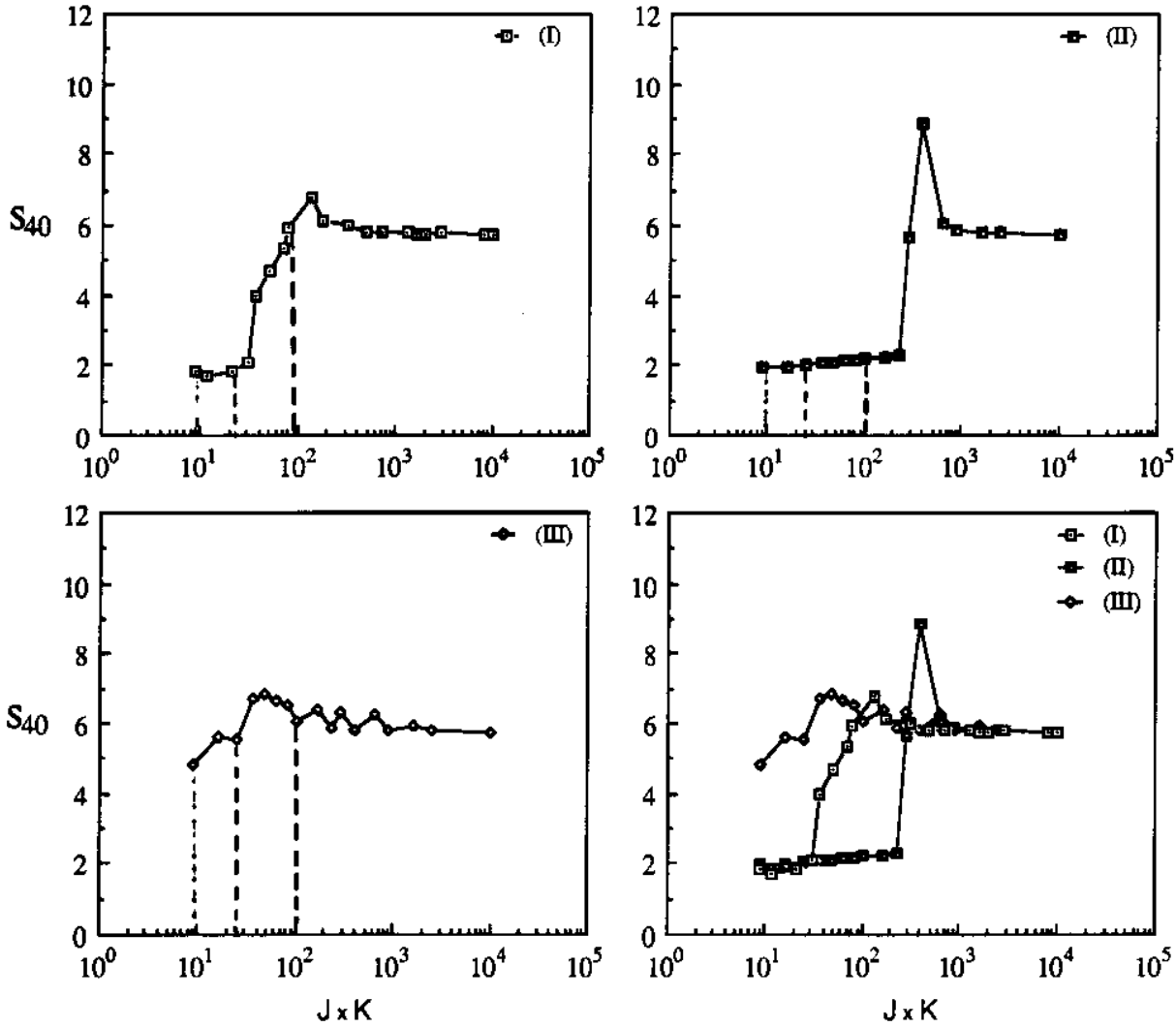


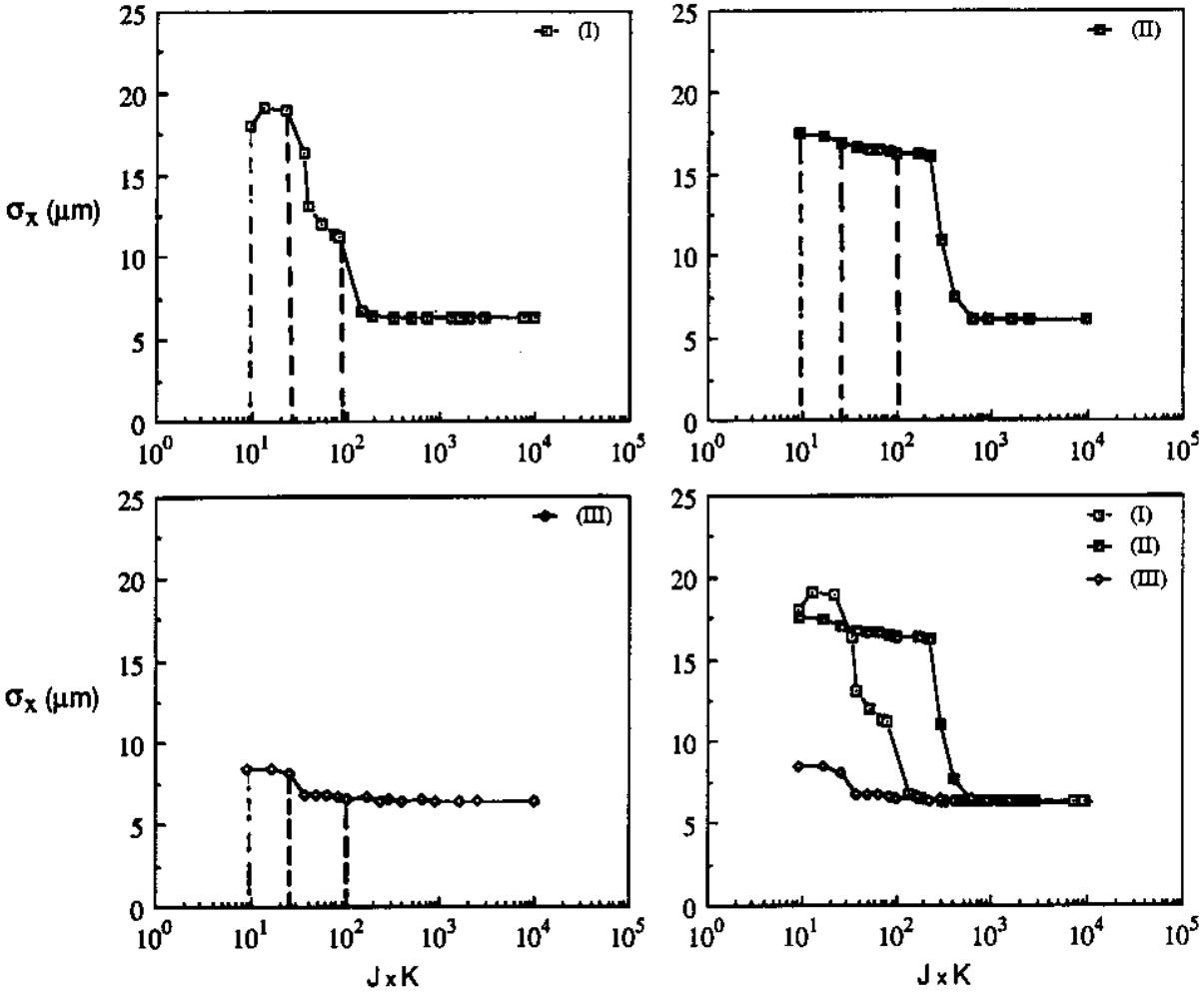
j x k= 100

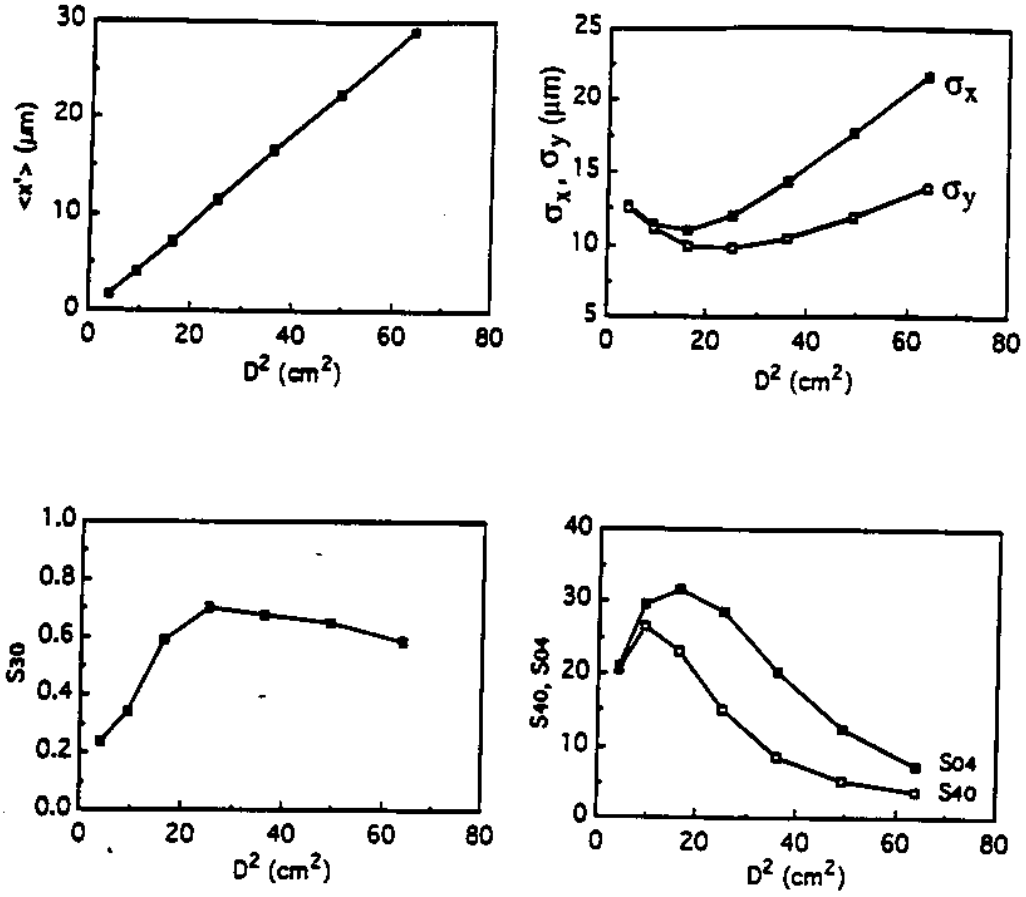












Evaluación de la calidad en sistemas ópticos

PEQUEÑAS ABERRACIONES

Razón de Strehl

No depende del tipo de aberración presente en el sistema óptico

Es función de la *varianza* σ^2_Δ de la aberración de fase sobre la pupila *S*

$$I(z') \approx 1 - \sigma^2_\Delta(z')$$

$$\sigma^2_\Delta(z') = \langle\Delta^2\rangle - \langle\Delta\rangle^2$$

$$\langle\Delta^n\rangle = \iint_S \Delta^n(x,y;0,0,z')\,dx\,dy$$

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

- Irradiancia axial máxima implica que la varianza debe ser mínima.

- El punto de irradiancia axial máxima recibe el nombre de **foco de difracción** y, para pequeñas aberraciones, sólo hay uno.

- En este caso se elige el **mejor plano imagen** como aquél que tiene la irradiancia axial máxima y, por tanto, la varianza mínima: El mejor plano imagen contiene al foco de difracción

¿Qué sucede si las aberraciones son mayores?

⬇

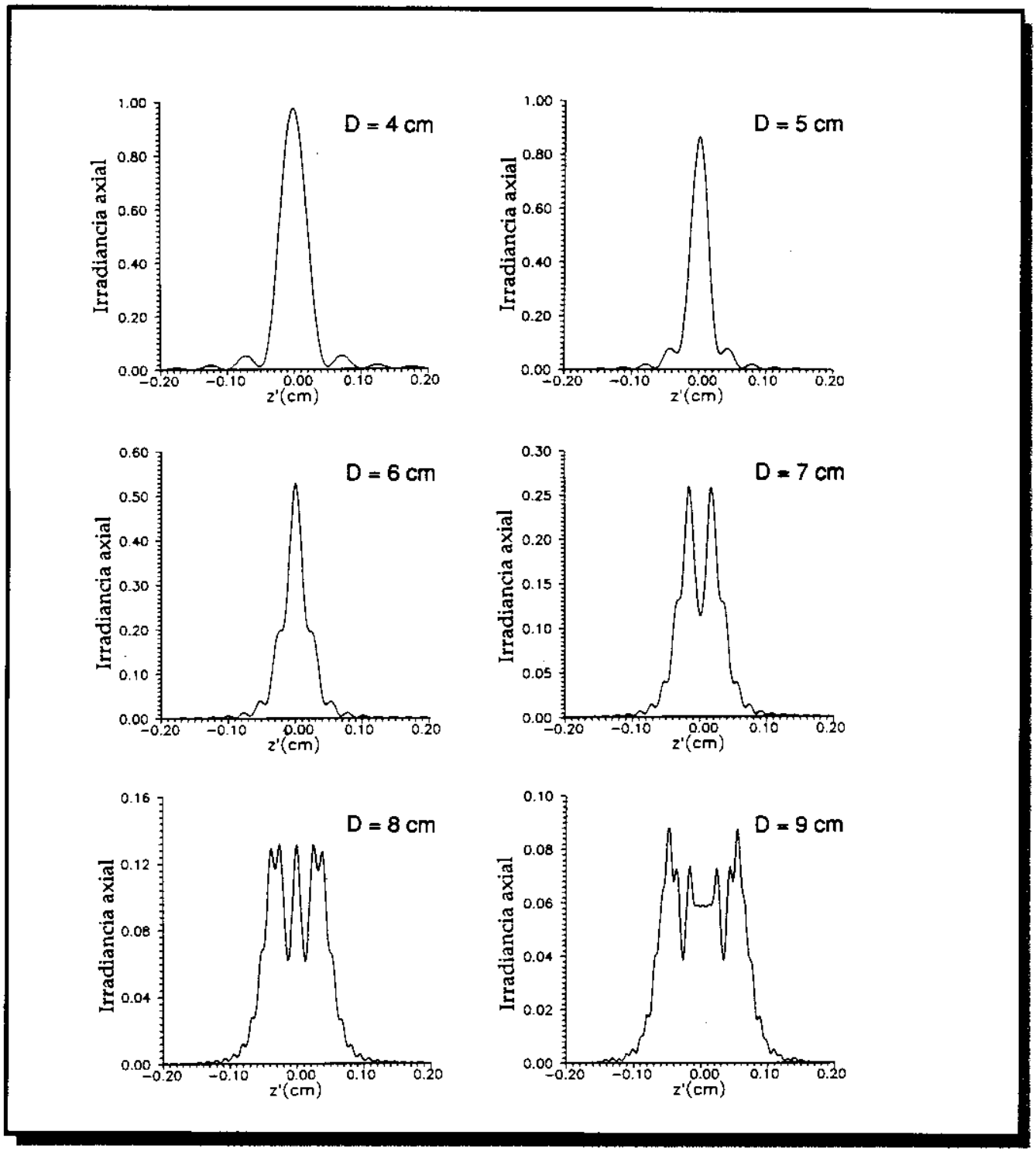
Situación frecuente en los EOHs

⬇

Pueden existir varios focos de difracción

(con idéntica irradiancia axial máxima)

EOH en eje con aberración esférica y desenfoque



Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

Entropía y calidad de imagen

- El concepto de **entropía** puede utilizarse para localizar regiones en las que su valor es extremal: Tienen interés desde el punto de vista óptico.

- La entropía aumenta conforme las aberraciones se incrementan.

- Existe un **valor mínimo de la entropía** correspondiente al plano gaussiano en ausencia de aberraciones.

- Utilización de una función **entropía** para determinar la **posición del plano de mejor imagen** en elementos ópticos holográficos.

- Esta función es de gran utilidad, en particular cuando hay más de un foco de difracción.

- Se utiliza una función entropía similar a la considerada en **Teoría de la Información**.

Distribuciones de intensidad $I(x',y';z')$ en planos del espacio imagen (convenientemente normalizadas)

↓

Función densidad de probabilidad $P(x',y';z')$

↓

A cada plano imagen se le asocia un valor de $P(x',y';z')$

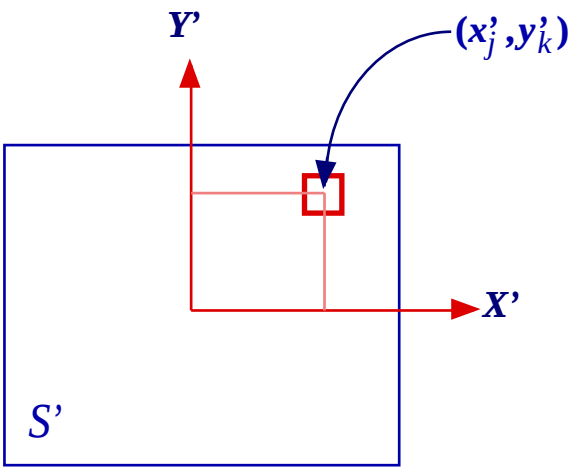
↓

Cada plano imagen está caracterizado por un valor de la entropía $H(z')$

Función densidad de probabilidad, *P*

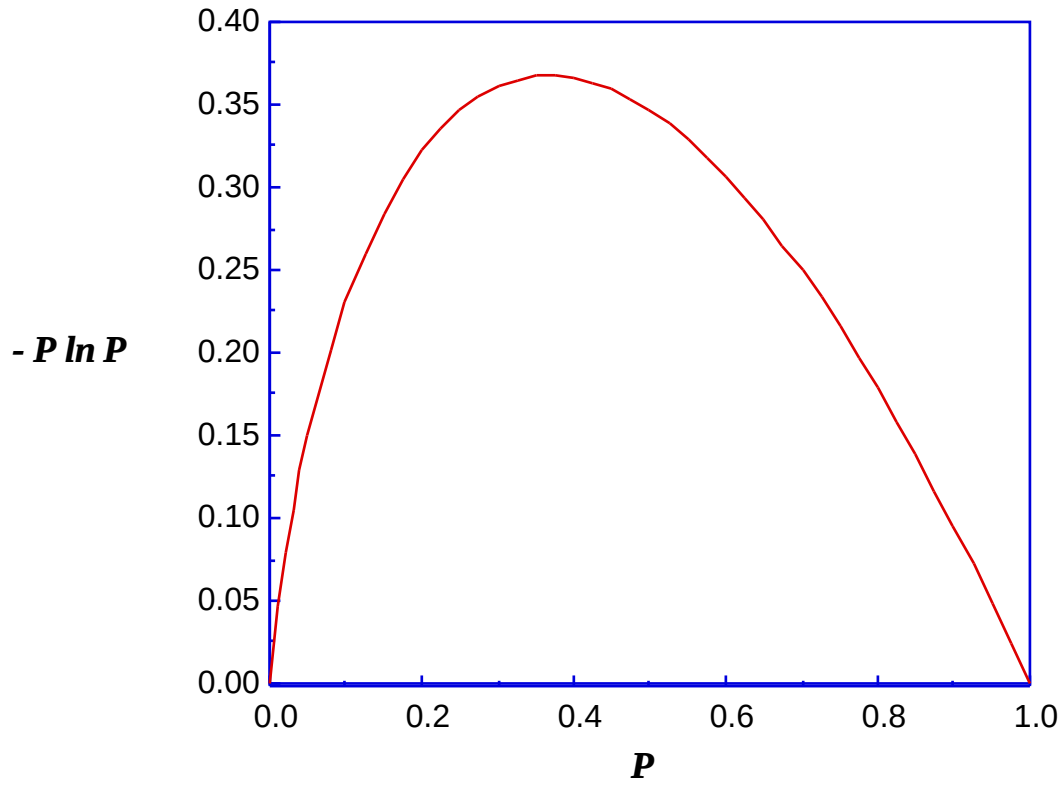
$$P(x'_j, y'_k; z') = \frac{I(x'_j, y'_k; z')}{\sum_{m=1}^{J} \sum_{n=1}^{K} I(x'_m, y'_n; z')}$$

- Región finita de área S' en el plano imagen.
- La región S' se divide en $N = J \times K$ celdas idénticas.
- (x'_j, y'_k) se toma en el centro geométrico de cada celda.



Función entropía, *H*

$$H(z') = -\sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} P(x'_j, y'_k; z') \ln [P(x'_j, y'_k; z')]$$



PROPIEDADES DE LA ENTROPÍA:

- $H \geq 0$

- H es **mínima** y su valor es $H = 0$ cuando todas las probabilidades son cero menos una que vale la unidad (**la imagen es un punto**).

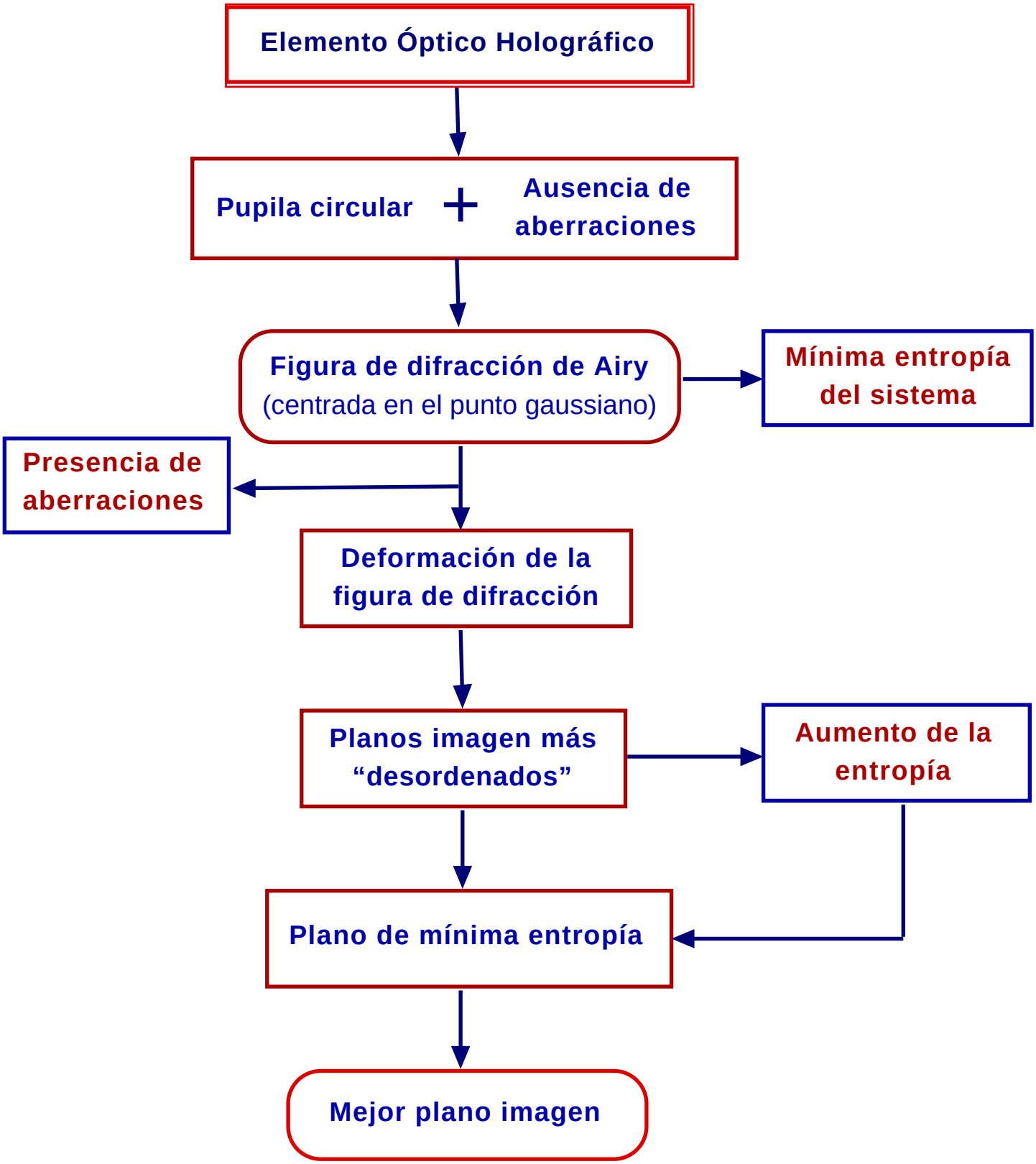
- Para un número de celdas N, la entropía H es **máxima** y de valor $H = \ln N$ cuando todas las probabilidades son iguales (**haz colimado**): $P = 1/N$

- Cualquier cambio que tienda a **equalizar** la distribución de probabilidad da lugar a un incremento de la entropía.

- Cuanto más **"desordenada"** sea la distribución de intensidades, mayor será su entropía.

- La entropía puede interpretarse como una medida de la manera en que la energía está repartida en el histograma de una distribución de intensidad en cada plano imagen.

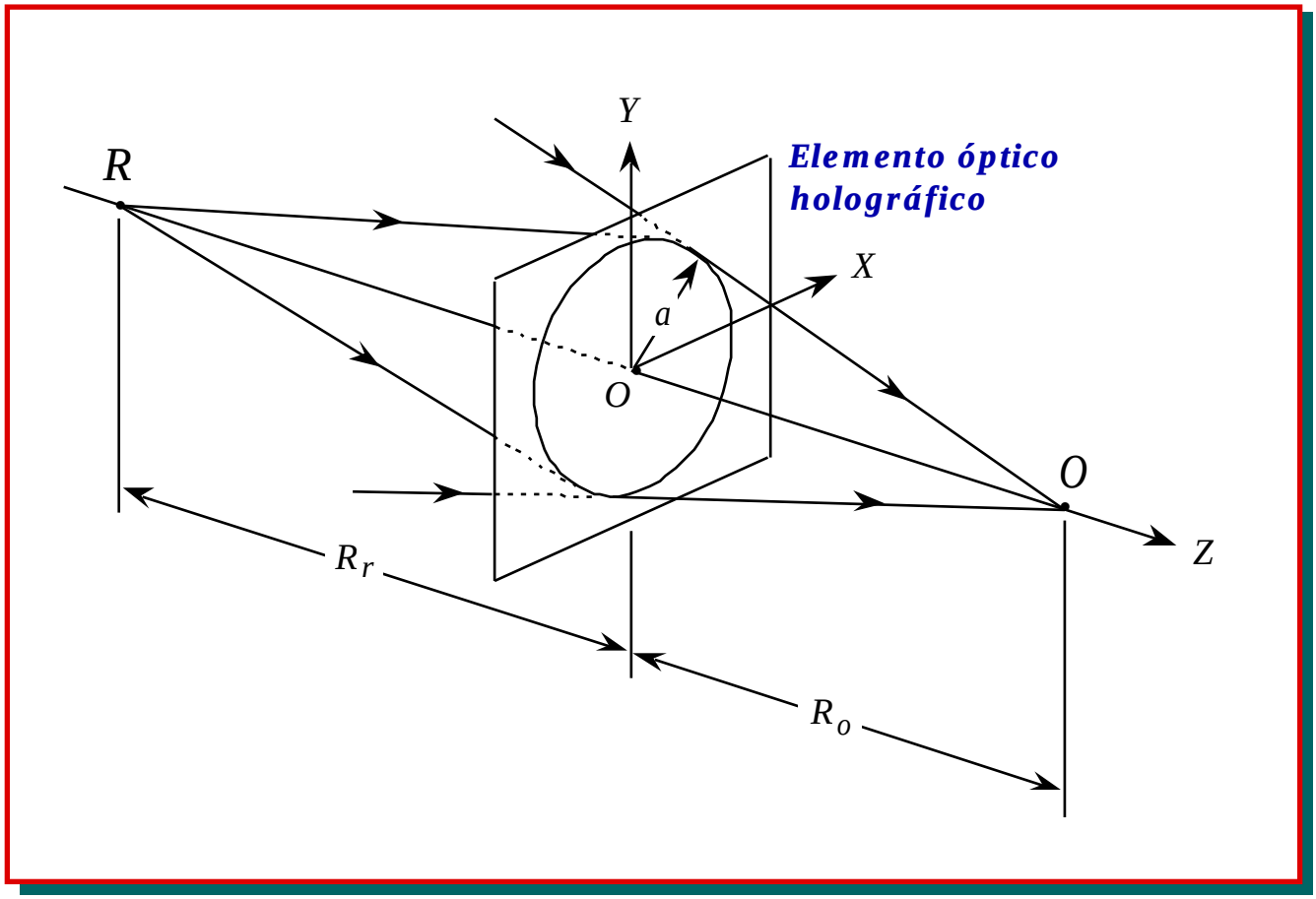
- Estamos interesados en obtener aquellos planos imagen de **entropía mínima**.



Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

EOH en eje con aberración esférica y desenfoque

GEOMETRÍA DE REGISTRO



$D = 2a = 8\ cm$	$\lambda_r = 633\ nm$
$R_r = -120\ cm$	$R_c = \infty$
$R_o = 60\ cm$	$\alpha_q = \beta_q = 0$

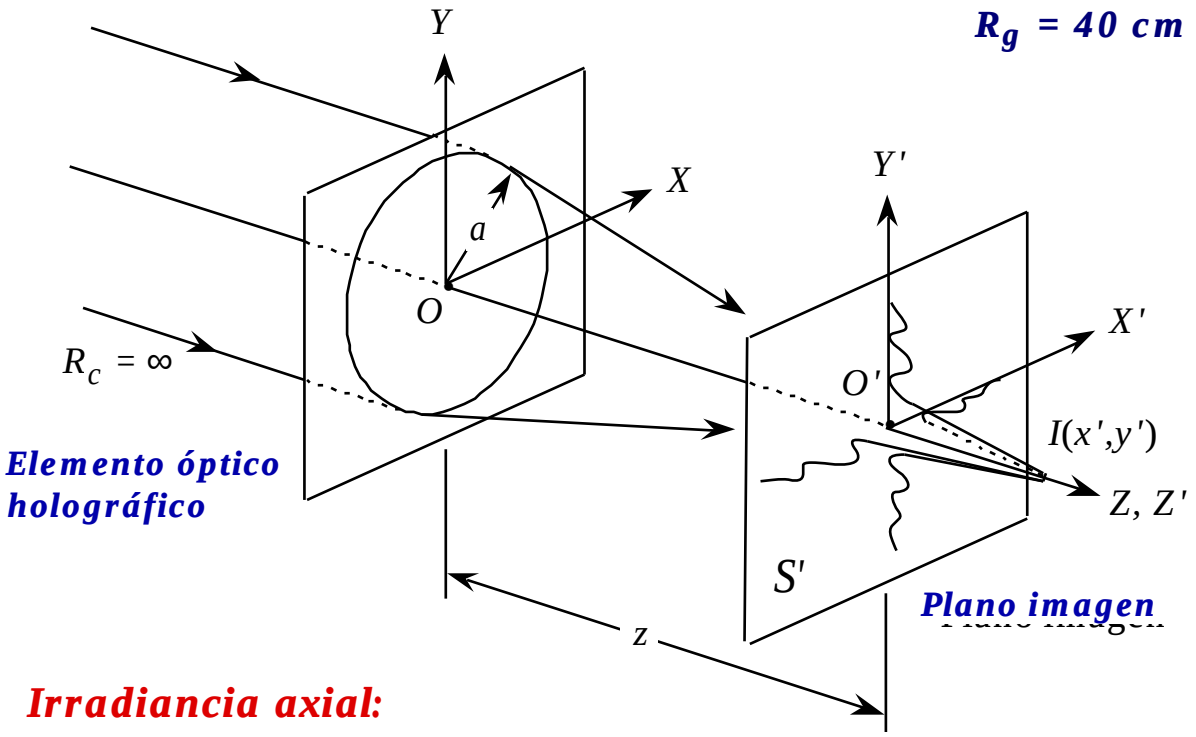
Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

GEOMETRÍA DE RECONSTRUCCIÓN

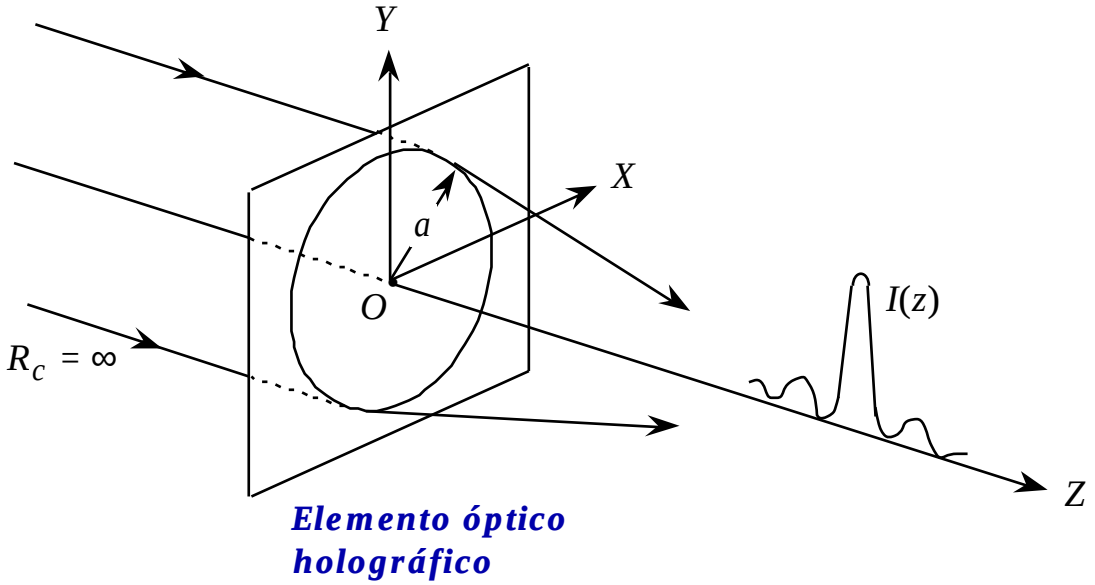
Distribución de intensidades (PSF):

$\lambda_c = 633\ nm$

$R_g = 40\ cm$



Irradiancia axial:



Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

CÁLCULO: ➢ ***Distribución de intensidades en planos imagen***

➢ ***Entropía a lo largo del eje Z***

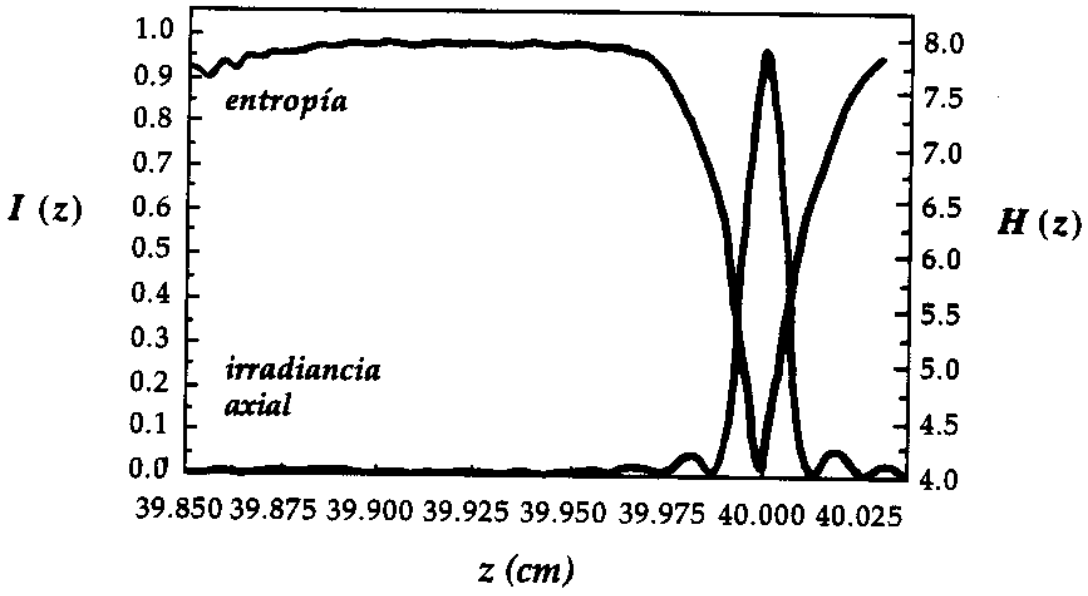
PLANO IMAGEN (S'): ***0.05 mm x 0.05 mm***

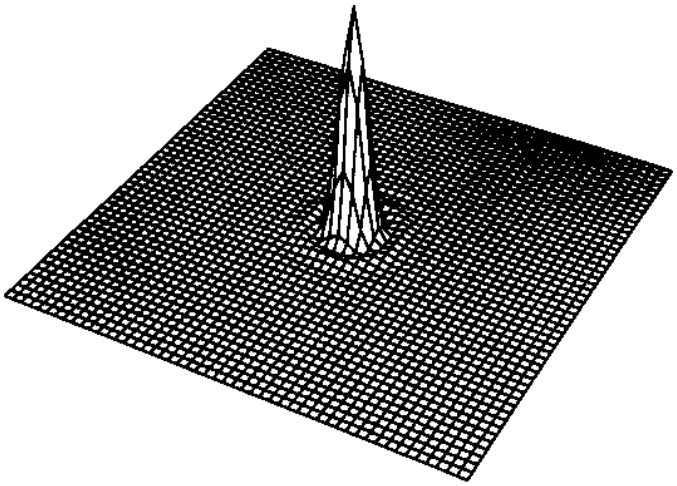
N = 51 x 51 celdas

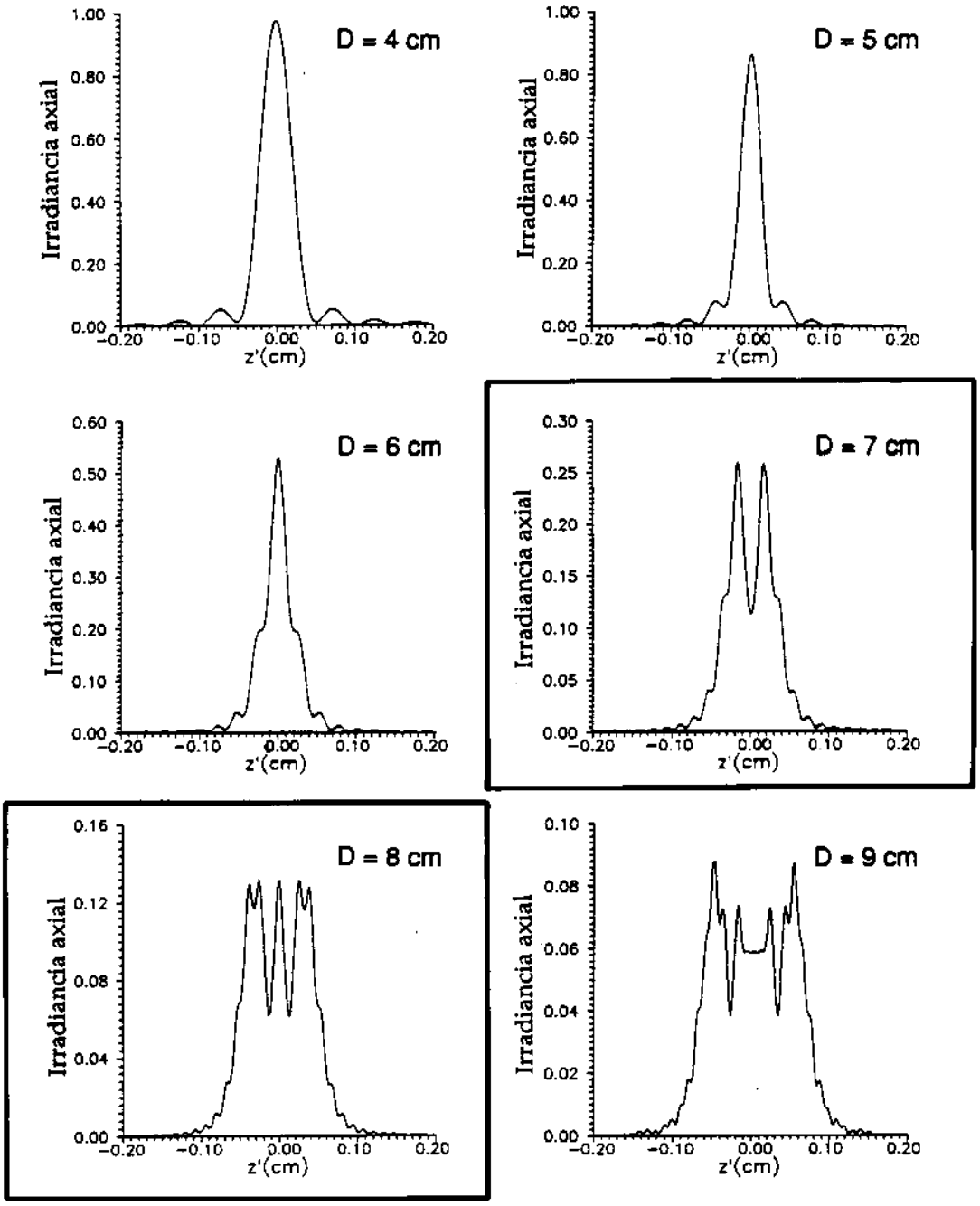
MÁXIMA ENTROPÍA: $H_{máx} = \ln N = \ln 2601 = 7.86$

$H_{mín}$ ➠ ***plano imagen gaussiano sin aberraciones***

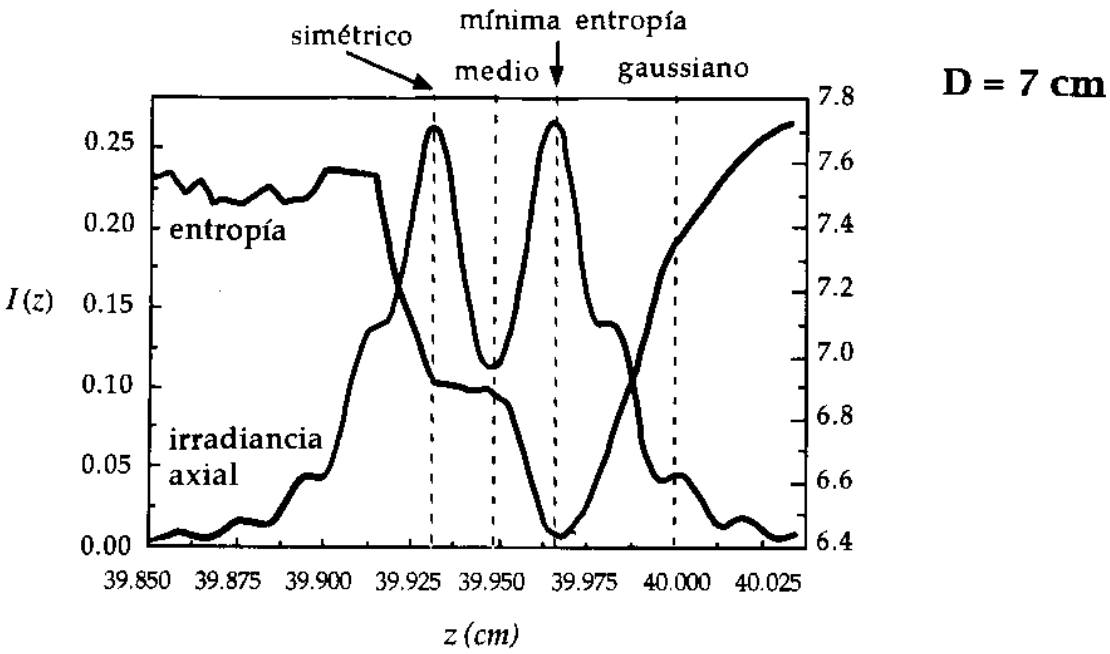
EOH sin aberraciones (D = 8 cm)

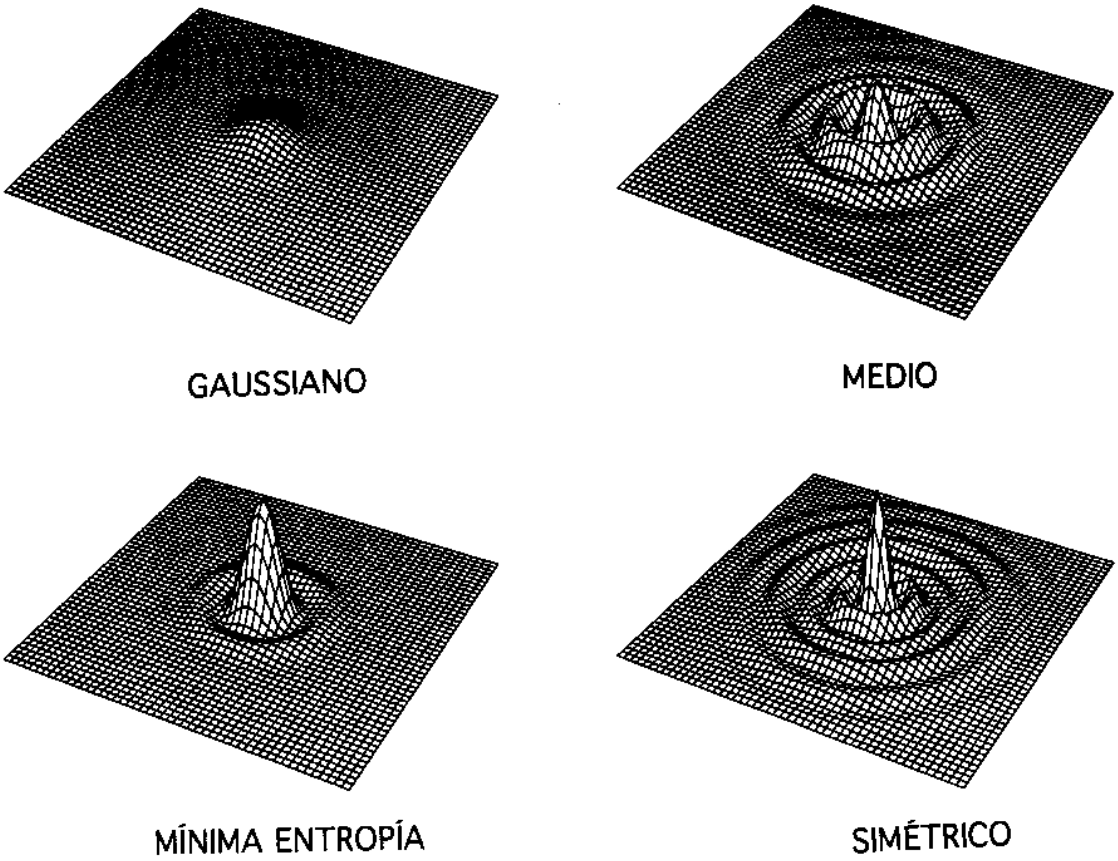




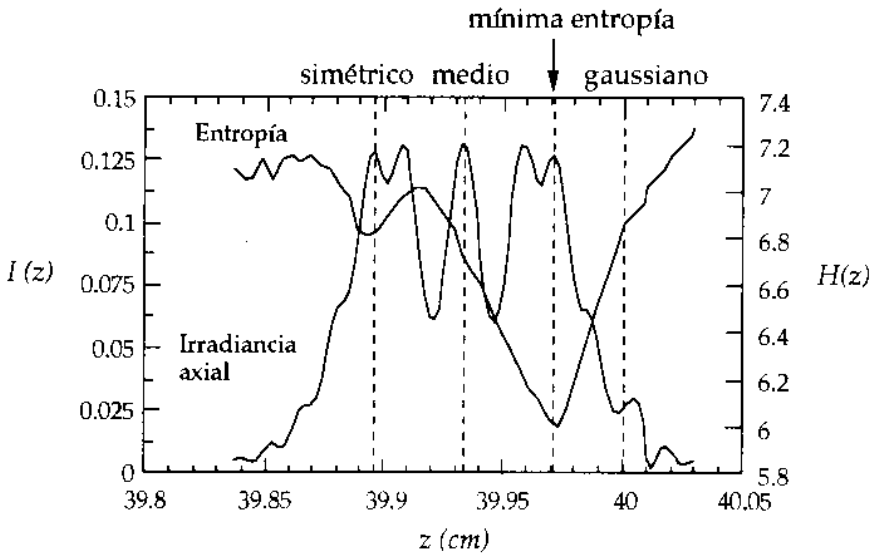


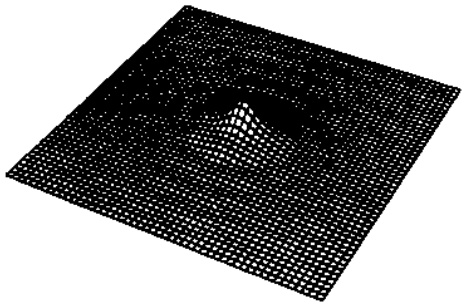
Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).



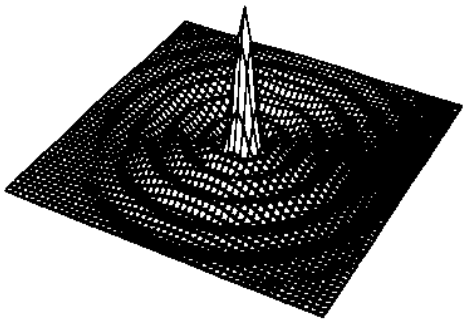


Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional. Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

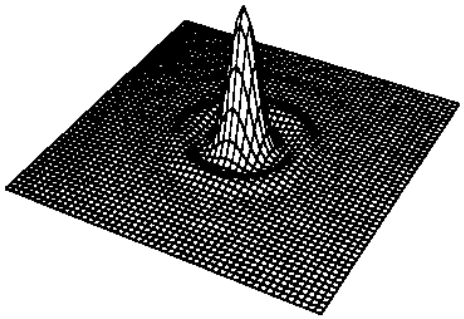




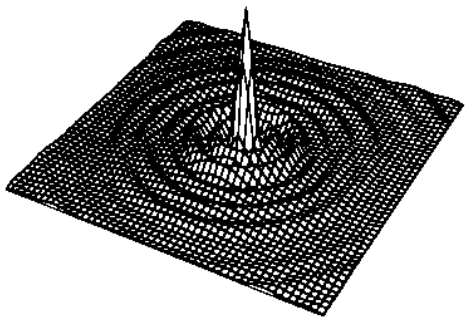
GAUSSIANO



MEDIO

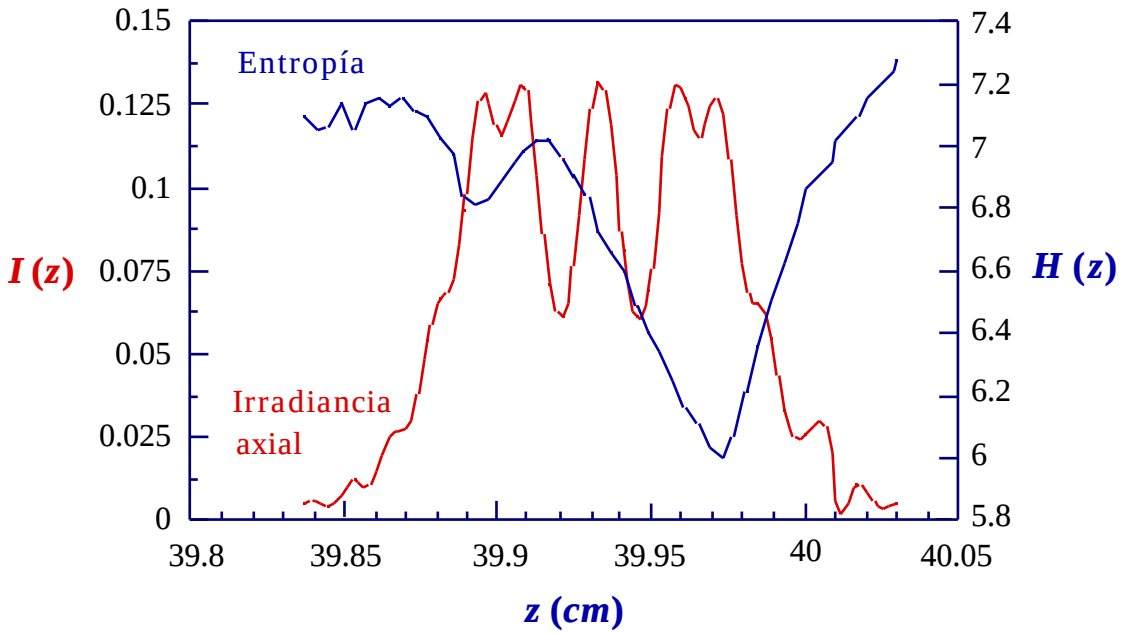


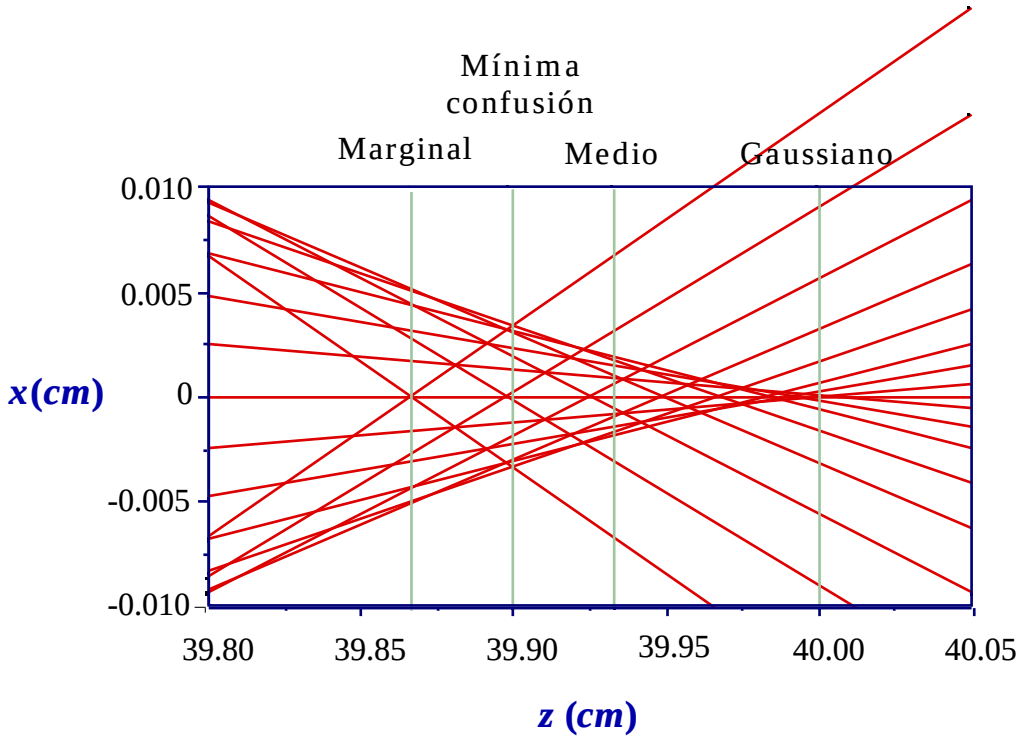
MÍNIMA ENTROPÍA



SIMÉTRICO

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).





Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

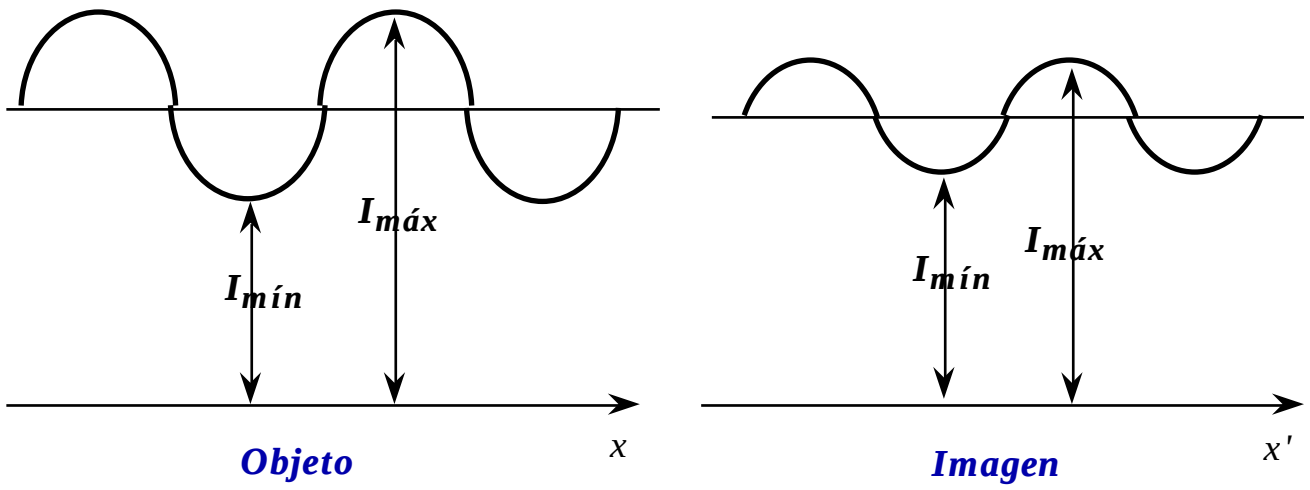
FUNCIÓN DE TRANSMISIÓN DE LA MODULACIÓN (MTF)

$$MTF(\nu_x, \nu_y) = \frac{M_{imagen}(\nu_x, \nu_y)}{M_{objeto}(\nu_x, \nu_y)}$$

- M es la **modulación** y es una medida de la visibilidad o contraste:

$$M = \frac{I_{máx} - I_{mín}}{I_{máx} + I_{mín}}$$

Entrada armónica y salida resultante:



Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

- La MTF es función de las **frecuencias espaciales:**

$$\nu_x = \frac{x}{\lambda_c z} \qquad \nu_y = \frac{y}{\lambda_c z}$$

- **Frecuencia de corte del sistema** (para D = 8 cm: 158 líneas/mm)

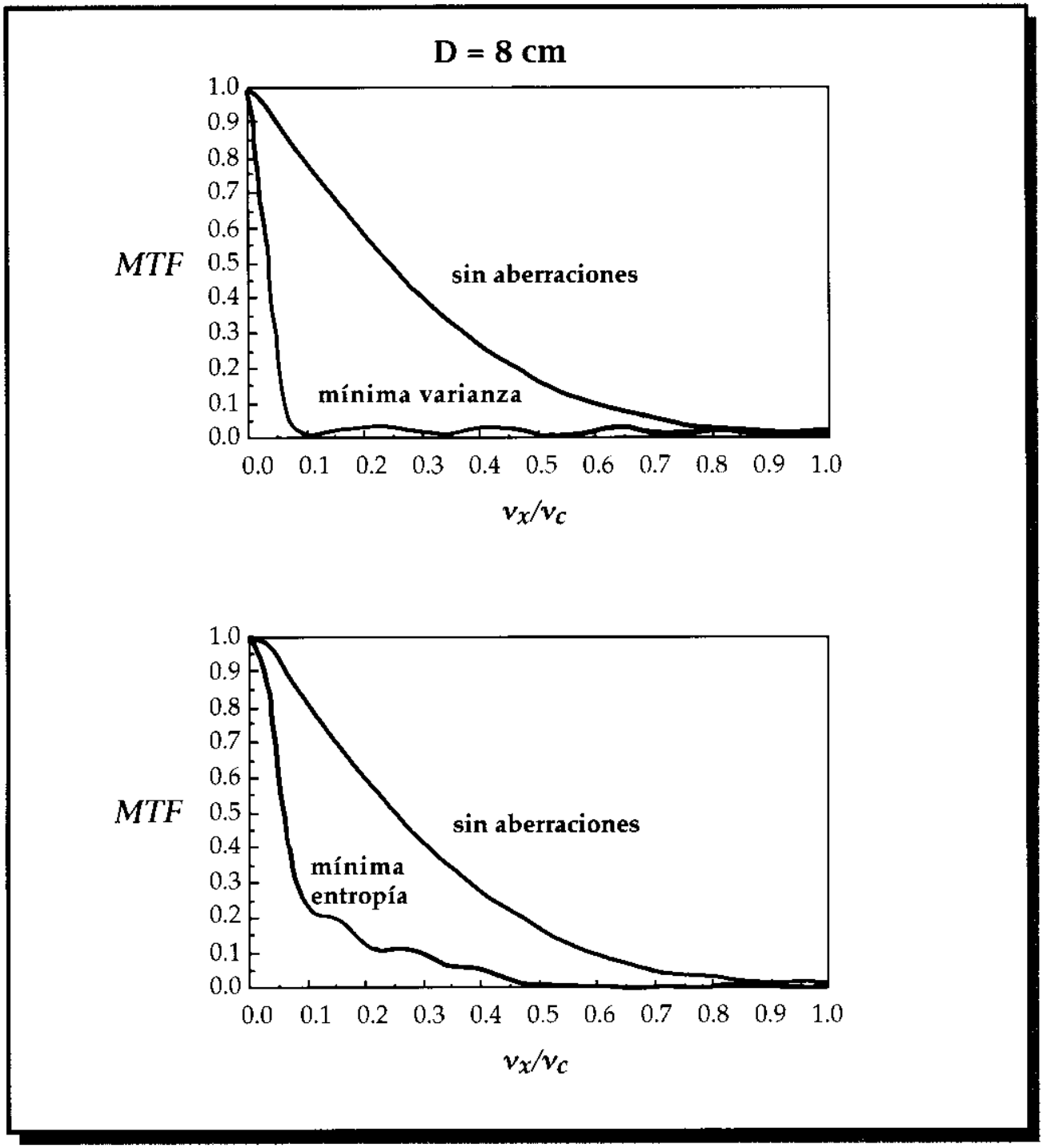
$$\boxed{\nu_c = \frac{D}{2\lambda_c z}}$$

- La MTF es una medida de la reducción en contraste de la imagen respecto al objeto en función de las frecuencias espaciales.

- La MTF es el módulo al cuadrado de la transformada de Fourier de la PSF.

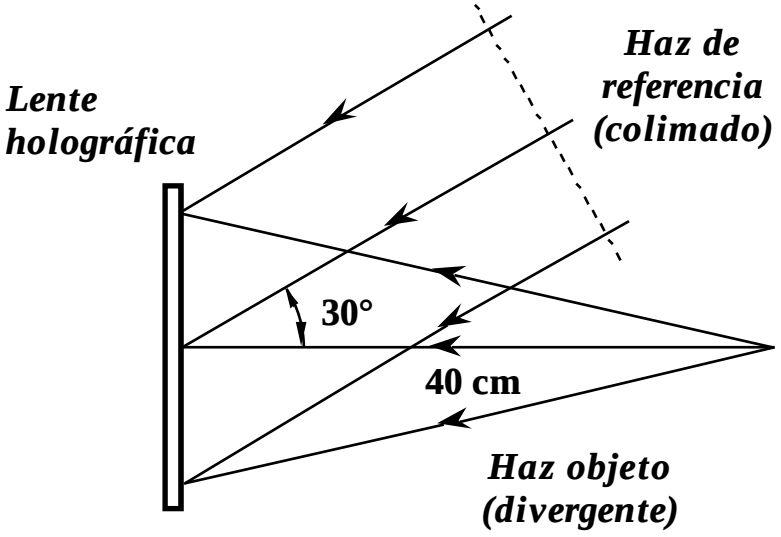
- Las aberraciones ensanchan la PSF, dando lugar a una MTF más estrecha.

- Los valores máximos de la MTF corresponden al sistema óptico sin aberraciones y limitado, por tanto, sólo por difracción.

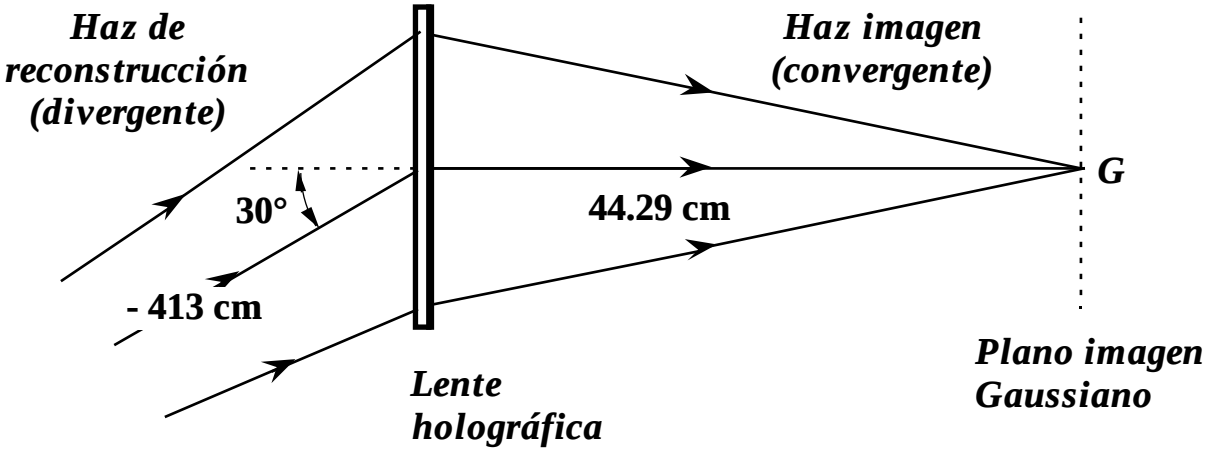


EOH fuera de eje con astigmatismo

GEOMETRÍA DE REGISTRO

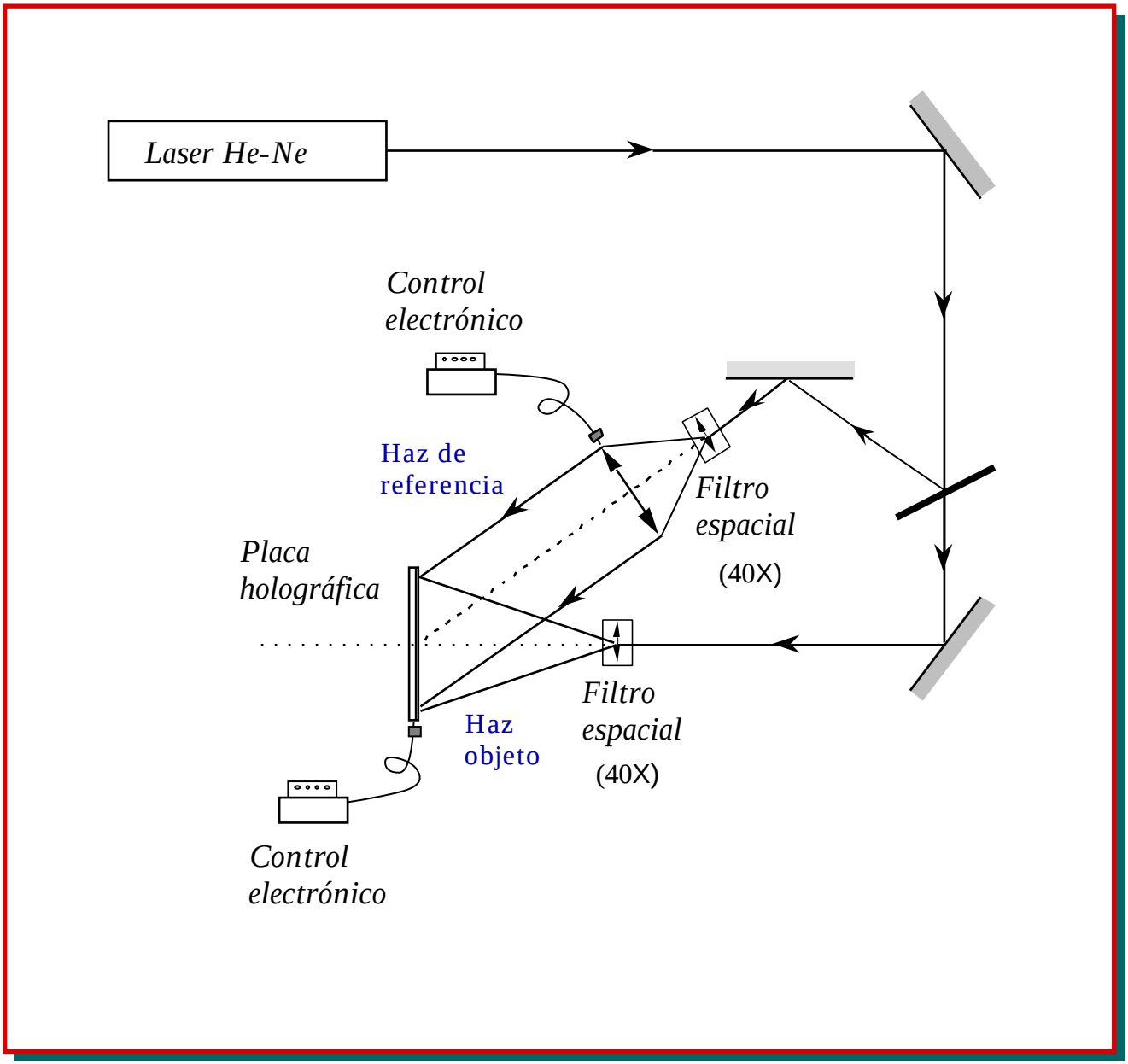


GEOMETRÍA DE RECONSTRUCCIÓN



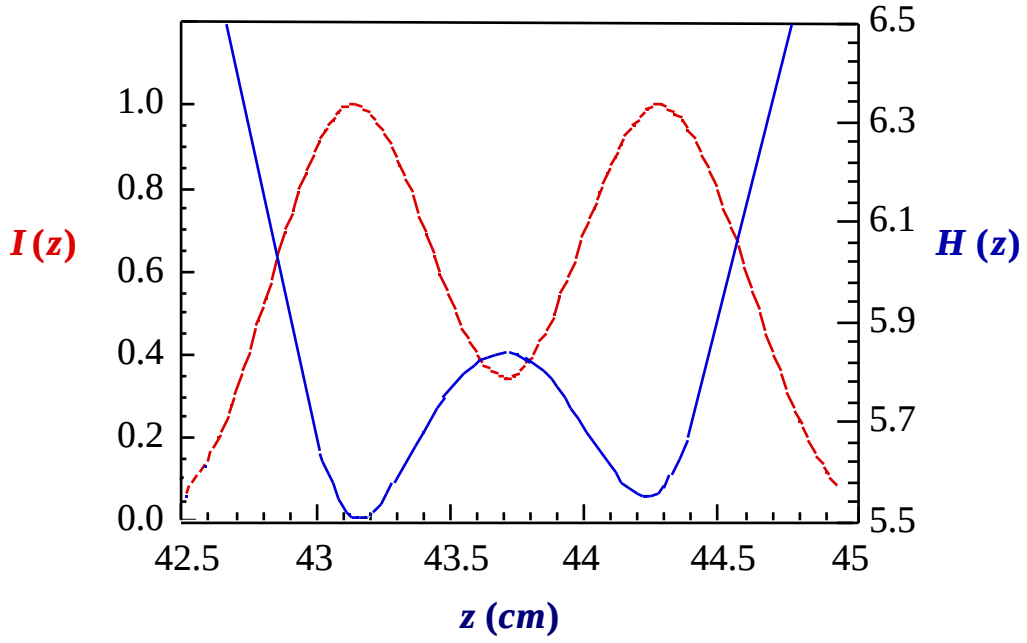
Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

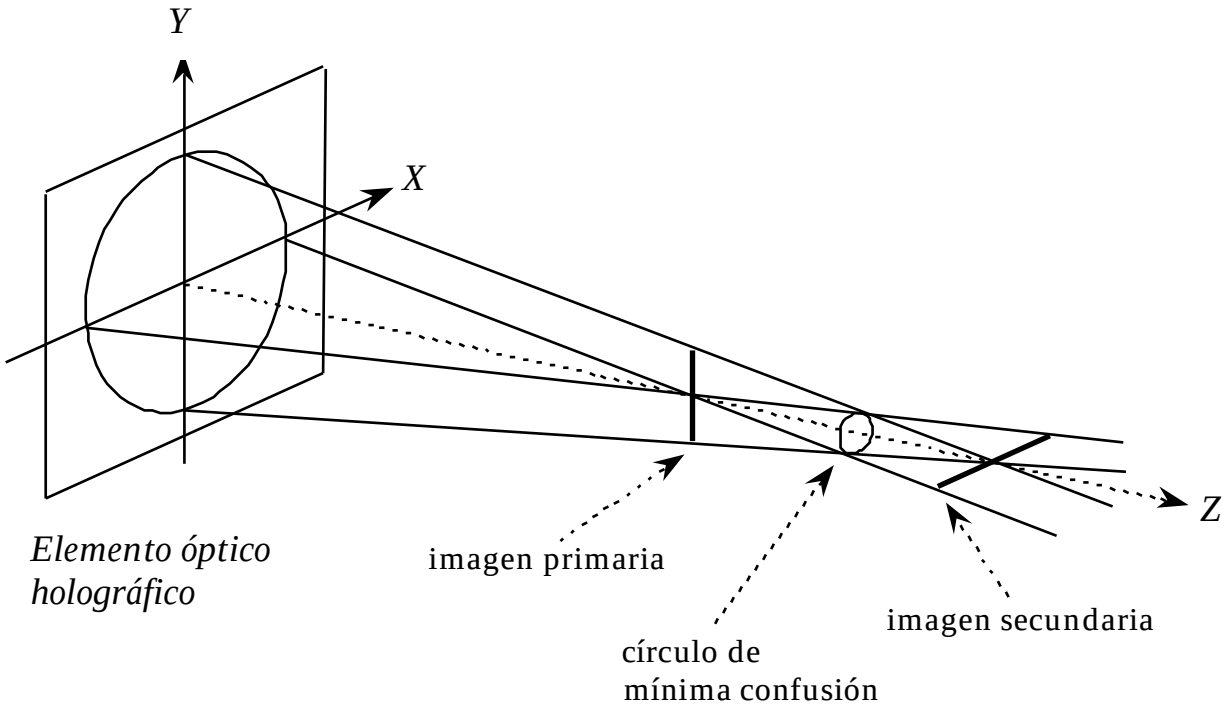
DISPOSITIVO EXPERIMENTAL (REGISTRO)



PLANO IMAGEN (S'): **438.6 µm x 428.4 µm**

N = 51 x 51 celdas



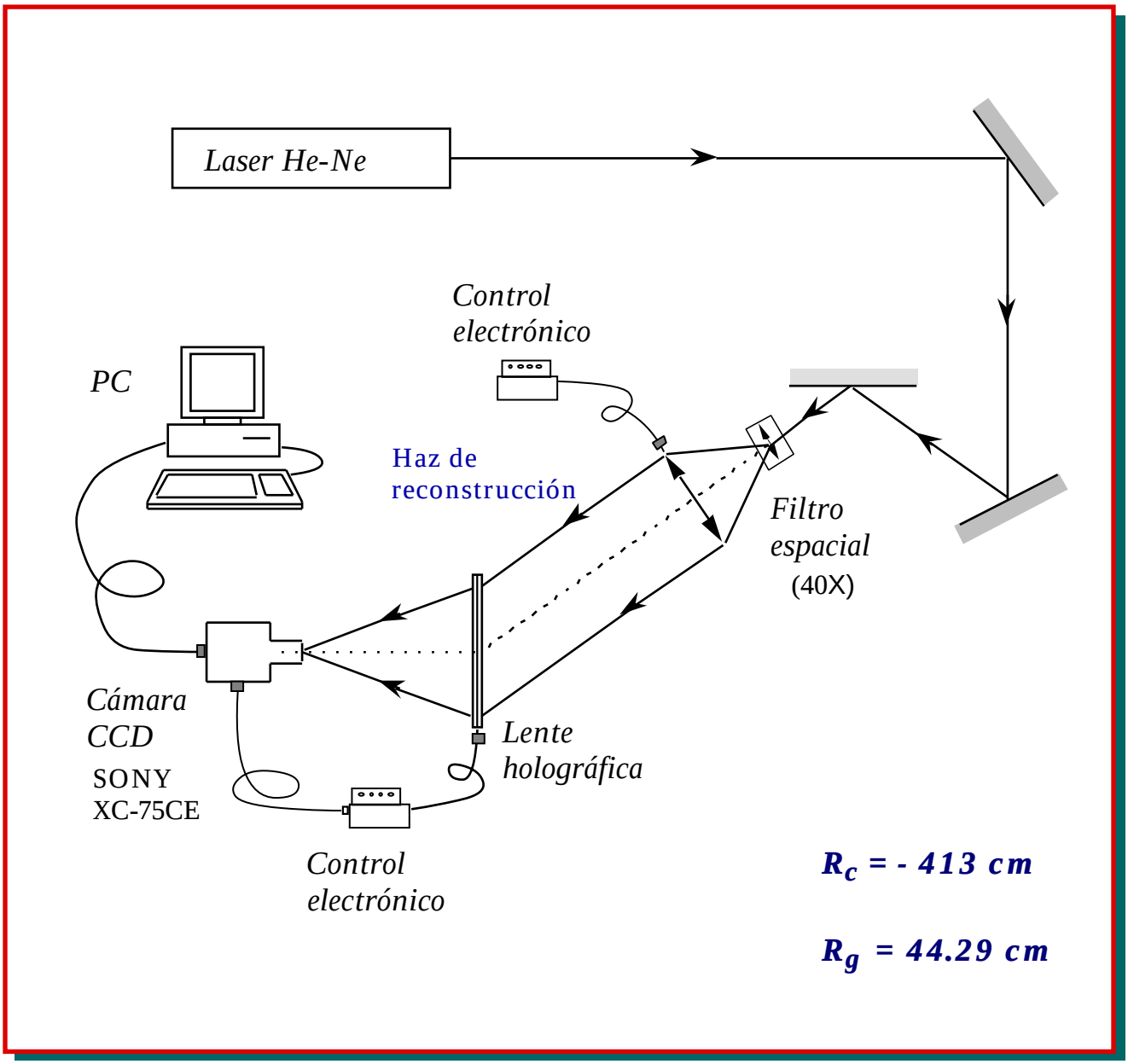


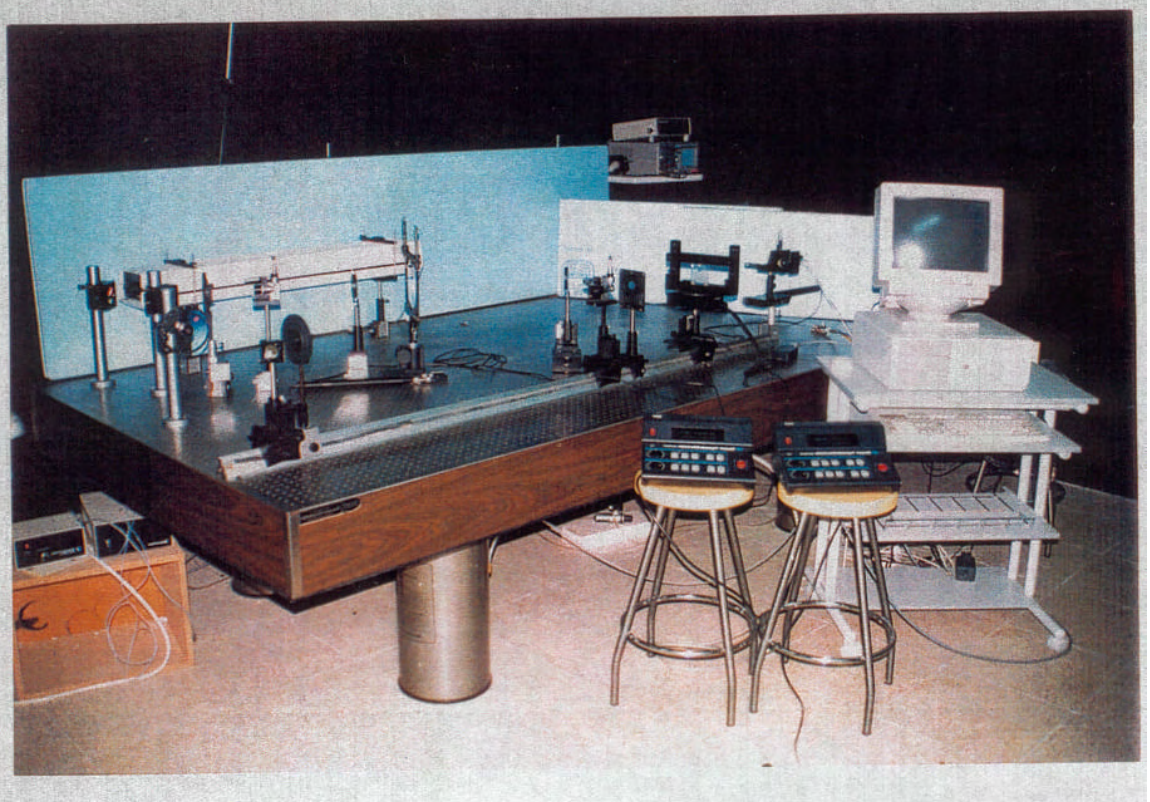
- **Láser He-Ne de 40 mW (λ_r = 633 nm)**
- **Relación de haces 1: 1**
- **Exposición: E = 40 μJ/cm^2**
- **D = 1.045 cm**
- **Emulsión fotográfica Agfa-Gevaert 8E75HD**
- **PROCESADO:**

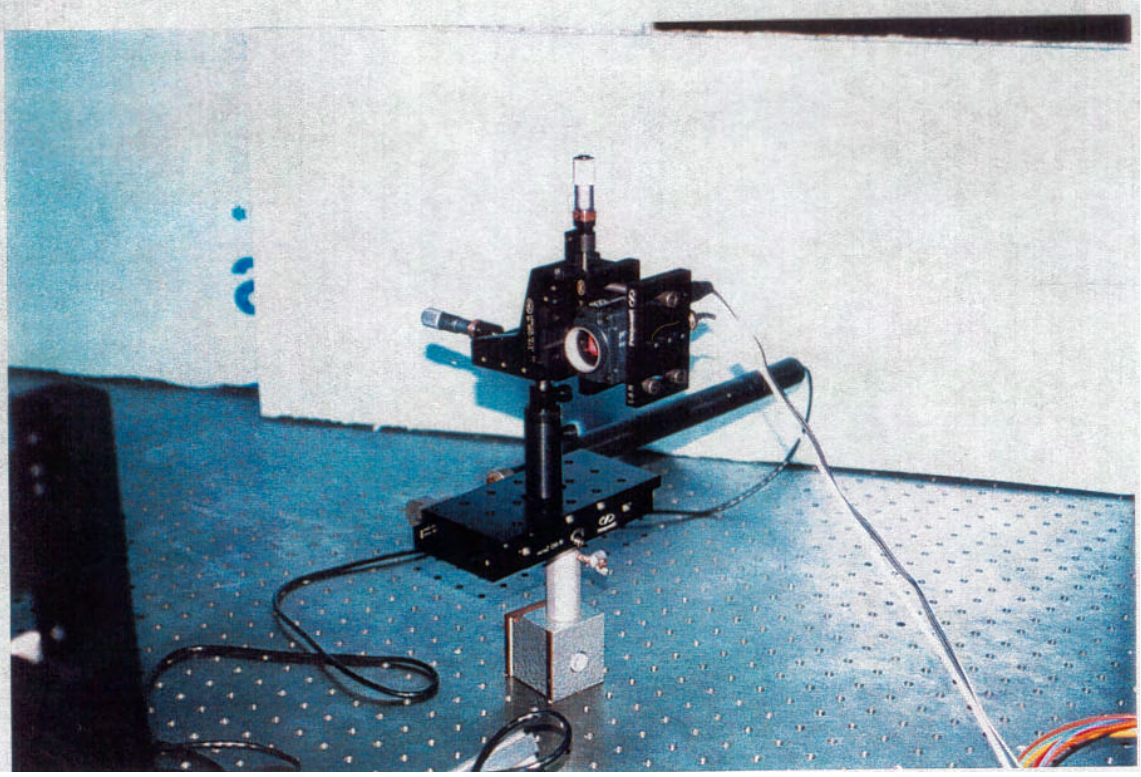
1. Revelador PAACM	20°C	4 minutos
2. Baño de paro		1 minuto
3. Blanqueo R-10	20°C	1 minuto
4. Lavado en agua corriente		1 minuto
5. Secado		

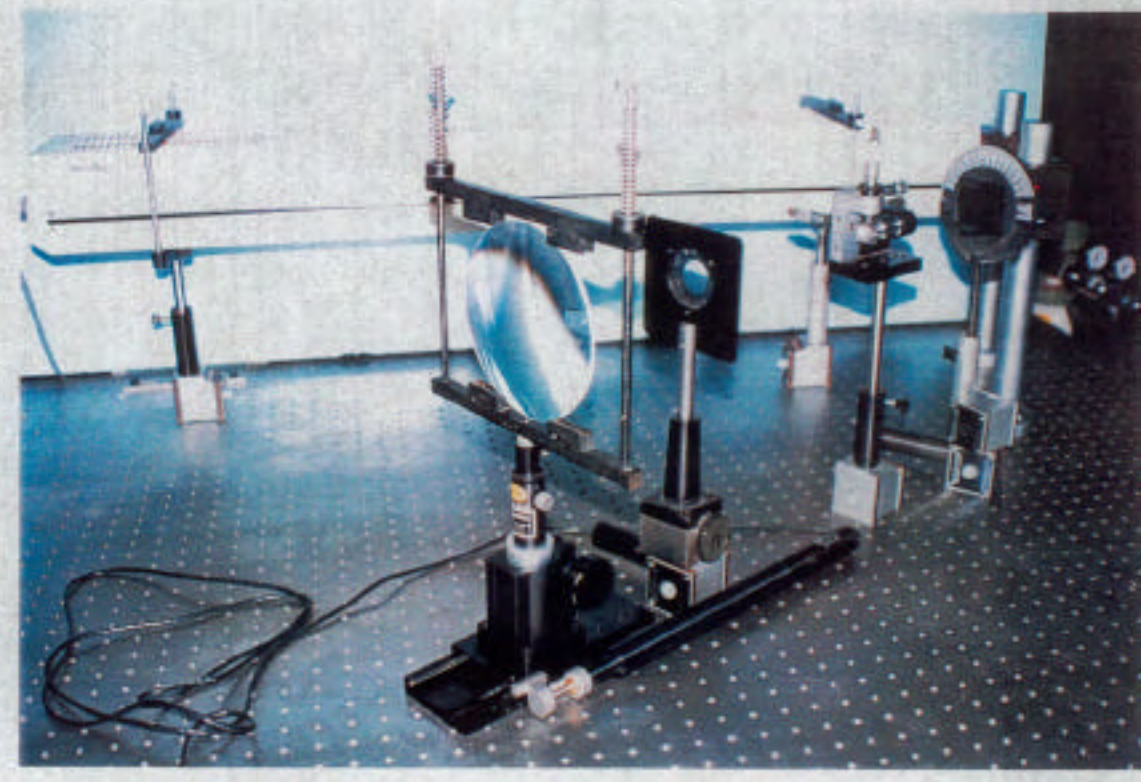
- **Rendimiento en difracción ~70%**

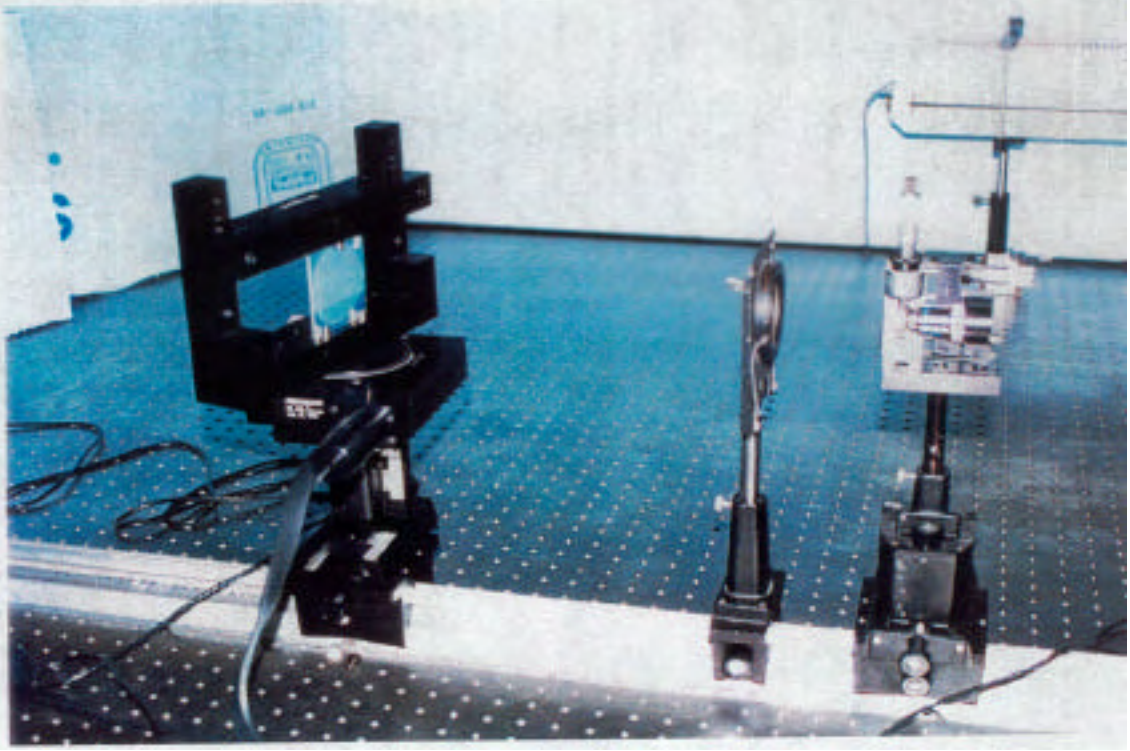
DISPOSITIVO EXPERIMENTAL (RECONSTRUCCIÓN)











- Cámara CCD de resolución 768 x 494 pixels conectada a un ordenador con una tarjeta digitalizadora *Data Translation DT 3851*

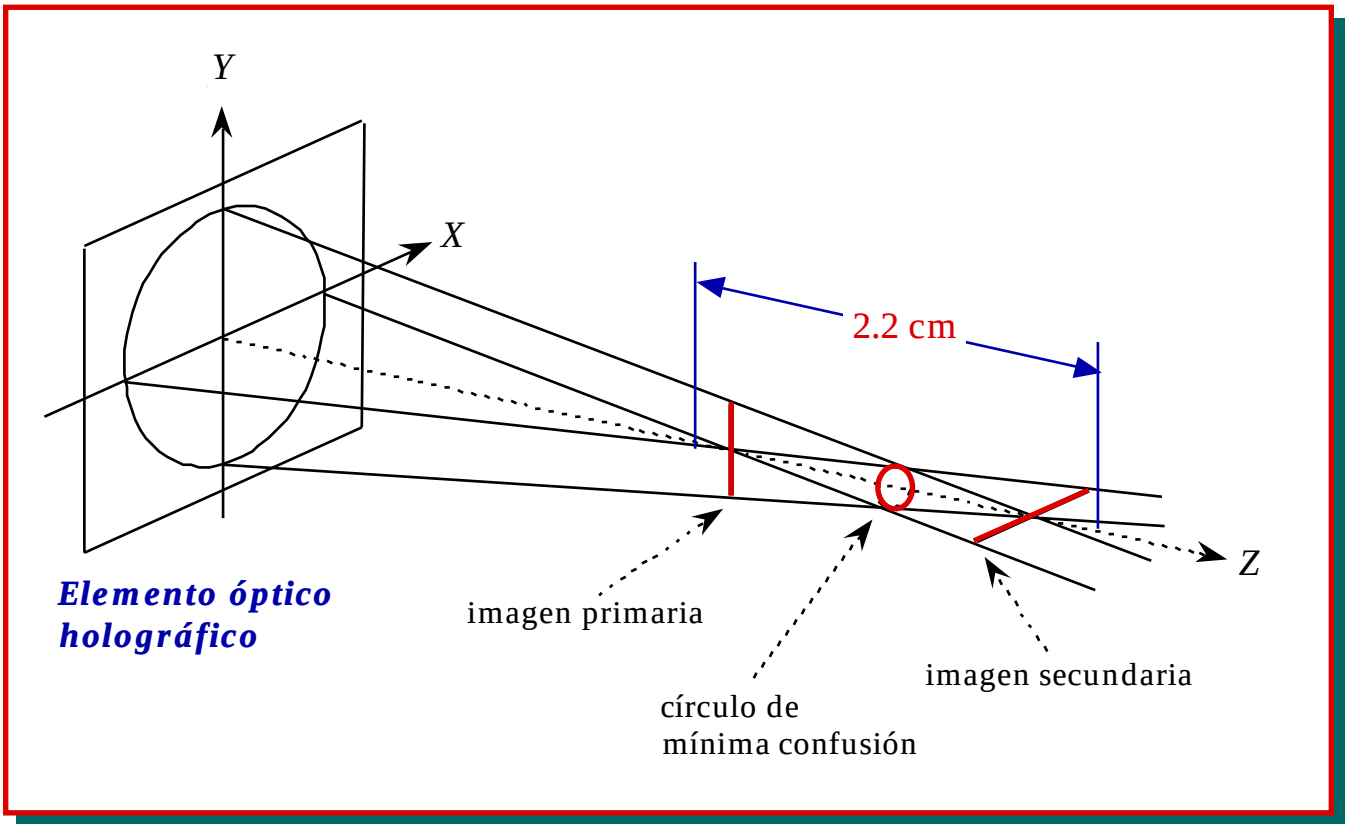
- Tamaño de cada pixel: 8.6 x 8.4 μm^2 (horizontal/vertical)

- Imagen digitalizada con el paquete de software *GLOBAL LAB image*

- 22 imágenes capturadas sobre 2.2 cm del eje óptico de la lente

- Región considerada en cada plano imagen: ***438.6 µm x 428.4 µm***

  N = 51 x 51 celdas



Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

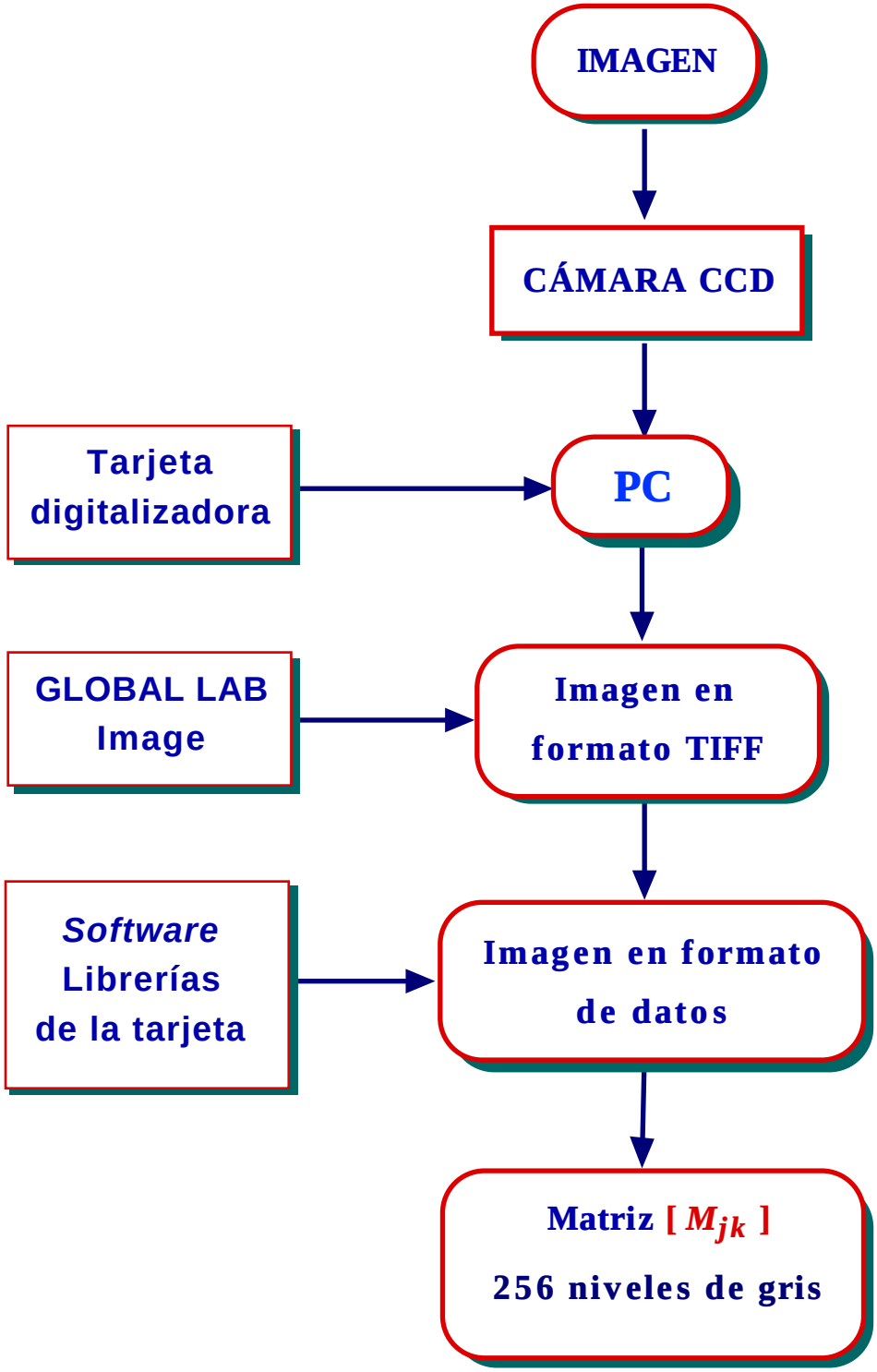


IMAGEN
CÁMARA CCD
Tarjeta digitalizadora
PC
GLOBAL LAB Image
Imagen en formato TIFF
Software Librerías de la tarjeta
Imagen en formato de datos
Matriz [M_{jk}]
256 niveles de gris

MATRIZ $[\,M_{jk}\,]$

Normalización a la unidad

$$M_{jk} \Rightarrow M_{jk} = \frac{M_{jk}}{255}$$

Ruido de fondo

$$R_{jk} \Rightarrow R_{jk} = \frac{R_{jk}}{255}$$

$\langle R \rangle$: *promedio de* R_{jk}

Eliminación del ruido de fondo $\langle R \rangle$

$$M_{jk} = Abs\,[M_{jk} - \langle R \rangle]$$

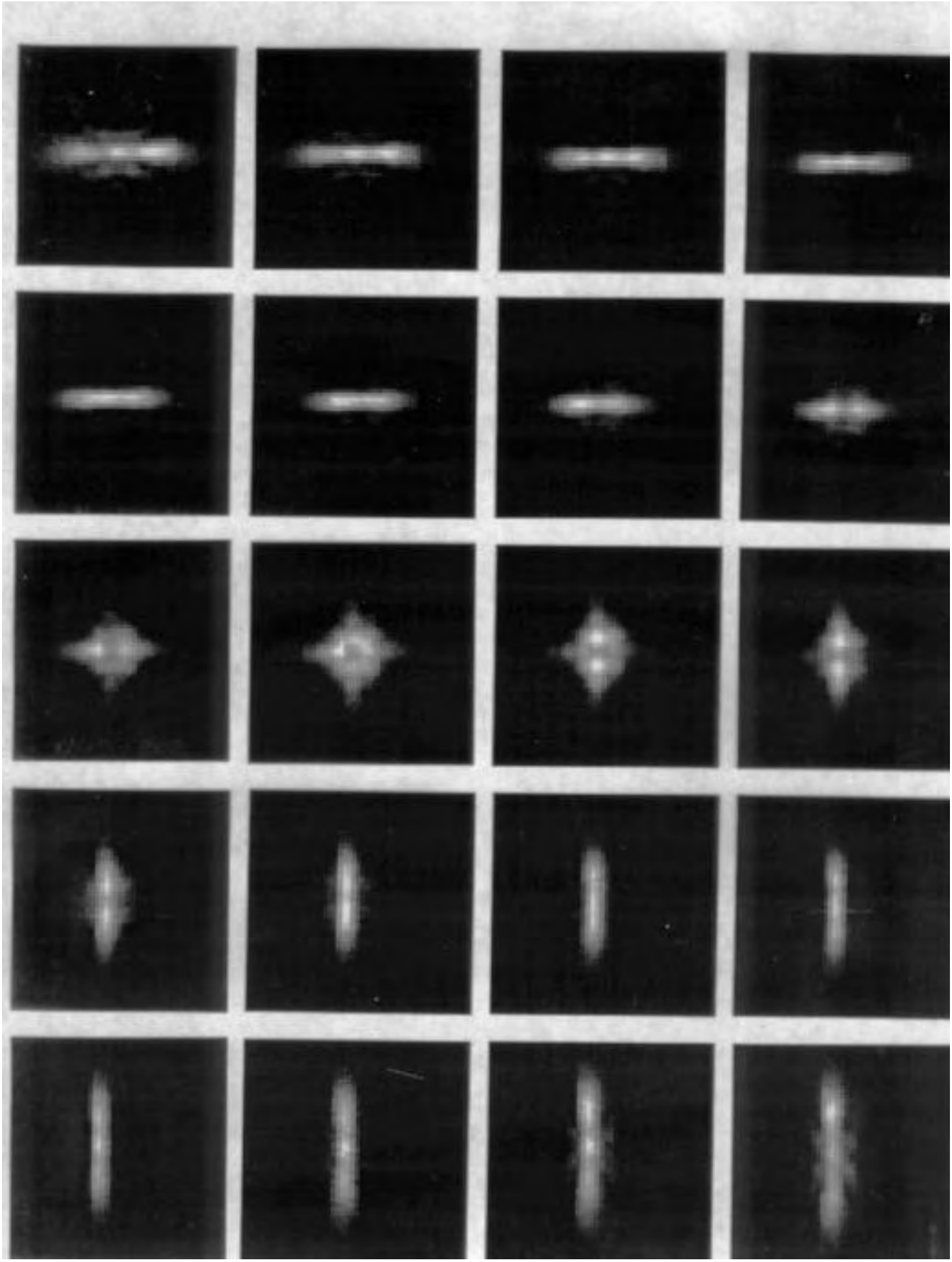
Distribución de probabilidad:

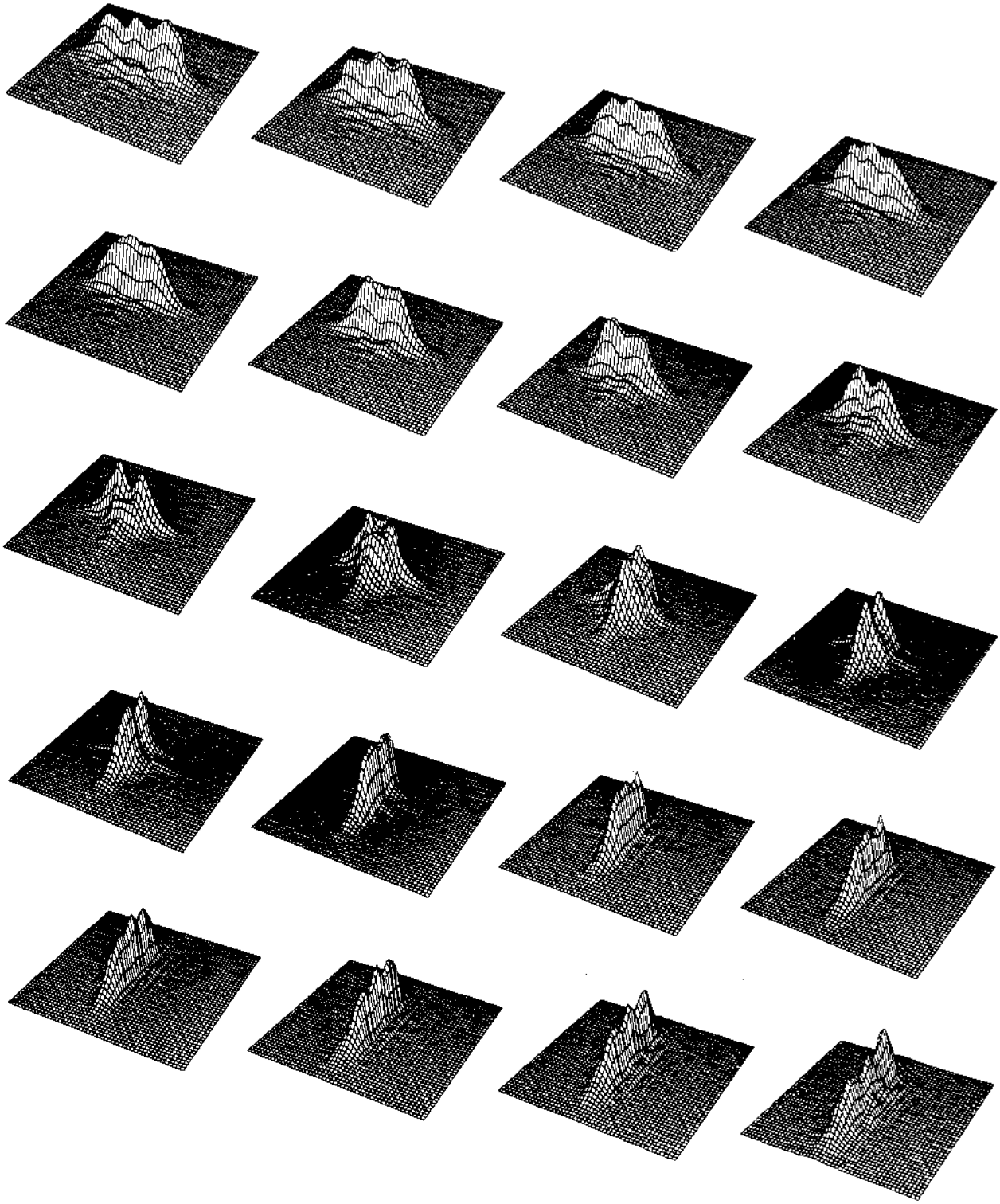
$$P_{jk} = \frac{M_{jk}}{\sum_{m=1}^{J} \sum_{n=1}^{K} M_{mn}}$$

Entropía:

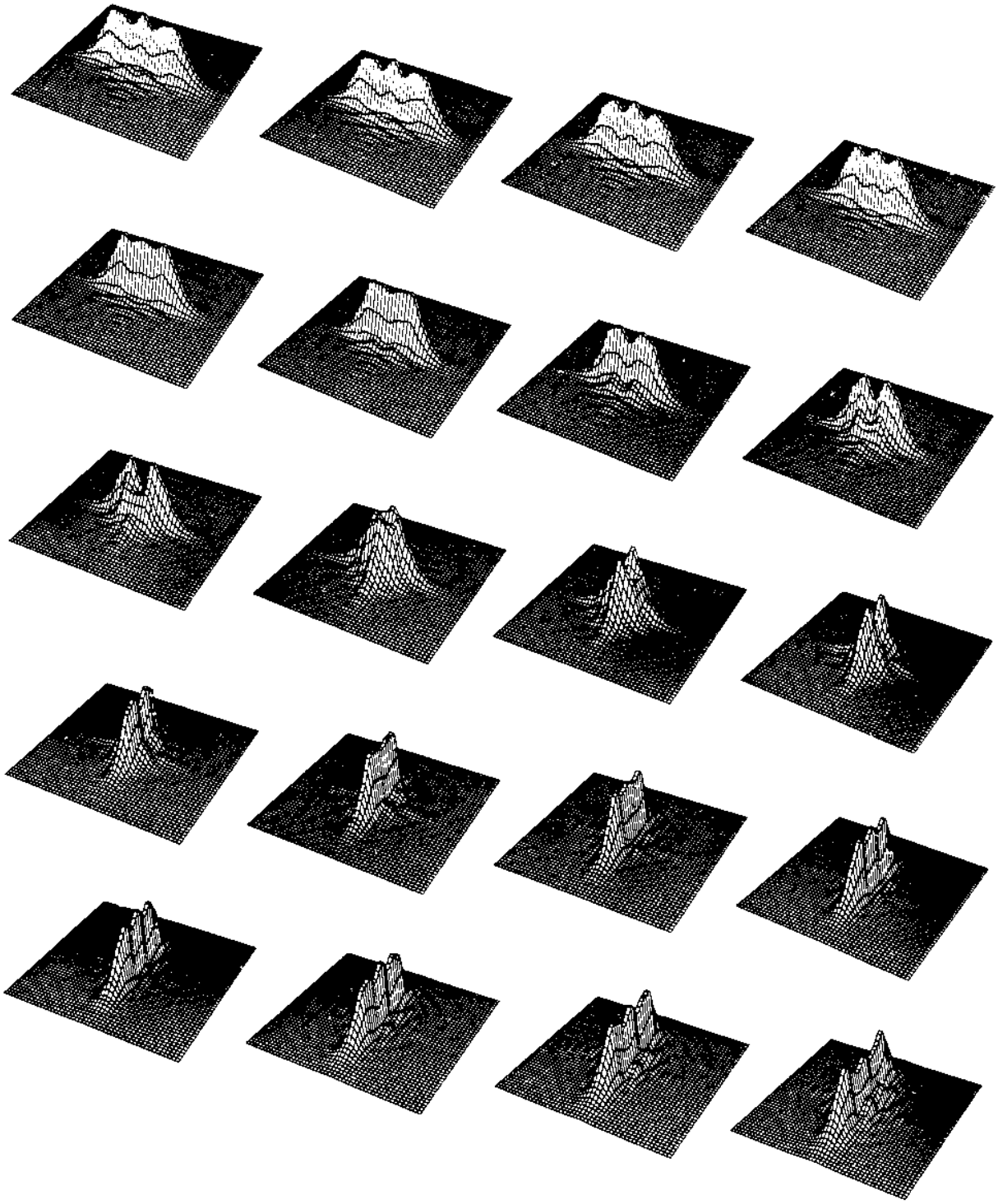
$$H = -\sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} P_{jk} \ln P_{jk}$$

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).





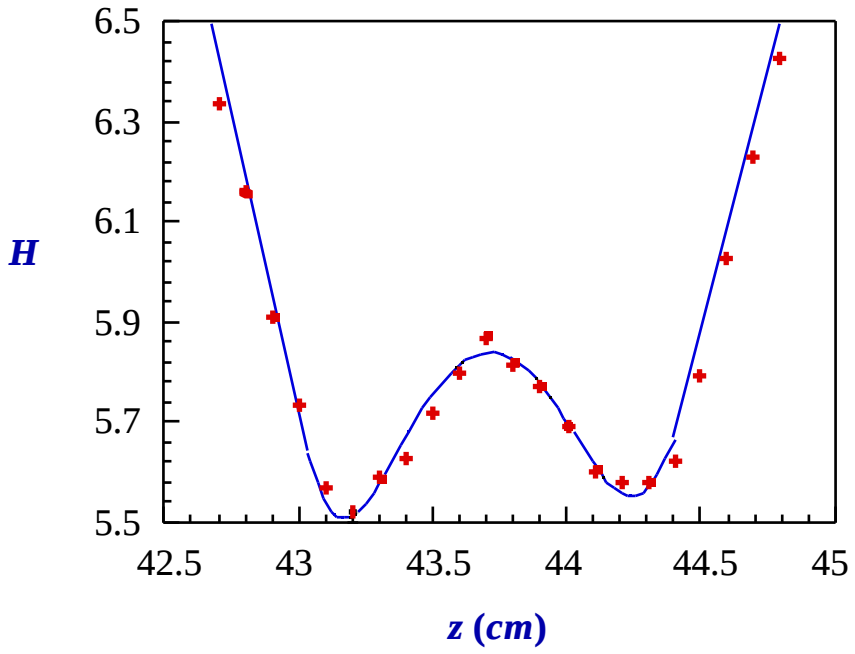
EXPERIMENTALES



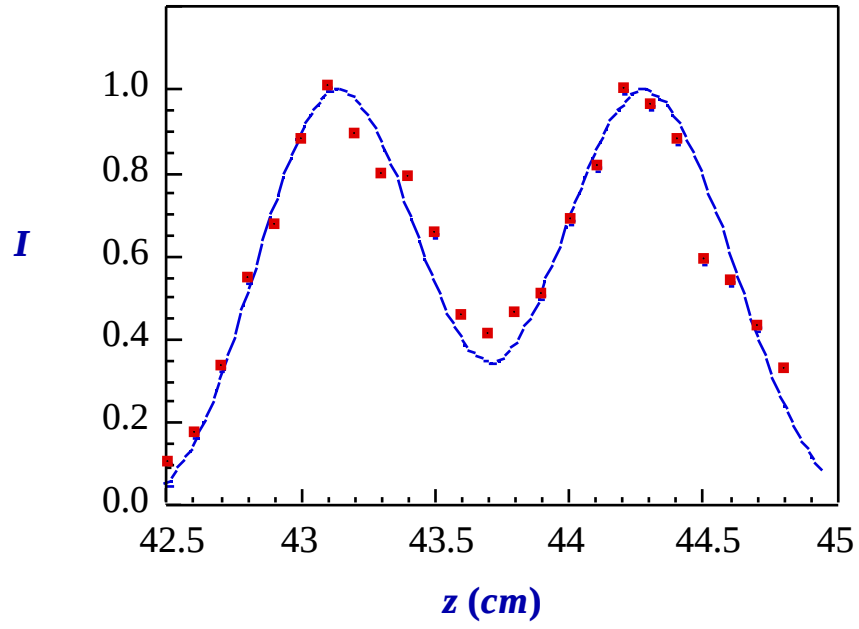
TEÓRICAS

Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

● *ENTROPÍA:*

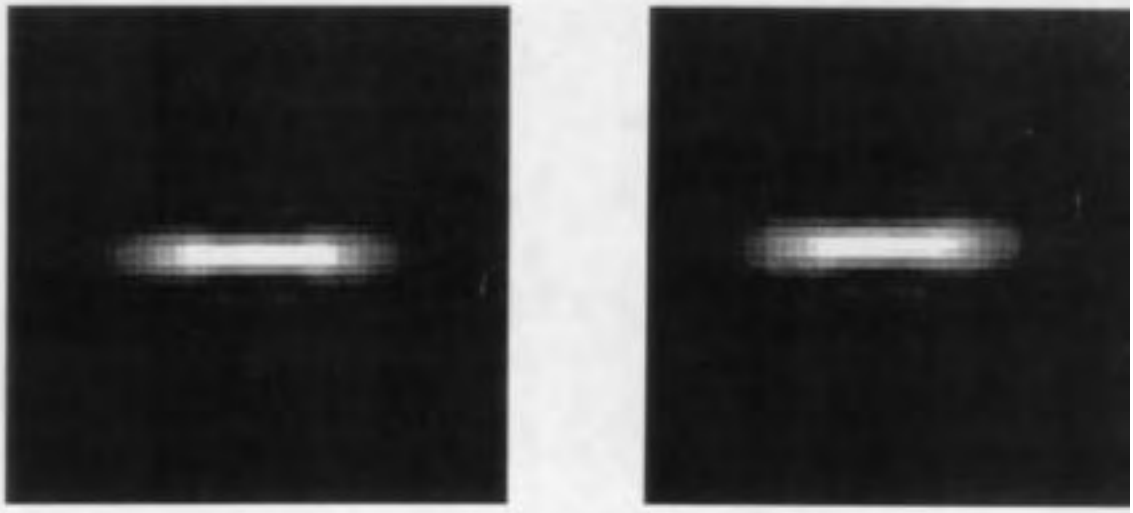


● *IRRADIANCIA AXIAL:*



TEÓRICAS EXPERIMENTALES

Imagen primaria



Círculo de mínima confusión

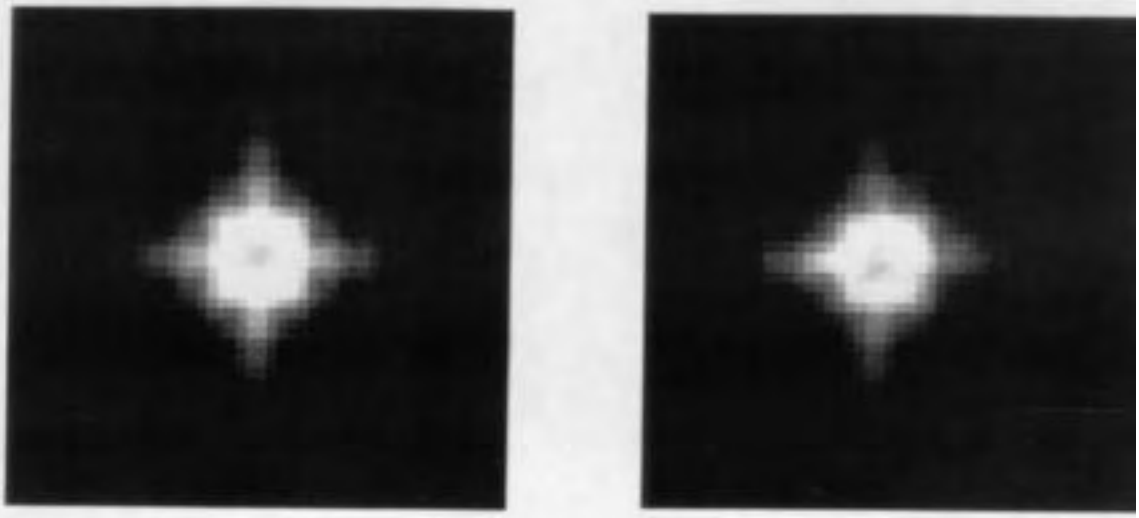
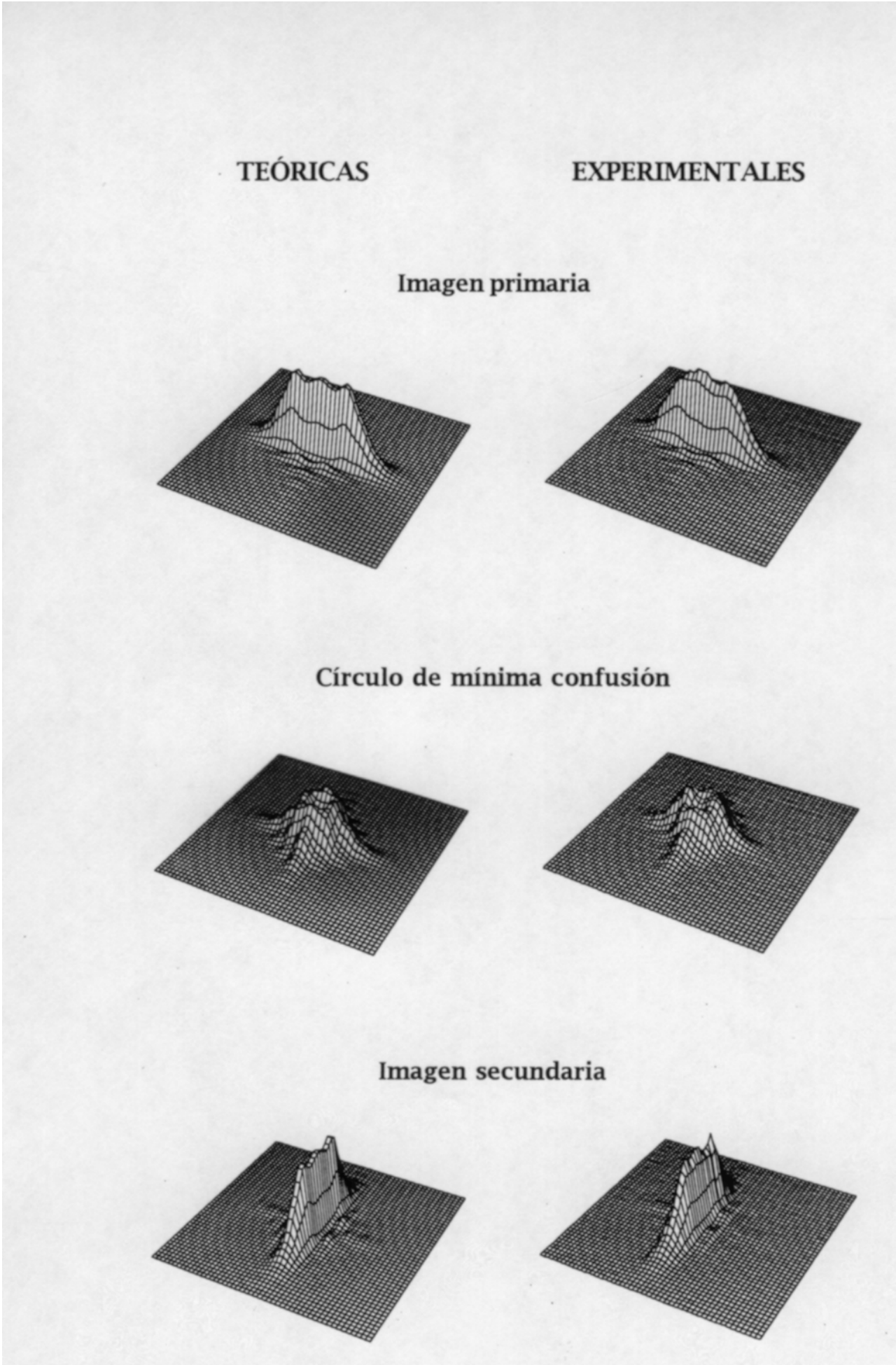


Imagen secundaria



Augusto BELÉNDEZ VÁZQUEZ, Elementos Ópticos Holográficos: Teoría Difraccional.
Depto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante (1999).

RESUMEN

- Se ha aplicado la **teoría de la difracción** a elementos ópticos holográficos con aberraciones, realizando un estudio teórico y experimental de diversos parámetros:

  - Distribución de intensidades en un plano imagen.
  - Irradiancia axial.

- Se ha utilizado una **función entropía** asociada a la distribución de intensidades de cada plano imagen: Esta entropía está relacionada con el **grado de desorden** en que se distribuye la energía luminosa en dicho plano.

- La función entropía ha demostrado su validez como **función de mérito** para el estudio y la evaluación de la **calidad de imagen** en sistemas holográficos, y se ha utilizado en la obtención del mejor plano imagen en EOHs.

- Se pueden obtener **experimentalmente** las distribuciones de intensidad y las irradiancias axiales, y la entropía a partir de estos datos experimentales, con una buena coincidencia entre los resultados teóricos y experimentales.

- En trabajos recientes se ha comparado esta función entropía con otras funciones de mérito utilizadas en la bibliografía:

  - Varianza de la aberración de onda
  - Varianza de la *PSF*
  - Pietraszkiewicz

  Se ha demostrado que la entropía no sólo es comparable con estas últimas, sino que presenta ventajas: Posibilidad de poder medirse experimentalmente.

- Se ha utilizado la función entropía para evaluar la influencia de la reconstrucción con **luz cuasimonocromática**, de anchura de banda pequeña. Situación es de gran interés en sistemas de interconexión óptica.

- La generalización al caso de amplitudes $A(x,y)$ no uniformes es inmediata: **Apodización.**

- **Apodización** debida a que el rendimiento en difracción no es uniforme sobre la pupila de salida del elemento (respuesta en frecuencias del material de registro, no uniformidad de la exposición y ecuación de Kogelnik).

- La **medida experimental** de la irradiancia axial permite obtener información sobre las aberraciones de un sistema óptico: Tipo de aberración y su valor.

- La función entropía puede utilizarse en **otras áreas** de investigación:

  - La medida del **campo modal** de una **fibra óptica**, parámetro fundamental cuando se desea ensamblar dos fibras ópticas.

  - Estudio de **lentes multifocales**, pues permitiría encontrar teórica y experimentalmente la posición de los distintos **focos** del sistema.