



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

DEPARTAMENTO DE FISICA

Trabajo de Tesis Doctoral:

***Procesamiento opto-digital empleando patrones de Speckle y
vórtices ópticos***

Tesista: Astrid Lorena Villamizar Amado

Directora: Dra. Myrian Tebaldi

Año: 2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS

Procesamiento opto-digital empleando patrones de Speckle y vórtices ópticos

Tesis para optar al grado de Doctor presentada por:

Astrid Lorena Villamizar Amado

Director: Dra. Myrian Tebaldi

Lugar de realización:

Centro de Investigaciones Ópticas

CIOp

2024

“No hay nada más hermoso que un padre que deja huella en la vida de sus hijos”

Anónimo

Índice

Agradecimientos	1
1. Introducción	2
1.1. Esquema general de la tesis	3
1.2. Speckle	5
1.3. Transformadas Integrales Lineales	6
1.4. Transformada de Laguerre Gauss	7
1.5. Singularidades de Fase	9
1.6. Estructura de núcleo	10
1.6.1. Vorticidad.....	11
1.6.2. Carga Topológica	12
1.6.3. Excentricidad	12
1.6.4. Ángulo de cruce por cero	13
1.7. Esfera de Poincaré	13
2. Densidad de vórtices ópticos	17
2.1. Descriptor de actividad.....	18
2.2. Secado de pintura.....	19
2.2.1. Montaje experimental	20
2.2.2. Filtro Esfera de Poincaré.....	24
2.2.3. Resultados.....	27
2.3. Mediciones en Turbulencias.....	29
2.3.1. Teoría de Kolmogorov de la turbulencia	31
2.3.2. Turbulencias ópticas.....	31
2.3.3. Densidad de vórtices ópticos en turbulencias atmosféricas	32
2.3.4. Análisis.....	34
3. Metrología de vórtices ópticos	38
3.1. Seguimiento de vórtices	39
3.2. Metrología en hologramas CGH.....	41

3.2.1.	Generación de hologramas	42
3.2.2.	Seguimiento de vórtices.....	44
3.2.3.	Análisis de seguimiento	45
3.3.	Metrología en imágenes ecocardiográficas	66
3.3.1.	Speckle tracking.....	69
3.3.2.	Rastreo empleando metrología de vórtices.....	73
4.	Metrología con Esfera de Poincaré	79
4.1.	Línea geodésica	80
4.2.	Seguimiento de objetos mediante vórtices ópticos y algoritmo de flujo óptico	82
4.2.1.	Algoritmo Demon.....	84
4.2.2.	Metrología óptica de vórtices	85
4.2.3.	Resultados.....	88
5.	Transformada Laguerre Gauss con núcleo Elíptico	99
5.1.	Transformada LG con núcleo elíptico.....	100
5.1.1.	Metrología de vórtices ópticos con filtro LGE.....	101
6.	Conclusiones	107
6.1.	Conclusiones y perspectivas	107
6.2.	Trabajos publicados	110
6.3.	Participaciones en eventos	111
	Bibliografía	114

Agradecimientos

Realizar un trabajo como este es una experiencia a nivel académico, profesional y personal, la cual no sería posible sin una cadena de acontecimientos y personas en el camino.

Agradezco a la Dra. Myrian Tebaldi por su guía, sus aportes, su estímulo y dedicación en la dirección de esta tesis. Así mismo, a Lili, Silvana y el Dr. Rabal, con quienes me sumergí en el mundo vorticero.

Al Centro de Investigaciones Ópticas (CIOp) un agradecimiento por abrir sus puertas y brindarme la oportunidad de realizar mi trabajo de tesis en la institución. Un agradecimiento especial al entepiso, cuya amabilidad me hizo sentir como en familia desde el primer momento.

Agradezco a CONICET por otorgarme una beca doctoral, así como a la Universidad Nacional de La Plata.

Esta aventura no fue posible sin mi grupo de contención, *mi familia* quienes desde la distancia me han apoyado y animado día a día. En especial a mi progenitor, quien es un apoyo incondicional, especialmente cuando la carga se hace pesada. A Gerald y Gabi por su compañía diaria, su amor y escucha.

A mis amigos, quienes me brindaron su apoyo y su afecto.

A Dios...

1. Introducción

A partir de la década de 1960 con la aparición del láser se pudo observar un nuevo fenómeno debido a la alta coherencia de la fuente luminosa conocido como SPECKLE [1-2]. El speckle consiste en un patrón aleatorio granular que se presenta cuando una superficie dispersora rugosa es iluminada con una fuente laser. Este patrón no tiene una relación directa con las características macroscópicas del objeto, sino que se debe a que la superficie del objeto es rugosa comparada con la longitud de onda del haz luminoso incidente. Si la superficie de los objetos no permanece rígida, sino que presenta algún tipo de movimiento local, entonces el diagrama de speckle observado evolucionará en el tiempo [3-4].

Si bien el ruido de speckle trae inconvenientes en diversas aplicaciones, existen otras en las cuales debido a sus propiedades es un efecto deseable que es posible aprovechar [5]. A manera de ejemplo, la metrología speckle permite conocer características del objeto a través de los patrones de intensidad. Otras aplicaciones son el análisis de vibraciones, las medidas de las trayectorias de movimiento, la rugosidad de superficies, la medición de tensiones y desplazamiento, entre otras [5].

Por otra parte, una rama de la óptica y la fotónica que ha atraído mucho interés en los últimos años es la óptica singular. Las singularidades o vórtices en la óptica presentan similitud con vórtices en otras partes de la ciencia. La óptica singular centra su estudio en tres tipos de singularidades: de familia de rayos, de singularidades de fase y de polarización de ondas [6]. En nuestro trabajo nos enfocaremos en las singularidades de fase o vórtices ópticos, asociados con los lugares del frente de onda donde la intensidad de la onda es cero y la fase es indefinida.

Las singularidades de fase no se presentan naturalmente en patrones de speckle. Sin embargo, para localizar en el campo aquellos puntos en los cuales la amplitud es nula y la fase singular es necesario conocer la fase del campo óptico o emplear transformadas integrales

lineales en registros de intensidad que permiten obtener un pseudo-campo y una pseudo-fase asociado. En los trabajos realizados por Takeda [7-10] y colaboradores se ha propuesto obtener el campo complejo y por lo tanto la pseudo-fase a partir de la aplicación de la transformada de Laguerre-Gauss a las distribuciones en intensidad.

Numerosas aplicaciones de las singularidades de fase han sido desarrolladas entre las que podemos nombrar la manipulación de micropartículas [11,12], el desarrollo de pinzas ópticas [13,14], la metrología de vórtices ópticos y estudio del momento angular orbital de campo de luz [15-18] entre otros.

1.1 Esquema general de la tesis

A partir del trabajo original de Takeda et al [7-10]. en esta tesis proponemos estudiar diversas aplicaciones de los vórtices o singularidades de fase en campos complejos generados mediante el empleo de la transformada de Laguerre Gauss.

En el capítulo introductorio se presentan las herramientas físicas y matemáticas básicas para la síntesis y caracterización de las singularidades de pseudo-fase a partir de las distribuciones de intensidad. La transformada de Laguerre Gauss permite obtener una señal analítica compleja a partir de distribución en intensidad. La señal compleja permite obtener las propiedades estructurales de los núcleos de dichas singularidades. Asimismo, se presenta una forma alternativa de identificar las singularidades de fase basado en el formalismo de la esfera de Poincaré.

En el capítulo 2 se presenta un método alternativo para el análisis de procesos dinámicos basado en las medidas de la densidad de vórtices. Se estudian las limitaciones que ocasiona la presencia de vórtices inestables y se propone el empleo de un filtro basado en la esfera de Poincaré para eliminar dichos vórtices. Esta propuesta se emplea para estudiar dos procesos dinámicos, el secado de pinturas y las turbulencias atmosféricas. En ambos casos los resultados obtenidos fueron contrastados con aquellos que surgen mediante técnicas convencionales.

En el capítulo 3 se presenta el estudio de una técnica de identificación y seguimiento de vórtices ópticos para determinar la trayectoria de un objeto 3D codificado en un video holográfico de solo fase de Fresnel,

generado con el método de capas. La propuesta permite determinar el desplazamiento de uno o varios objetos 3D, así como variaciones en su tamaño sin necesidad de realizar la reconstrucción de los hologramas.

En este mismo capítulo se propuso el empleo de la técnica de metrología de vórtices ópticos para el procesamiento de ecografías cardíacas. En este caso se generan un mapa de pseudo-fase a partir de los fotogramas de las ecografías. Las singularidades de fase se utilizan como marcadores, lo que brinda la posibilidad de rastrear el movimiento miocárdico. El procedimiento consiste en determinar los vórtices homólogos, su trayectoria a lo largo de la ecografía en cada región del ventrículo izquierdo y a partir ellos calcular la deformación global de la pared miocárdica. Se implementó la técnica de speckle tracking basado en template matching con algoritmos de diferencia de sumas aditivas y correlación. Los resultados conseguidos a partir de la implementación de la metrología de vórtices y del speckle tracking fueron comparados con aquellos obtenidos a partir de un equipo eco cardiógrafo comercial.

En el capítulo 4 se analiza la metrología de vórtices ópticos empleando la distancia en la esfera de Poincaré como factor de mérito para la selección de los vórtices homólogos. Para este estudio se emplearon distribuciones de speckle generadas por la luz que atraviesa un difusor plano que se desplaza lateralmente entre registros sucesivos. En este caso se emplea también la transformada de Laguerre Gauss para generar los mapas de pseudo-fase a partir de los patrones de speckle en intensidad. Para verificar la validez de los resultados obtenidos al emplear las singularidades de fase dichos resultados se compararon con aquellos que surgen de la implementación del algoritmo Demon.

En el capítulo 5 se propone el empleo de la transformada de Laguerre Gauss generalizada. A diferencia de la transformada convencional que posee un único parámetro ω que controla el ancho del filtro, la transformada generalizada permitirá asignar diferentes valores al parámetro ω en cada coordenada. La propuesta se evaluó analizando patrones de speckle que se desplazan entre registros sucesivos. Cada patrón de speckle es procesado empleando la transformada de Laguerre Gauss generalizada con el objetivo de obtener la pseudo fase. Luego se emplea el procedimiento convencional de vórtices que consiste en localizar las singularidades, emplear las propiedades del

núcleo para determinar los homólogos, determinar los desplazamientos coordinados relativos entre las parejas de homólogos. Este procedimiento permite determinar las distancias promedio entre los vórtices homólogos a lo largo de los ejes x e y , y analizarlos mediante histogramas. Se obtienen las varianzas respectivas en cada caso con el objetivo de comparar los resultados que surgen del empleo de la transformada generalizada.

1.2 Speckle

Al iluminar con luz coherente un vidrio difusor o una superficie dispersora reflectora cuya rugosidad es grande en comparación con la longitud de onda de la fuente luminosa, se puede observar un patrón de puntos brillantes y oscuros. Cada zona luminosa es llamado grano de speckle y el diagrama es llamado patrón de speckle.

La onda reflejada por la superficie de un objeto consiste en contribuciones provenientes de muchas áreas dispersoras independientes. Su propagación hasta un punto de observación resulta de la adición de las componentes dispersadas con diferentes retardos relativos que dependen de la microestructura de la superficie del objeto bajo estudio y de su geometría. La interferencia de estas ondas desfasadas pero coherentes, genera el patrón de puntos brillantes y oscuros. El patrón de speckle presentara una multitud de puntos brillantes donde la interferencia es constructiva, de puntos oscuros correspondientes a interferencia destructiva, así como a valores intermedios.

Como es conocido para que se produzca interferencia entre dos ondas, estas deben ser coherentes. Es el láser la fuente de luz coherente por excelencia que permite obtener un patrón de speckle de alto contraste [19-21].

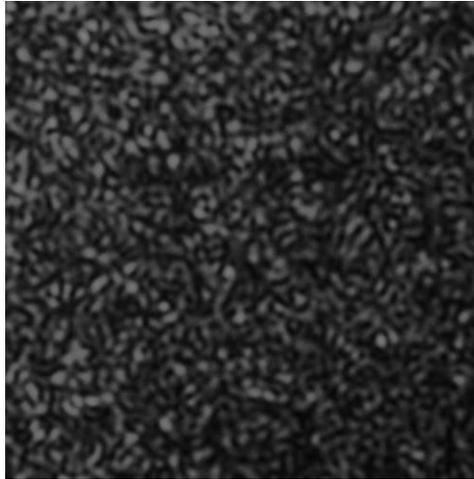


Figura 1.1: Patrón de Speckle

Si se presentan movimientos de la superficie rugosa o de los centros dispersores, alteraciones temporales del medio de transmisión o de la fuente de la luz, el patrón observado presentara cambios a través del tiempo, esto es conocido como speckle dinámico.

El speckle dinámico es característico de las muestras biológicas cuando son iluminadas por un láser, aunque también puede observarse en algunos procesos industriales no biológicos, como por ejemplo secado de polímeros, corrosión, eflorescencia, intercambio de calor, etc.

Éste fenómeno óptico de variación de intensidad luminosa local que se produce sobre la superficie de una muestra debido al movimiento de los centros dispersores, variaciones de índice de refracción, etc permite bajo determinadas circunstancias obtener información útil sobre el fenómeno que les da origen.

1.3 Transformadas Integrales Lineales

Las transformaciones integrales son operadores matemáticos que actúan sobre funciones para alterar su dominio [22]. Las transformadas integrales generan una nueva función $F(s)$ integrando el producto de una función existente $f(t)$ y un kernel $k_n(t,s)$ entre límites adecuados:

$$F(s) = \int_{C_n} k_n(t,s)f(t) dt \quad (1.1)$$

La función $F(s)$ se le denomina transformada de la función $f(t)$, a $k_n(t,s)$ núcleo integral de la transformación o kernel siendo k_n con $n = 1,2$ funciones genéricas de las variables s y t , tanto para la transformada con $n = 1$ como para su inversa $n = 2$ y C_n denota la trayectoria en el plano complejo [23]. Si $f(t)$ es conocida y se especifican k_1 y C_1 , es posible obtener $F(s)$ si la función es integrable. Además, esta ecuación también es una transformada integral lineal para $f(t)$ cuando se especifica $F(s)$, k_2 y C_2 . Para cada transformación integral existe una relación que convierte la función transformada en la función original. Existe una relación biunívoca entre la función y su transformada [24].

Varias transformaciones reciben el nombre de los matemáticos que las introdujeron, como, por ejemplo: la transformada de Laplace, donde el núcleo es e^{-ts} y los límites de integración son cero y más infinito; o en la transformada de Fourier, donde el núcleo es $e^{-i2\pi st}$ y los límites son menos y más infinito.

Si los núcleos k_1 y k_2 son iguales y los caminos de integración entre la transformada y su inversa son iguales, la relación entre $f(t)$ y $F(s)$ son recíprocas y se conocen como funciones conjugadas. Cuando estas funciones son idénticas excepto por el signo, las relaciones son contrarrecíprocas.

Las transformadas integrales son de gran utilidad permitiendo por ejemplo obtener una distribución compleja similar a la fase a partir de funciones de valor real. A partir de los campos complejos es posible obtener las distribuciones o mapas de pseudo-fase [25].

1.4 Transformada Laguerre Gauss

La transformada Laguerre Gauss, es una transformada integral lineal cuyo núcleo o kernel presenta un filtro pasa banda. Dicha transformada permite obtener una señal analítica compleja $\tilde{I}(x,y)$

relacionado con una distribución de intensidad original $I(x, y)$. La señal analítica esta expresada de la siguiente manera:

$$\tilde{I}(x, y) = \iint LG(f_x, f_y) \mathfrak{F}\{I(x, y)\} e^{i2\pi(xf_x + yf_y)} df_x df_y \quad (1.2)$$

donde $LG(f_x, f_y)$ es el filtro Laguerre-Gauss, $\mathfrak{F}\{I(x, y)\}$ es la transformada de Fourier, $I(x, y)$ es la distribución de intensidad original y $\tilde{I}(x, y)$ es la señal analítica compleja.

El filtro Laguerre-Gauss LG expresado en el dominio de la frecuencia se expresa como:

$$LG(f_x, f_y) = (f_x + if_y) e^{-\frac{(f_x^2 + f_y^2)}{\omega^2}} = \rho e^{-\frac{\rho^2}{\omega^2}} e^{i\beta} \quad (1.3)$$

donde $\rho = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$ y $\beta \equiv \tan^{-1}\left(\frac{f_y}{f_x}\right)$ son las coordenadas polares en el dominio de la frecuencia espacial, ω es el parámetro que controla el ancho de banda del filtro que suprime componentes de altas frecuencias espacial que dan lugar a algunas de las singularidades de fase inestables que no satisfacen los requerimientos para su correcta discriminación en metrología de vórtices. El número de singularidades de fase puede controlarse eligiendo un ancho de banda ω adecuado. La ecuación (1.3) presenta en su amplitud una forma de toro como se muestra en la figura 1.2, la cual sirve como filtro pasa banda

La expresión del filtro LG en el dominio espacial resulta:

$$\tilde{I}(x, y) = I(x, y) * lg(x, y) \quad (1.4)$$

donde $*$ denota la operación de convolución y $lg(x, y)$ es la función de LG en el dominio espacial que está definida como:

$$lg(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}\{LG(f_x, f_y)\} = i\pi^2 \omega^4 (x + iy) e^{-\pi^2 \omega^2 (x^2 + y^2)} \quad (1.5)$$

$$lg(x, y) = i\pi^2 \omega^4 r e^{-\pi^2 r^2 \omega^2} e^{i\alpha} \quad (1.6)$$

donde \mathfrak{F}^{-1} es la transformada de Fourier inversa y $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $\alpha = \tan^{-1} y/x$ son las coordenadas polares en el dominio espacial.

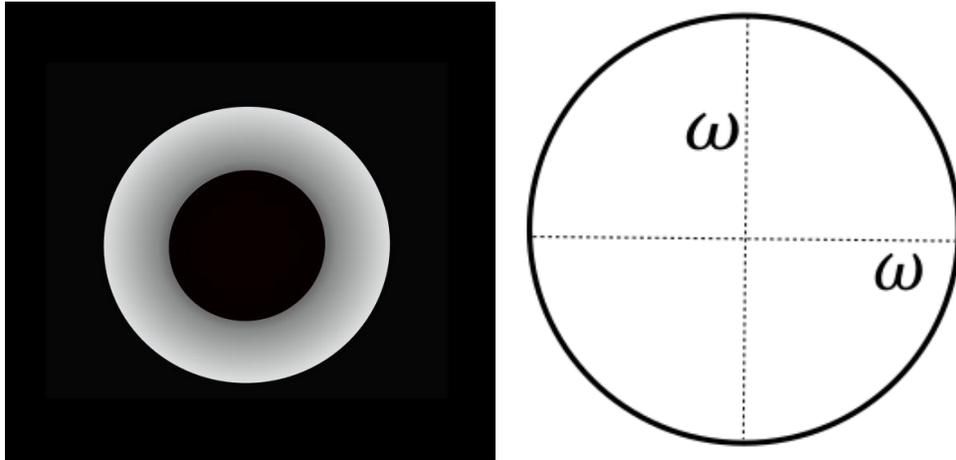


Figura 1.2: Representación de la amplitud del filtro de transformada Laguerre Gauss

1.5 Singularidades de fase

Las singularidades de fase o vórtices están asociadas con los lugares del frente de onda en donde la intensidad del campo luminoso se anula y la fase no está definida. Para obtener dichos puntos es necesario conocer la fase del campo óptico, no disponible en las imágenes en intensidad. Sin embargo, las singularidades de fase también pueden ser encontradas en campos de valores complejos sintetizados a partir de las distribuciones en intensidad.

Por medio de la implementación del filtro *LG* se obtiene un patrón complejo que será referido como pseudo-campo para diferenciarlo del campo original que generó el patrón de intensidad. En este nuevo patrón existen lugares donde la intensidad es nula y la fase no está definida, donde no hay luz, no hay fase asociada. A pesar de esto en las vecindades de estos puntos la pseudo-fase presenta propiedades muy interesantes.

Se les llama pseudo-campo y pseudo-fase para diferenciarlos del campo y la fase reales. El campo complejo se comportará de manera análoga al campo óptico real, lo que permite utilizar el campo complejo generado con fines metrológicos.

Para que la intensidad sea nula, la parte real e imaginaria del campo complejo deben ser cero en el mismo punto. Se determinan las parte

real e imaginaria a partir del campo complejo generado aplicando la transformada de Laguerre Gauss a un patrón de speckle en intensidad. En la misma figura 1.3 se muestra la pseudo-fase de un patrón de speckle. Tanto en la pseudo-fase como en los cruces por cero de las partes reales e imaginarias del campo se han señalado los vórtices con círculos verdes.

Hay dos formas en las que circula la fase en el cruce por cero de la parte real e imaginaria, las cuales son: una circulación horaria y antihoraria. Si la fase en la singularidad circula en el sentido antihorario se le conoce como un vórtice positivo mientras cuando circula en sentido horario se le conoce como un vórtice negativo.

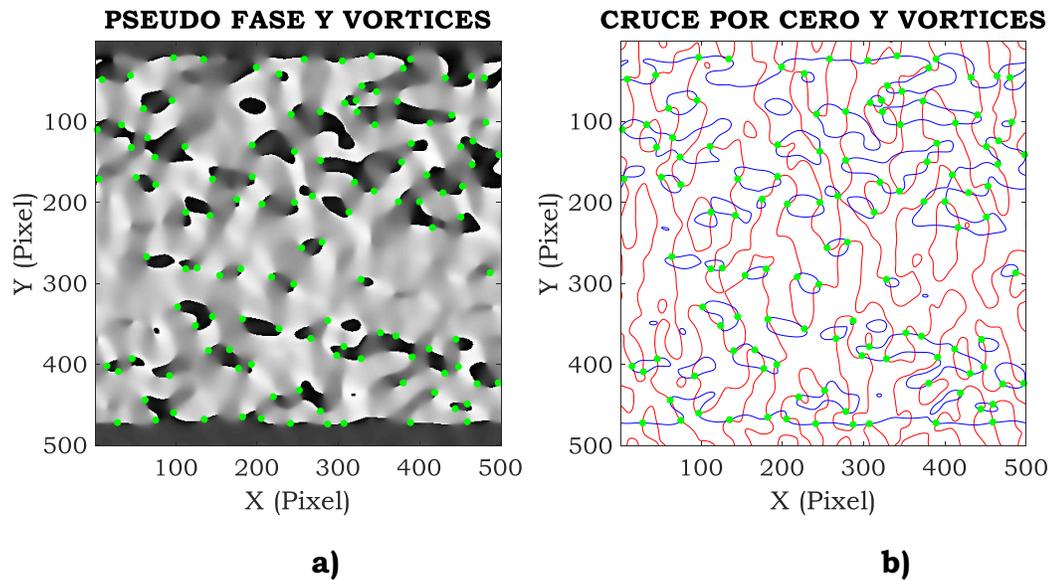


Figura 1.3: a) Pseudo-fase de un patrón de speckle con vórtices en el campo indicados por medio de puntos verdes. b) Cruce por cero de la parte real (rojo) e imaginaria (azul) del campo y las singularidades señaladas con círculos verdes

1.6 Estructuras del núcleo

Las singularidades de fase están distribuidas aleatoriamente en los mapas de fase o pseudo-fase y pueden ser empleadas como marcadores en el campo [8].

Los vórtices ópticos se pueden caracterizar por un conjunto de propiedades como lo son: vorticidad, excentricidad, carga topológica, el ángulo del cruce por cero entre la parte real e imaginaria del campo. Generalmente la parte real e imaginaria del campo complejo de un patrón de speckle bidimensional en las vecindades de un vórtice se puede definir como:

$$\Re[\check{I}(x, y)] = a_r x + b_r y + c_r \quad (1.7)$$

$$\Im[\check{I}(x, y)] = a_i x + b_i y + c_i \quad (1.8)$$

donde los coeficientes a_k, b_k, c_k ($k = r, i$) son obtenidos mediante el método de ajuste de mínimos cuadrados a partir de los valores complejos que son detectados alrededor de cada singularidad. A partir de las partes real e imaginarias interpoladas de la representación de la señal compleja del patrón de speckle, podemos obtener un perfil detallado de la fase o la pseudo-fase alrededor del vórtice óptico [8].

Basándose en sus definiciones, los parámetros geométricos y físicos que caracterizan la singularidad de fase se puede expresar en términos de los coeficientes de ajuste.

1.6.1 Vorticidad

Se define la vorticidad como el rotor de la corriente óptica del campo en la singularidad, se puede expresar como:

$$\vec{\Omega} = \nabla\{\Re[I(x, y)] \times \Im[I(x, y)]\} \quad (1.9)$$

En el caso de trabajar con una imagen la dirección de omega es perpendicular al plano de la imagen y su magnitud puede ser aproximada utilizando los coeficientes de ajuste de (1.7) y (1.8)

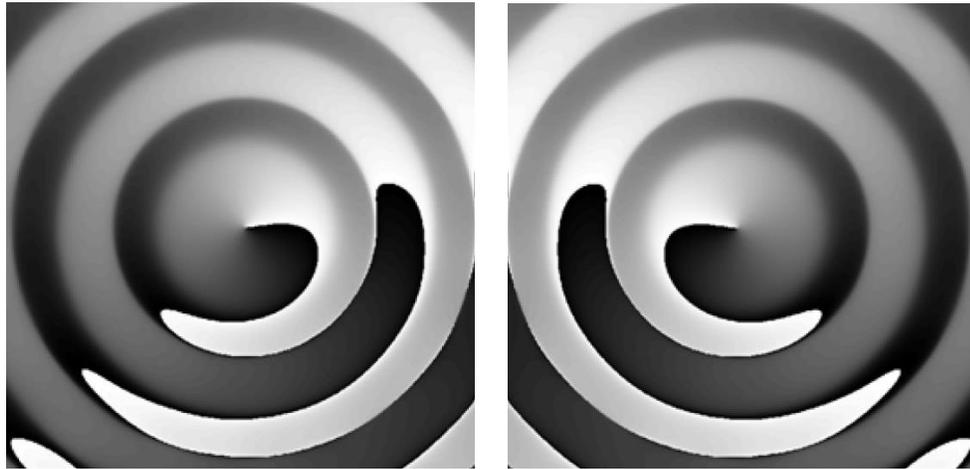
$$\Omega = |\vec{\Omega}| = |a_r b_i - a_i b_r| \quad (1.10)$$

1.6.2 Carga topológica

La fase alrededor del vórtice óptico cambia en múltiplos de 2π . El número de veces que la fase se incrementa en 2π es la fuerza de la singularidad en términos de ese cambio de fase. Esta cantidad se conoce como carga topológica, toma valor de números enteros cuyo signo se asocia con el sentido de incremento de la fase, sea este horario o antihorario.

En este trabajo, el pseudocampo se obtiene mediante la implementación de un filtro Laguerre-Gauss que contiene vórtices con carga topológica 1 en su función transferencia. Por este motivo, el pseudocampo solo tendrá singularidades con carga topológica ± 1 . Así, si la fase incrementa 2π la carga topológica será 1, de lo contrario la fase disminuye en 2π con una carga topológica -1.

$$q = \text{sgn}(\vec{\Omega} \cdot \vec{e}_z) = \text{sgn}(a_r b_i - a_i b_r) \quad (1.11)$$



a)

b)

Figura 1.4: Singularidades de fase con diferente carga topológica: a) Vórtice positivo, fase en dirección anti horaria. b) Vórtice negativo, fase en dirección horaria.

1.6.3 Excentricidad

La pseudo fase alrededor de una singularidad presenta una variación de 2π , sin embargo, este cambio no es uniforme.

La intensidad del campo puede ser aproximado en el entorno cercano a un vórtice siguiendo contornos elípticos. Utilizando los coeficientes de ajuste la excentricidad se puede expresar como:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{(a_r^2 + a_i^2 + b_r^2 + b_i^2) - \sqrt{(a_r^2 + a_i^2 - b_r^2 - b_i^2)^2 + 4(a_r b_r + a_i b_i)^2}}{(a_r^2 + a_i^2 + b_r^2 + b_i^2) + \sqrt{(a_r^2 + a_i^2 - b_r^2 - b_i^2)^2 + 4(a_r b_r + a_i b_i)^2}}} \quad (1.12)$$

1.6.4 Ángulo del cruce por cero

El cruce de la parte real e imaginaria cuando las dos son nulas

$$\Re[\tilde{I}(x, y)] = 0, \quad \Im[\tilde{I}(x, y)] = 0 \quad (1.13)$$

puede ser caracterizado por medio del ángulo entre las rectas tangentes en el punto de intersección. Empleando los coeficientes dados en las ecuaciones (1.8) y (1.9) las expresiones de las rectas son:

$$y = -\frac{a_r}{b_r}x - \frac{c_r}{b_r}, \quad y = -\frac{a_i}{b_i}x - \frac{c_i}{b_i} \quad (1.14)$$

Por consiguiente, el ángulo de las dos rectas es invariante al desplazamiento y la rotación de la singularidad y se puede expresar de la siguiente manera:

$$\theta_{RI} = \begin{cases} \left| \tan^{-1} \left(\frac{a_r b_i - a_i b_r}{a_r a_i - b_r b_i} \right) \right| & \text{si } |\theta_{RI}| < \frac{\pi}{2}, \\ \pi - \left| \tan^{-1} \left(\frac{a_r b_i - a_i b_r}{a_r a_i - b_r b_i} \right) \right| & \text{si } |\theta_{RI}| > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (1.15)$$

1.7 Esfera de Poincaré

Una forma de caracterizar las singularidades de fase es la propuesta por Wang [26] donde se considera el gradiente del pseudocampo en el vórtice, estableciéndose una analogía con el vector de polarización de una onda.

Por lo general, el cambio de la pseudo-fase alrededor de las singularidades de fase no es uniforme, está en función del ángulo azimutal y los contornos de amplitud, que es una estructura típica del núcleo alrededor de la singularidad de pseudo-fase, muestra una elipse fuertemente anisotrópica. En las proximidades de un vórtice, las partes real e imaginaria de la representación de la señal Laguerre-Gauss de un patrón de speckle bidimensional pueden expresarse como:

$$\nabla\tilde{I} = (a_r + ja_i)\hat{x} + (b_r + jb_i)\hat{y} = (a_r\hat{x} + b_r\hat{y}) + j(a_i\hat{x} + b_i\hat{y}) \quad (1.16)$$

donde \hat{x} y \hat{y} son versores en las direcciones en x e y .

Es posible observar la similitud entre el gradiente del campo y el vector de polarización respecto a sus características geométricas. Por lo cual, se adopta los parámetros de Stokes en polarización, siendo estos análogos, pero sin ninguna relación física entre ellos. De esta manera, es posible definir las elipses anisotrópicas asociadas a la pseudo-fase, localizando un vórtice óptico en la esfera de Poincaré.

$$\begin{aligned} S_0 &= a_r^2 + b_r^2 + a_i^2 + b_i^2, \\ S_1 &= a_r^2 + a_i^2 - b_r^2 - b_i^2, \\ S_2 &= 2(a_r b_r + a_i b_i), \\ S_3 &= 2(a_r b_i - a_i b_r). \end{aligned} \quad (1.17)$$

El conjunto de expresiones anteriores nos permite deducir que solo tres de ellas son independientes, ya que están relacionadas de la siguiente manera:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \quad (1.18)$$

De manera similar al procedimiento usado en polarización, es posible escribir los parámetros elípticos de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} S_1 &= S_0 \cos(2\chi) \cos(2\varphi), \\ S_2 &= S_0 \cos(2\chi) \sin(2\varphi), \\ S_3 &= S_0 \sin(2\chi). \end{aligned} \quad (1.19)$$

donde φ es el ángulo azimutal entre el semieje mayor y y el eje x , χ es el ángulo de elipticidad, definido como la tangente inversa del

coeficiente entre la longitud de los semiejes como se muestra en la figura 1.5a

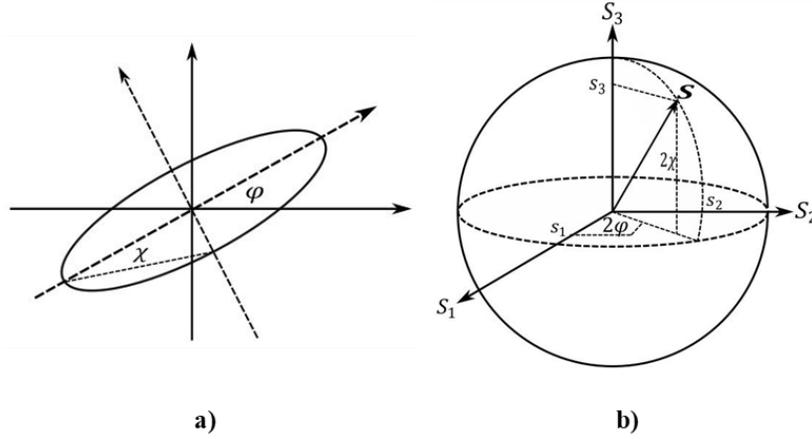


Figura 1.5: Parámetros para la representación de la esfera de Poincaré para describir la estructura del núcleo de las singularidades de fase. En a) contorno de amplitud elíptico, y en b) esfera de Poincaré para los diferentes contornos de amplitud de las singularidades.

Una representación sencilla de los tres parámetros S_1 , S_2 y S_3 como componentes de una superficie esférica tridimensional con un radio unitario es conocida como *esfera de Poincaré* y está definido como:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{S_0} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (1.20)$$

En la figura 1.5b se muestran las coordenadas para la representación en la esfera de Poincaré de las estructuras elípticas anisotrópicas del núcleo de un vórtice óptico. Las variables s_n con $n = 1,2,3$ se pueden considerar como las coordenadas cartesianas del punto \vec{S} sobre la esfera con radio uno, 2χ y 2ϕ las coordenadas angulares en el mismo punto.

Por lo que, cualquier posible estado de la elipse para la estructura del núcleo de una singularidad de fase corresponde a un único punto en la superficie de la esfera. Esta unicidad sirve como una huella digital del vórtice que permite una correcta identificación y seguimiento a través de una transformación.

En la metrología de vórtices ópticos, las singularidades de fase que se ubican en los polos de la esfera de Poincaré son de gran interés. Cuando se analiza un patrón de speckle en fase o pseudo fase las singularidades ubicadas en los polos de la esfera son más abundantes, debido a que la amplitud de la estructura del núcleo tiende a ser circular y su identificación es correcta. Al analizar los cruces por cero de los planos real e imaginario del campo en las vecindades de este tipo singularidad estos se entrelazan en un punto, localizando así el vórtice.

Por el contrario, al analizar las singularidades ubicadas en el ecuador, el cruce de los planos se entrelaza en una línea recta, dificultando la localización de estas, a estos vórtices se les conoce como singularidades inestables. Hemos observado que el ruido electrónico presente en las imágenes origina vórtices inestables, situados en el ecuador y en su vecindad no son relevantes en metrología de vórtices ópticos.

2. Densidad de vórtices ópticos

Cuando un haz laser altamente coherente ilumina una superficie ópticamente rugosa, se genera un patrón de speckle, debido a la interferencia de un gran número de ondas que difieren en su fase o, aunque menos frecuente en amplitud. Este comportamiento es aleatorio por lo que requiere un análisis estadístico.

Las distribuciones de intensidad del speckle son sensibles a cambios microscópicos de la superficie del objeto a lo largo del tiempo. Estos cambios pueden utilizarse para monitorizar diferentes procesos en medicina, biología e industria, como por ejemplo en los procesos biológicos [27-30], la movilidad de parásitos [31], la placa aterosclerótica [32], mediciones del flujo sanguíneo [27]. En aplicaciones industriales se analiza la hidro absorción de zeolitas [33], la corrosión [34] y el secado de pintura [35]. Para estudiar los cambios que presentan dichas intensidades se emplean diferentes descriptores que permiten analizar y caracterizar los patrones de speckle dinámico.

Una manera conveniente para mostrar la evolución temporal de un diagrama de speckle es la propuesta por Oulamara et al [36]. Para cada estado del fenómeno en estudio, se registran imágenes sucesivas del diagrama de speckle dinámico. Las secuencias de imágenes se adquieren mediante el uso de una cámara CCD o CMOS. Con esta secuencia de imágenes se construye una nueva imagen bidimensional, llamada Historia Temporal de los Diagramas de Speckle más conocida por el acrónimo HTPS. Este método produce una representación visual donde la dimensión horizontal de la imagen HTPS representa el tiempo y la dimensión vertical, el espacio.

En este capítulo se presentará un nuevo descriptor para estudiar cambios en los patrones de speckle durante un proceso dinámico basado en la densidad de vórtices ópticos en las imágenes correspondientes a historias temporales de speckle HTPS. Como mencionamos en el capítulo anterior no son de interés los vórtices

localizados en el ecuador ni en la vecindad del ecuador en la esfera de Poincaré. En particular en las imágenes de baja actividad es notable la presencia de vórtices originados en el ruido electrónico y no en la actividad del speckle. Estas singularidades de fase originados en el ruido son vórtices inestables que no son eliminados con el filtro de Laguerre Gauss. Por esto se diseñó un filtro basado en la esfera de Poincaré para eliminar los vórtices inestables. En este capítulo se verificará la validez de la propuesta mencionada como método válido para el estudio de procesos dinámicos de diferentes orígenes comparando los resultados con aquellos obtenidos por métodos tradicionales. En particular se analizará el secado de pinturas y las turbulencias atmosféricas.

2.1 Descriptores de actividad

El análisis temporal de una señal de speckle dinámico proporciona información detallada sobre los movimientos microscópicos asociados al fenómeno que lo ocasiona.

Existen múltiples descriptores que permiten estudiar las señales y secuencias de imágenes de speckle dinámico. Estos descriptores se aplican a las secuencias de imágenes, por ejemplo, al procesar la señal temporal correspondiente a cada pixel de manera individual, prescindiendo de sus vecinos. Esta técnica proporciona un descriptor para cada pixel, y las variaciones espaciales de estos descriptores permiten discernir diferentes actividades dentro del mismo patrón de speckle, posibilitando la discriminación espacial dentro de la muestra analizada.

Entre los descriptores utilizados, se encuentra el contraste temporal, definido como la relación entre la desviación estándar y el valor medio de una señal de speckle [37]. Otro descriptor de amplio uso es el ancho de correlación, que permite la medición del tiempo de vida promedio del grano de speckle [38-39]. Asimismo, el momento de inercia de la matriz de co-ocurrencia se destaca como un descriptor cualitativo [40]. Sin embargo, su limitación radica en requerir una gran cantidad de muestras, por lo que se emplea principalmente en imágenes de HTPS [40].

Evaluando el flujo sanguíneo, Fujii propuso el descriptor de diferencias promediadas [41,42], donde el algoritmo funciona como un filtro pasabanda sobre una señal. Una variante de este método es el de diferencias generalizadas, desarrollada por Arizaga [43], que considera las diferencias con todos los valores de intensidad presentes en la señal.

El descriptor propuesto por Briers y Webster [44] es el LASCA (Laser Speckle Contrast Analysis), el cual inicialmente se empleó para la medición del flujo de sangre capilar y posteriormente fue implementado en otras aplicaciones [45-47].

Además de los descriptores mencionados, existen otros que se fundamentan en el análisis frecuencial del patrón de speckle.

2.2 Secado de pinturas

La evaluación del secado de pintura es un paso importante en distintos procesos industriales, ya que permite optimizar los tiempos de producción y evaluar las propiedades del recubrimiento para introducir mejoras. La pintura además de ofrecer un acabado superficial aporta a los materiales protección frente a la corrosión, a la sensibilidad a la luz o propiedades magnéticas y eléctricas, entre otras. Durante el secado de pintura tienen lugar una serie de procesos químicos que incluyen la creación de una película y la eliminación de disolventes [48,49].

En pinturas tipo látex (a base de agua), el proceso cinético de secado está controlado por la difusión del disolvente a través de la pintura y por la evaporación en la superficie [50]. El secado depende también de factores externos como lo son la geometría, la temperatura, la humedad y/o la velocidad del aire. Cuando no hay disolvente libre en la superficie, el secado es controlado por el flujo capilar del disolvente hacia la superficie [35].

El método más utilizado y directo para medir el secado de pinturas es el gravimétrico, que consiste en pesar una muestra a intervalos regulares y registrar la pérdida de peso debida a la evaporación del disolvente.

Si hay actividad de speckle los vórtices y su pseudo-fase cambian su localización en los patrones de speckle [40,51].

A continuación, se presenta un método alternativo para el análisis del proceso dinámico de secado de pintura basado en las medidas de la densidad de vórtices.

2.2.1 Montaje experimental

El experimento se realizó con pintura a base de látex. La muestra se prepara extendiendo horizontalmente la pintura sobre un sustrato de vidrio de $4 \times 4 \text{ cm}^2$ utilizando una barra aplicadora estándar de acero inoxidable. El espesor de la película es de aproximadamente $50 \mu\text{m}$. La temperatura ambiente y las condiciones del aire se mantienen constantes durante las mediciones; la temperatura ambiente se mantiene entre 22°C y 24°C y la humedad entre el 40% y el 60% HR.

El montaje se presenta en la figura 2.1. El dispositivo experimental consta de una fuente de luz laser He-Ne (10mW, $\lambda=632.8 \text{ nm}$) atenuada con un filtro de densidad neutra para iluminar la muestra. Los sucesivos patrones de speckle generados a partir de la superficie de la pintura activa se registran con una cámara CMOS EO10012 C con un tamaño de pixel de $1.67 \mu\text{m} \times 1.67 \mu\text{m}$. La velocidad de adquisición de los fotogramas es de 200 fps y tiempos de iteración para la captura de imágenes es de $(1/200)\text{s}$. La secuencia de imágenes dinámicas de speckle permiten realizar un seguimiento de los cambios a lo largo del tiempo, proporcionando una herramienta conveniente para evaluar el estado de secado de la pintura. Se registraron 500 imágenes speckle sucesivas cada 10 minutos. En primer lugar, se genera una historia temporal de patrones de speckle (HTPS). La HTPS se obtiene seleccionando una columna de cada una de las 500 imágenes de speckle y poniendo la columna de cada imagen de la secuencia lado a lado. La imagen HTPS generada tiene $m \times n$ pixeles donde m representa la historia temporal de cada pixel de la columna n -ésima de cada patrón speckle [36]. Las imágenes HTPS tiene dimensiones de 500×500 pixeles.

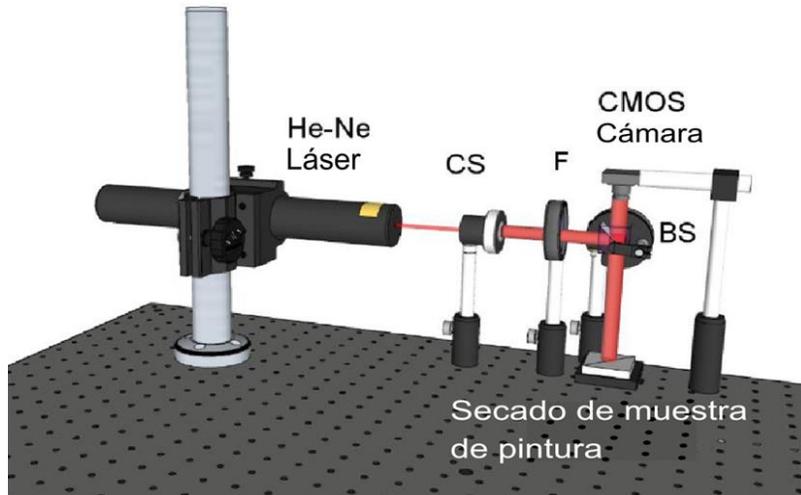


Figura 2.1: Montaje experimental (CS: Sistema Colimador; F: filtro de densidad neutra; BS: divisor de haz).

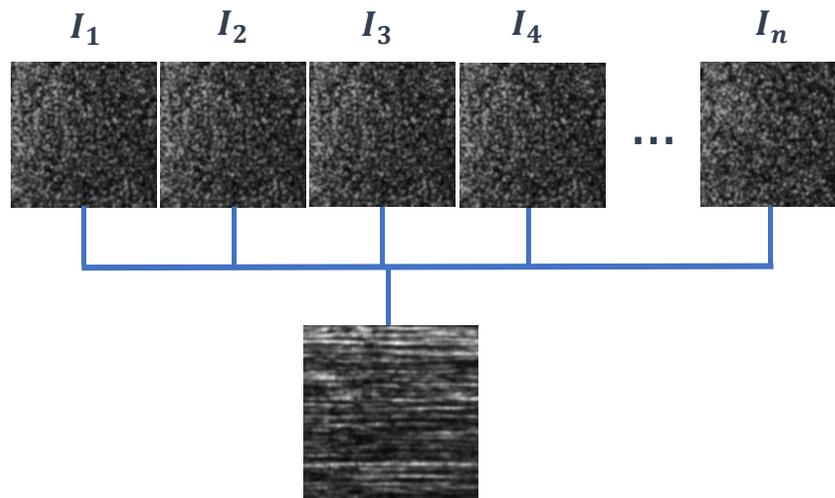


Figura 2.2: Esquema de la generación de HTPS para n número de patrones de speckle.

Analizando las imágenes HTPS es posible caracterizar la evolución temporal de los fenómenos subyacentes relacionados con dichos speckles, lo que permite observar distintos niveles de actividad. Las HTPS correspondientes a diferentes niveles de secado de la pintura se muestran en la figura 2.3, donde para ejemplificar se muestran tres estados de actividad. La variación de la intensidad a lo largo del tiempo se representa en el eje horizontal de las HTPS, lo que permite visualizar los estados de secado de la pintura. Es decir que estas imágenes nos brinda información cualitativa del estado de secado de

la pintura. Cuando no hay actividad, el patrón de speckle no presenta ninguna variación en la dirección horizontal o temporal. Por el contrario, cuando el proceso dinámico es muy activo, la HTPS muestra rápidas variaciones de intensidad que se asemeja a un patrón de speckle espacial ordinario. La figura 2.3a representa la pintura recién pintada es decir con mayor actividad. En la etapa intermedia, como se observa en la figura 2.3b la pintura ha comenzado a secarse y por lo tanto la actividad a lo largo del eje horizontal disminuye. Finalmente, en la figura 2.3c que corresponde a la pintura seca, no hay variaciones a lo largo del tiempo y por lo tanto se observan franjas continuas en la dirección horizontal que corresponde al tiempo. Una vez seca la pintura, el patrón de speckle alcanza un estado estacionario. Hemos observado que la pintura se seca en aproximadamente a 420 minutos.

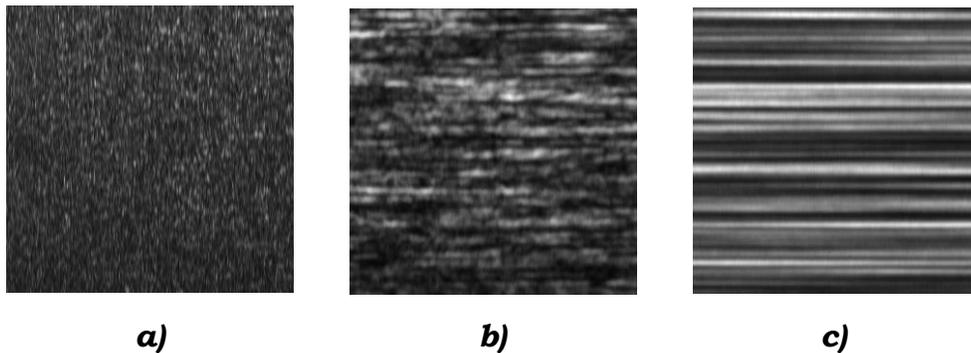


Figura 2.3: Imágenes HTPS correspondientes a diferentes estados de actividad
a) $T=0$ min, b) $T=210$ min y c) $T= 420$ min.

Como las imágenes de HTPS son patrones de intensidad, no contienen información de fase. No obstante, se puede calcular una pseudo-fase y obtener información sobre las singularidades de fase o vórtices ópticos a partir de la señal compleja resultante del empleo del filtro de Laguerre-Gauss sobre la imagen HTPS en intensidad. Esta señal compleja no introduce nueva información óptica, sino que mapea la información de valor real en una representación analítica de señal de valor complejo. Las singularidades mencionadas pueden detectarse a partir del patrón de speckle de intensidad sin utilizar interferometría.

El número de singularidades de fase de las HTPS dependen del parámetro del ancho de banda (ω) del filtro *LG*. Una vez seleccionado el ancho banda, se utilizará el mismo para todas las HTPS a lo largo

del tiempo. En estas condiciones, la cantidad de singularidades de fase en cada HTPS dependerá la actividad del medio o del secado de la pintura. Aunque existen variaciones del índice de refracción durante el proceso de secado, estas son pequeñas y cambian a un ritmo lento si se comparan con la actividad de evaporación y tienen un impacto pequeño en las mediciones de pintura con disolvente (látex).

En la figura 2.4 se muestra las pseudo-fase correspondientes a diferentes momentos del proceso de secado. La distribución de pseudo-fase se codifica utilizando un nivel de gris de 8 bits. En dichas imágenes se incluyen en color rojo las singularidades de pseudo-fase o vórtices ópticos con carga topológica positiva y con color verde aquellas con carga topológica negativa. Tal como era esperado si la pseudofase corresponde a una HTPS con mucha actividad, la densidad de vórtices es más alta. La densidad de vórtices disminuye gradualmente a medida que el proceso dinámico cambia de actividad rápida a lenta. La densidad de singularidades de fase es un indicador sencillo y visual para evaluar el proceso dinámico, pero solo es un método cualitativo. Como era de esperar, en el estado de actividad más bajo casi no se observan cambios en las imágenes de pseudo-fase de las HTPS a lo largo del eje horizontal, y las distribuciones de vórtices son casi nulas. Sin embargo, es llamativo observar que en el estado final del proceso de secado hay presencia de singularidades de fase (ver figura 2.4 f)), cuando se esperaría cero vórtices ópticos. Se determino que dichas singularidades están asociadas al ruido y no contienen información del proceso dinámico bajo estudio.

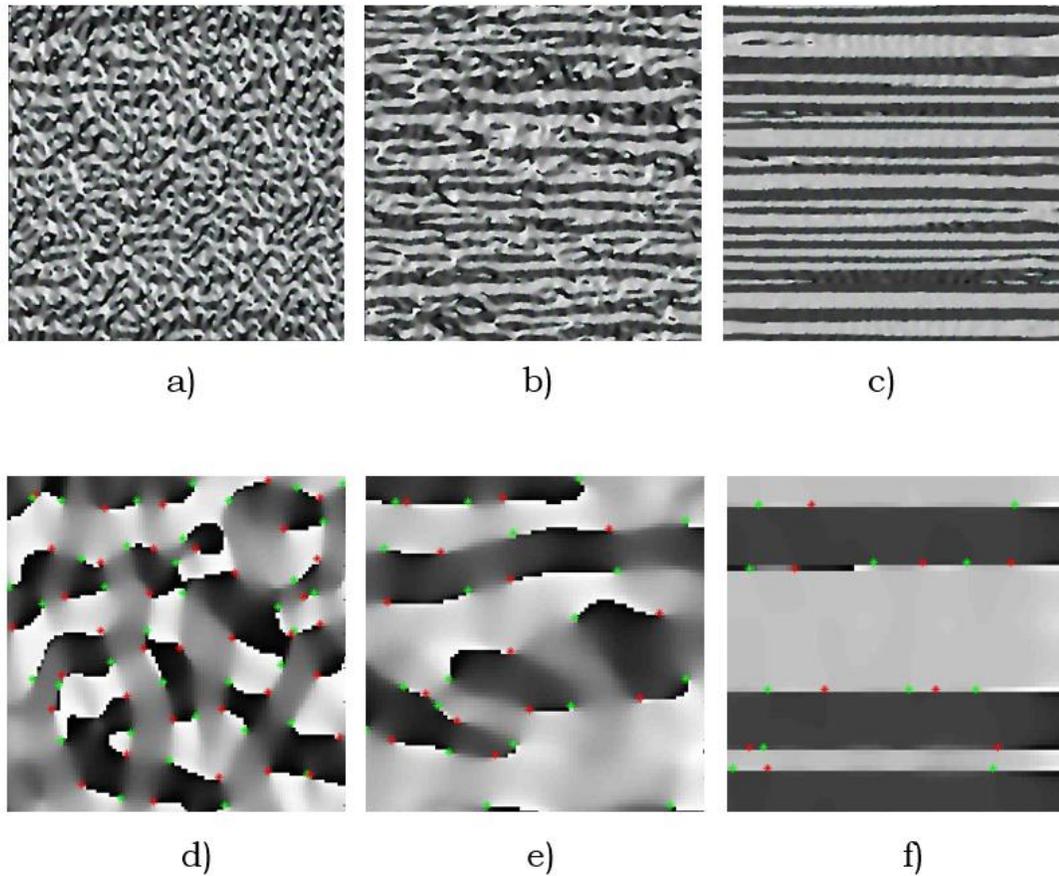


Figura 2.4: Distribuciones de Pseudo-fase de los HTPS correspondientes a tres estados de actividad a) $T=0$ min, b) $T=210$ min y c) $T=420$ min. Ampliaciones de la distribución de Pseudofase con los vórtices ópticos de carga positiva y negativa, d) $T=0$ min, e) $T=210$ min y f) $T=420$ min

2.2.2 Filtro Esfera de Poincaré

Como se mencionó en el punto anterior creemos que los vórtices presentes en las distribuciones de pseudo-fase de la HTPS correspondientes a la pintura seca muestra la presencia de singularidades de fase que asociamos a la presencia de ruido en las imágenes

Por otra parte, recordemos que, en metrología de vórtices ópticos, las singularidades de fase que son de interés se localizan en los polos de la esfera, la amplitud de la estructura del núcleo de estas singularidades tiende a ser circular, lo que permite su correcta

identificación. Al analizar el cruce por cero de los planos imaginario y real del campo en las cercanías del vórtice estos se cortan en un punto, haciendo posible la localización de la singularidad, por lo que son conocidos como vórtices estables. El caso opuesto ocurre cuando los vórtices se localizan en el ecuador de la esfera, los cruce por cero de los planos se cortan en una línea recta, lo que dificulta su localización. Además, estas singularidades tienden a desaparecer cuando tiene lugar una transformación, por lo que se le conocen como vórtices inestables.

La esfera de Poincaré es una representación del campo complejo (Figura. 2.5), con características geométricas similares a las empleadas en el campo vectorial de polarización. Los parámetros que describen las elipses anisotrópicas asociadas a cada singularidad de fase fueron definidos en las ecuaciones (1.18 - 1.20).

En general, cada singularidad de fase tiene sus estructuras centrales anisotrópicas únicas con diferentes ángulos acimutales y elipticidad, estas tienen una distribución casi uniforme en la esfera con una ligera concentración en los polos.

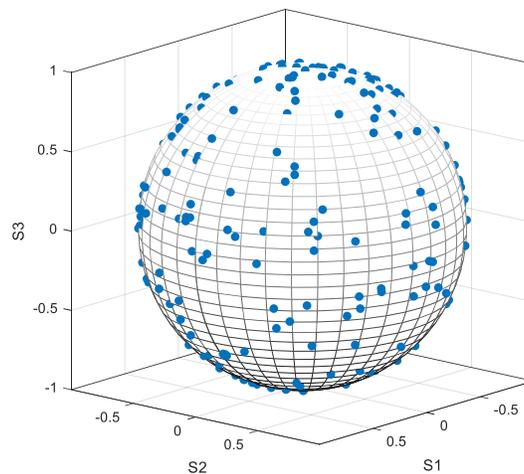


Figura 2.5: Representación de vórtices ópticos (azul) en la esfera de Poincaré.

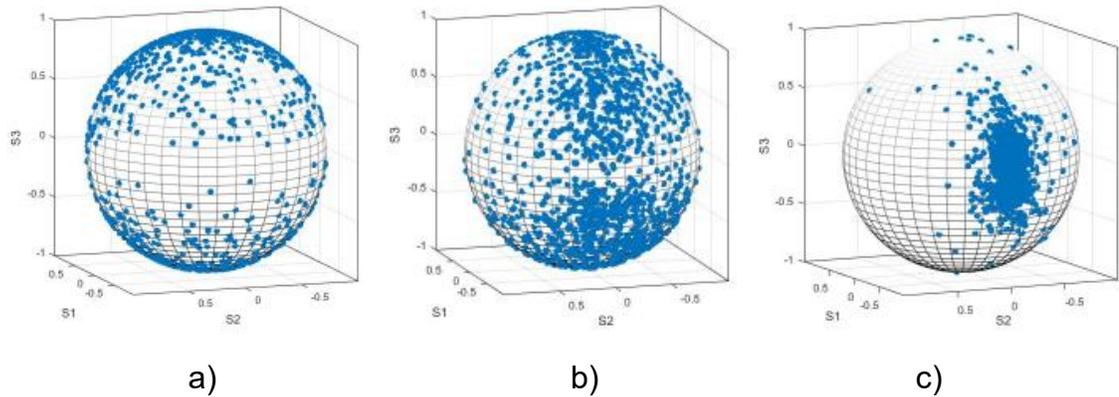


Figura 2.6: Distribución de las singularidades de fase anisotrópicas en la esfera de Poincaré para los tiempos a) $T=0$ min, b) $T=210$ min y c) $T= 420$ min.

La representación bidimensional (2D) de la señal compleja isotrópica del patrón HTPS se obtiene utilizando el filtro de Laguerre-Gauss. Tras identificar las correspondientes estructuras de núcleo de pseudo-fase, se localizan las singularidades, en su representación en la esfera de Poincaré. En la figura 2.6 se localizan en la esfera los vórtices correspondientes a las imágenes HTPS de tres estados diferentes. Como se ha mencionado, los vórtices en el ecuador consideramos que son singularidades asociadas al ruido presente en las imágenes HTPS y no a la actividad de la muestra. Por lo antes mencionado es esperable que los vórtices de dichas singularidades inestables se localicen en el ecuador y en sus cercanías.

En la figura 2.6 a), que corresponde a una actividad elevada en la muestra, no se localizan singularidades alrededor del ecuador. Por el contrario, en el caso de la pintura seca (figura 2.6 c)), las singularidades se sitúan cerca del ecuador tal como habíamos supuesto.

Como los vórtices asociados al ruido no llevan información de la actividad de los speckle proponemos emplear un filtro basado en la representación de la esfera de Poincaré para eliminar dichas singularidades de fase inestables.

El filtro está descrito por la siguiente ecuación:

$$S' = \left\{ S(x, \varphi) \mid -\frac{1}{36}\pi \leq X \leq \frac{1}{36}\pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi \right\} \quad (2.1)$$

En nuestro experimento utilizamos el mencionado filtro para eliminar los vórtices dentro de una región de 10 grados alrededor del ecuador en la esfera, tal como se describe en la figura 2.7. La densidad de vórtices filtrada mediante la esfera de Poincaré se utiliza para determinar la densidad de vórtices en cada HTPS y obtener una nueva curva de secado.

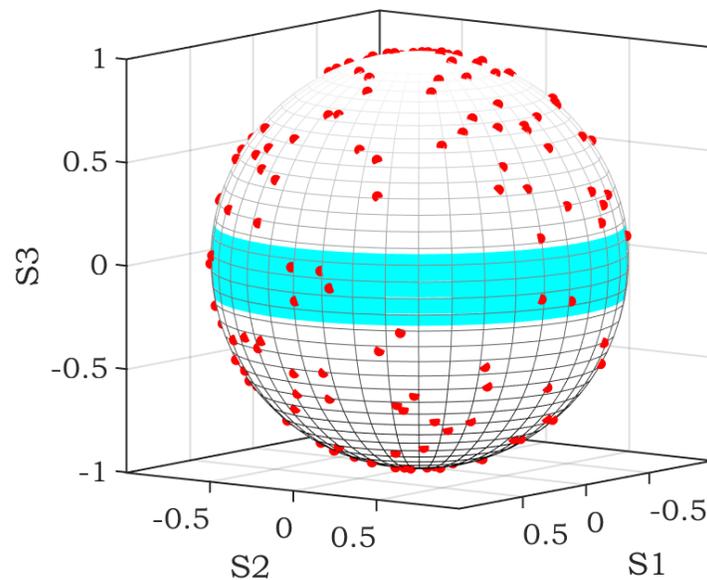


Figura 2.7: Filtro de esfera de Poincaré.

2.2.3 Resultados

Las medidas obtenidas por el método basado en la densidad de vórtices serán comparadas con los resultados que surgen de emplear el método gravimétrico estándar para la determinación del secado de pintura.

El método gravimétrico estándar consiste en colocar las muestras de pintura en una balanza analítica y medir la pérdida de peso a lo largo de la etapa de secado. Cabe aclarar que la adquisición de la secuencia de patrones dinámicos de speckle y las medidas del peso son realizaron simultáneamente.

En primer lugar, se incluyen los resultados obtenidos sin emplear el filtro basado en la esfera de Poincaré. Los cambios de densidad de vórtices en función del tiempo de secado se representan en la figura 2.8, donde los cuadros negros y rojos indican los datos experimentales obtenidos utilizando la densidad de vórtices y las medidas gravimétricas, respectivamente. La actividad puntual representada en la figura 2.8 corresponde a 42 datos de HTPS ordenados cronológicamente. El lapso de tiempo fue de 420 minutos, lo que significa que cada HTPS este espaciado 10 minutos. En este experimento concreto cada punto representa un estado temporal, y se obtiene procesando el conjunto de 500 imágenes de speckle tomadas cada 0,9 segundos.

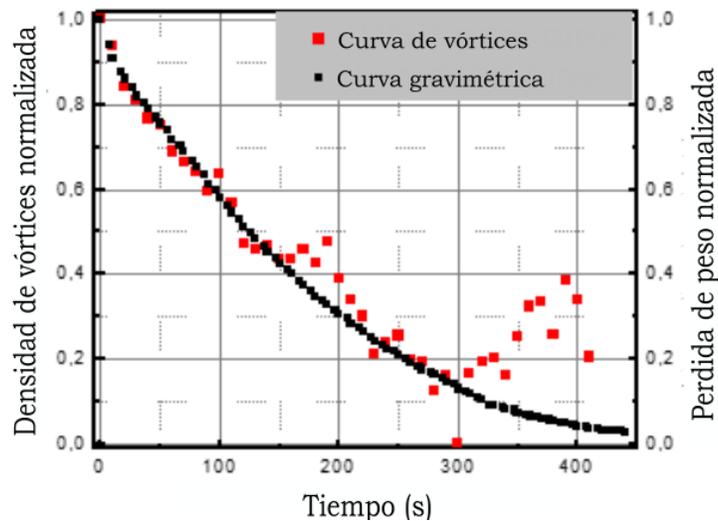


Figura 2.8: Comparación entre la densidad de vórtices (rojo) y la medición gravimétrica (negro)

Durante el periodo inicial del proceso de secado, tanto las curvas gravimétricas (normalizadas) (puntos negros) como la densidad de vórtices (cuadrados rojos) muestran un comportamiento similar. Tal como esperábamos a partir de los resultados obtenidos en secciones anteriores, una inspección de las curvas muestra que son cualitativamente diferentes cuando disminuye la actividad. Las diferencias observadas en la figura 2.8 son debidas a la presencia de vórtices inestables no originados en la actividad de la HTPS. Las singularidades observadas en el caso seco son debidas al ruido. El ruido de la imagen creemos es generado por el proceso de grabación y digitalización de dichas imágenes. Sin embargo, el filtro basado en la esfera de Poincaré permitirá eliminar estos vórtices indeseables. Cabe mencionar que el ruido en casos de baja actividad es un inconveniente en todos los métodos.

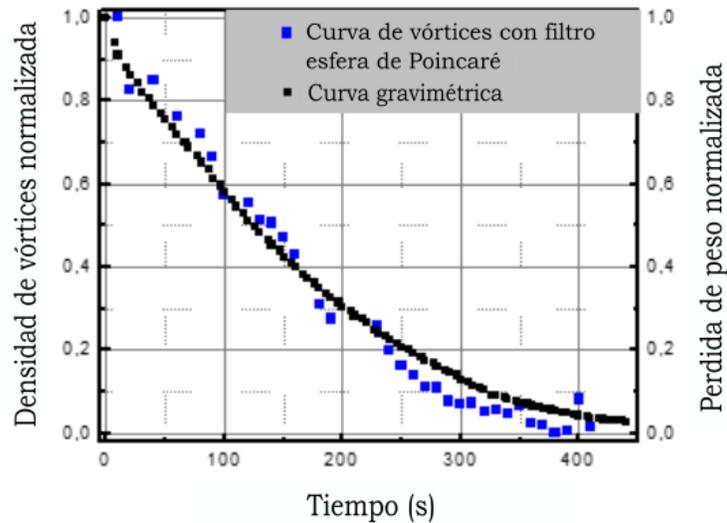


Figura 2.9: Comparación entre la densidad de vórtices utilizando el filtro de la esfera de Poincaré (azul) y la medición gravimétrica (negro).

En la figura 2.9 se muestran las curvas de la densidad de vórtices en función del tiempo de secado cuando para el cálculo de la densidad de vórtices se eliminan los vórtices inestables. El filtro basado en la esfera de Poincaré permitió eliminar los vórtices dentro de una región de 10 grados alrededor del ecuador en la esfera.

Los cuadros negros y azules en la figura 2.9 denotan los datos experimentales obtenidos utilizando la densidad de vórtices y el filtro basado en la esfera de Poincaré y las curvas gravimétricas, respectivamente. Obsérvese que los resultados obtenidos utilizando el filtro basado en la esfera de Poincaré tienen un comportamiento muy similar al obtenido mediante medidas gravimétricas.

Si bien el filtro fue propuesto para el estudio del secado de pintura, el procedimiento podría aplicarse a otros experimentos dinámicos.

2.3 Mediciones en Turbulencias

La tierra está envuelta por una capa gaseosa que se extiende a varios centenares de kilómetros por encima de la superficie. Cerca del 98% está compuesto por nitrógeno y oxígeno, además del vapor de agua y el argón; aunque otros gases como el dióxido de carbono, metano, neón y helio están presentes [52]. La capa atmosférica está dividida en cuatro subcapas principales y tres límites isotérmicos:

- Troposfera: Contiene el 75% aproximadamente de la masa atmosférica terrestre. Su máxima temperatura la alcanza en el suelo y desciende hasta unos 55°C aproximadamente. La tropopausa es la capa de aire de unos 9 km con una temperatura constante de -55°C .
- Estratosfera: Esta capa se extiende desde los 20 km hasta los 48 km de altitud. La temperatura del aire aumenta con la altitud, ya que el ozono absorbe la radiación ultravioleta del sol. La estratopausa es otra capa isotérmica que separa la estratosfera de la siguiente capa.
- Mesosfera: Esta capa se extiende hasta los 80 km de altitud, acá la temperatura disminuye hasta -90°C . La mesopausa es la tercera capa isotérmica que separa a la mesosfera de la termosfera.
- Termosfera: Se extiende hasta 600 km de altitud, en esta capa la temperatura del aire aumenta por encima de los 90 km. En esta capa se incluye a la *ionosfera* y la *exosfera*, siendo esta última la región más externa de la atmósfera.

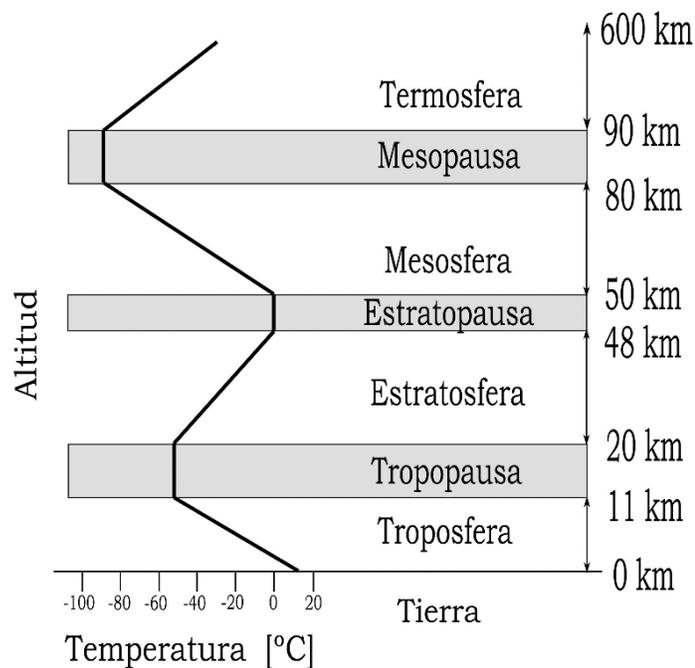


Figura 2.10: Capas atmosféricas y temperatura del aire según [52,53]

La propagación de la luz se ve afectada por tres procesos atmosféricos que son la absorción, la dispersión y las fluctuaciones del índice de refracción (por ejemplo, las turbulencias ópticas).

2.3.1 Teoría de Kolmogorov de la turbulencia

El movimiento del aire y las variaciones aleatorias de la temperatura causan la turbulencia en la atmosfera de la tierra, esto altera el índice de refracción tanto espacial como temporalmente. Estas variaciones degradan el frente de onda que llegan a cualquier sistema óptico, por lo que para superar esta distorsión se han empleado diversas técnicas para reducir sus efectos. La teoría más aceptada del flujo turbulento por su consistencia con las observaciones fue publicada por Kolmogorov [54], luego por Obukhov [55] y de forma independiente por Corrsin [56], estas adaptaron el modelo de Kolmogorov para las fluctuaciones de temperatura.

2.3.2 Turbulencia óptica

En un punto \mathbf{R} del espacio, el índice de refracción puede ser escrito como:

$$n(\mathbf{R}) = 1 + 79 \cdot 10^{-6} \left[\frac{P(\mathbf{R})}{T(\mathbf{R})} \right] = 1 + n_1(\mathbf{R}) \quad (2.2)$$

donde n esta normalizado por su valor promedio n_0 . P es la presión y T es la temperatura. Las fluctuaciones inducidas por la temperatura en el índice de refracción atmosférico se denominan *turbulencia óptica*, la cual tiene propiedades de homogeneidad estadística e isotropía dentro del sub-rango inercial.

La función de estructura para el índice de refracción ($D_n(R)$) satisface las leyes de potencia

$$D_n(R) = \langle (n(\mathbf{R}_1) - n(\mathbf{R}_2))^2 \rangle = \begin{cases} C_n^2 R^{2/3} & \text{si } l_0 \ll R \ll L_0 \\ C_n^2 l_0^{-4/3} R^2 & \text{si } R \ll l_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

donde los subíndices de \mathbf{R} indican los puntos donde se calcula n , L_0 es la escala externa de turbulencia, l_0 la escala interna de la

turbulencia y C_n^2 es el parámetro es una medida de la intensidad de la turbulencia.

Se puede relacionar el parámetro de estructura para el índice de refracción con el parámetro de estructura para la temperatura según:

$$C_n^2 = \left[79 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T^2} \right]^2 C_t^2 \quad (2.4)$$

Los valores usuales de C_n^2 permiten clasificar las turbulencias como: débiles si $C_n^2 \lesssim 10^{-17} m^{-2/3}$ y fuertes si $C_n^2 \gtrsim 10^{-17} m^{-2/3}$.

Para aplicaciones de propagación horizontal, se asume que C_n^2 es una constante, para propagaciones verticales debe modelarse en función de la altura.

2.3.3 Densidad de vórtices ópticos en turbulencias atmosféricas

Se estudia la densidad de singularidades de fase en la propagación de imágenes a través de la turbulencia atmosférica en condiciones controladas en laboratorio (turbulador). Se estudia la evolución temporal de cada columna de la imagen y encontramos que la densidad de vórtices en dichas secciones correlaciona con intensidad de la turbulencia, permitiendo cuantificarla.

Se realizó un experimento conceptual simple de propagación de imágenes en condiciones controladas en las que se muestran un patrón fijo en un monitor LED estándar seguido de una región con una turbulencia artificial y luego se enfoca la imagen del monitor en una cámara (Ver figura 2.11).

Con el fin de tener una turbulencia inercial completamente desarrollada en condiciones estables y estadísticamente repetibles, empleamos una cámara de turbulencia de laboratorio (turbulador). Para simular la turbulencia atmosférica, dos flujos de aire a diferentes temperaturas son forzados a colisionar en la cámara produciendo una mezcla isotrópica entre aire frío y caliente. La luz del objetivo se propaga a través de $\sim 0.35 m$ de turbulencia en la cámara de mezcla. En este aparato las características de turbulencia solo se deben a la diferencia de temperatura ($\Delta T = T_1 - T_2$) entre el foco frío (temperatura ambiente) y caliente. Al aumentar la temperatura de la fuente caliente,

se pueden lograr diferentes intensidades de turbulencia. El turbulador ofrece la ventaja de un comportamiento estable para cualquier valor de intensidad de turbulencia en su rango operativo, ajustable por el usuario simplemente fijando la diferencia de temperatura. La intensidad de la turbulencia, cuantificada por la constante de estructura del índice de refracción (C_n^2), fue previamente caracterizada para el aparato en función de la diferencia de temperatura ΔT entre la fuente fría y caliente. Los experimentos se llevaron a cabo con 15 diferencias de temperatura que van desde 2.6°C a 106.2°C , todas con C_n^2 caracterizado (rango de fluctuación débil a fuerte).

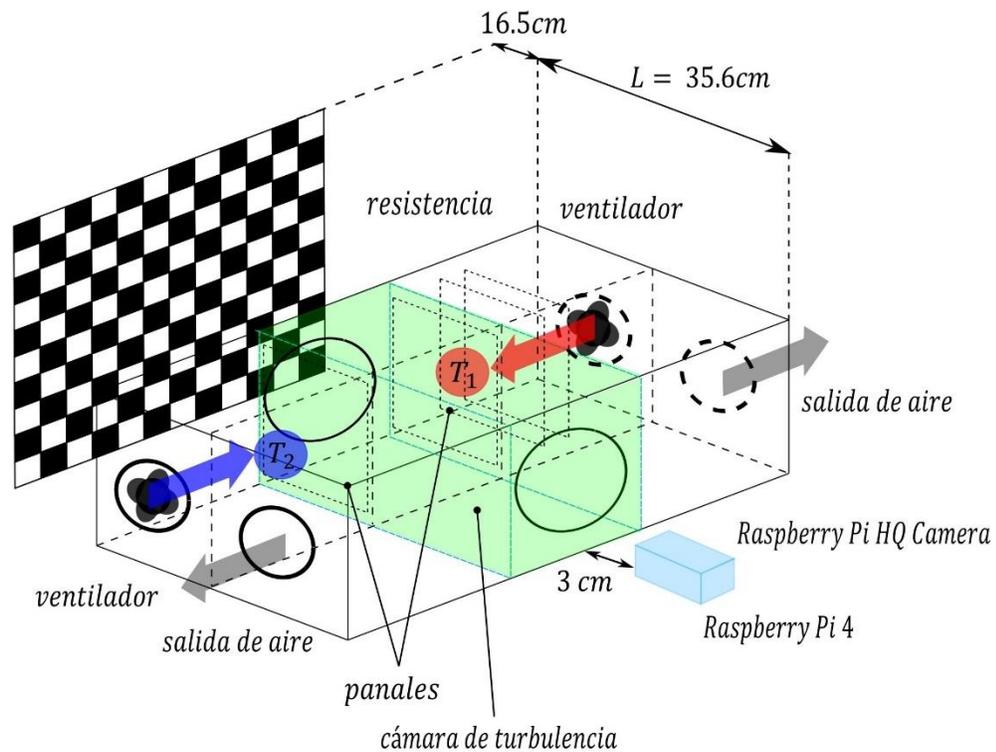


Figura 2.11: Esquema del arreglo experimental.

El equipo de captura consistió en una cámara Raspberry Pi High Quality Camera (12.3 megapixel Sony IMX477 sensor, 7.9 mm diagonal image size) conectada a una placa Raspberry Pi 4 (Model 4b). Para cada intensidad de turbulencia se realizó una captura de 60 segundos a 24 fps y resolución de 640×480 . Este modelo de cámara permite registrar en formato yuv sin compresión, de donde se extrajo

la luminancia para el análisis (con mayor aporte del verde del filtro Bayer, $\sim 550 \text{ nm}$) [57-59].

2.3.4 Análisis

Las imágenes en la región de interés fueron de 225×244 píxeles en escala de grises. Una imagen representativa de las capturas donde se puede apreciar el patrón en la pantalla LED se incluye en la figura. 2.12.

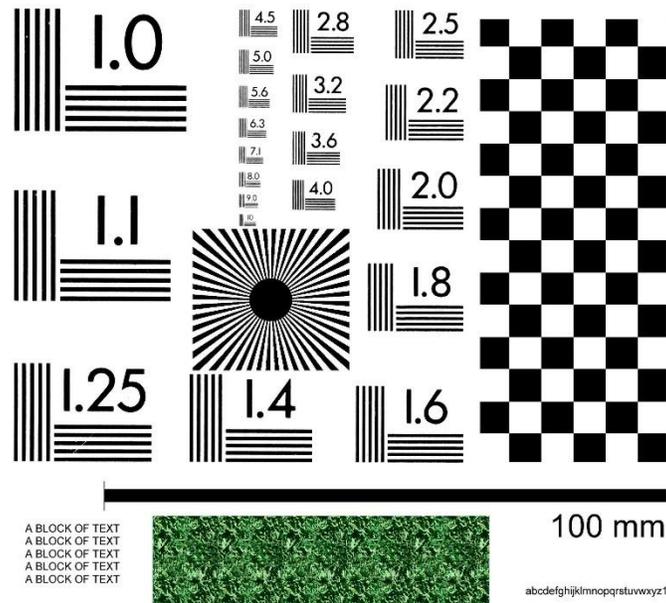


Figura 2.12: Imagen objeto, patrón empleado para la toma de datos.

Es posible asignar una función de valor compleja a la función de valor real adquirida (imagen de intensidad). Para lograr este objetivo se utiliza un filtro de Laguerre Gauss, que consiste en un filtro lineal mediante el cual se relaciona el patrón complejo resultante con la distribución de entrada.

El filtro *LG* permite obtener un pseudo campo que contiene singularidades de fase o vórtices ópticos. Como mencionamos anteriormente, las singularidades distribuidas aleatoriamente en la información de pseudo-fase están directamente relacionadas con el objeto y el desplazamiento de cada singularidad está directamente relacionado con el desplazamiento local de la superficie bajo estudio. Las propiedades estructurales de núcleo de las singularidades

permiten definir las unívocamente y seguirlas en su movimiento. Por otro lado, la localización de los vórtices en la esfera de Poincaré permiten eliminar los vórtices inestables (cercano al ecuador).

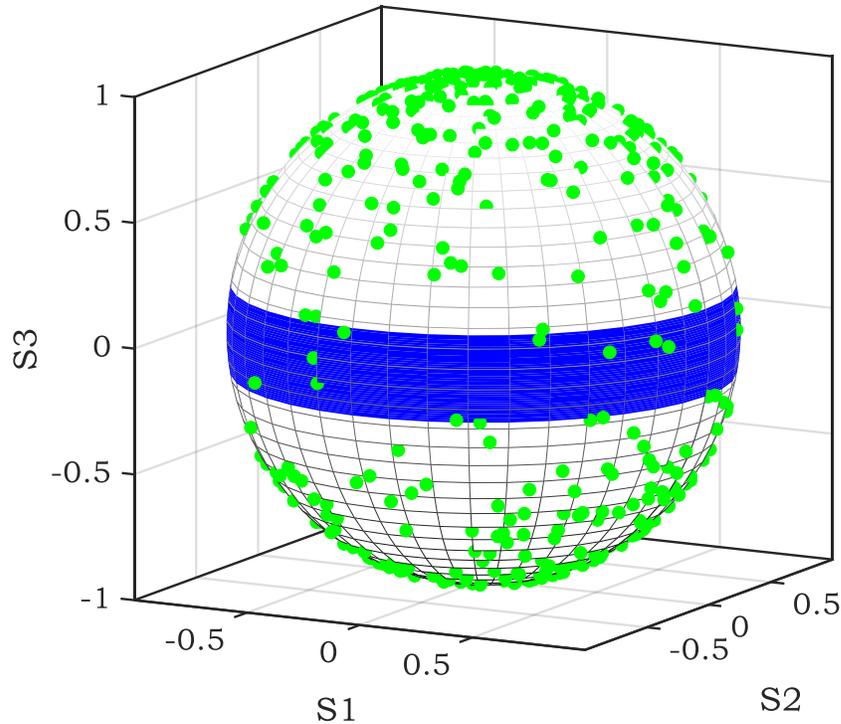
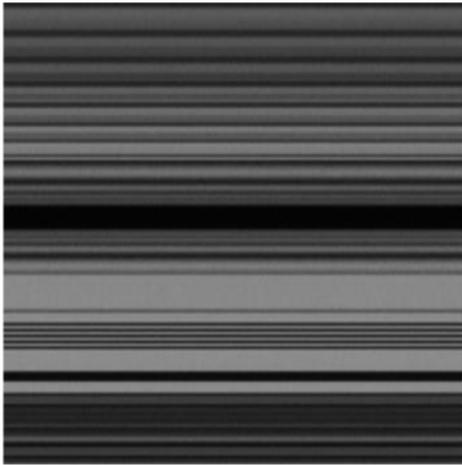


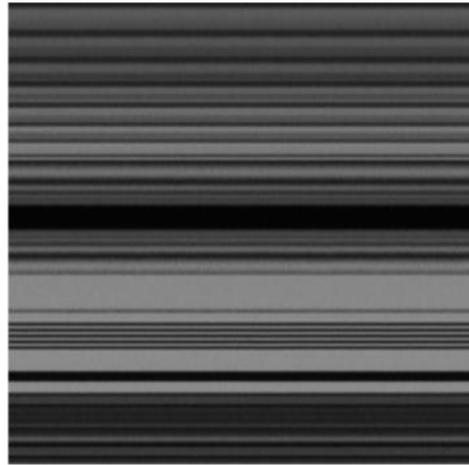
Figura 2.13: Singularidades de fase en la esfera de Poincaré, los vórtices localizados en la franja azul se consideran singularidades inestables.

A partir de las imágenes a lo largo del tiempo correspondientes a cada nivel de intensidad de turbulencia se construyen imágenes de historias temporales. En particular, se selecciona una determinada columna de las imágenes a lo largo del tiempo y a partir de las mismas se genera las imágenes de historia temporal. Se determina en cada imagen la localización de los vórtices y, tras un filtrado adecuado en la esfera de Poincaré para eliminar los vórtices inestables, determinamos la cantidad (densidad) de vórtices presentes. Este procedimiento se repite para cada columna de la imagen de entrada y se calcula el promedio de densidad de singularidades obtenidas en cada captura lo comparamos con la intensidad conocida de la turbulencia del aparato.

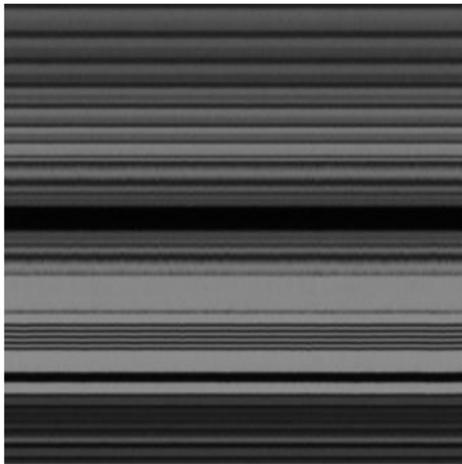
$$C_n^2 = 6.1396 \times 10^{-9} \left(m^{-2/3} \right)$$



$$C_n^2 = 9.3904 \times 10^{-9} \left(m^{-2/3} \right)$$



$$C_n^2 = 1.856 \times 10^{-8} \left(m^{-2/3} \right)$$



$$C_n^2 = 3.7728 \times 10^{-8} \left(m^{-2/3} \right)$$

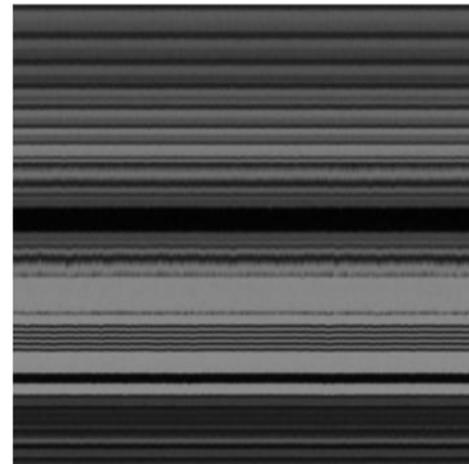


Figura 2.14: Evolución temporal de la columna indicada de muestra para 4 intensidades representativas del rango de turbulencia.

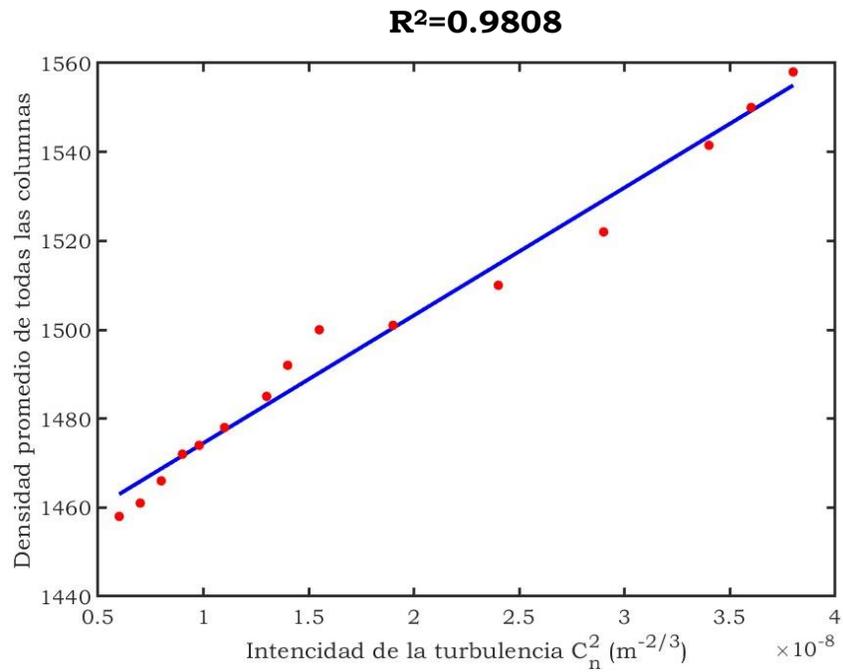


Figura 2.15: Comparación entre la densidad de vórtices filtrados por la esfera de Poincaré (rojo) y la medición de la intensidad de la Turbulencia (azul).

Se encontró una buena correlación entre la densidad promedio de vórtices y la intensidad de turbulencia ($R^2 = 0.9808$), abriendo el camino para la cuantificación de la turbulencia por este método cuya captura experimental es sencilla.

3. Metrología de vórtices ópticos

Desde la década del 70 la fotografía speckle y la metrología speckle han sido muy estudiadas. En particular, en la fotografía speckle la idea básica es comparar los patrones de intensidad de un objeto rugoso en un estado inicial y final después de haber sufrido, por ejemplo, un desplazamiento o una deformación. Estas técnicas han dado lugar al desarrollo de diversas aplicaciones [60-64].

En la interferometría óptica, las singularidades de fase son un efecto indeseable ya que obstaculizan el desenvolvimiento de fase. Sin embargo, en los últimos años, se han propuesto diversas aplicaciones metroológicas que se basan en vórtices ópticos. La metrología óptica de vórtices aprovecha el hecho que las singularidades de fase son puntos geométricos bien definidos en las cuales las propiedades del núcleo son únicas. Esto permite que los vórtices sean utilizados como marcadores unívocos e identificables [65].

Entre las múltiples aplicaciones se reportó la detección de desplazamientos con precisión nanométrica [7] y rotaciones en la escala de los miliradianes [8]. En particular, en ref. [7] se propone el uso de las singularidades de fase presentes en la señal analítica compleja obtenida a partir de un patrón de speckle en intensidad como indicativo del desplazamiento local del speckle. Debido a que la pseudo-fase puede obtenerse sin recurrir a la interferometría, esta técnica puede ser usada en imágenes de texturas aleatorias de origen natural (como tejidos biológicos) o artificial incluso iluminadas con luz natural no coherente. La versatilidad de la información del pseudocampo permite una amplia gama de aplicaciones más allá de las desarrolladas para la metrología speckle.

El objetivo en este capítulo es mostrar la implementación de las singularidades de fase o vórtices ópticos como un método confiable en

el rastreo de objetos en movimiento de diferentes procedencias, biológicos como las imágenes médicas o simulados como hologramas generados en computador.

3.1 Seguimiento de vórtices

Al igual que los patrones de speckle en intensidad imprimen marcas en la superficie de un objeto iluminado coherentemente, las singularidades de fase distribuidas aleatoriamente en la información de pseudo-fase asociada a los patrones de speckle imprimen marcas únicas relacionadas con la superficie del objeto. Al igual que dos personas no poseen el mismo patrón de huella dactilar, ninguna singularidad de fase tiene exactamente las mismas propiedades de las estructuras del núcleo. Como se mostró anteriormente, las singularidades de fase se localizan en la intersección de las dos líneas de cruce por cero de las partes real e imaginaria del campo. Para el seguimiento de vórtices homólogos antes y después de un desplazamiento se identifican las singularidades de fase correspondientes a los mapas de fase o pseudo-fase para los dos momentos. Para identificar y localizar las singularidades de fase se utilizan las propiedades del núcleo: vorticidad (dada por la ecuación (1.10)), carga topológica (dada por la ecuación (1.11)), excentricidad (dada por la ecuación (1.12)) y ángulo del cruce por cero (dada por la ecuación (1.15)). La unicidad de las singularidades permite una identificación correcta y estimar el desplazamiento de un objeto a partir del seguimiento de los movimientos de dichos vórtices homólogos.

El desplazamiento de cada singularidad de fase está directamente relacionado con el desplazamiento local de la superficie del objeto. Así, el desplazamiento de un objeto puede estimarse a partir del cambio de coordenadas de cada singularidad de fase dentro de toda la zona de sondeo, como se muestra en la figura 3.1. En el proceso de desplazamiento o deformación, pueden crearse o aniquilarse vórtices de a pares y con carga topológica opuesta [66].

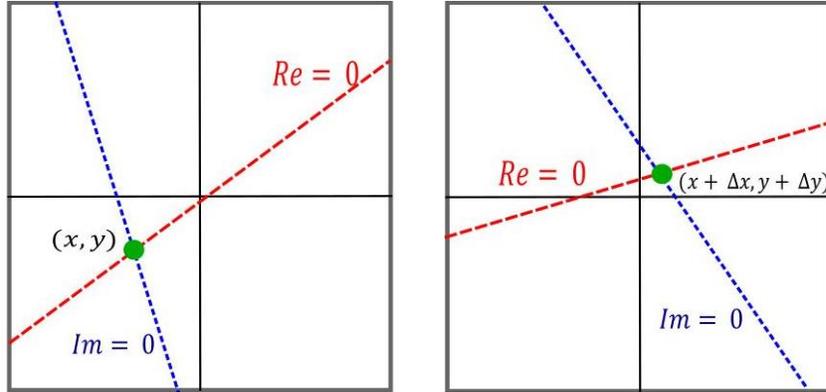


Figura 3.1: Diagrama esquemático del principio de la metrología óptica de vórtices

Si a priori se conoce que el desplazamiento es pequeño, el proceso de búsqueda puede restringirse solo a las singularidades de fase vecinas más cercanas de la misma carga topológica. Cuando el desplazamiento es grande, no uniforme o no se tiene información a priori, es compleja la identificación de las singularidades.

Cabe aclarar que, si las imágenes antes y después del desplazamiento no están decorrelacionadas, los cambios en las propiedades de las estructuras del núcleo son muy pequeñas. Sin embargo, a medidas que la decorrelación aumenta, los cambios en las propiedades del núcleo también lo hacen y dificulta la identificación y seguimiento de los homólogos. Cabe aclarar que si la dinámica del patrón es lenta en comparación con el intervalo de muestreo es posible analizar el comportamiento de dichos vórtices.

Para encontrar los vórtices homólogos antes y después al desplazamiento del objeto, es necesario establecer ciertas condiciones sobre las propiedades de las estructuras del núcleo:

$$|\Delta| = |(\Omega - \Omega')/(\Omega + \Omega')| < \varepsilon_1 \quad (3.1)$$

$$q = q' \quad (3.2)$$

$$|\Delta e| = |e - e'| < \varepsilon_2 \quad (3.3)$$

$$\Delta\theta_{RI} = |\theta_{RI} - \theta'_{RI}| < \varepsilon_3 \quad (3.4)$$

donde los parámetros primados están relacionados con las singularidades de fase después del desplazamiento. Luego de la selección de los valores umbrales ε_1 , ε_2 y ε_3 , la mayoría de las singularidades de fase con grandes diferencias en sus estructuras centrales pueden eliminarse eficazmente.

Posteriormente, en una segunda etapa se elige una figura de mérito para optimizar la selección de los vórtices, la cual se expresa como:

$$F = (e - e')^2 + \left(\frac{\Omega - \Omega'}{\Omega + \Omega'}\right)^2 + \left[\frac{2}{\pi}(\theta_{RI} - \theta'_{RI})\right]^2 \quad (3.5)$$

Este factor de mérito se calcula para cada singularidad de fase y se identifican los pares de homólogos a partir del valor mínimo de F .

De esta manera, el desplazamiento de un objeto en el plano se puede estimar a partir del cambio de coordenadas de los vórtices homólogos dentro del área de trabajo.

3.2 Metrología en hologramas en CGH

Un holograma es un registro de la intensidad del patrón de interferencia entre la luz procedente de un objeto o escena y un haz referencia. Este contiene información tanto de fase como de la amplitud del campo del objeto, lo que permite su reconstrucción completa.

Un método flexible para obtener contenido holográfico es el uso de hologramas generados por ordenador (CGH), en este caso los hologramas se calculan numéricamente, permitiendo no tener restricciones en resolución o tamaño y sin la necesidad de configuraciones costosas para el almacenamiento holográfico.

Existen muchos algoritmos de CGH, dependiendo del tipo de holograma que queramos generar y del esquema de visualización elegido.

Los métodos de CGH de solo fase más comunes se derivan del algoritmo de Gerchberg-Saxton [67], que permiten calcular la fase que conecta un plano de entrada con su plano de transformación de Fourier. Esta técnica está limitada a la generación de hologramas a

partir de objetos 2D. Sin embargo, cortando un objeto 3D en capas [68], generando el Holograma de solo fase (HSF) de cada capa, y sumando los HSFs de todas las capas, es posible obtener un HSF simple de un objeto 3D.

3.2.1 Generación de hologramas

En primer lugar, se obtiene una imagen en intensidad y una imagen de profundidad de la escena 3D cuyo holograma se quiere generar. Para ello se utiliza un software de modelado y renderizado 3D de uso común (Blender). La imagen de profundidad es una imagen en escala de grises, donde cada valor de la escala de grises representa la distancia entre ese pixel y el plano de la cámara (ver figura 3.2).

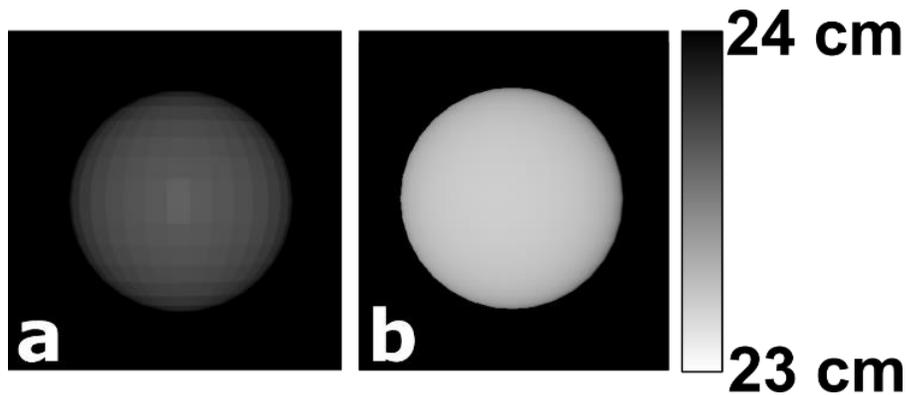


Figura 3.2: a) Imagen de intensidad de la escena 3D b) imagen de profundidad de la misma escena

Utilizando la imagen de profundidad, podemos segmentar la imagen de intensidad en varias rebanadas o capas separadas axialmente una cierta distancia dz , como se muestra en la figura 3.3. A continuación, se generan hologramas utilizando dos enfoques. En uno, se multiplica cada capa por una máscara de fase aleatoria y se retropropaga cada capa al plano del holograma utilizando un propagador de Fresnel. Entonces, se suman todas las capas y se descarta la amplitud del resultado. La función de fase resultante será el holograma del objeto 3D completo. A este método de generación de hologramas se lo denominará RPM.

El otro enfoque consiste en asignar una fase aleatoria fija a cada punto del objeto 3D. a este método de generación se lo denominará FRP. La diferencia entre ambos enfoques radica que en una propuesta

la fase aleatoria cambia entre capas y fotogramas de video, mientras que en la otra propuesta la fase aleatoria es una característica de la superficie del objeto y, por tanto, permanece invariante, aunque el objeto este en movimiento.

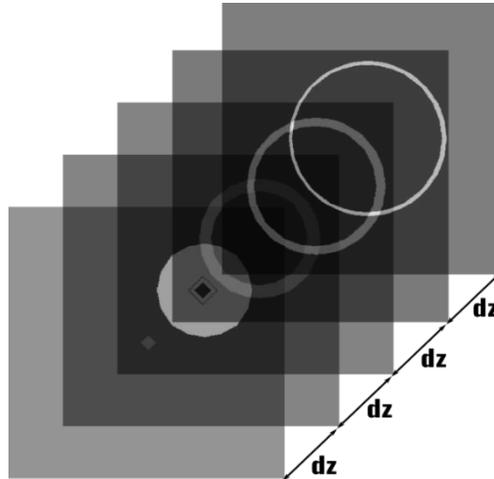


Figura 3.3: Corte en profundidad de la imagen en intensidad utilizando la información de profundidad.

Para nuestra propuesta se generaron hologramas con una resolución de 1920x1920 píxeles. La ventana del objeto tiene un tamaño de 1500x1500 píxeles. La distancia entre cada plano del objeto es de 0.2 mm, y la distancia entre el objeto y los planos del holograma es de 23 cm. El objeto se corta en 50 capas de profundidad. El tamaño del píxel es de 8 μm y la longitud de onda de iluminación es de 532 nm.

En la figura 3.4, se muestra el holograma generado utilizando ambos métodos de generación y sus respectivas reconstrucciones. Visualmente, la calidad de la reconstrucción es muy similar. La diferencia entre los dos enfoques se nota al observar que el ruido del speckle cambia en cada fotograma para el método RPM debido a que la fase aleatoria cambia entre fotogramas. Por otro lado, en los hologramas generados por el método FRP, el ruido del speckle en la esfera permanece constante en todos los fotogramas.

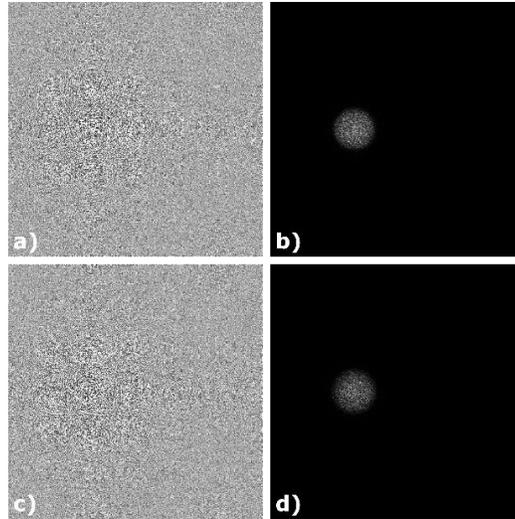


Figura 3.4: a) Holograma generado mediante método RPM, b) objeto reconstruido a partir del holograma a), c) holograma generado mediante método FRP, y d) objeto reconstruido a partir de c).

3.2.2 Seguimiento de vórtices

Para rastrear los objetos 3D a partir de los hologramas generados con los métodos detallados anteriormente, no será necesario realizar la reconstrucción de hologramas, se implementa el método de rastreo de singularidades de fase en la información de fase del holograma.

Las singularidades de fase distribuidas aleatoriamente en la información de fase del holograma están relacionadas directamente con el objeto. Por lo tanto, un desplazamiento del objeto produce un desplazamiento de los vórtices ópticos. Como se mencionó, las propiedades de las estructuras del núcleo de las singularidades pueden utilizarse como una huella dactilar que caracteriza de forma única cada singularidad de fase. Esta identificación permite rastrear el movimiento de cada singularidad. Así, el desplazamiento del objeto puede estimarse a partir del desplazamiento de la singularidad dentro del área de sondeo.

Se consideran dos alternativas. En la primera, las singularidades de fase se determinan de la información de la fase asociada a cada fotograma del video holográfico. Las singularidades se localizan donde

las partes real e imaginaria de las señales complejas son nulas. Como se mencionó anteriormente, las propiedades del núcleo pueden utilizarse para la identificación única de la singularidad de fase. Los parámetros de la estructura central de los vórtices ópticos son la excentricidad, el ángulo del cruce por cero, la carga topológica y la vorticidad (Ecuaciones 1.10-1.12; 1.15).

Estas características permiten identificar todas las singularidades de fase asociadas a cada fotograma de los hologramas generados con el FMP y con el método RPM. A continuación, el desplazamiento del objeto en el holograma puede estimarse a partir del cambio de coordenadas de la singularidad de fase ($\Delta x, \Delta y$) a lo largo del video. Obsérvese que las singularidades de fase con grandes diferencias en sus estructuras centrales no lograron encontrar su homólogo y deben eliminarse. Como una alternativa para aumentar el número de vórtices ópticos al rastrear, se aplica la transformada de *LG* (ecuación 1.3), ya que permite aumentar el número de singularidades de fase en la región con un ancho de banda apropiado (ecuación 1.3) y así incrementar el número de homólogos en el rastreo, proporcionando un medio más eficaz para determinar el desplazamiento del objeto 3D.

3.2.3 Análisis de seguimiento

Seguimiento de vórtices en holograma de fase

Para seguir el movimiento del objeto a partir de sus hologramas, se aplica el seguimiento de vórtices anteriormente descrito para los videos holográficos generados por los métodos FRP y RPM. Se prueban desplazamientos en un solo eje, en ambos ejes y se realizan mediciones para videos que incluyen diferentes desplazamientos.

En primer lugar, se selecciona una región de 50x50 píxeles en el fotograma inicial del video, como se muestra en el cuadrado rojo de la figura 3.5. Esta misma región seleccionada se procesa en cada fotograma del video holográfico, para encontrar los vórtices ópticos, identificados mediante la utilización de las propiedades del núcleo y rastreando su movimiento.

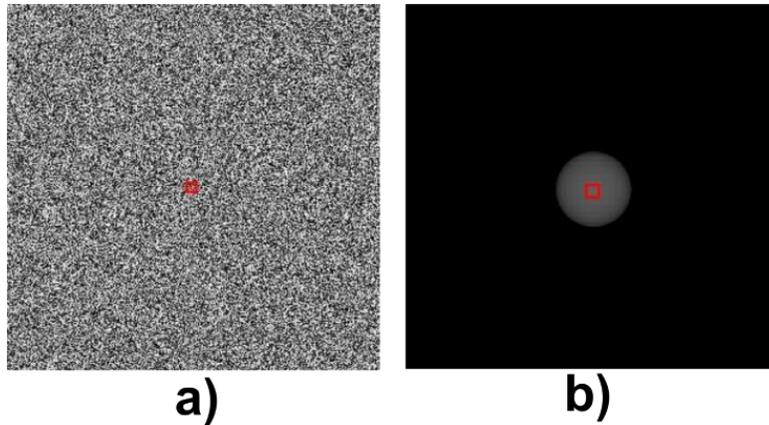


Figura 3.5: El cuadro rojo indica la región seleccionada que se tendrá en cuenta para el análisis de seguimiento. a) en el holograma, b) objeto en el paso de reconstrucción (objeto).

Esta misma región seleccionada se procesa en cada fotograma del video holográfico, para encontrar los vórtices ópticos, identificados mediante la utilización de las propiedades del núcleo y rastreando su movimiento.

Se considera únicamente las singularidades de fase con carga topológica positiva (puntos rojos de la figura 3.6). En la figura 3.6 se muestra el área seleccionada correspondiente al primer fotograma del video holográfico generado por la técnica RPM. El video holográfico corresponde a un desplazamiento horizontal de 139 píxeles del objeto a lo largo de los 30 fotogramas.

Para identificar las singularidades o vórtices homólogos entre fotogramas de video, se evalúan las propiedades del núcleo como huellas dactilares. Algunas singularidades de fase muestran cambios importantes en su estructura central a lo largo del video. En este caso, la asignación de vórtices homólogos falla, y estas singularidades no deben tenerse en cuenta en el análisis de seguimiento. Además, algunos vórtices desaparecen durante los fotogramas del video debido a la creación y aniquilación de pares de vórtices con cargas topológicas opuestas. En este caso, no se pueden encontrar homólogos al rastrear los vórtices.

Los rombos verdes de la figura 3.6 indican las singularidades en las que falla la asignación de vórtices homólogos. Solo se rastrearán aquellos vórtices que están presentes durante todos los fotogramas del video holográfico (puntos rojos figura 3.6).

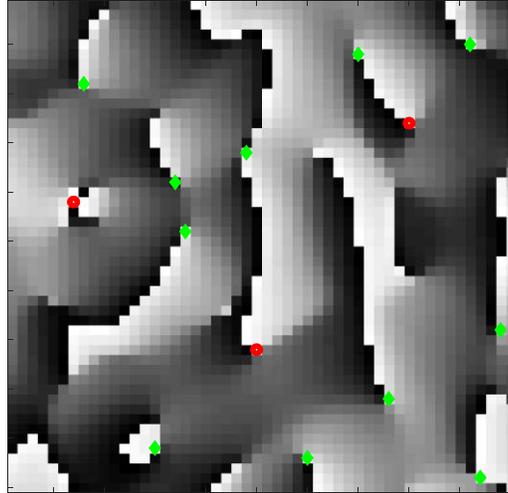


Figura 3.6: Región procesada correspondiente al primer fotograma del video holográfico RPM. Los puntos rojos indican las singularidades de fase que pudieron rastrearse en todos los fotogramas del video holográfico. Los rombos verdes indican las singularidades en las que fallan la asignación de vórtices homólogos.

Tras determinar las coordenadas de todos los vórtices en la zona de sondeo elegida, se mide su desplazamiento. En la figura 3.7 se muestra la trayectoria de cada vórtice óptico durante el video holográfico RPM.

Como se puede observar, la trayectoria media (línea en verde) reproduce un desplazamiento aproximadamente horizontal, replicando el comportamiento del objeto.

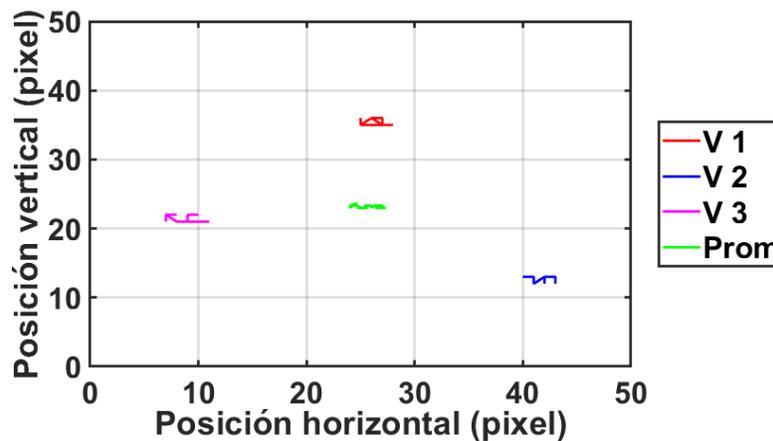


Figura 3.7: Seguimiento directo de vórtices para un video holográfico generado por RPM correspondiente a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles. V1-V3: vórtices rastreados

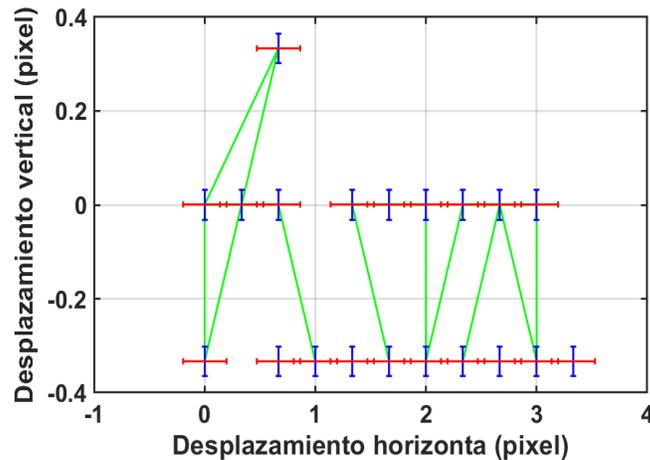


Figura 3.8: Desplazamiento medio del vórtice para un video generado por RPM correspondiente a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles.

En la figura 3.8 se observa el desplazamiento medio de los vórtices ópticos en el video holográfico, se aprecian algunas fluctuaciones que afectan a la precisión de la técnica de seguimiento de vórtices. En particular, se observa una incertidumbre en la posición media del vórtice de 0.2 píxeles (calculada con una confianza del 97.5%). Sin embargo, la detección del desplazamiento horizontal es evidente.

Se realiza el mismo procedimiento utilizando un video holográfico FRP. El video holográfico corresponde a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles a lo largo de 30 fotogramas. En la figura 3.9 se muestra la zona correspondiente al primer fotograma del video holográfico que se va a procesar.

A continuación, las figuras 3.10 y 3.11, presentan los resultados de seguimiento del video FRP. Obsérvese que, en este caso el número de vórtices homólogos aumenta en comparación con los resultados de RPM. Por lo que se puede rastrear vórtices adicionales y el desplazamiento horizontal medio evaluado es mayor en comparación con el primer caso (3.5 píxeles de desplazamiento horizontal para el video FRP y 3.33 píxeles de desplazamiento horizontal para el RPM). Se observa también una fluctuación significativamente menor en el desplazamiento medio del vórtice en los resultados del FRP en comparación con los del RPM.

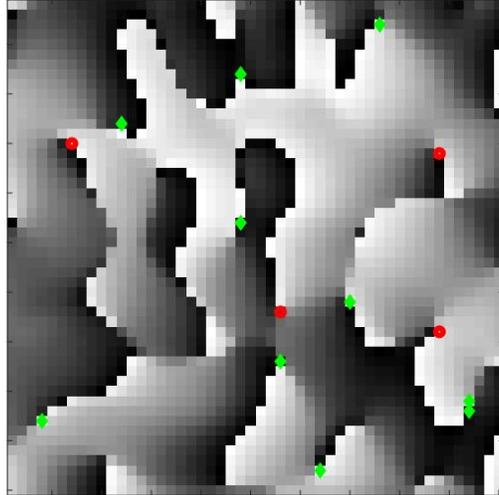


Figura 3.9: Región procesada correspondiente al primer fotograma del video holográfico FRP. Los puntos rojos indican las singularidades de fase que pudieron rastrearse en todos los fotogramas del video holográfico. Los rombos verdes indican las singularidades en las que falla la asignación de vórtices homólogos.

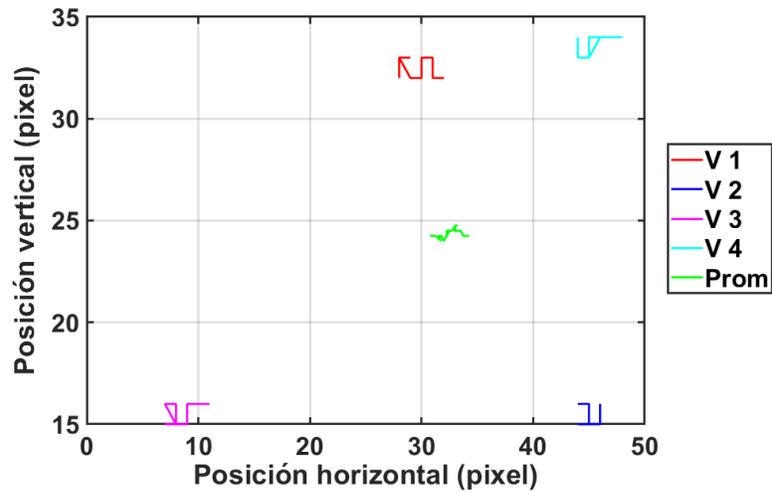


Figura 3.10: Seguimiento directo de vórtices para un video generado por FRP correspondiente a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles. V1-V4: vórtices ópticos rastreados.

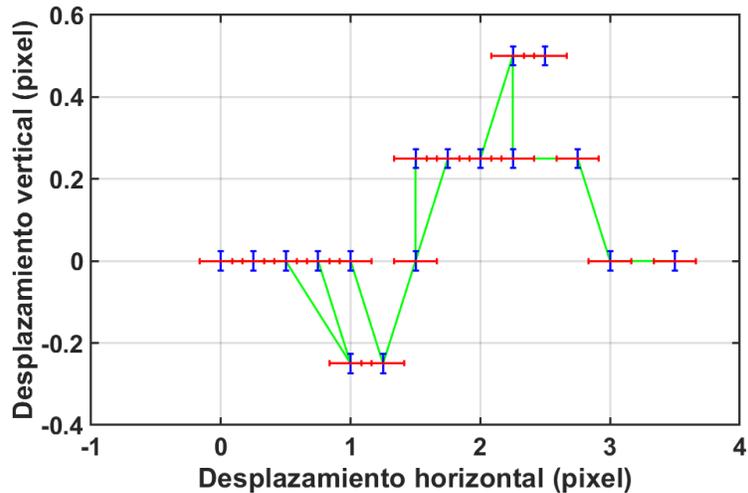


Figura 3.11: Desplazamiento medio del vórtice para un video generado por FRP correspondiente a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles.

Seguimiento de vórtices en pseudo fase

Otra alternativa para el seguimiento es generar una pseudo-fase. Este nuevo patrón de fase se obtiene a partir del holograma mediante una transformada de LG . Al elegirse un ancho de banda adecuado (ω) se aumenta el número de singularidades en la pseudo-fase. Una vez encontrados los vórtices en todos los fotogramas, se rastrea los vórtices homólogos que pueden identificarse en todos los fotogramas del video. Asimismo, el seguimiento de los vórtices homólogos se lleva a cabo mediante la evaluación de las propiedades de la estructura del núcleo. Por último, el desplazamiento relativo de coordenadas entre imágenes se realiza mediante la correspondencia de los vórtices homólogos en los respectivos mapas de pseudo-fase.

En la figura 3.12 se observa la misma región de la figura 3.6 después de procesarla mediante la transformada LG . Los vórtices ópticos rastreados durante todos los fotogramas están marcados con puntos rojos. Para cada fotograma del video analizado se selecciona las mismas regiones de 50x50 píxeles.

Se prueba un video compuesto por 30 fotogramas generado con el método RMP. Junto con el video holográfico se produce un

desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles. El seguimiento de vórtices ópticos se realiza con un total de siete singularidades a través del video RMP. Por último, se establece la relación entre el desplazamiento medio de los vórtices y el desplazamiento del objeto.

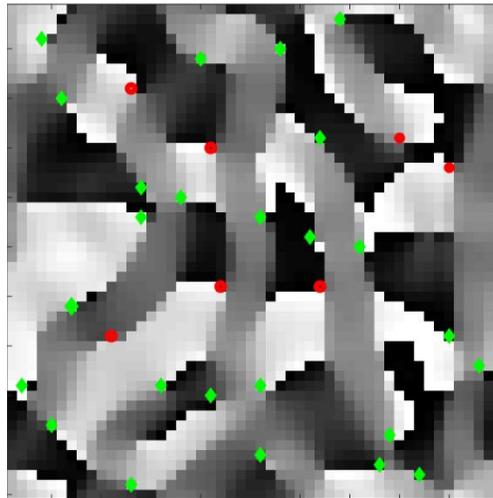


Figura 3.12: Región procesada por Laguerre-Gauss correspondiente al primer fotograma del video holográfico RPM. Los puntos rojos indican las singularidades de fase que pudieron rastrear en todos los fotogramas del video holográfico. Los rombos verdes indican las singularidades en las que falla la asignación de vórtices homólogos.

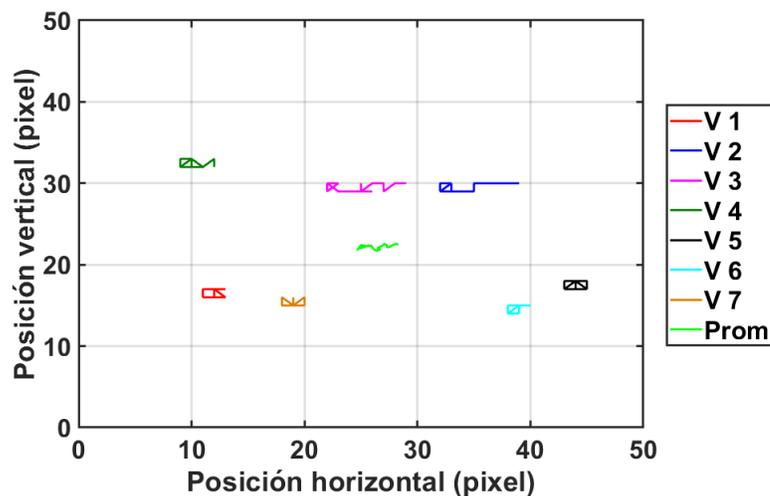


Figura 3.13: Seguimiento de vórtices para un video generado por RPM correspondiente a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles. V1-V7: vórtices rastreados.

Como puede verse en la figura 3.13, aunque hay diferencias en el desplazamiento de cada vórtice individual, el desplazamiento medio es una buena indicación de la presencia de un desplazamiento horizontal del objeto. En la figura 3.14 se muestra el desplazamiento medio con respecto a la posición media original de los vórtices. Estos resultados iniciales de la pseudo información de fase muestran que el desplazamiento medio medido de los vórtices es de 3.57 píxeles en comparación con un desplazamiento de 3.33 píxel medido directamente a partir de la información de fase. Esto, combinado con el control añadido sobre el número de vórtices rastreados obtenido mediante el uso de la pseudo-fase, significa que este puede ser un mejor enfoque para el seguimiento del video holográfico.

Teniendo en cuenta esto, se repiten las pruebas de las figuras 3.13 y 3.14 utilizando videos con diferentes desplazamientos. Los resultados se pueden observar en la tabla 3.1.

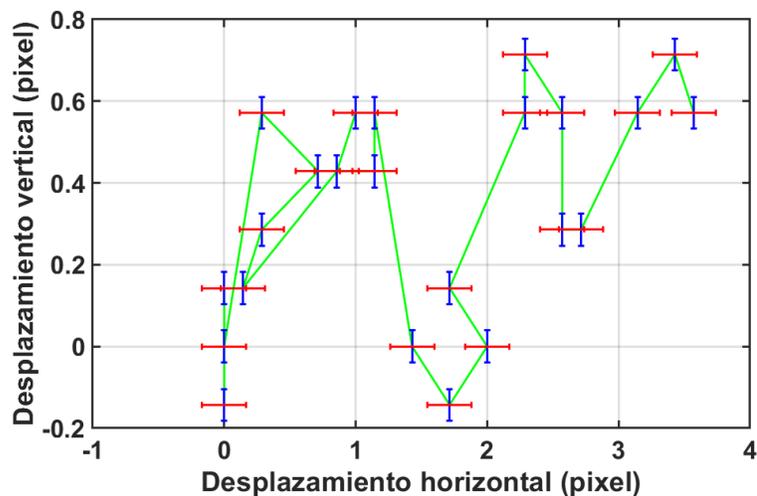


Figura 3.14: Desplazamiento medio del vórtice para un video generado por RPM correspondiente a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles.

En la figura 3.15, se muestra los resultados del seguimiento de un video holográfico generado por FRP de un objeto que se mueve 139 píxeles en dirección horizontal. En comparación con los resultados de RPM de la figura 3.13, se observa una disminución de la fluctuación en las coordenadas del vórtice. Para resaltar mejor este comportamiento, se muestra el desplazamiento medio de los vórtices en la figura 3.16.

Se repite la prueba para diferentes desplazamientos de los objetos y se muestra los resultados en la tabla 3.2.

Desplazamiento del objeto (pixeles)	Desplazamiento medio del vórtice (pixeles)	Incertidumbre media del desplazamiento del vórtice (pixeles)
139	3.5	0.2
125	3.3	0.1
111	3.0	0.1
83	2.5	0.1
70	2.3	0.1
42	1.7	0.1
14	0.75	0.03

Tabla 3.1: Relación entre los desplazamientos del objeto y del vórtice para los videos holográficos generados por RPM.

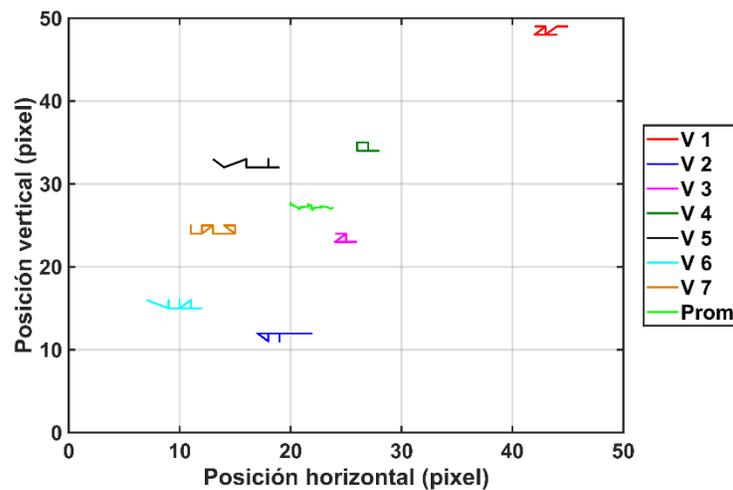


Figura 3.15: Seguimiento de vórtices para un video generado por FRP correspondiente a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 pixeles. V1-V7: vórtices rastreados.

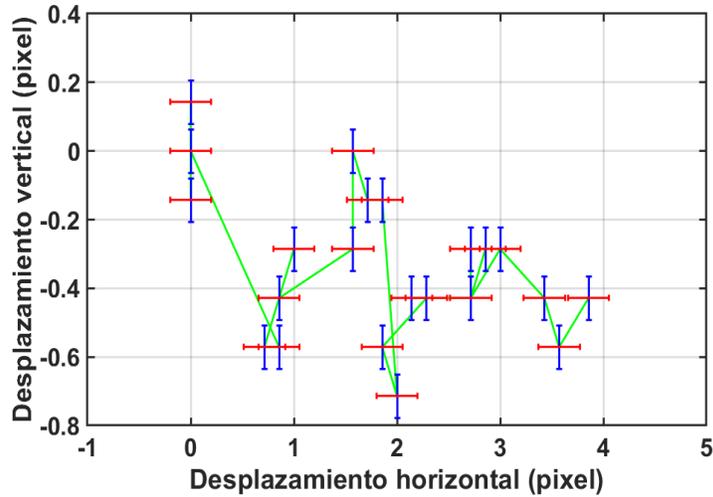


Figura 3.16: Desplazamiento medio del vórtice para un video generado por FRP correspondiente a un desplazamiento horizontal del objeto de 139 píxeles.

Desplazamiento del objeto (píxeles)	Desplazamiento medio del vórtice (píxeles)	Incertidumbre media del desplazamiento del vórtice (píxeles)
139	3.9	0.2
125	3.7	0.2
111	3.3	0.2
83	3.1	0.2
70	2.4	0.1
42	1.8	0.1
14	0.77	0.04

Tabla 3.2: Relación entre los desplazamientos del objeto y del vórtice para los videos holográficos generados por FRP.

Seguimiento de vórtices para CGH con movimiento en el plano

Se procede a comprobar el rastreo cuando el objeto se mueve en las direcciones vertical y horizontal simultáneamente. Para esto, se generan dos videos holográficos, uno con el método FRP y otro con el método RMP, con una duración de 30 fotogramas del mismo objeto con un desplazamiento de 98 píxeles a lo largo de una diagonal de 45° grados, como se muestra en la figura 3.17.

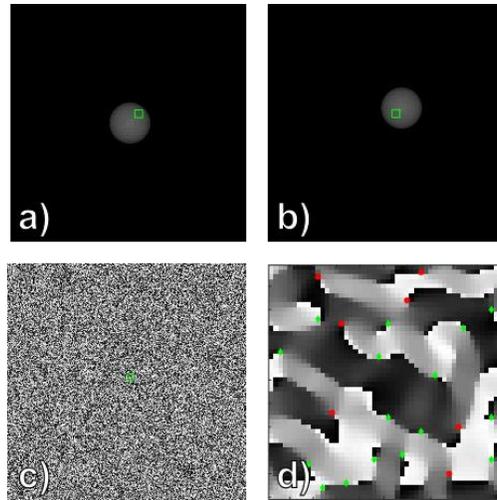


Figura 3.17: a) Primer fotograma del video holográfico generado con RPM. Cuadro verde: área de interés utilizada para el seguimiento del vórtice, b) fotograma final del video holográfico, c) fase del holograma inicial del video holográfico y d) Pseudo-fase de la zona de interés. Los puntos rojos indican las singularidades de fase rastreadas en todos los fotogramas del video holográfico. Los rombos verdes indican singularidades en las que falla la asignación de vórtices homólogos.

En el video RPM, se pudo rastrear seis vórtices diferentes, como se muestra en la figura 3.18. El desplazamiento medio de los vórtices se observa en la figura 3.19.

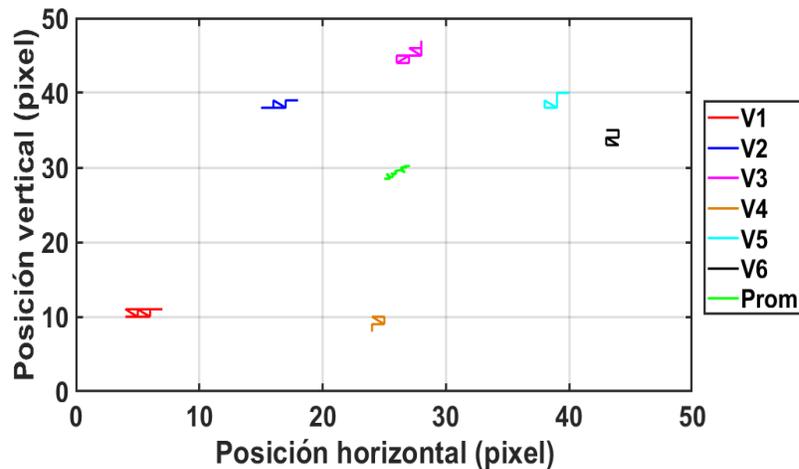


Figura 3.18: Seguimiento de vórtices para un video generado por RPM correspondiente a un desplazamiento diagonal del objeto de 98 píxeles. V1-V6: vórtices ópticos rastreados.

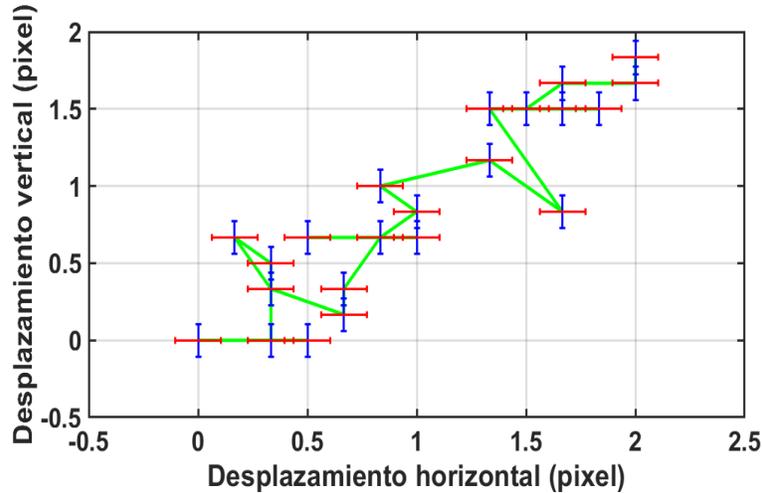


Figura 3.19: Desplazamiento medio del vórtice para un video generado por RPM correspondiente a un desplazamiento diagonal del objeto de 98 píxeles.

A partir de estos resultados, se puede ver que el desplazamiento medio del vórtice medido para el RPM fue de 1,6 píxeles en la dirección vertical y de 2 píxeles en la dirección horizontal. El resultado es un desplazamiento en diagonal total de 2.5 píxeles. Esto muestra la sensibilidad ligeramente inferior de las medidas empleando vórtices ópticos para un movimiento en diagonal. Se repite el mismo procedimiento para un video FRP. En este caso, también se identifican seis vórtices diferentes que son rastreados en todos los fotogramas del video como se muestra en la figura 3.20. Además, el desplazamiento medio se muestra en la figura 3.21.

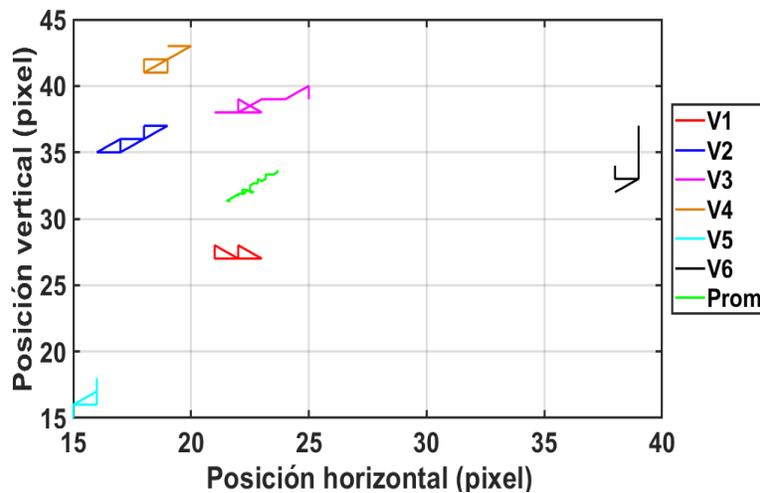


Figura 3.20: Seguimiento de vórtices para un video generado por FRP correspondiente a un desplazamiento diagonal del objeto de 98 píxeles. V1-V6: vórtices ópticos rastreados.

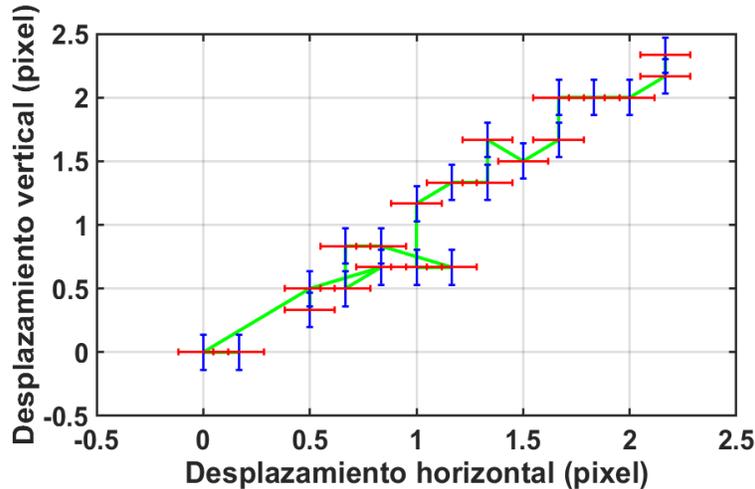


Figura 3.21: Desplazamiento medio del vórtice para un video generado por FRP correspondiente a un desplazamiento diagonal del objeto de 98 píxeles.

En este caso, se obtiene un desplazamiento de 2.4 píxeles en sentido horizontal y 2.6 en sentido vertical, lo que resulta en un desplazamiento diagonal de 3.5 píxeles. Esta medida es superior al desplazamiento para el método RPM, lo que permite observar que el método FRP presenta mayor sensibilidad en comparación con el método RPM

Seguimiento de vórtices para CGH correspondientes a dos objetos

Se prueba la técnica de rastreo para un video que contenga más de un objeto. Debido a las características de la transformada de Fresnel utilizada para obtener los hologramas, la información de cada objeto, aunque distribuida por todos los planos del holograma, esta particularmente localizada cerca de la posición de cada objeto. Este comportamiento permite evaluar el movimiento de dos objetos independientes en un único holograma.

El video holográfico corresponde a dos esferas, una etiquetada como objeto A con un desplazamiento de 83 píxeles en la horizontal y otra como objeto B con un movimiento de 83 píxeles, pero en sentido vertical. En la figura 3.22 se muestra el primer y último fotograma reconstruido de este video. En la figura 3.23 se muestra las zonas seleccionadas para el seguimiento del vórtice, tanto en el plano objeto como en el del holograma

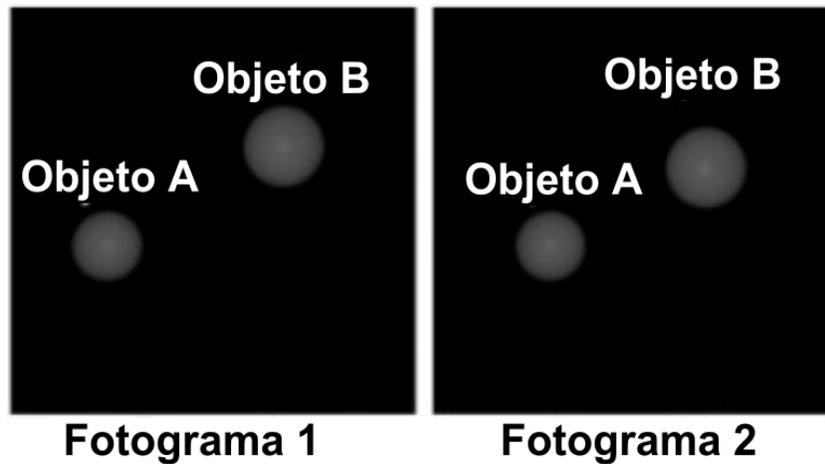


Figura 3.22: Primer y último fotograma de la escena cuyos hologramas se generarán y se rastrean mediante el método de vórtice óptico.

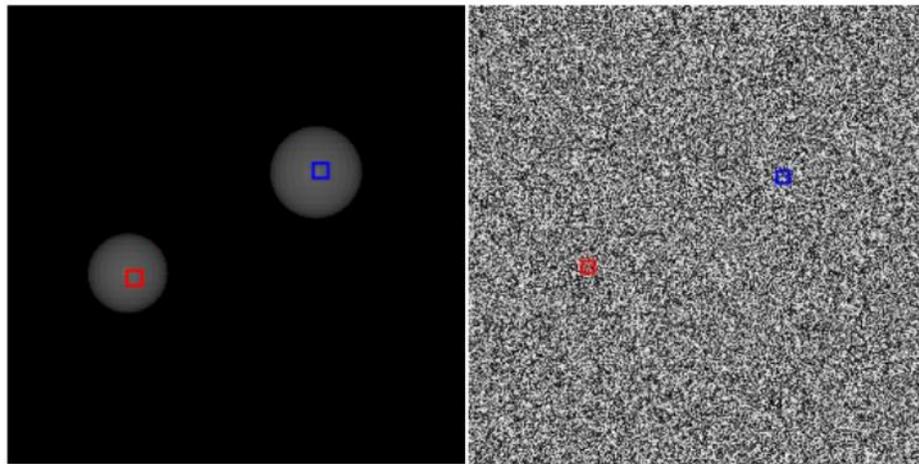


Figura 3.23: Zonas seleccionadas para el seguimiento óptico de vórtices.

Una vez más, se genera el video holográfico empleando los métodos FRP y RPM.

A continuación, se muestra los resultados del seguimiento de los vórtices ópticos a partir de la información de pseudo fase para el método de RPM. En la figura 3.24, se observa el desplazamiento medio final de los vórtices ópticos del objeto A es de aproximadamente 2.12 píxeles y para el objeto B es de 2.2 píxeles. Para un desplazamiento de 83 píxeles, este resultado muestra una menor sensibilidad en

comparación al obtenido con un solo objeto donde se esperaba un desplazamiento de 2.5 píxeles. No obstante, estos resultados demuestran la capacidad del método de seguimiento óptico de vórtices para seguir diferentes objetos en función del área de interés seleccionada.

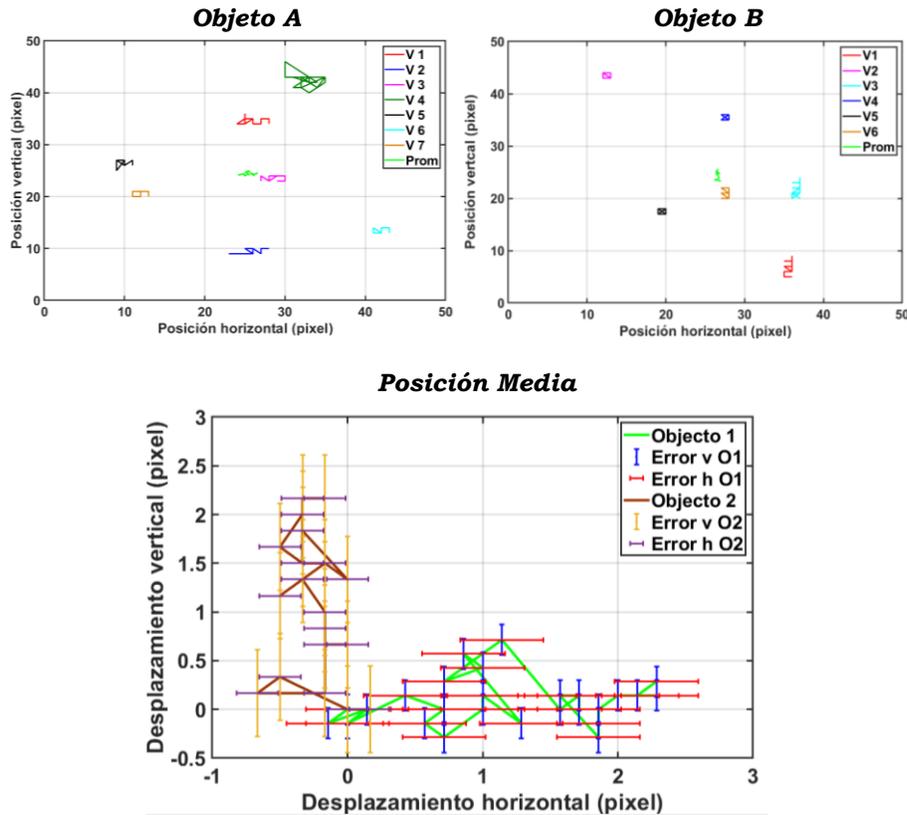


Figura 3.24: Primer y último fotograma de la escena cuyos hologramas se generarán y se rastrean mediante el método de vórtice óptico.

Se repite la prueba para el video generado por FRP. Los resultados se observan en la figura 3.25 donde se muestra que el desplazamiento medio del vórtice en el caso FRP es de casi 3 píxeles para el objeto A y de 3.3 píxeles para el objeto B. Estos resultados muestran una diferencia significativa respecto al resultado RPM.

Esto confirma una vez más la mayor capacidad de la técnica de seguimiento de vórtices para detectar el movimiento en los hologramas generados con el método FRP.

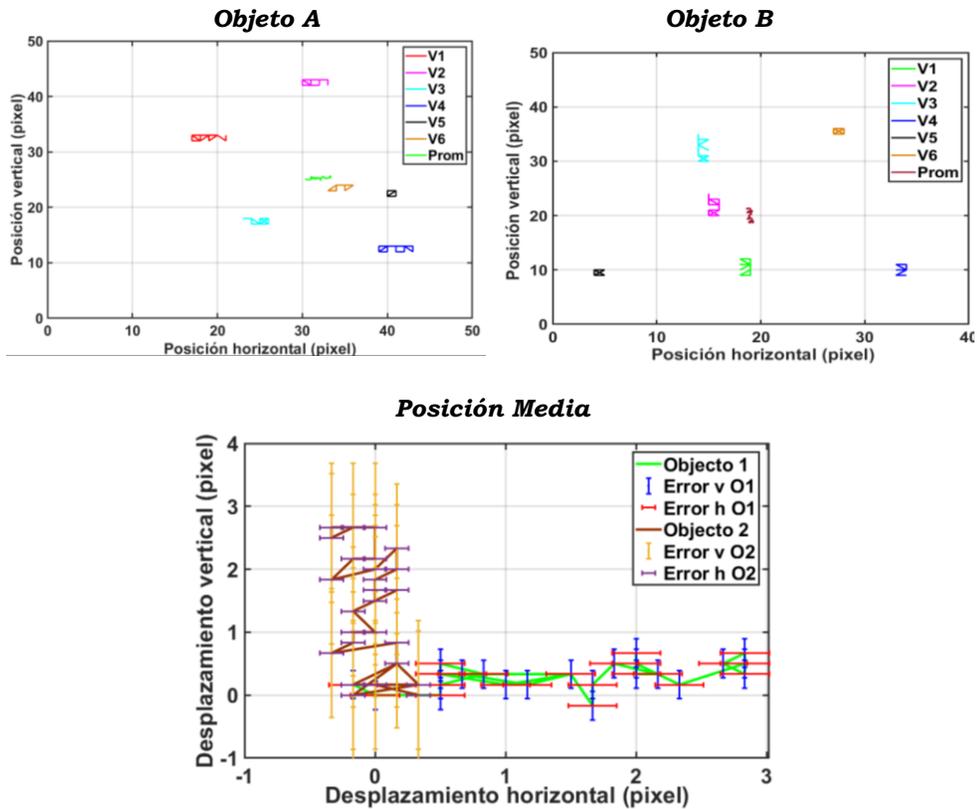


Figura 3.25: Primer y último fotograma de la escena cuyos hologramas se generarán y se rastrearán mediante el método de vórtice óptico.

Hay que destacar que este seguimiento de dos objetos es posible porque la separación entre los dos objetos y la distancia entre el plano del holograma y el plano del objeto garantizan que en cada zona de interés los vórtices sean causados en su mayor parte por la luz procedente de uno de los objetos. A medida que aumenta la distancia entre el plano del holograma y el plano de reconstrucción, la luz de todos los objetos se extiende por todo el plano del holograma, y los vórtices resultantes son causados por toda la escena. En este caso, no se puede medir el movimiento de los objetos individualmente.

Seguimiento de vórtices para CGH correspondientes a un objeto que varía su radio a lo largo del tiempo

Hasta el momento se ha encontrado la trayectoria de uno o más objetos en videos holográficos que se desplazan pero que no varían su forma. En este caso, se analizó la posibilidad de determinar la variación de radio de una esfera en el tiempo. Para esto se toma las

escenas que componen el video en el cual una esfera aumenta y disminuye su tamaño. El video holográfico corresponde a una esfera cuya radio varia a lo largo del tiempo entre 128 pixeles y 323 pixeles.

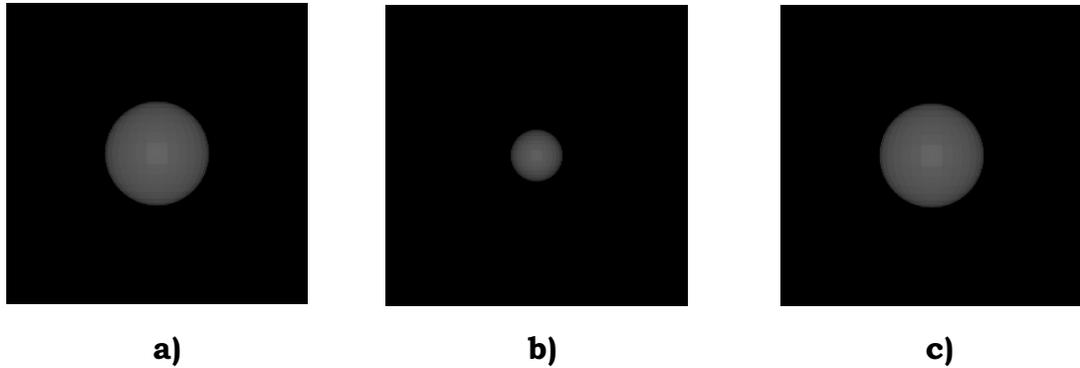


Figura 3.26: Fotogramas del video holográfico donde un objeto cambia periódicamente su tamaño.

Como se realizó en los casos anteriores, en el holograma se rastreó el cambio en el radio de la esfera en tres regiones diferentes marcadas en un cuadro verde, azul y rojo en la figura 3.27.

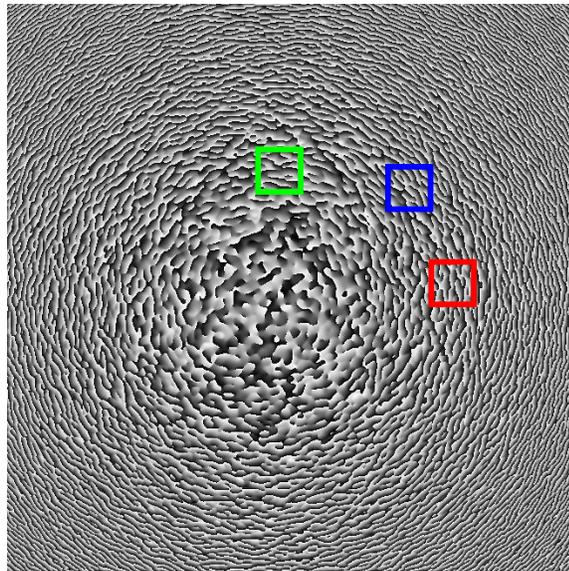


Figura 3.27: Fotograma holográfico donde se toman tres diferentes zonas de interés para realizar el rastreo implementando las singularidades de fase, zona 1 en verde, zona 2 rojo y zona 3 azul.

En la figura 3.28 se muestra los resultados del seguimiento de los vórtices ópticos a partir de la información de pseudo fase en los

hologramas de las esferas que cambian su tamaño generado por el método de RPM. Se selecciono un ancho de filtro LG de 0.11 y se consideran cada una de las regiones indicadas. Se rastrean seis singularidades de fase y se obtiene la variación promedio del radio para el video holográfico generado bajo el método RPM.

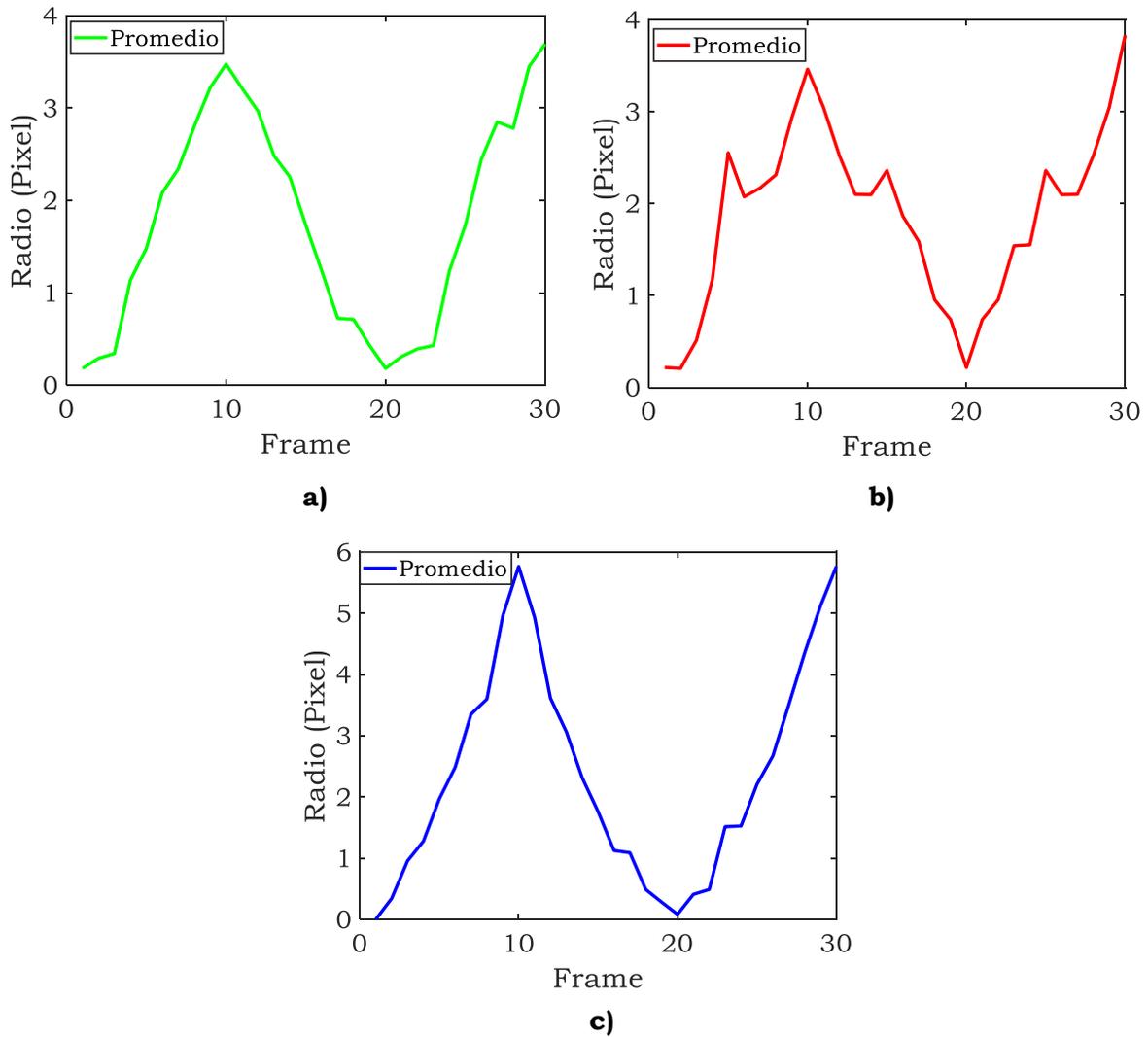


Figura 3.28: Variación promedio en el tiempo del radio de una esfera mediante rastreo con vórtices ópticos para hologramas RPM, medido en a) zona 1, b) zona 2 y c) zona 3.

Se repite la prueba para el video generado por FRP. Los resultados se observan en la figura 3.29 donde se muestra las variaciones promedio

del radio. Estos resultados concuerdan con lo obtenido mediante RPM.

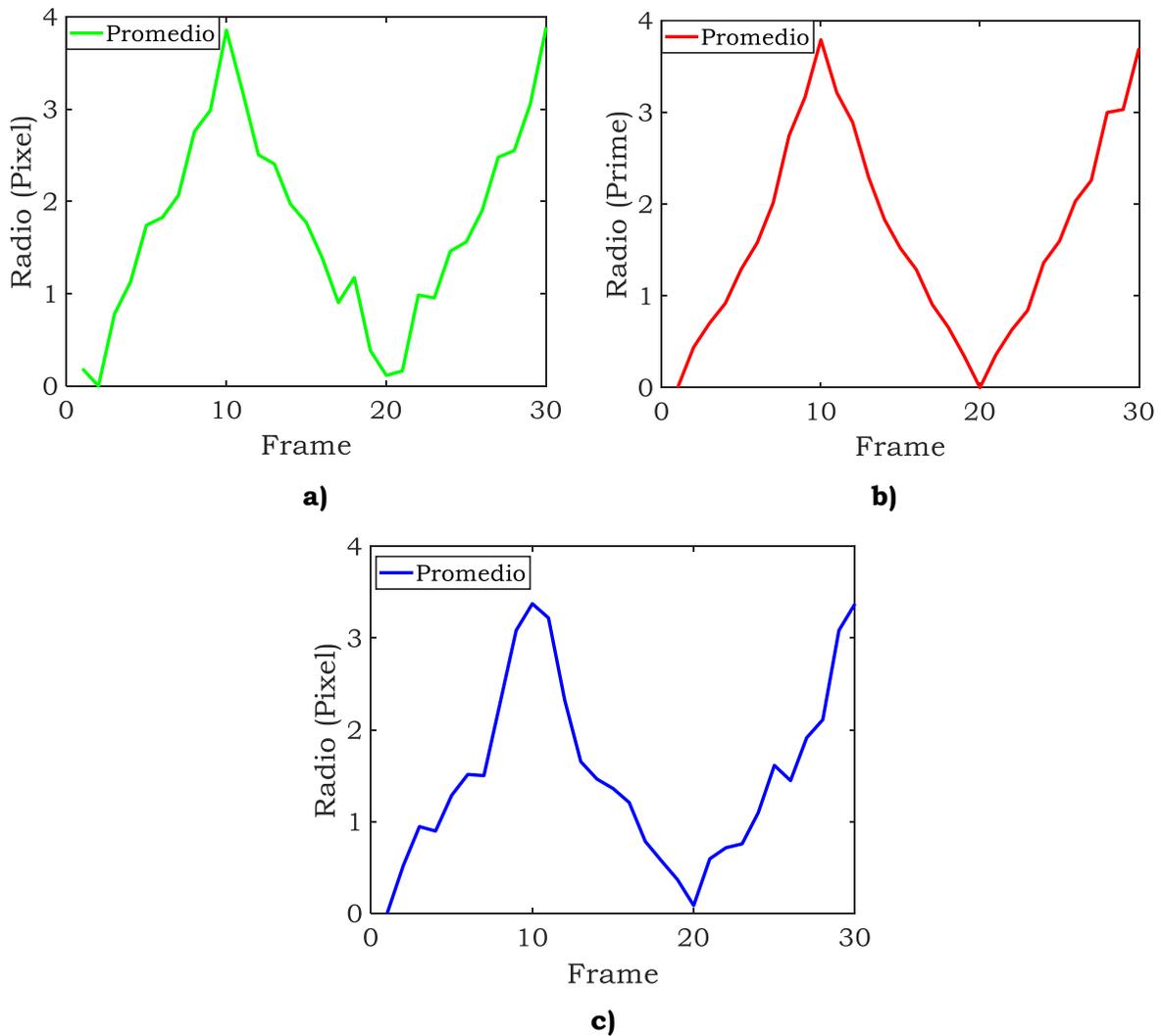


Figura 3.29: Variación promedio en el tiempo del radio de una esfera mediante rastreo con vórtices ópticos para hologramas FRP, medido en a) zona 1, b) zona 2 y c) zona 3.

Ahora se analiza un objeto que no guarda simetría, en este caso empleamos un corazón que es generado al utilizar un software de modelado y renderizado 3D (Blender). A partir de este video se generan videos holográficos para cada uno de los métodos que hemos implementado RPM y FRP.

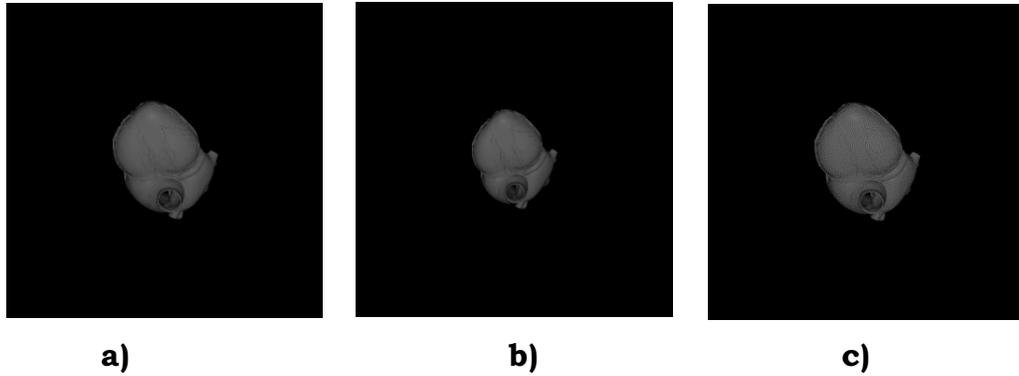


Figura 3.30: Fotogramas del video holográfico donde un corazón modelado en 3D cambia periódicamente su tamaño.

Se toman dos regiones diferentes en el holograma para rastrear el cambio en el radio del corazón, como se observa en la figura 3.31.

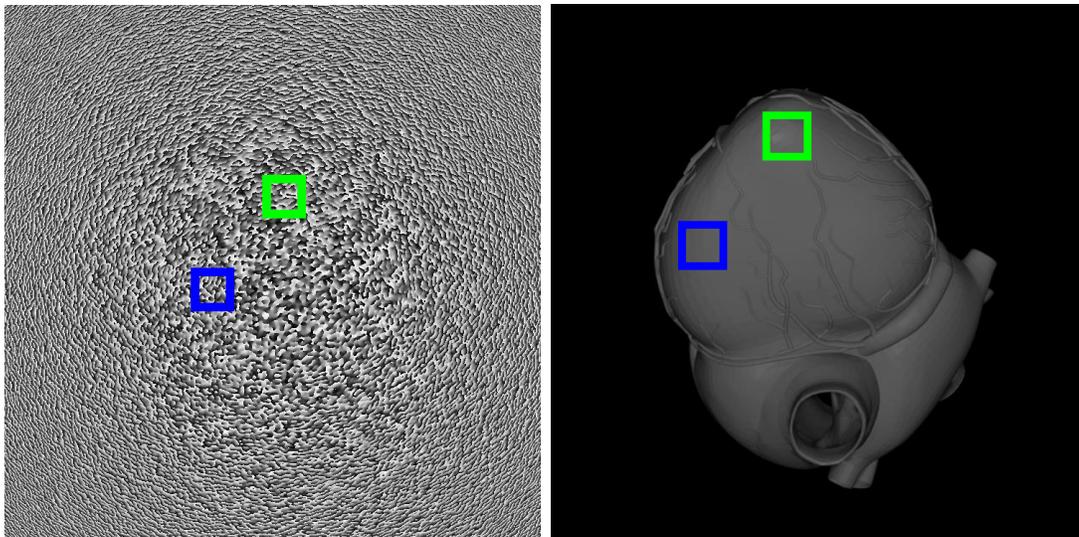


Figura 3.31: Fotogramas del video y del video holográfico donde un corazón cambia periódicamente su tamaño. Se toman dos zonas de interés para realizar el rastreo implementando las singularidades de fase, zona 1 en verde y zona 2 azul.

Las escenas del video holográfico generado por el método RMP se analiza empleando un filtro LG con valor de 0.11, se localizan los vórtices ópticos y se los rastrea a lo largo del tiempo. Se calcula la variación promedio del radio durante el ciclo. De igual forma, se realiza el proceso de rastreo de singularidades de fase en un video

holográfico generado mediante el enfoque FRP, para las dos regiones señaladas en la imagen 3.31

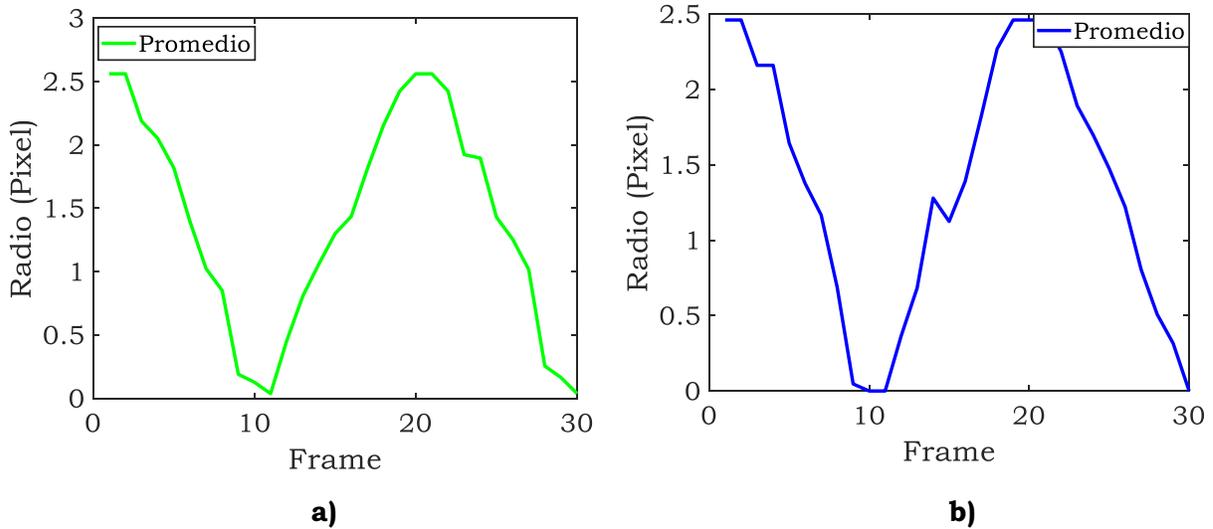


Figura 3.32: Variación promedio en el tiempo del radio de un corazón mediante rastreo con vórtices ópticos para hologramas RPM, medido en a) zona 1 y b) zona 2.

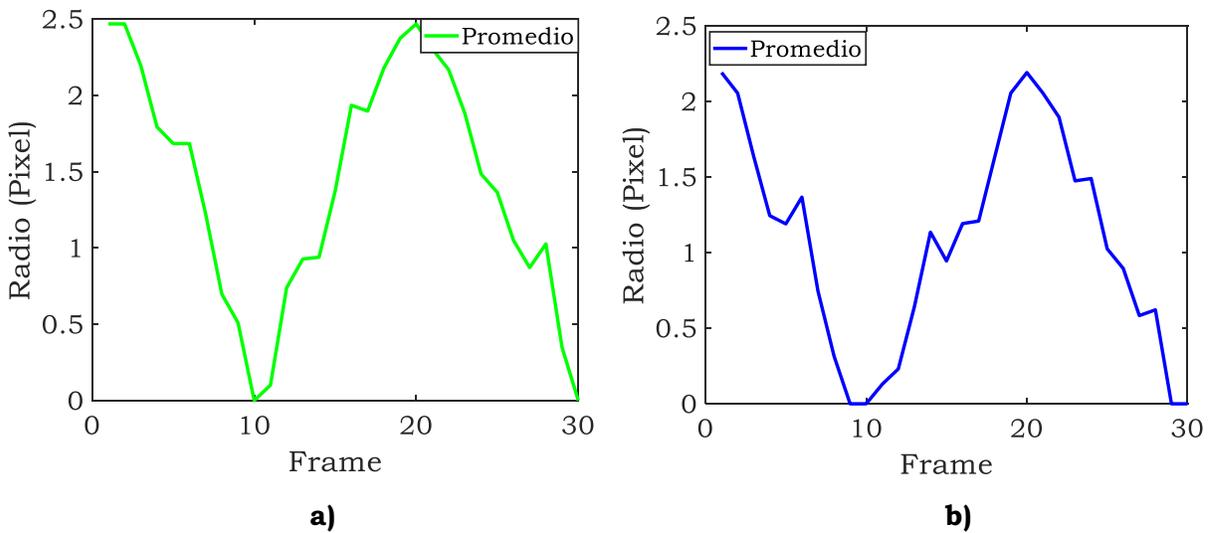


Figura 3.33: Variación promedio en el tiempo del radio de un corazón mediante rastreo con vórtices ópticos para hologramas FRP, medido en a) zona 1 y b) zona 2.

3.3 Metrología en imágenes ecocardiográficas

La ecografía es una herramienta no invasiva e indolora que utiliza ondas de ultrasonido para crear imágenes en movimiento. Este procedimiento ayuda al médico a evaluar el funcionamiento de órganos internos tales como el corazón, así como la sangre que fluye a través de los vasos [69,70]. Debemos destacar que la ecografía es una prueba diagnóstica en la que no se irradia al paciente (como si lo hacen las radiografías, TAC, etc.). Por lo tanto, es una prueba segura y que no produce ningún efecto secundario pudiendo por lo tanto ser realizada en un hospital o un consultorio médico.

En nuestro trabajo nos enfocaremos en el ecocardiograma o ultrasonido cardíaco (Ver figura 3.34). Esta técnica aporta información acerca del tamaño, forma, función, fuerza de bombeo del corazón, movimiento y grosor de sus paredes y el funcionamiento de sus válvulas, fluidos alrededor del corazón, coágulos de sangre o tumores intracardiacos como orificios anormales entre cavidades cardíacas.

El ecocardiograma se obtiene a través de un ecocardiógrafo que consta: de un transductor el cual capta las imágenes del corazón, una pantalla que recoge las imágenes captadas por el transductor y una computadora que procesa la información obtenida. Las imágenes se pueden obtener de diferentes modos, entre ellos el bidimensional que permite ver las diferentes estructuras del corazón durante el movimiento.

La potencialidad de la ecocardiografía aumenta considerablemente cuando se analizan las imágenes obtenidas con técnicas de procesamiento de imágenes. Los equipos comerciales que procesan la información son de altísimo costo. La ecocardiografía por “speckle tracking” (ST) ha surgido como una técnica para la evaluación objetiva y cuantitativa de la función miocárdica. La técnica es capaz de detectar pequeñas diferencias en el speckle de cada segmento miocárdico durante ese ciclo cardíaco, tanto en sístole como en diástole y calcular su estiramiento o retracción (deformación) a partir de un punto de referencia. Recordemos que la diástole es el movimiento de relajación y expansión del corazón y de las arterias que se producen cuando la sangre purificada entra en ellas mientras la sístole es el movimiento de contracción del corazón y de las arterias para empujar la sangre que contienen.

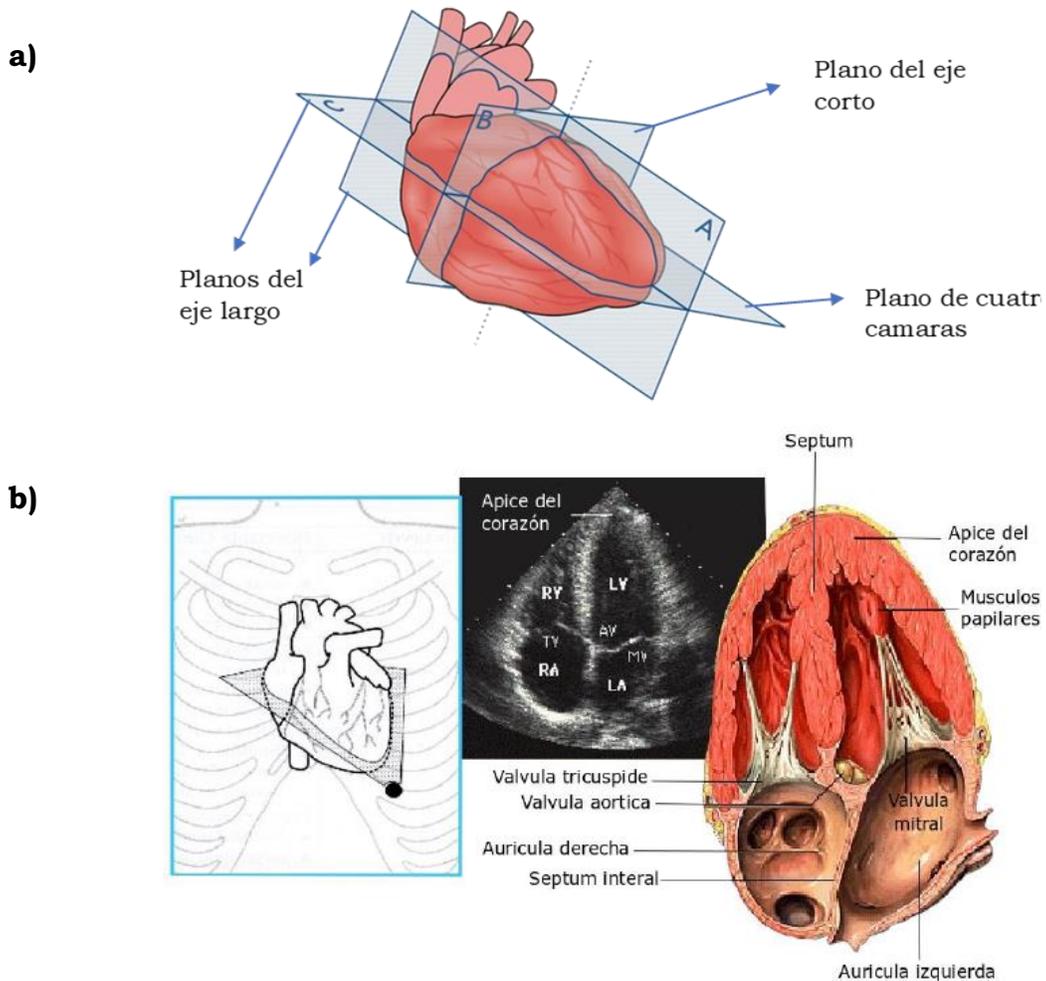


Figura 3.34: a) Vistas ortogonales del corazón, b) Vistas apical de cuatro cámaras.

La fibra miocárdica repetidamente cambia su tamaño y su forma durante una contracción cardíaca normal. La fibra cambia su tamaño simultáneamente en varias direcciones: longitudinal (sentido ápex-base), radial (las fibras tienden a converger hacia un punto en el centro del ventrículo) y circunferencial (las fibras se acortan en el sentido de la circunferencia de la cavidad) tal como se puede observar en la Figura 3.35. Asimismo, las fibras pueden torcer y rotar.

El “strain” se define como el cambio fraccional en longitud de un segmento del miocardio entre el inicio de la diástole y el fin de la sístole. El “strain” generalmente se expresa en porcentaje (%). En la

técnica de speckle tracking los “speckles” en las ecocardiografías son marcadores acústicos que esta técnica sigue cuadro a cuadro para calcular la deformación. Si se representa el desplazamiento de las marcas acústicas en función del tiempo, se tendrá una curva de deformación de este punto de la pared en función del tiempo. Esta curva se denomina “strain rate” o tasa de deformación.

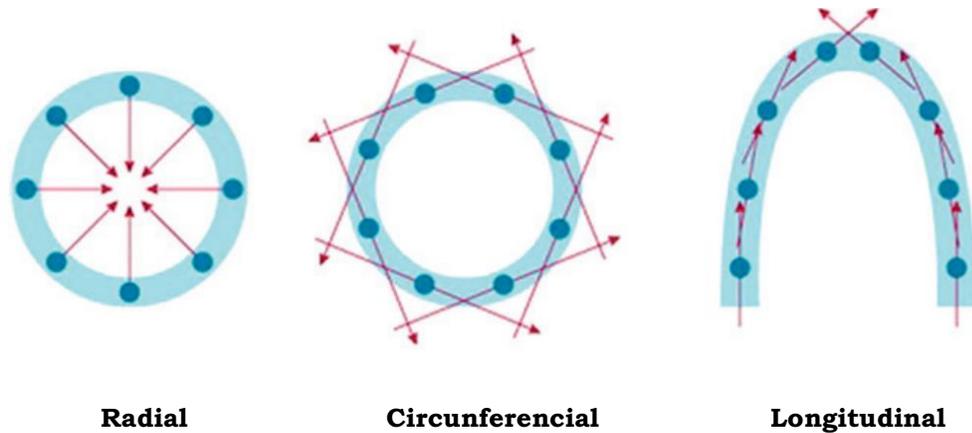


Figura 3.35: Diferentes métricas de strain o deformación en el musculo cardiaco

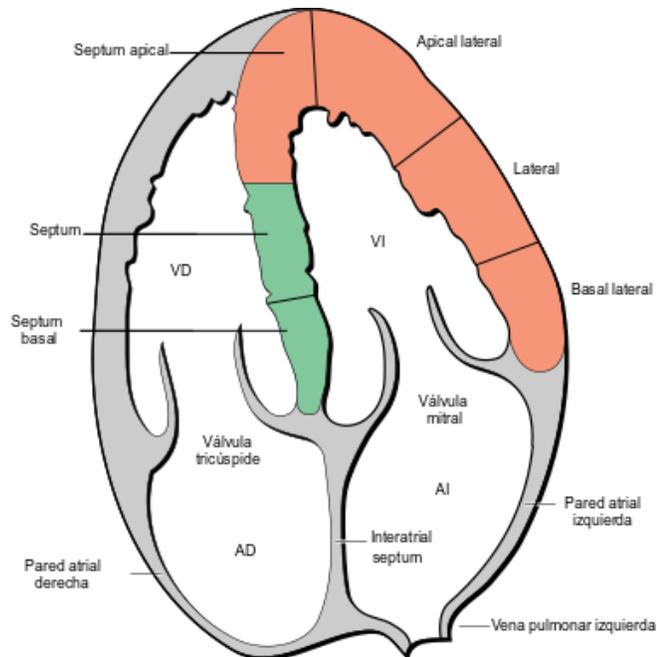


Figura 3.36 Segmentos en que se divide el ventrículo izquierdo para la determinación del strain longitudinal

El tipo de deformación más usado en investigación básica y clínica es el “strain longitudinal” o “deformación longitudinal” ya que brinda información completa sobre los segmentos (septum basal, septum, septum apical, apical lateral, lateral y basal lateral) en que se divide el ventrículo izquierdo (ver Figura 3.36) para su análisis y determinación de su función global.

$$S = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \quad (3.6)$$

donde L_1 es el tamaño de la fibra durante su máximo estiramiento y L_0 es el tamaño de la fibra en reposo. La deformación puede ser evaluada en cada región del ventrículo (deformación local) y el promedio de las deformaciones representa la deformación global, lo que muestra la función ventricular global.

El strain o deformación longitudinal, mide la deformación en el sentido base-ápex de la cavidad, es decir, el acotamiento de la cámara. Como la longitud final de la cavidad (sistólica) es menor que la longitud inicial (diastólica), el porcentaje de la deformación es negativo [71].

El strain longitudinal global se considera como un parámetro eficaz para la cuantificación de la función ventricular izquierda. Los valores normales para strain longitudinal global oscilan entre -15,9% a -22,1% (promedio, -19,7%; IC 95%: -18,9% a -20,4%). Los valores de referencia para strain longitudinal global pueden variar por la disponibilidad de diferentes equipos de imagen ecocardiográfica, así como distintas aplicaciones de software para el análisis de ST.

3.3.1 Speckle Tracking

La técnica más utilizada para estimar el movimiento del corazón es el speckle tracking (ST) [72-77]. Speckle-tracking, literalmente significa seguimiento o el rastreo del speckle o marcas acústicas digitales presentes en los ecocardiogramas que forman la imagen bidimensional. La idea de la propuesta es identificar y seguir los speckles durante todo el ciclo cardíaco en el miocardio. Esta permite obtener información sobre el movimiento de los tejidos a partir del estudio de los patrones de speckle. El ST ha permitido estudiar la mecánica miocárdica y ha mostrado su utilidad en la detección de afecciones cardíacas [71,78].

Dos organizaciones internacionales: European Association of Cardiovascular Imaging (EACVI) y American Society of Echocardiography (ASE) publicaron un documento de consenso para estandarizar las técnicas de análisis de deformación miocárdica usando ST [79]. En esta guía se dan las bases teóricas para explicar el significado fisiológico y el cálculo matemático de distintos parámetros de quienes utilizan imágenes de deformación miocárdica para investigación y con utilidad clínica.

Como mencionamos anteriormente, uno de los índices clínicos de deformación miocárdica determinado con el ST es el “strain global”. Los resultados obtenidos por speckle tracking han sido validados utilizando imágenes de resonancia magnética cardíaca y sonomicrometría como patrones de referencia.

Los algoritmos utilizados en el speckle tracking (ST) para rastrear el movimiento de los patrones de speckle dependen de las diferentes empresas que comercializan los equipos. El algoritmo de ST se puede aplicar a una imagen completa o a una región de interés dentro de la misma. El procedimiento consiste en seleccionar una pequeña región rectangular (ventana o kernel), a continuación, se toma una región de búsqueda, que consiste en una zona rectangular de mayor dimensión que el kernel en el fotograma siguiente (ver imagen 3.37). Se determina la posición de la mejor coincidencia entre las regiones del primer y segundo fotograma, mediante algún método de máxima correlación o similitud. Esto se realiza a lo largo de todos los fotogramas que constituyen el del ecocardiograma [80].

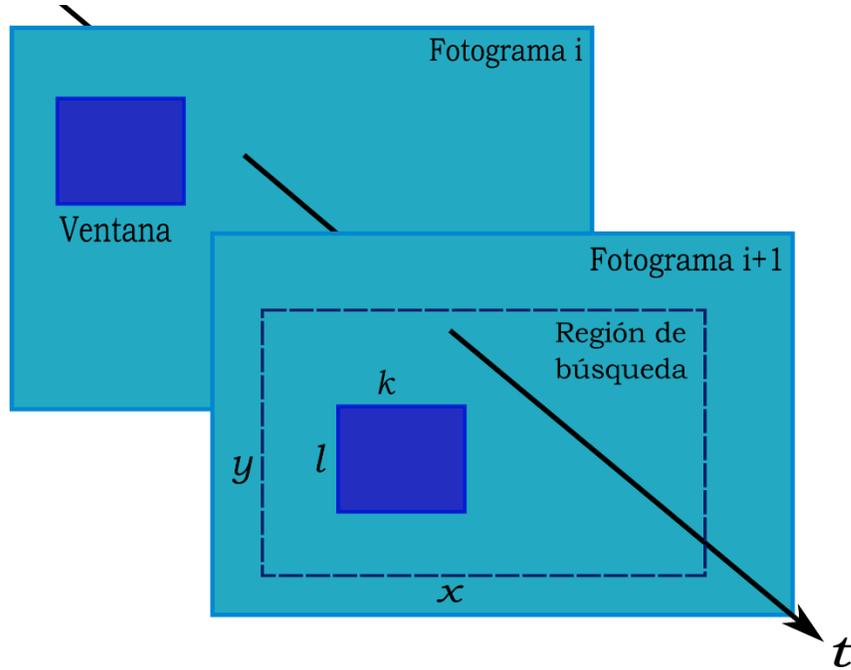


Figura 3.37: Diagrama del algoritmo Speckle Tracking.

Hemos implementado dos estrategias basadas en un proceso de template matching para analizar las imágenes ecocardiografías. En primer lugar, se implementa el algoritmo conocido como ADS (absolute difference sum o suma de diferencia absoluta). Este algoritmo se basa en calcular la diferencia absoluta entre cada píxel del bloque original y el píxel correspondiente del bloque que se utiliza para comparar. La mejor coincidencia para las coordenadas (m, n) según el algoritmo ADS se determina matemáticamente mediante la siguiente ecuación:

$$S_{m,n} = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^k |X_{ij} - Y_{i+m,j+n}| \quad (3.7)$$

donde $l \times k$ es la dimensión del kernel.

Otra alternativa involucra obtener las coordenadas (m,n) que presentan el mayor valor del coeficiente de correlación.

$$\rho_{m,n} = \frac{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^k (X_{i,j} - \bar{X}) (Y_{i+m,j+n} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^l (X_{i,j} - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^k (Y_{i+m,j+n} - \bar{Y})^2}} \quad (3.8)$$

donde X e Y son los valores medios de los pixeles de la ventana en cada región considerada.

Ambos algoritmos mencionados anteriormente se utilizan para determinar la deformación global o “strain” global en un ecocardiograma correspondiente a un paciente sano. A modo de ejemplo del procedimiento implementado, en la figura 3.38 se definieron 4 ventanas a lo largo del septum. Luego, se evaluará para estas ventanas la correlación dentro de la región de búsqueda y se determinará su nueva ubicación en los siguientes fotogramas.

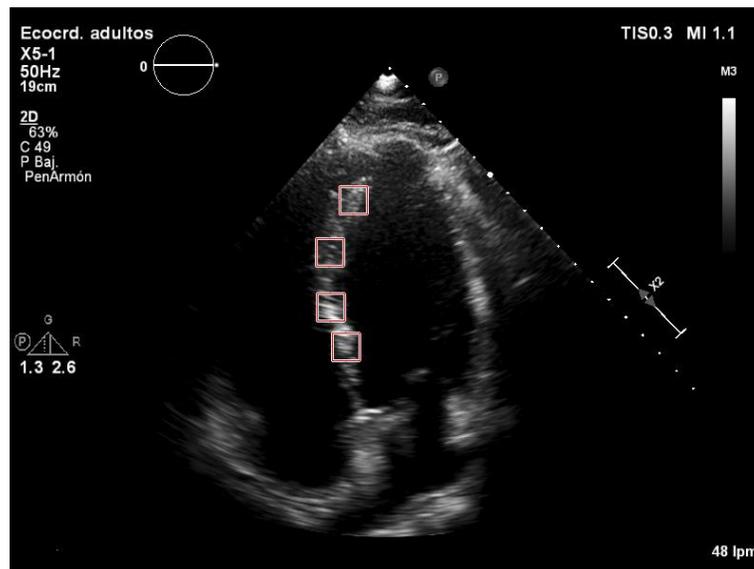


Figura 3.38: Definición de 4 ventanas para su seguimiento.

Con la información de la posición fotograma a fotograma se puede realizar los cálculos de deformación en la región de interés. En la figura 3.39 se muestran los valores de la deformación longitudinal global calculadas a partir de las ventanas de la figura 3.38 en un ciclo cardíaco. Como se puede visualizar, existen valores negativos de la deformación ya que se toma como punto de referencia la longitud de las fibras en un estado inicial de reposo.

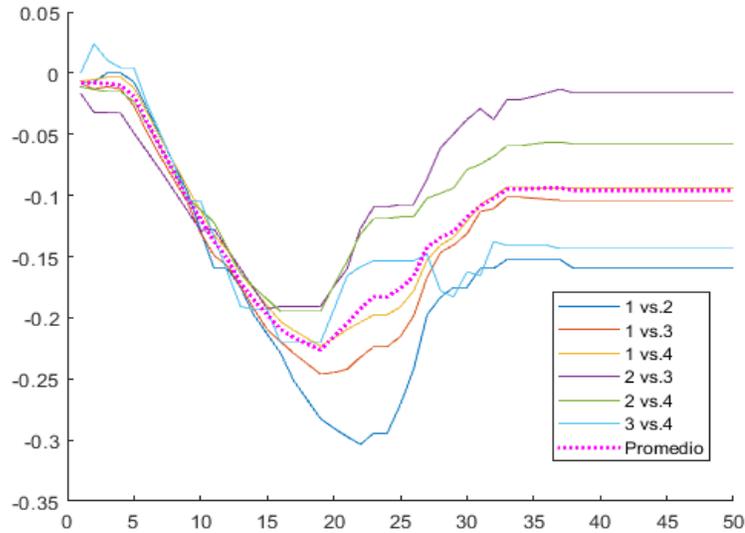


Figura 3.39: Deformación obtenida durante 50 fotogramas.

Evaluamos tanto el algoritmo de correlación (ecuación (3.8)) como el SAD basado en template matching (ecuación (3.9)). Por otra parte, en ambos casos se evaluó la aplicación de un filtro de tipo gaussiano para disminuir el efecto de las regiones de borde en las ventanas. Los resultados obtenidos se incluyen en la figura 3.40 observándose diferencias entre los diferentes algoritmos, aunque globalmente la forma de las curvas no muestra diferencias importantes. En la figura 3.41 se incluyen los resultados del equipo General Electric.

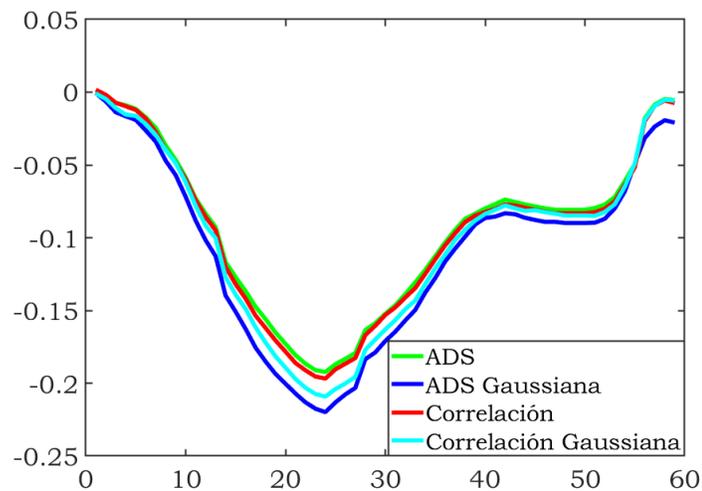


Figura 3.40: Deformación global obtenida al implementar los algoritmos SAD y correlación basados en template matching.

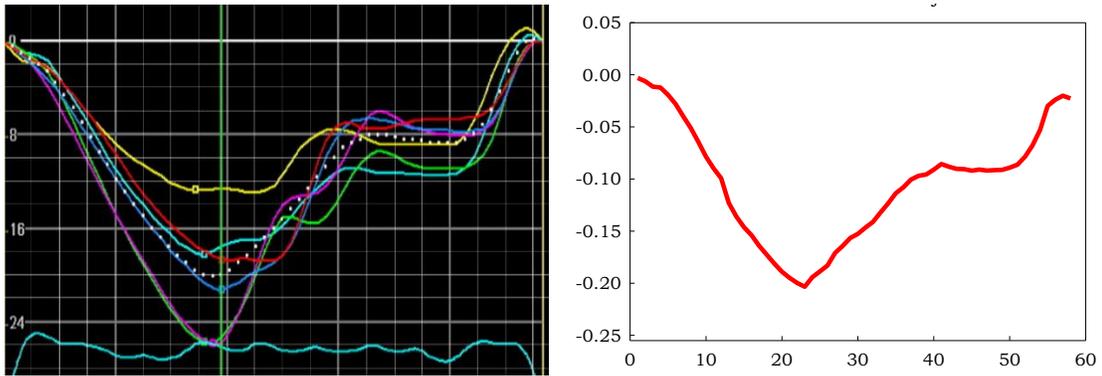
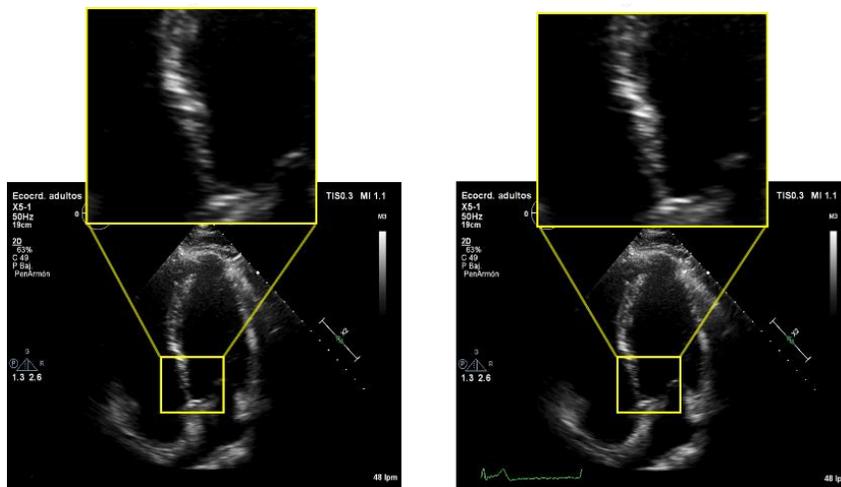


Figura 3.41: Deformación obtenida del equipo General Electric, la curva puntuada es la deformación global del miocardio.

3.3.2 Rastreo empleando metrología de vórtices

Las imágenes ecocardiográficas presentan como ya hemos mencionado speckle lo que permite emplear otras técnicas para su caracterización, como, por ejemplo, la metrología de vórtices ópticos. Las singularidades de fase se usarán como marcadores de imagen, brindando la posibilidad de rastrear el movimiento miocárdico a partir de los vórtices en los diferentes fotogramas de la ecocardiografía.



a) Fotograma 1

b) Fotograma 2

Figura 3.42: Imagen ecocardiográfica con zoom en la zona de interés a) Frame de inicio del ciclo cardiaco b) Frame de finalización del ciclo cardiaco el musculo cardiaco

La Figura 3.42 presenta dos fotogramas del ecocardiograma bajo estudio, que corresponden al inicio y al final del ciclo cardíaco con un zoom con la zona de interés. Se aplica la transformada de Laguerre Gauss a cada fotograma, obteniéndose mapas de pseudo-fase para cada uno de ellos. Con la misma técnica detallada para los hologramas generados por computadora (sección 3.2.2) se localizan los vórtices ópticos (ver figura 3.43). Se realiza el seguimiento de las singularidades de fase a partir de las propiedades estructurales del núcleo. A partir de la identificación de los vórtices homólogos se obtiene su trayectoria en los sucesivos fotogramas. A modo de ejemplo en la figura 3.44 se incluyen las trayectorias correspondientes a la región del septum basal del ventrículo izquierdo. En la figura 3.45 se incluyen las posiciones de las abscisas y ordenadas correspondientes a los vórtices incluidos en la figura 3.44. Esta información permite empleándolos de a pares determinar su deformación local en cada región del ventrículo.

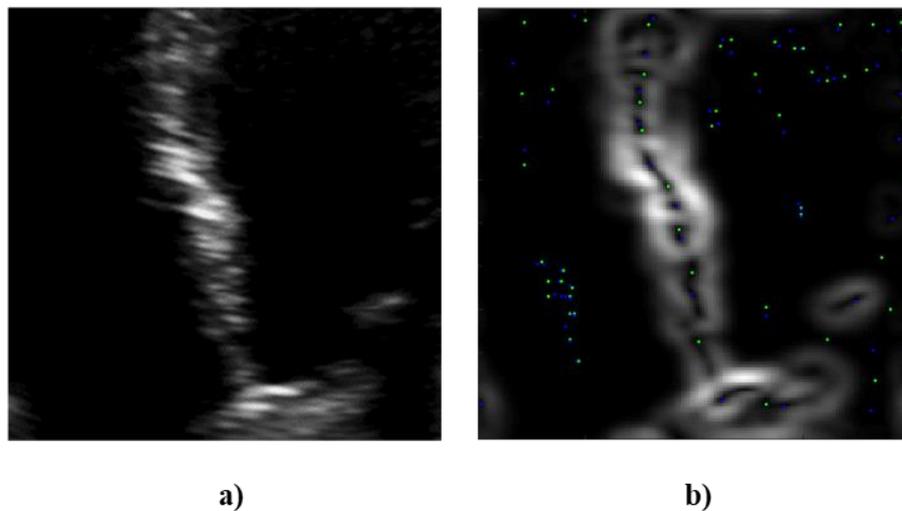


Figura 3.43: Imagen del septum basal a) Fotograma del ecocardiograma con la región de interés b) Localización de vórtices (azul y verde) en el mapa de pseudo fase

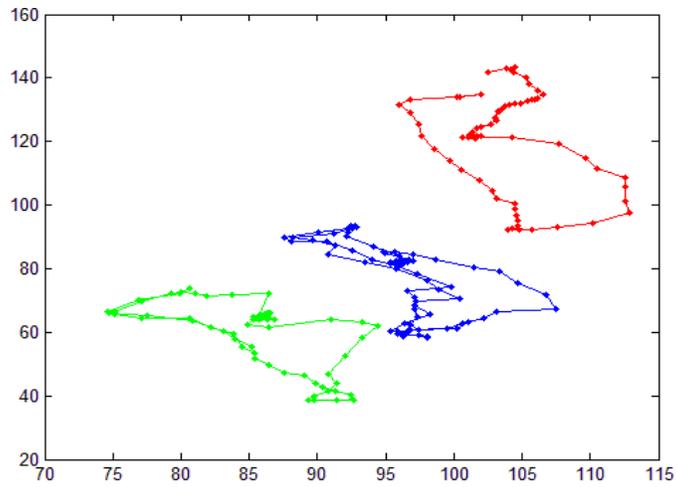


Figura 3.44: Trayectorias de tres vórtices localizados en la región del septum basal

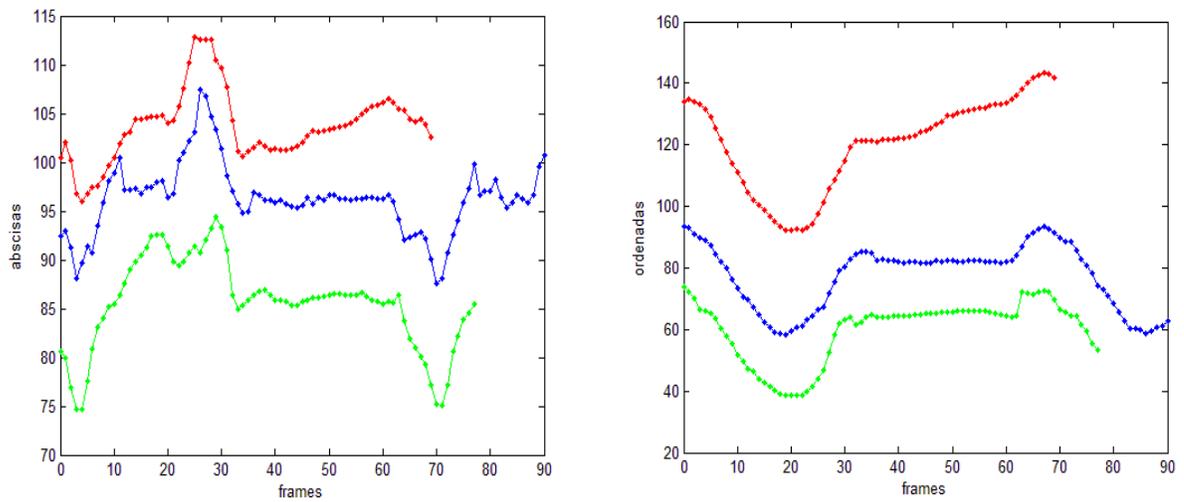


Figura 3.45: Posiciones de las abscisas y ordenadas correspondientes a los tres vórtices indicados en la figura 3,44 en los distintos fotogramas del ecocardiograma

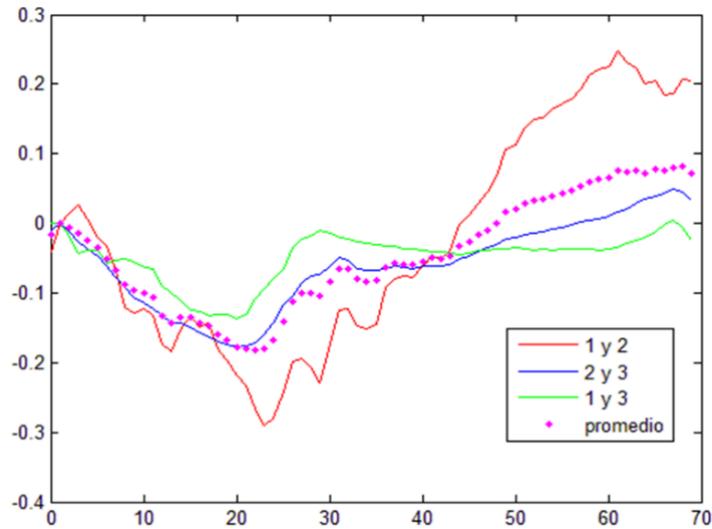


Figura 3.46: Deformaciones del septum basal en un ciclo cardiaco

Siguiendo el mismo procedimiento detallado anteriormente en las seis regiones en las cuales se divide el ventrículo izquierdo (ver figura 3.47) se determina la deformación de la pared miocárdica en cada zona. Promediando las deformaciones correspondientes a cada zona se obtiene la deformación global.

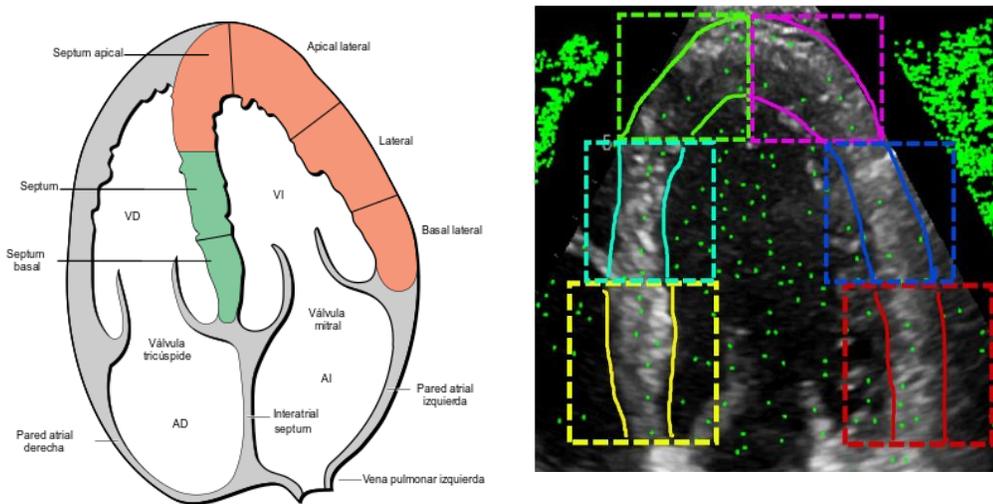


Figura 3.47: Imagen ecocardiográfica con singularidades de fase marcadas en las zonas de interés

En la figura 3.48 se observan las curvas de la deformación global o “strain global” en el miocardio obtenida al implementar: algoritmos de

speckle tracking (TM y Correlación), la obtenida por el equipo de General Electric y por último aquella calculada al emplear el rastreo con singularidades de fase. Si bien hay un acuerdo global entre las curvas, la deformación global obtenida mediante el rastreo con singularidades de fase es ligeramente mayor que la calculado por el equipo comercial General Electric.

Cabe aclarar que para rastreo de vórtices como para la implementación del speckle tracking solo accedimos a las imágenes procesadas por el equipo y no a los datos sin procesar.

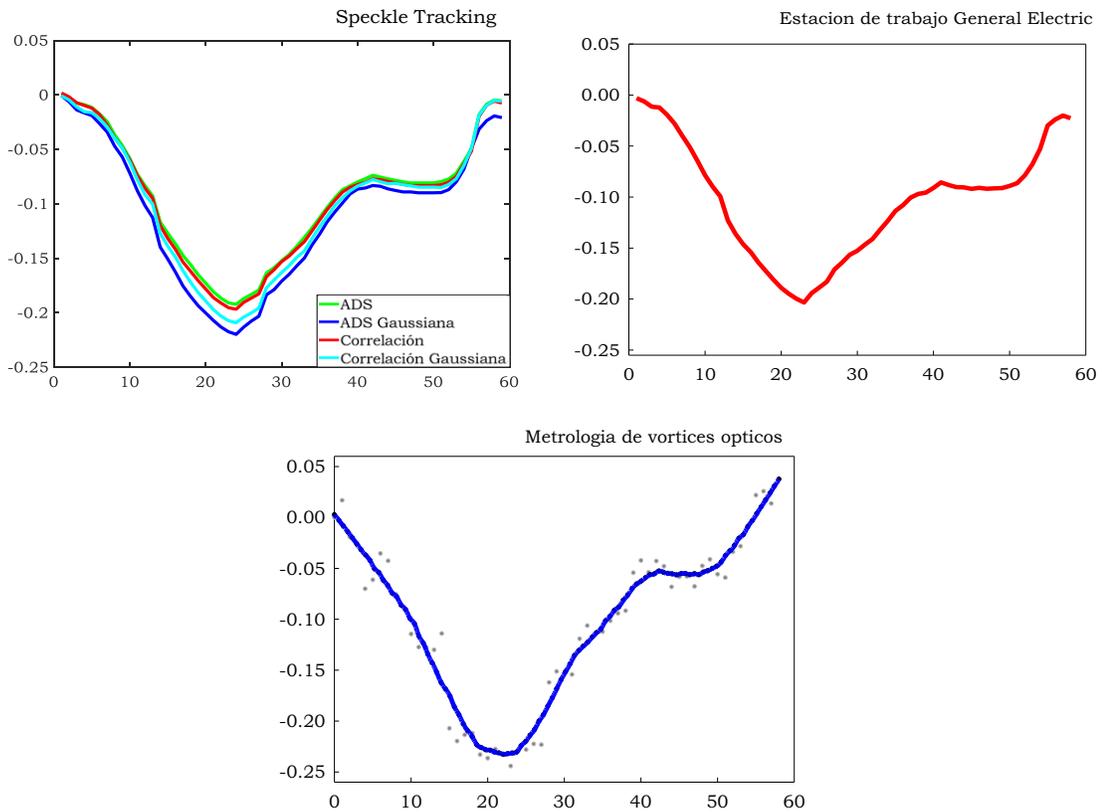


Figura 3.48: Deformación longitudinal global de cuatro cámaras adquirido por:
 a) Speckle Tracking (“Template matching” y correlación), b) la estación de trabajo General Electric y c) Vórtices Ópticos

4. Metrología de vórtices ópticos y esfera de Poincaré

Las singularidades de fase distribuidas aleatoriamente en los mapas de pseudo-fase asociadas a patrones de intensidad pueden ser utilizadas como marcadores del campo. Al realizar un desplazamiento local de la superficie del objeto, el patrón de intensidad, la pseudo-fase y los vórtices ópticos también presentan cambios debido a la relación directa entre el desplazamiento del objeto y el desplazamiento de las singularidades de fase.

En el capítulo anterior se ha mostrado como comenzando por la identificación unívoca de las singularidades de fase a partir de las propiedades estructurales del núcleo y el empleo de un factor de mérito determinado a partir de las mismas propiedades fue posible realizar un seguimiento de dichas singularidades.

La idea clave de la metrología de vórtices es el hecho de que las singularidades de fase están bien definidas para permitir la identificación y el seguimiento inequívocos de un vórtice óptico. Para que esto ocurra las propiedades del núcleo deben permanecer sin cambios apreciables.

Nótese que las singularidades de fase con grandes diferencias en propiedades del núcleo no lograron encontrar sus homólogos y deben eliminarse. En ref. [81] se estudió la influencia de la decorrelación de las distribuciones de speckle en el contexto de la metrología de vórtices, aplicada al estudio de desplazamientos uniformes en el plano. En ese trabajo se presentaron evidencias experimentales que respaldan que la decorrelación trae como consecuencia que la

confiabilidad de los resultados disminuya. Esto se debe a la dificultad para obtener histogramas de alta calidad, lo que a su vez está relacionado con una reducción en el número de vórtices homólogos que se pueden rastrear durante el proceso y por supuesto trae aparejado una mayor probabilidad de que se identifiquen erróneamente vórtices homólogos

En ese sentido resulta de gran interés buscar alternativas, nuevos factores de mérito que permitan identificar correctamente un mayor número de vórtices. En ese sentido en este capítulo se analiza la posibilidad de emplear para la selección de los homólogos un factor de mérito basado en la distancia en la esfera de Poincaré. Es decir, se propone emplear como factor de mérito la distancia más corta entre un par de vórtices homólogos. La propuesta fue analizada empleando imágenes de speckle que se desplazan y afectadas por decorrelación. Como método de validación de la propuesta los resultados se compararán con aquellos obtenidos empleando el algoritmo Demon.

4.1 Línea geodésica

La esfera de Poincaré es una representación 3D del campo complejo, con características geométricas similares a las empleadas en el campo vectorial de polarización. Esta representación permite localizar en una esfera con radio de valor unitario, cada singularidad de fase. Los parámetros que describen las elipses anisotrópicas asociadas a cada vórtice óptico y dependientes de las propiedades estructurales fueron definidos en las ecuaciones (1.18).

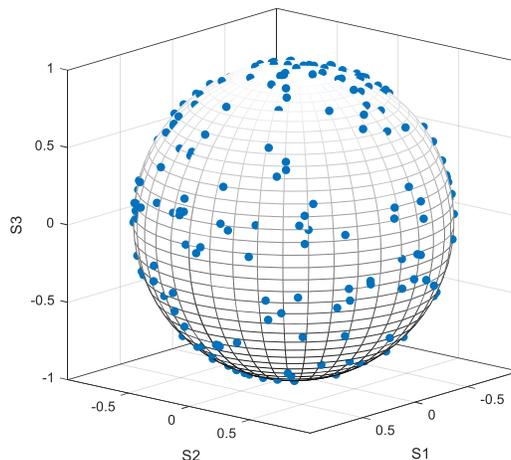


Figura 4.1: Esfera de Poincaré y vórtices ópticos (azul)

Cada vórtice óptico tiene propiedades estructurales del núcleo únicas con diferente elipticidad y ángulos acimutales. Estas singularidades presentan una distribución casi uniforme con una ligera concentración en los polos.

La estructura única del núcleo permite su uso como marcador univoco del campo, además de una correcta identificación y seguimiento a través de una transformación en el campo.

En metrología de vórtices ópticos, las singularidades de fase que son de interés se localizan en los polos de la esfera, al recordar que el cruce por cero de los campos real e imaginario en las cercanías de los vórtices se cortan en un punto. Por otra parte, en el caso de las singularidades localizadas en el ecuador de la esfera de Poincaré, el cruce por cero de los planos se corta en una línea recta, lo que dificulta su localización y por lo tanto limita la utilidad de dichas singularidades con fines metrológicos.

Para encontrar las singularidades de fase después de una transformación, variación, desplazamiento o deformación, es necesario introducir una medida de similitud que proporcione un criterio de identificación correcta. Como se muestra en la figura 4.2 la distancia a lo largo de una línea geodésica puede elegirse como un parámetro de mérito para la mejor identificación de correspondencia de los vórtices ópticos. La línea geodésica es el camino más corto entre dos puntos de la superficie de la esfera, también conocida como ortodrómica, que es un segmento de un gran círculo [82]. La función de mérito basada en la distancia a lo largo de la línea geodésica se puede expresar como:

$$|\Delta\vec{S}| = \left| \arccos(\vec{S} \cdot \vec{S}') \right| \leq \varepsilon \quad (4.1)$$

donde los parámetros primados están relacionados con las singularidades de fase después del desplazamiento (ver Figura 4.2). Tras una adecuada selección del valor umbral ε y teniendo en cuenta la identificación previa en el plano de pseudofase, se puede localizar, identificar y rastrear pares de homólogos de una forma más precisa en diversos procesos dinámicos.

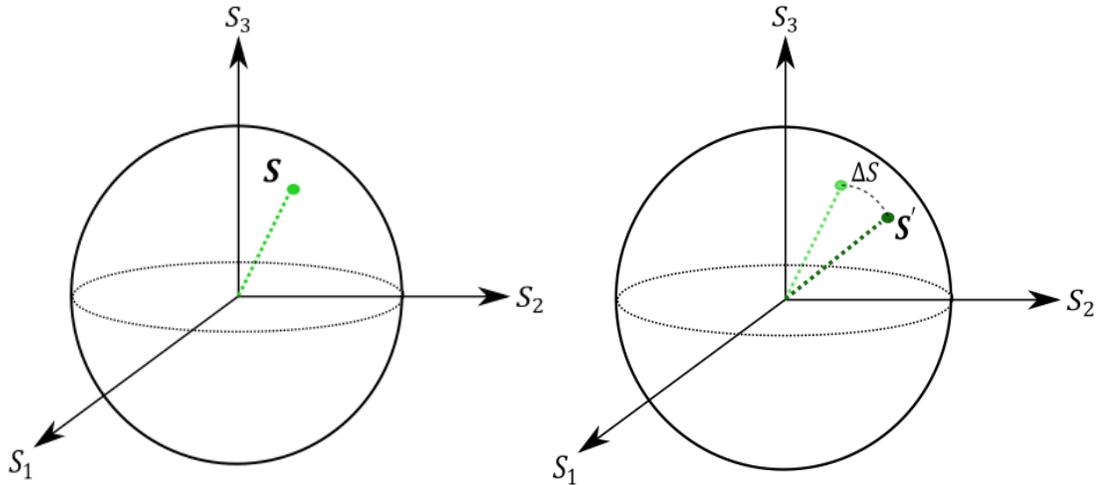


Figura 4.2: Distancia ortodrómica en la esfera de Poincaré como función de mérito para la coincidencia de singularidades de fase

4.2 Seguimiento de objetos mediante vórtices ópticos y algoritmo de flujo óptico

Cuando un haz de luz altamente coherente ilumina una superficie ópticamente rugosa, genera un patrón de speckle. El seguimiento de las distribuciones de intensidad en este patrón es un problema común en algunas técnicas de imagen, que van desde la microscopía holográfica [83-84] hasta la resonancia magnética [85-86] y los ecogramas de ultrasonidos [87-89]. Se ha propuesto y demostrado una amplia gama de algoritmos y métodos para lograr un seguimiento rápido y preciso de los objetos. Entre estos métodos se encuentran los enfoques de flujo óptico, que miden y rastrean la magnitud y dirección de los cambios de intensidad en una imagen [90]. El flujo óptico es la distribución de velocidades de movimiento aparente de patrones de brillo en una imagen, también definido como un patrón de movimiento aparente de objetos, superficies y bordes en una escena causado por el movimiento relativo entre el objetivo y el observador. Se trata de un campo vectorial 2D en el que cada vector da cuenta del desplazamiento de los píxeles entre dos fotogramas. De este modo, se puede obtener información relevante sobre la disposición espacial de los objetos y la velocidad de cambio de la misma.

Estos métodos de flujo óptico pueden aplicarse con éxito al seguimiento del movimiento de un medio fuertemente difuso en

movimiento, ya que el movimiento del medio introducirá un movimiento correlacionado en la distribución de intensidad del patrón de speckle [91.92]. Para ello, los métodos de flujo óptico describen el problema como un conjunto de ecuaciones de flujo bajo la consideración de que las intensidades de los objetos en una imagen son constantes en el tiempo. La variante más común es el “algoritmo demon”, que se basa en la paradoja del demonio de Maxwell en termodinámica. Este algoritmo combina un algoritmo de estimación de campo vectorial estabilizado con una regulación gaussiana [93]. En el algoritmo básico, se define una velocidad (movimiento) en cada pixel utilizando diferencias de intensidad e información de gradiente. Este campo de velocidad se suaviza con una gaussiana y se utiliza iterativamente para transformar la imagen en movimiento y registrarla en la imagen estática. Esto permite con una optimización del método encontrar el desplazamiento de cada pixel que compone la imagen, midiendo así la similitud entre dos imágenes [94].

Los métodos de flujo óptico se han aplicado con éxito a las mediciones del flujo sanguíneo a partir de imágenes de speckle laser [95], reconstrucción de sonido mediante micrófonos laser [96], speckle tracking en ecocardiografía [97], estimación de mapas de profundidad en escenas con texturas débiles [98] y mediciones de vibraciones a partir de campos speckle [99], por nombrar algunos. Estos enfoques, aunque muy capaces, no pueden medir movimientos subpixel en el campo de speckle, y su alta sensibilidad también los hace particularmente susceptibles al ruido y a los cambios locales. Como alternativa a los métodos de flujo óptico, encontramos la metrología de vórtices ópticos basada en la identificación y seguimientos de las singularidades de fase que aparecen de la información de pseudo-fase generada por la transformada *LG* de una imagen de intensidad de entrada. La metrología empleando vórtices ópticos permite alcanzar una precisión inferior al pixel. Además, dado que la presencia de singularidades suele estar relacionada con el campo de fase, más que con su intensidad por pixel, esta técnica no se ve afectada por los cambios de intensidad, superando a los métodos de flujo óptico más comunes. Sin embargo, a pesar de estas ventajas, identificar los parámetros óptimos para lograr el mejor rendimiento posible con el seguimiento óptico de objetos mediante vórtices puede ser todo un reto debido a los diversos parámetros que intervienen.

Por este motivo, se utiliza el método de flujo óptico del algoritmo Demon para optimizar los parámetros de la metrología de

singularidades de fase, con el fin de lograr el seguimiento subpíxel de objetos en movimiento a partir de un campo de speckle. Para ello, aplicamos el algoritmo Demon en patrones de speckle registrados experimentalmente para rastrear el movimiento en el campo. A continuación, se realiza el seguimiento empleando los vórtices ópticos. Los parámetros utilizados en el rastreo óptico se calibran y optimizan tomando como referencia los resultados de flujo óptico. Este procedimiento se realiza globalmente en todo el campo de speckle y localmente en regiones seleccionadas, lo que muestra la flexibilidad de la técnica.

4.2.1 Algoritmo Demon

El algoritmo demon permite encontrar la distribución del campo vectorial de desplazamiento necesario para hacer coincidir una imagen deformada con una imagen de referencia. Si la transformación entre cada píxel y de la imagen deformada A y el píxel correspondiente x de la imagen de referencia R viene dada por $y = T(x)$, podemos definir un campo de desplazamiento relacionado con la transformación dada por $U(x) = T(x) - x$. En el caso del algoritmo demon, el campo de desplazamiento U se define como:

$$U = \frac{(R)T(A)\nabla R}{\|\nabla R\|^2(R - T(A))^2} \quad (4.2)$$

donde ∇ denota la operación gradiente. Para evitar posibles indeterminaciones del campo de desplazamiento U en él cuando el gradiente de la imagen de referencia es cercano a 0, se aplica un suavizado gaussiano sobre el mismo. Vale la pena notar, que este campo U no puede ser calculado directamente, ya que existe un amplio rango de posibles transformaciones T entre la imagen A y R . Para hallar el T que mejor aproxima el campo de desplazamiento entre ambas imágenes, se aplica un proceso de optimización basado en descenso de gradiente estocástico, donde se intenta minimizar la diferencia entre la imagen obtenida tras aplicar el campo de desplazamiento correspondiente a la transformación hallada en cada iteración y la imagen deformada A . La aplicación del suavizado gaussiano sobre el campo de desplazamiento en cada iteración del proceso de optimización, también permite eliminar las fluctuaciones u oscilaciones del descenso de gradiente [100].

El resultado final de este proceso es un campo vectorial por pixel que hace coincidir la imagen deformada con la de referencia. En la figura 4.3 se muestra un ejemplo de este algoritmo. En ella se muestra dos patrones de speckle (figura 4.3a y figura 4.3b) con un desplazamiento horizontal entre ellas. El resultado en la figura 4.3c muestra el campo de desplazamiento obtenido empleando el algoritmo demon sobre el patrón de speckle inicial figura 4.3a. Aquí podemos apreciar que el campo de desplazamiento sigue el desplazamiento horizontal entre los dos patrones.

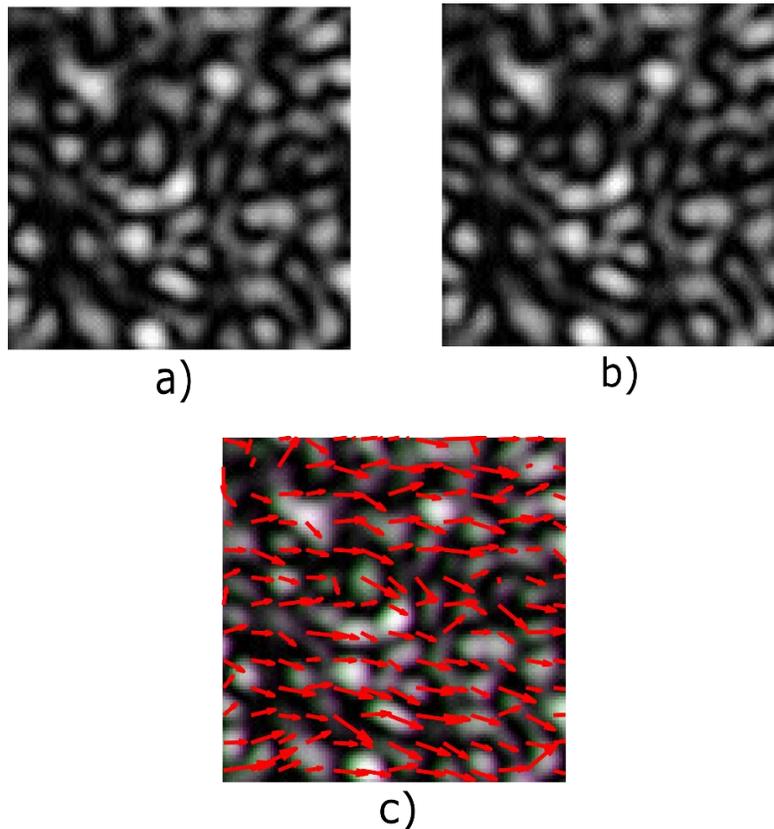


Figura 4.3: a) Estado inicial del patrón de speckle, b) estado final del patrón de speckle y c) flujo óptico con vectores de desplazamiento (en rojo)

4.2.2 Metrología óptica de vórtices

Como realizamos en capítulos anteriores a partir de patrones de speckle en intensidad es posible empleando la transformada de Laguerre Gauss obtener campos complejos que contengan pseudo-fases en las cuales encontrar singularidades de fase o vórtices ópticos.

Una vez localizadas las singularidades, se determinan las propiedades del campo circundante. Estas propiedades permiten caracterizar los vórtices y utilizarlas como identificadores propios de campo y rastrearlos a lo largo de un proceso dinámico.

Con una elección adecuada del ancho de banda del filtro ω , es posible controlar la densidad de las singularidades de fase, lo que permite aumentar el número de vórtices disponibles para analizar el patrón de speckle.

Los patrones de speckle fueron obtenidos empleando el dispositivo experimental esquematizado en la figura 4.4. El haz colimado de un láser He-Ne (632.8 nm) incide sobre una máscara opaca provista de una pupila circular. Un difusor se sitúa inmediatamente detrás de la máscara. Se forma un patrón de speckle objetivo en un plano a una distancia z del difusor. Las distribuciones de speckle se registran en la cámara CCD. En el caso analizado la máscara con la pupila y el difusor no se mueven solidariamente al desplazar el difusor en el plano, es decir que al desplazarse la máscara con respecto al difusor cambia el conjunto de centros dispersores del difusor que generan el patrón de speckle produciendo decorrelación entre el patrón de speckle antes y después del desplazamiento. La decorrelación modifica las propiedades estructurales del núcleo de los vórtices y en consecuencia limita la correcta selección de los pares de homólogos entre los patrones antes y después del desplazamiento.

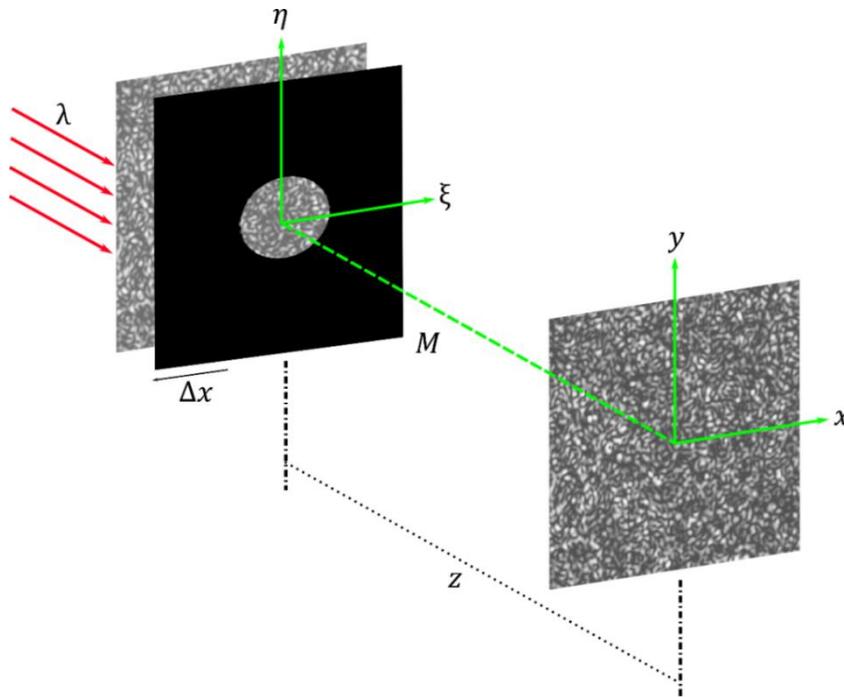


Figura 4.4: Esquema experimental para el registro de patrones speckle antes y después del desplazamiento en el plano. Donde λ es la longitud de onda, M la máscara, Δx el desplazamiento en el plano.

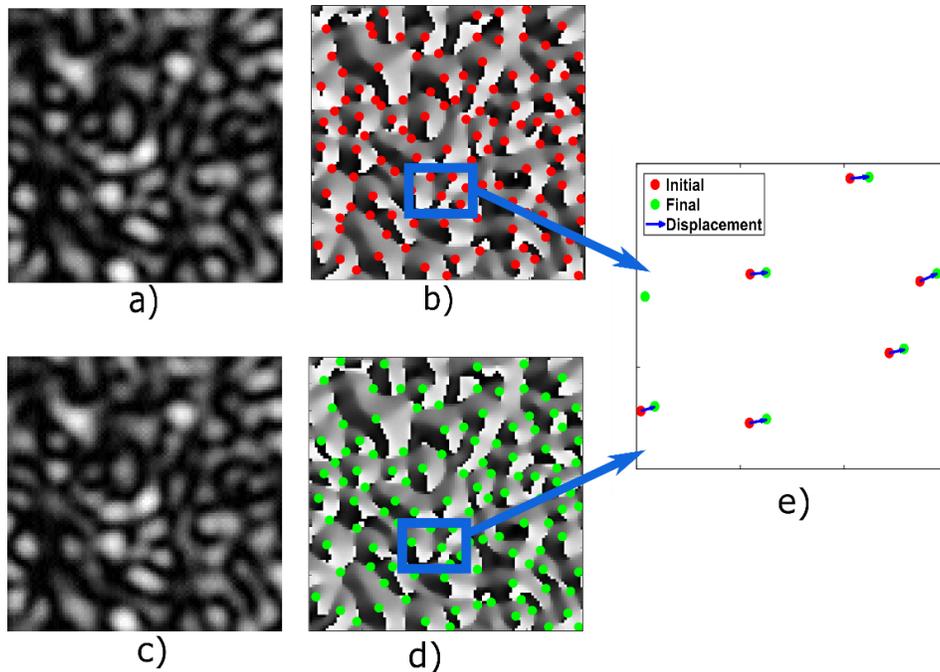


Figura 4.5: a) Patrón de speckle en el estado inicial b) pseudo-fase con vórtices ópticos para un estado en reposo (rojo), c) patrón de speckle después del desplazamiento del difusor, d) pseudo-fase con vórtices ópticos para el patrón de intensidad de C (en verde) y e) Ampliación del área mostrando desplazamiento de algunas singularidades de fase.

La figura 4.5 muestra el patrón de speckle antes (figura 4.5a) y después del desplazamiento del difusor (figura 4.5c). La transformada de Laguerre Gauss permite generar una pseudo-fase asociada a cada distribución de speckle. La figura 4.5b representa la pseudo-fase correspondiente al estado inicial, mientras que la figura 4.5d muestra la pseudo-fase correspondiente al estado final.

Posteriormente se identificaron las singularidades de fase homólogas en la información de pseudo-fase asociada al patrón de speckle antes (color rojo) y después (color verde) del desplazamiento. En la figura 4.6 a) se presentan los vórtices homólogos en los mapas de pseudo-fase, mientras en la figura 4.6 b) se muestra una representación de dichas singularidades en la esfera de Poincaré. Esta representación permite identificar vórtices estables localizados en los polos de la esfera y los vórtices inestables que se localizan en las regiones cercanas al ecuador. Como ya mencionamos los vórtices inestables no son de utilidad en aplicaciones metrológicas y por lo tanto es conveniente eliminarlos en nuestro análisis.

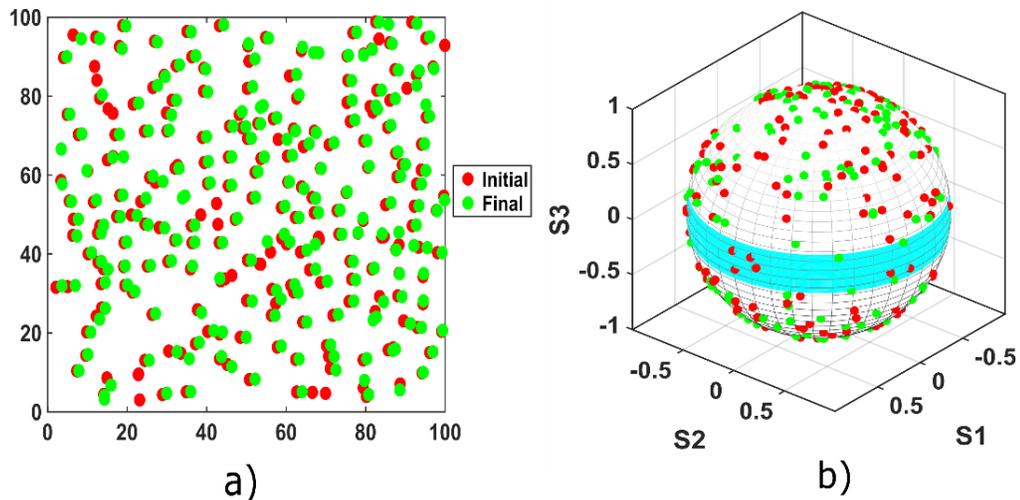


Figura 4.6: a) vórtices ópticos para el estado inicial (puntos rojos) y final (puntos verdes) en el plano y b) vórtices ópticos representados en la esfera de Poincaré (la franja azul representa la ubicación de vórtices inestables cercanos al ecuador)

4.2.3 Resultados

A continuación, se analizan los resultados empleando el método de Demon. Se utiliza imágenes obtenidas experimentalmente como se

detalló anteriormente. En la figura 4.7 se muestra un patrón de speckle inicial de 500x500 píxeles.

En primer lugar, se estima el campo de desplazamiento de las imágenes, tomando como referencia el patrón de speckle del estado inicial. El desplazamiento a lo largo de los dos ejes se obtiene mediante 100 iteraciones, este desplazamiento está en unidades de píxel. Se adquiere una imagen deformada según el campo de desplazamiento obtenido previamente y se visualiza por interpolación lineal, mostrando una versión deformada de la imagen según el desplazamiento del cuadro.

Por último, los vectores de desplazamiento de la imagen en movimiento se trazan a partir de matrices de dimensiones 500x500 correspondientes a las dimensiones de las imágenes, que son de 500x500 píxeles

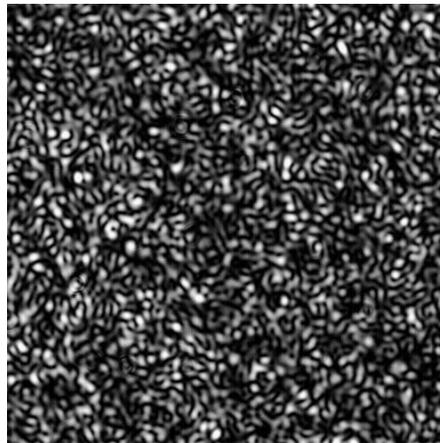


Figura 4.7: Patrón speckle de 500x500 píxeles en el estado inicial

Posteriormente se realizó el seguimiento del desplazamiento de los patrones de speckle empleando el enfoque de seguimiento de vórtices ópticos descrito en capítulos anteriores. Se evalúan varios desplazamientos en un solo eje, se caracteriza y optimiza los parámetros de seguimiento de las singularidades de fase.

Se utilizaron imágenes de speckle con dimensiones de 500x500 píxeles con un desplazamiento horizontal entre el estado inicial al estado final. Para el procesamiento se emplea la transformada *LG* con

un ancho de banda con valor de $\omega = 0.11$ y una distancia entre homólogos en la esfera de Poincaré con un valor de 5 ($D \leq 5$). Se localizan 1780 pares de vórtices homólogos y con esta información se generan los histogramas correspondientes al par de ejes coordenados (X-Y). En la figura 4.8, se incluye con fines de comparación los histogramas obtenidos empleando el método Demon y el método de vórtices ópticos.

Un parámetro cuantitativo que permite comparar los dos métodos es la varianza, la cual se calcula para cada coordenada y cada método, estas se muestran en la tabla 4.1.

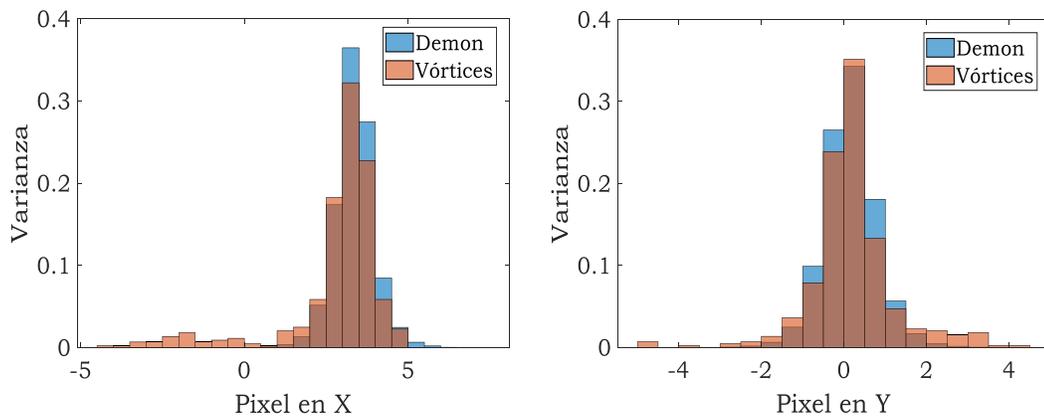


Figura 4.8: Histogramas para las coordenadas X e Y respectivamente, para el método Demon y Vórtices Ópticos

	Coor X Vorti	Coor Y Vorti	Coor X Demon	Coor Y Demon
Varianza	2.0960	1.0191	0.3547	0.3928

Tabla 4.1: Tabla con valores de varianza en los dos ejes coordenados para el método Demon y el método de Vórtices Ópticos.

A continuación, y con el objetivo de verificar las mediciones, la imagen inicial con dimensión de 500×500 pixeles es dividida en cuatro regiones de interés cada una con un tamaño de 250×250 , como se muestra en la figura 4.9. En cada una de las zonas de trabajo se emplea la transformación LG con los parámetros anteriormente descritos ($\omega = 0.11$ y $D \leq 5$), se localizan las singularidades de fase y se encuentran los pares de homólogos.

A partir de los pares de vórtices homólogos se determina el desplazamiento entre ellos y con esta información se construyen los histogramas para cada eje coordenado.

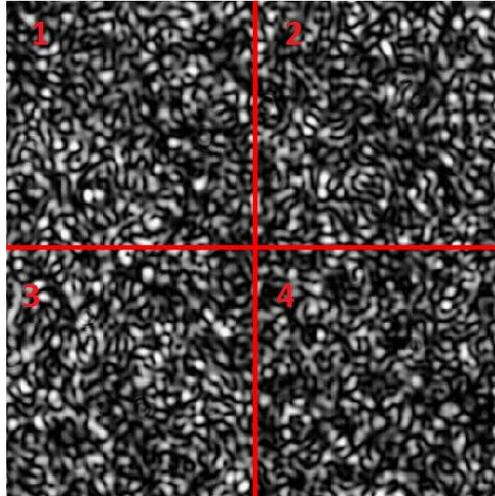


Figura 4.9: Patrón speckle de 500x500 pixeles dividido en cuatro zonas de interés.

En la tabla 4.2 se muestran las varianzas para los dos métodos de rastreo empleados en los dos ejes coordenados para cada una de las cuatro regiones seleccionadas.

Zona- Varianza	Coor X Vórtices	Coor Y Vórtices	Coor X Demon	Coor Y Demon
1	1.7257	0.8548	0.3372	0.3766
2	2.1162	1.1525	0.3323	0.3956
3	2.2729	0.9937	0.3515	0.3916
4	2.2579	1.0691	0.3984	0.3969

Tabla 4.2: Tabla con valores de varianza en los dos ejes coordenados para el método Demon y el método de Vórtices Ópticos en las cuatro zonas de trabajo.

Luego, la misma imagen inicial de speckle de 500x500 pixeles se divide en 25 regiones de interés con un tamaño de 100x100 pixeles cada una de ellas, como se muestra en la figura 4.10. En cada zona se emplea la transformada LG con un valor del filtro LG de 0.11 y una

distancia entre homólogos en la esfera de Poincaré con un valor de $D \leq 5$.

A partir de esta información de los vórtices se obtienen los desplazamientos en las dos coordenadas y se construyen histogramas y se calcula la varianza para cada caso. Estos datos también se analizan empleando el método Demon.

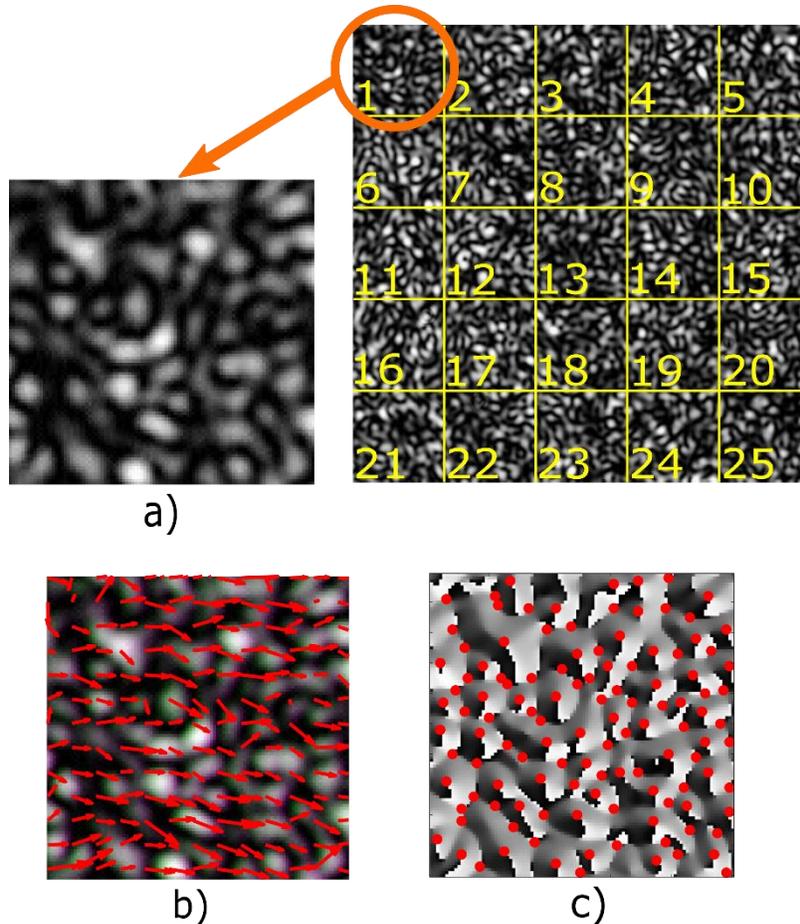


Figura 4.10: a) Patrón speckle dividido en 25 zonas de interés, b) Patrón de speckle de la región 1, c) Vectores de desplazamiento generados por el método Demon de la zona 1 (en rojo) y d) Vórtices ópticos de pseudofase en la región 1 (en rojo)

En la figura 4.11 se observa los histogramas para los ejes coordenados, al implementar los métodos de rastreo propuestos (Demon y Vórtices ópticos), estos histogramas corresponden a la zona 1 que se muestra en la figura 4.10.

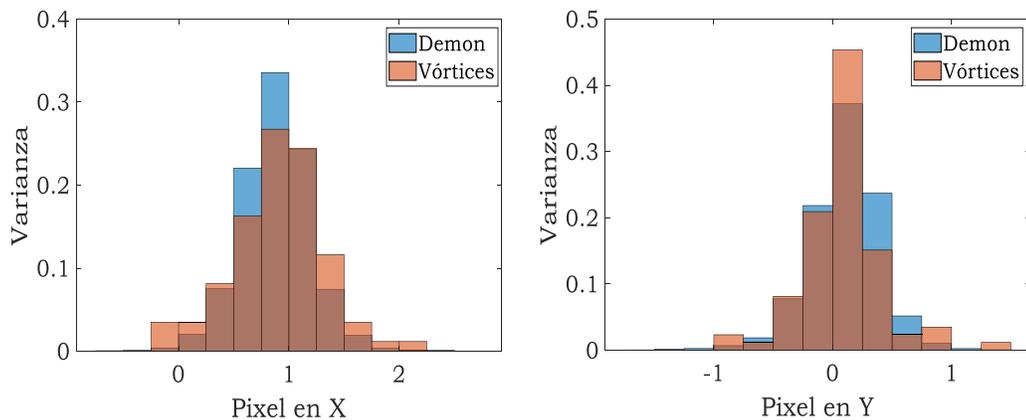


Figura 4.11: Histogramas de los ejes X e Y

La tabla 4.3 muestra la varianza obtenida con la implementación de los dos métodos propuestos. Los resultados muestran que la varianza en ambos ejes coordenados es mayor empleando el método de vórtices ópticos. Por ese motivo a continuación se buscará optimizar los parámetros utilizados para obtener los pares de homólogos.

	Coor X Vorti	Coor Y Vorti	Coor X Demon	Coor Y Demon
Varianza	0.1690	0.1121	0.0890	0.0807

Tabla 4.3: Tabla con valores de varianza en los dos ejes coordenados para el método Demon y el método de Vórtices Ópticos.

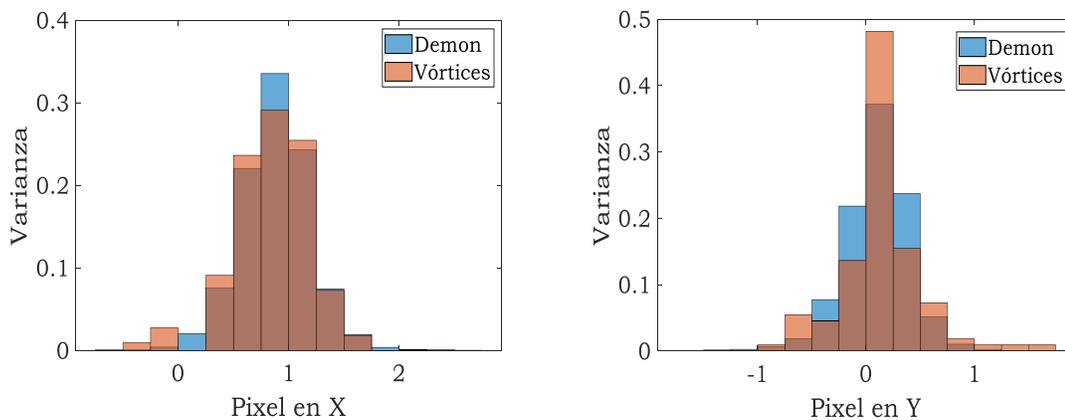


Figura 4.12: Histogramas de los ejes X e Y.

Se verifica que un aumento del ancho de banda del filtro LG (ω con un valor de 0.25) y una disminución del parámetro del factor de mérito de la distancia entre homólogos en la esfera de Poincaré ($D \leq 2$), permite disminuir las varianzas de los histogramas en ambos ejes de coordenados cuando se emplea el método de vórtices ópticos (ver figura 4.12). A continuación, se muestra en la tabla 4.4 los valores para las varianzas en el par de ejes coordenados que surgen de la implementación de los métodos de Demon y los vórtices ópticos con los parámetros mencionados. Se aprecia la importante disminución en el valor de la varianza obtenida para el método de vórtices ópticos a partir de la adecuada selección de parámetros en el seguimiento (comparar Tabla 4.3 y 4.4).

	Coor X Vortices	Coor Y Vortices	Coor X Demon	Coor Y Demon
Varianza	0.0865	0.0743	0.0890	0.0807

Tabla 4.4: Tabla con valores de varianza en los dos ejes coordenados para el método Demon y el método de Vórtices Ópticos.

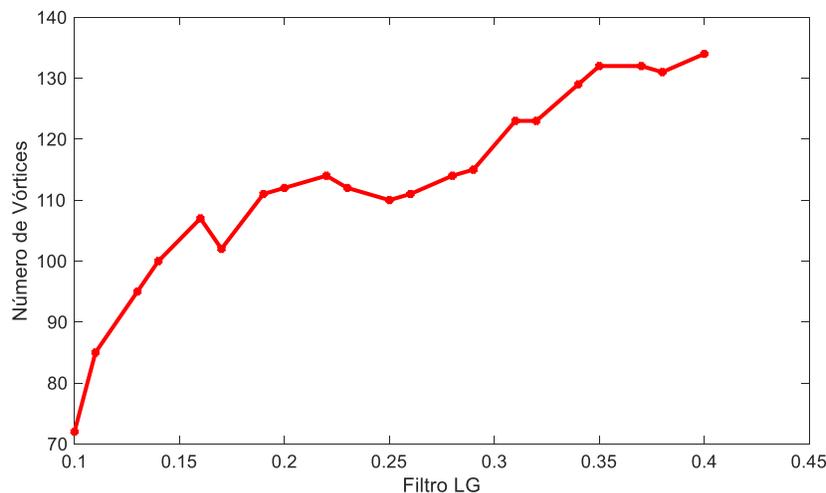


Figura 4.13: Gráfica que muestra la dependencia del número de vórtices y el ancho de banda del filtro LG

Como es conocido un mayor número de homólogos, mejorara la estadística y por lo tanto los resultados obtenidos. El parámetro del ancho de banda en la esfera de Poincaré controla el número de e vórtices en la información de pseudo-fase: por ese motivo a

continuación analizaremos como varia la cantidad de vórtices en términos del parámetro ω del filtro de Laguerre Gauss y su influencia en la varianza de los histogramas.

La figura 4.13 ilustra la relación entre el ancho del filtro Laguerre-Gauss y el número de vórtices ópticos. Estos resultados fueron obtenidos manteniendo constante el parámetro de la distancia en la esfera de Poincaré. La curva muestra que a medida que aumenta el tamaño del filtro, aumenta el número de singularidades de fase presentes en la información de pseudo-fase. Este aumento en los vórtices facilita la identificación de un mayor número de pares homólogos durante el proceso de seguimiento cuando el difusor se desplaza. Sin embargo, un aumento del número de homólogos por sí solo no garantiza mejorar los histogramas dado que los vórtices agregados pueden deberse a falsas identificaciones: Por lo cual, es relevante estudiar las varianzas en cada caso.

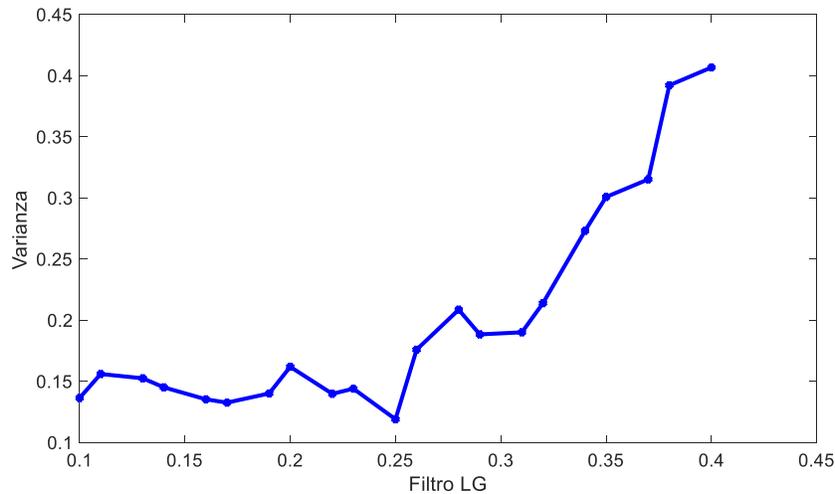


Figura 4.14: Grafica que muestra la dependencia de la varianza y el ancho de banda del filtro LG

Se analiza la relación que existe entre el ancho del filtro *LG* y la varianza de los histogramas de desplazamiento. Se observa que a medida que aumenta el ancho del filtro, también aumenta la varianza. Sin embargo, para valores del filtro inferiores a 0.3 la varianza varia levemente. Por otra parte, para valores de ω mayores a 0.3 la varianza crece mucho. En particular el mínimo valor de la varianza se logra con un filtro con valor de ω de 0.25.

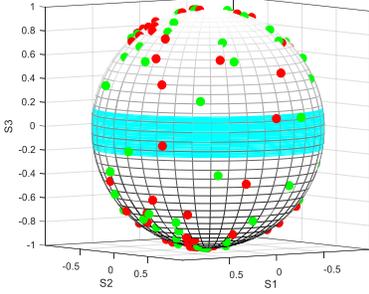
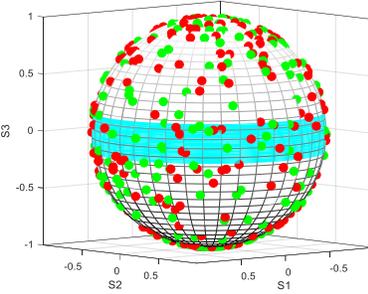
Ancho de banda del filtro LG	$\omega = 0.10$	$\omega = 0.40$
Singularidades en la esfera de Poincaré		
Porcentaje vórtices en la zona ecuatorial	4%	26,84%

Tabla 4.5: Tabla con valores anchos de banda del filtro LG y porcentaje de singularidades inestables en cada caso.

Teniendo en cuenta la relación entre el número de vórtices homólogos, el ancho de banda del filtro LG y el valor de la varianza, se analiza la presencia de singularidades de fase en la zona ecuatorial localizando los vórtices ópticos en la esfera de Poincaré, se aplica a valores de ω de 0.10 y 0.40. En la tabla 4.5 se observa que al aumentar el ancho de banda del filtro Laguerre Gauss, también se aumenta el porcentaje de singularidades inestables lo que podría tener relación con el incremento de la varianza.

A continuación, y con el objetivo de conocer los límites de nuestra propuesta, se estudiará el tamaño mínimo de las imágenes en el que la implementación del método de vórtices ópticos da resultados fiables. Para dicho análisis se parte de una de las 25 zonas en que se subdivide la imagen (la región 1 de la figura 4.10), dicha zona se divide en 4 zonas de 50×50 píxeles, como se muestra en la figura 4.15.

Estas nuevas regiones se analizan empleando para el rastreo con vórtices ópticos los siguientes parámetros, ancho del filtro LG 0.15 y una distancia en esfera de Poincaré $D \leq 2$. Bajo estas condiciones de obtienen 44 pares de homólogos. Los histogramas correspondientes se incluyen en la figura 4.16. En la tabla 4.6 se muestran los valores

de las varianzas para cada eje coordenado empleando rastreo de vórtices ópticos y el algoritmo Demon.

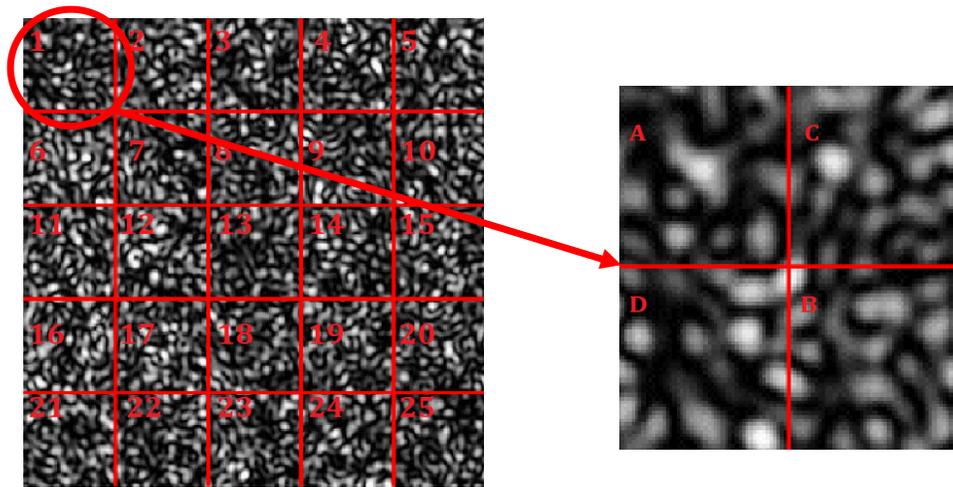


Figura 4.15: Se muestra la imagen original dividida en 25 zonas y la zona 1 subdividida en cuatro zonas de tamaño 50x50 pixeles de dimensión.

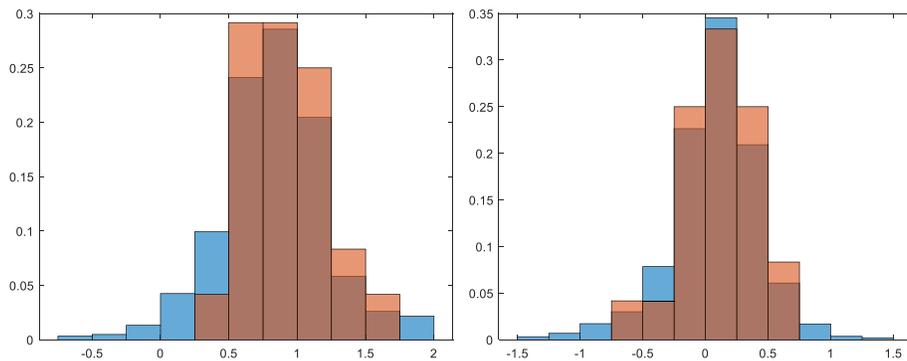


Figura 4.16: Histogramas de los ejes X e Y para la zona A.

	Coor X Vorti	Coor Y Vorti	Coor X Demon	Coor Y Demon
Varianza	0.0833	0.0714	0.1043	0.1061

Tabla 4.6: Tabla con valores de varianza en los dos ejes coordenados para el método Demon y el método de Vórtices Ópticos en imagen de 50x50 pixeles de dimensión.

Luego se tomó una subárea de la zona A de la imagen 4.15. El tamaño de las zonas de trabajo en este caso es 30x30 pixeles. Se procesa esta

imagen empleando un ancho de banda del filtro *LG* de 0.15 y una distancia en la esfera de Poincaré ($D \leq 2$). En este caso, solo se encuentran 4 pares de vórtices homólogos que no son suficiente para una determinación adecuada, estadísticamente hablando del desplazamiento entre los patrones de speckle. Por lo mencionado, concluimos que el tamaño de imagen mínimo para obtener valores significativos por el método de vórtices ópticos es de 50×50 pixeles.

En la figura. 4.17 se muestran los histogramas obtenidos por el método de vórtices y el método Demon. En la tabla 4.7 se incluyen las varianzas en ambos ejes coordenados empleando ambos métodos. Si bien la varianza obtenida por el método de vórtices ópticos es ligeramente menor que la obtenida por el método Demon, los datos de vórtices surgen a partir del análisis de solamente 4 vórtices.

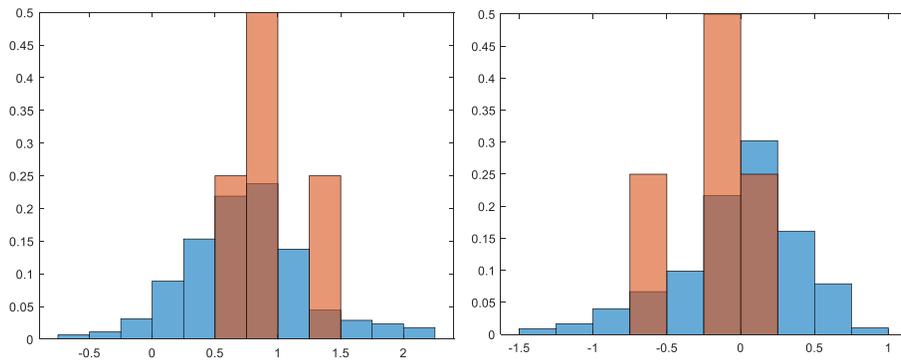


Figura 4.17: Histogramas para las coordenadas de *X* e *Y* para imágenes de tamaño de 30×30 pixeles.

	Coor X Vorti	Coor Y Vorti	Coor X Demon	Coor Y Demon
Varianza	0.1060	0.1259	0.1155	0.3434

Tabla 4.7: Tabla con valores de varianza en los dos ejes coordenados para el método Demon y el método de Vórtices Ópticos en imagen de 30×30 pixeles de dimensión.

5. Transformada Laguerre-Gauss con núcleo elíptico

Existen en la literatura diferentes filtros que pueden ser utilizados para obtener una señal compleja a partir de una señal real para estudiar las singularidades [81,101]. En el caso del speckle estos filtros transforman el patrón de intensidad $I(x,y)$ en un patrón de números complejos denominados $\tilde{I}(x,y)$ en los cuales es posible localizar singularidades de fase.

En este capítulo se propone una generalización de la transformada de Laguerre-Gauss (TLG). La transformada de LG convencional posee un núcleo circular con un único parámetro ω que controla el ancho de banda del filtro que suprime parte de las componentes de altas frecuencias que dan lugar a singularidades inestables. En este capítulo se propone el empleo de una transformada de Laguerre Gauss generalizada de núcleo circular con un parámetro ω para cada una de las coordenadas.

La propuesta se evaluará empleando patrones de speckle que se desplazan entre registros. Hay decorrelación entre el patrón de speckle antes y después del desplazamiento. Cada distribución es procesada empleando la transformada de Laguerre Gauss generalizada con el objetivo de obtener los campos complejos y la pseudo-fase correspondiente. Luego se emplea el procedimiento convencional de vórtices que consiste en localizar las singularidades, emplear las propiedades estructurales del núcleo y factores de mérito para determinar los homólogos y a partir de ellos los desplazamientos coordenados relativos entre las parejas de homólogos. Este procedimiento permite determinar las distancias promedio entre los vórtices homólogos a lo largo de los ejes x e y , y analizarlos mediante histogramas. Se analizarán las varianzas en termino de los

parámetros de ancho de banda en cada eje coordenado con el objetivo de determinar el conjunto de parámetros que optimiza los resultados y comparar con los resultados empleando el filtro de Laguerre Gauss convencional de núcleo circular.

5.1 Transformada de Laguerre Gauss Elíptico

La transformada Laguerre Gauss de núcleo elíptico LGE, es una transformada integral lineal que tiene como característica un kernel con geometría elíptica. Definimos este núcleo como:

$$LG(f_x, f_y) = (f_x + if_y)e^{-\left(\frac{f_x^2}{\omega_1^2} + \frac{f_y^2}{\omega_2^2}\right)} \quad (5.1)$$

Este kernel posee un ancho de banda diferente para cada eje coordenado del plano y se reduce al núcleo convencional de geometría circular cuando consideramos iguales los anchos de bandas en ambos ejes, es decir $\omega_1 = \omega_2 = \omega$.

La selección independiente de los parámetros ω_1 y ω_2 en cada uno de los ejes, permite al utilizar la transformada considerar regiones ligeramente diferentes en el plano de Fourier.

En la figura 5.1 se muestra un esquema de un filtro con núcleo elíptico con parámetros ω_1 y ω_2 diferentes.

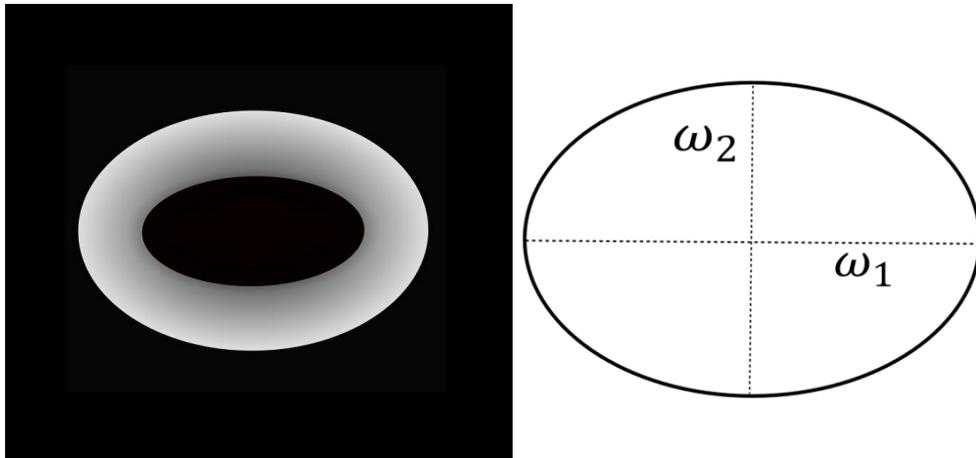


Figura 5.1: Representación de la amplitud del filtro de transformada Laguerre Gauss Elíptico LGE

5.1.1 Metrología de vórtices ópticos con filtro LGE

La propuesta del filtro de LGE se evaluará empleando patrones de speckle que se desplazan entre registros. Los patrones de speckle se generan al iluminar el conjunto máscara-difusor con un haz laser He-Ne (632.8 nm) colimado (ver Figura 5.1). La máscara opaca posee una pupila circular y el difusor se sitúa inmediatamente detrás de la máscara. Se forma un speckle objetivo en un plano de observación a una distancia z del conjunto máscara-difusor y se coloca una cámara CCD para su registro. Los patrones de speckle en intensidad antes y después del desplazamiento del difusor se muestran en la figura 5.2. Dado que el difusor se desplaza, pero manteniendo la posición de la máscara, se modifican los centros dispersores que generan el patrón de speckle objetivo en el estado final respecto al inicial. Esto hace que haya decorrelación entre el patrón de speckle antes y después del desplazamiento.

A partir de los patrones de speckle de la figura 5.2 y utilizando la transformada de LGE se genera una función de valores complejos y un mapa de pseudo-fase que dependerá de la selección de los parámetros ω_1 y ω_2 del filtro.

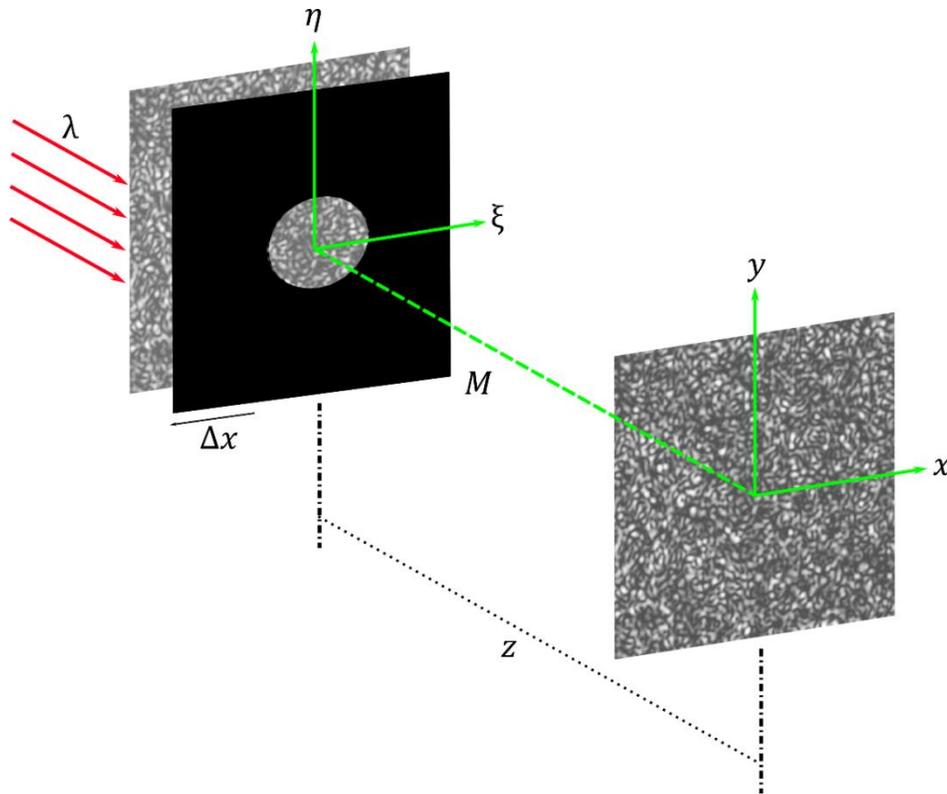


Figura 5.2: Esquema experimental para el registro de patrones speckle antes y después del desplazamiento en el plano. Donde λ es la longitud de onda, M la máscara, Δx el desplazamiento en el plano.

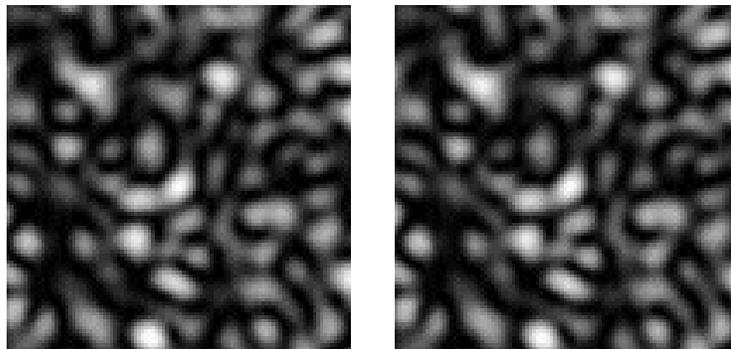


Figura 5.3: Patrones de speckle antes y después del desplazamiento del difusor respectivamente.

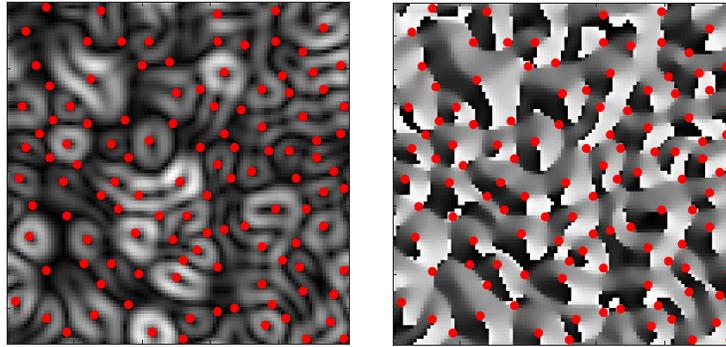


Figura 5.4: Mapas de pseudo amplitud y pseudo-fase con localización de vórtices en rojo

El pseudocampo generado con la LGE permite localizar y parametrizar pares de vórtices homólogos en los mapas de pseudo-fase y pseudo amplitud (Figura 5.4).

Posteriormente se emplea el procedimiento convencional de vórtices que consiste en localizar las singularidades, emplear las propiedades estructurales del núcleo y el factor de mérito para determinar los homólogos. Utilizamos como factor de mérito la distancia en la esfera de Poincaré propuesta en el capítulo anterior. Se realiza el seguimiento de los homólogos en los mapas de pseudo-fase. Finalmente, con la información obtenida se construyen y analizan los histogramas correspondientes a los desplazamientos en los ejes coordenados.

En la primera fila de la figura 5.5 se muestran los histogramas para los ejes coordenados x e y al implementar una transformada LG convencional con un núcleo circular. Luego, se procede a realizar el mismo análisis empleando la transformada LGE y los resultados se incluyen en las dos filas restantes. Obsérvese que los histogramas de las dos últimas filas fueron obtenidos a partir de la transformada LGE, pero intercambiando los anchos de banda en los ejes coordenados.

A partir de las ubicaciones del máximo de los histogramas, podemos determinar los desplazamientos del objeto en cada dirección. Asimismo, la varianza de los histogramas nos sirve como medida de confiabilidad de las medidas.

Nótese que los histogramas que se muestra en las figuras 5.5 c) y 5.5 d) corresponde a una transformada LGE donde el eje menor de la elipse está en la dirección del desplazamiento. Es posible observar que en este caso la varianza en la coordenada y es menor que en la dirección x .

Por otra parte, en las Fig. 5.5 e) y 5.5 f) que corresponde transformada LGE donde el eje mayor de elipse está en la dirección del desplazamiento del difusor. Es posible observar que en este caso la varianza en la coordenada x es menor que en la dirección y .

Como se esperaba en el caso de la transformada LG con núcleo circular, los histogramas de desplazamiento para singularidades de fase en x e y tienen anchos de pico iguales con la misma varianza. Pero en el caso de la transformada LG con núcleo elíptico, el histograma de desplazamiento para singularidades de fase en x e y tiene picos con diferente varianza en cada dirección.

Teniendo en cuenta que el parámetro ω controla la densidad de los vórtices en cada dirección. Entonces el parámetro ω se puede seleccionar adecuadamente para aumentar la densidad del vórtice en la dirección del desplazamiento reduciendo, en consecuencia, la varianza.

El disponer de un mayor número de vórtices homólogos mejora las varianzas en los histogramas. Por lo tanto, en el siguiente análisis hemos modificado los anchos de banda del filtro en las dos direcciones perpendiculares, pero manteniendo el número de vórtices aproximadamente constante en todos los casos de manera de poder evidenciar el efecto de la modificación de los anchos de banda en las direcciones x e y . La Tabla 5.1 muestra los cambios de varianza cuando se modifica el valor de los parámetros ω_1 y ω_2 .

Los resultados de la Tabla 5.1 confirman que la varianza disminuye cuando el eje mayor del filtro elíptico coincide con la dirección de desplazamiento del difusor.

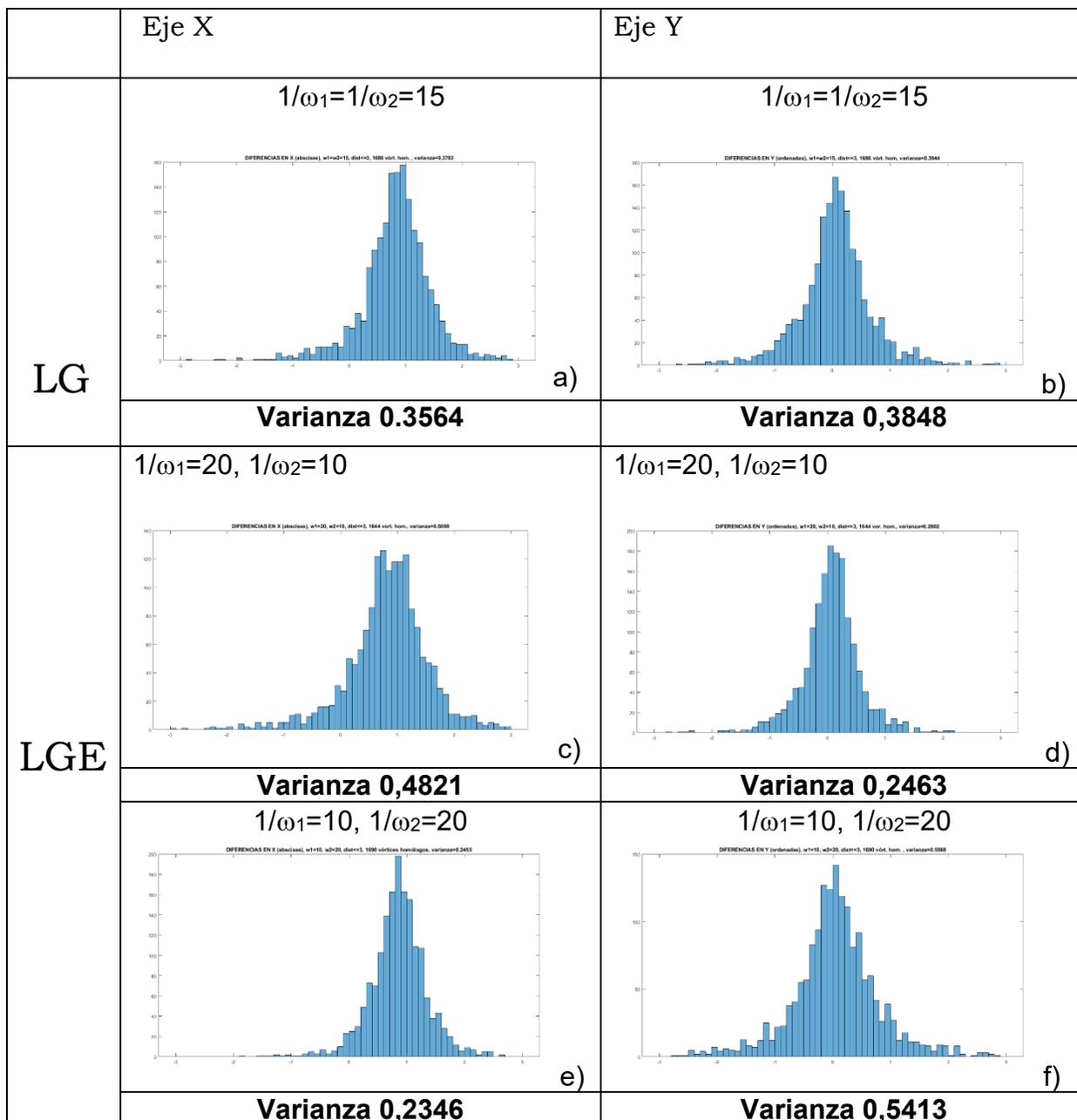


Figura 5.5: Histogramas par las coordenadas x e y empleado LG and LGE

LGE ancho de banda en x	LGE ancho de banda en y	Total de vortices homólogos	Varianza
1/W1=20	1/W2=10	1606	0,4821
1/W1=15	1/W2=15	1664	0.3564
1/W1=14	1/W2=16	1649	0.3247
1/W1=13	1/W2=17	1636	0.2849
1/W1=12	1/W2=18	1683	0.2781
1/W1=11	1/W2=19	1666	0.2605
1/W1=10	1/W2=20	1659	0.2346

Tabla 5.1: Tabla con valores de varianza en eje X con los diferentes anchos de banda de los dos ejes coordenados para un filtro TLG Elíptico.

6. Conclusiones

6.1 Conclusiones y Perspectivas

En este último capítulo se exponen las conclusiones generales de esta tesis. En una primera parte se describen los aportes desarrollados en esta tesis. Luego, se mencionan algunas nuevas líneas de investigación que se desprenden de este trabajo.

Para finalizar, se enumeran las publicaciones realizadas durante esta tesis y una lista de conferencias y presentaciones a congresos.

En este trabajo se presenta un conjunto de aplicaciones de las singularidades de fase presentes en campos de valores complejos obtenidos a partir de transformaciones integrales lineales como la transformada de Laguerre Gauss.

En primer lugar, se propuso el empleo de un descriptor alternativo y eficaz para el estudio de fenómenos dinámicos tan diversos como el secado de pinturas o las turbulencias atmosféricas. La implementación de vórtices ópticos en speckle dinámico como descriptor de actividad se realizó a partir de imágenes de historia temporal de patrones de speckle. Al evaluar las situaciones de baja o nula (pintura seca) actividad se encontró una densidad de vórtices no nula en contraposición a lo esperado en estas situaciones. Se determino que los vórtices encontrados en situaciones de baja o nula actividad están originados en ruido electrónico de la imagen presentes y no a partir de la actividad del speckle. Se verifico que estos vórtices son vórtices inestables y están localizados en el ecuador de la esfera de Poincaré. Para eliminar el efecto de dichas singularidades inestables e indeseables se diseñó un filtro basado en la esfera de Poincaré.

Los resultados obtenidos para las medidas de secado de pintura a partir de la densidad de vórtices ópticos y el filtro basado en la esfera

de Poincaré muestra buen acuerdo con aquellos obtenidos a partir de métodos gravimétricos convencionales.

Este mismo análisis se utilizó en otro fenómeno de evolución temporal como lo es la propagación de imágenes a través de la turbulencia atmosférica en condiciones controladas en laboratorio (turbulador). Se ha observado que la densidad de vórtices tiene una buena correlación con la intensidad de la turbulencia atmosférica a partir de medidas realizadas con un instrumento de referencia calibrado a tal efecto. La caracterización con técnicas tradicionales requiere de instrumental especializado o técnicas de análisis muy elaboradas. A contraposición el método basado en la densidad de vórtices ópticos en el análisis de imágenes de historia temporal se basa en imágenes capturadas con una cámara genérica. Esto abre la posibilidad de emplear esta propuesta como un cuantificador de la turbulencia atmosférica.

Luego se analizó el empleo de una técnica de identificación y seguimiento de vórtices ópticos para determinar la trayectoria de un objeto 3D codificado en un video holográfico y para el procesamiento de ecografías cardíacas.

En la primera propuesta los videos holográficos se generaron con dos métodos (FRP y RPM) basados en capas de fase. En ambos casos se localizaron los vórtices y se determinó el desplazamiento de los mismos entre las distintas imágenes. Los resultados permitieron determinar el desplazamiento de uno o varios objetos 3D, así como variaciones en su tamaño sin necesidad de realizar la reconstrucción de los hologramas. Ambas propuestas dieron resultados muy promisorios. Sin embargo, se debe tener en cuenta que a medida que aumenta la distancia entre el plano del holograma y el plano de reconstrucción, la luz de todos los objetos que componen la escena se extiende por todo el plano del holograma, limitando en consecuencia la utilidad de la propuesta para el seguimiento individual de múltiples objetos a partir de los vórtices resultantes son causados por toda la escena.

En el caso de las ecografías cardíacas fue posible rastrear el movimiento miocárdico a partir de los mapas de pseudofase generados empleando la transformada de Laguerre Gauss sobre los fotogramas de las ecografías cardíacas. El procedimiento consistió en determinar los vórtices homólogos, su trayectoria a lo largo de la

ecografía en cada región del ventrículo izquierdo y a partir ellos calcular la deformación promedio y posteriormente la deformación global de la pared miocárdica. Los ecógrafos comerciales procesan las imágenes ecográficas empleando la técnica de speckle tracking. Se implemento la técnica de speckle tracking basado en template matching con algoritmos de diferencia de sumas aditivas y correlación. Los resultados obtenidos a partir de la implementación de la metrología de vórtices y del speckle tracking fueron comparados con aquellos obtenidos a partir de un equipo ecocardiógrafo comercial. Los resultados obtenidos muestran un buen acuerdo global, aunque es ligeramente mayor la deformación obtenida mediante metrología de vórtices. Cabe aclarar que para el procesamiento mediante speckle tracking y metrología de vórtices se analizaron las imágenes provistas por un ecógrafo comercial. Dichas imágenes tienen un procesamiento que creemos puede haber alterado los resultados. No pudimos acceder a los datos originales sin procesar del ecógrafo. No obstante, la limitación mencionada creemos que los resultados muestran que la técnica propuesta es una alternativa válida en la obtención de la deformación longitudinal para el diagnóstico de patologías miocárdicas.

Finalmente debemos mencionar que la aplicación de los vórtices en ecocardiografía es un desarrollo que tendría un enorme impacto en la medicina teniendo en cuenta que la técnica de ecografía es muy accesible, segura y no requiere realizarla en instituciones hospitalarias.

La mayor dificultad en el análisis de vórtices es la detección de los vórtices homólogos entre dos fotogramas consecutivos. En presencia de decorrelación los parámetros que caracterizan a un vórtice (propiedades del núcleo de las singularidades) varían tanto que es muy difícil encontrar los homólogos. Asimismo, entre dos fotogramas sucesivos se producen aniquilaciones y creaciones de nuevos vórtices. En resumen, el problema clave es identificar correctamente la mayor cantidad de vórtices homólogos. En ese sentido se buscaron nuevas alternativas que mejoraran la detección de los mismos. Se propuso el empleo además de las propiedades estructurales del núcleo el empleo de la distancia en la esfera de Poincaré como factor de mérito para la selección de los vórtices homólogos. Para verificar la propuesta se emplearon distribuciones de speckle antes y después de un desplazamiento en una situación de decorrelación. Para verificar la validez de los resultados obtenidos al emplear las singularidades de

fase dichos resultados se compararon con aquellos que surgen de la implementación del algoritmo Demon. Los resultados obtenidos a partir de métodos de flujo óptico como el algoritmo Demon permitieron mejorar la selección de los parámetros implicados en la metrología de seguimiento de vórtices y por lo tanto permitiendo una mejor determinación del desplazamiento mediante singularidades de fase. Aunque se trata de una prueba de concepto, se cree que esta propuesta de calibrar el seguimiento de singularidades de fase con métodos de seguimiento convencionales puede permitir aprovechar mejor la resolución potencial por debajo del píxel de la metrología de vórtices para una gama más amplia de aplicaciones.

Finalmente, y con el mismo objetivo anterior de encontrar alternativas que optimicen las medidas con vórtices se propuso el empleo de una transformada de Laguerre Gauss de núcleo elíptico, dicha transformada permite seleccionar adecuadamente los anchos de banda del filtro en cada dirección. La metrología de vórtices ópticos determina los desplazamientos del objeto en cada dirección a partir de las ubicaciones del máximo de los histogramas. La varianza de los histogramas es una medida de confiabilidad de las medidas. Por lo tanto, para mejorar las medidas se requiere reducir las varianzas. A partir de los resultados se verifico que se puede seleccionar adecuadamente el parámetro ω en la dirección de desplazamiento para reducir la varianza de las medidas en esa dirección.

Existen todavía muchos aspectos relativos a este trabajo y a las aplicaciones propuestas en los cuales es necesario continuar profundizando. A continuación, se detallan algunos de ellos. El análisis de vórtices es prometedor como lo muestran nuestros trabajos y otros previos, pero requiere mejorar los algoritmos para identificar los vórtices homólogos en particular en situaciones de decorrelación de manera de tratar de disminuir las falsas identificaciones o las no identificaciones de pares de homólogos. Esto permitiría tener mayor número de homólogos, mejorar la estadística y por lo tanto los resultados obtenidos.

6.2 Trabajos Publicados

- *Alternative representation for optimized phase compression in holographic data.* A. Velez Zea, A L. Villamizar Amado, M. Tebaldi, R. Torroba. OSA CONTINUUM 2, 3 572-581 (2019)
- *Unstable phase singularities in noise contaminated images.* A. L. Villamizar Amado, N. Cap, S. Gallo, H. Rabal, M. Tebaldi. Proceedings of SPIE (2020)
- *Echocardiography images analysis by using Laguerre Gauss Transform.* A. L. Villamizar Amado, S. Gallo, N. Cap, H. Rabal, M. Tebaldi. Frontiers in Optics/Laser Science OSA (2020)
- *Poincare sphere noise filtering for singularities in dynamic speckle activity: Application to paint drying time measurement.* A. L. Villamizar Amado, D. Sierra Sosa, A. Elmaghraby, E. Grumel, H. Rabal, M. Tebaldi. Optics and Laser in Engineering, 136 (2021) 106317.
- *Vortex technique to track 3D object displacement in CGH.* A. L. Villamizar Amado, A. Vélez Zea, M. Tebaldi. Journal of Optics. 24 (2022)
- *Object tracking from speckle fields using optical vortices and optical flow demon algorithm.* A. L. Villamizar Amado, A. Vélez Zea, M. Tebaldi. Enviado
- *Atmospheric turbulence characterization with optical vortex density.* D. Gulich, A. L. Villamizar Amado, M. Tebaldi, N. Cap. En escritura.

6.3 Participación en eventos

- *Estudio dinámico de la eficiencia de difracción en el acoplamiento de dos haces en materiales fotorrefractivos $Bi_{12}TiO_{20}$*

- A. L. Villamizar Amado, N. A. Arias Hernández, M. L. Molina Prado, M. Tebaldi IX Encuentro de estudiantes de Óptica y fotónica y XIV Taller de Óptica y Fotónica, 21 al 24 de mayo, San Martín, Buenos Aires, Argentina (2018)
- *Procesamiento opto-digital empleando patrones de Speckle y singularidades de fase*
A. L. Villamizar Amado, M. Tebaldi. Jornada de estudiantes de postgrado del CIOp 2018, 22 de noviembre, La Plata, Buenos Aires, Argentina
 - *Compresión de datos holográficos por medio de análisis de fase*
A. Vélez Zea, A. L. Villamizar Amado, M. Tebaldi, R. Torroba. V Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería, La Plata, Argentina (2019)
 - *Metrología de vórtices usando filtros de Laguerre Gauss elípticos.*
M. Tebaldi, N. Cap, H. Rabal, S. Gallo, A. L. Villamizar Amado. V Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería, La Plata, Argentina (2019)
 - *Speckle Tracking en imágenes de ultrasonido.*
S. Gallo, A. L. Villamizar Amado, N. Cap, H. Rabal, M. Tebaldi. X Escuela de estudiantes de Óptica y fotónica y XV Taller de Óptica y Fotónica, 20 al 23 de mayo, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina (2019)
 - *Análisis de imágenes médicas usando metrología de vórtices y filtros Laguerre-Gauss elíptico.*
A. L. Villamizar Amado, S. Gallo, N. Cap, H. Rabal, M. Tebaldi. X Escuela de estudiantes de Óptica y fotónica y XV Taller de Óptica y Fotónica, 20 al 23 de mayo, San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina (2019)
 - *Diffraction efficiency in a photorefractive material when the grating vector makes an angle with the external electric field.*
A. L. Villamizar Amado, B. Barrera, N. A. Arias Hernández, M. Tebaldi, M. L. Molina Prado. RIAO-OPTILAS-MOPM 2019, 23 al 27 de septiembre, Cancún, México (2019)

- *Echocardiography image análisis by using vortex metrology.*
A. L. Villamizar Amado, S. Gallo, N. Cap, H. Rabal, M. Tebaldi. RIAO-OPTILAS-MOPM 2019, 23 al 27 de septiembre, Cancún, México (2019)
- *Análisis del secado de pinturas empleando historias temporales de diagramas de Speckle y vórtices ópticos.*
A. L. Villamizar Amado, D. Sierra Sosa, E. Grumel, H. Rabal, M. Tebaldi. RIAO-OPTILAS-MOPM 2019, 23 al 27 de septiembre, Cancún, México (2019)
- *Unstable phase singularities in noise contaminated images*
A. L. Villamizar Amado, N. Cap, S. Gallo, H. Rabal, M. Tebaldi SPIE Optics + Photonics Exhibition, 24 al 28 de agosto, Foro Digital (2020)
- *Seguimiento de un objeto 3D en videos holográficos usando vórtices ópticos.*
A. L. Villamizar Amado, M. Tebaldi, A. Velez Zea. ENO CANCOA 2021, 22 al 26 de noviembre, Medellín, Colombia (2021)
- *Metrología de vórtices empleando transformada de Laguerre Gauss de núcleo elíptico.*
A. L. Villamizar Amado, N. L. Cap, S. Gallo, D. Sierra Sosa, H. Rabal. M. Tebaldi. ENO CANCOA 2021, 22 al 26 de noviembre, Medellín, Colombia (2021)
- *Rastreo de objeto 3D en videos holográficos usando la Transformada de Laguerre-Gauss.*
A. L. Villamizar Amado, M. Tebaldi, A. Velez Zea. EEOF TOPFPT 2022. 31 de mayo al 3 de junio, Tandil, Argentina (2022)
- *Object tracking from speckle fields using optical vórtices and optical flow demon algorithm.*
A. L. Villamizar Amado, M. Tebaldi, A. Velez Zea. RIAO OPTILAS 2023, 27-31 de marzo, San Jose, Costa Rica (2023)
- *Seguimiento en patrones de speckle con vórtices ópticos y algoritmo DEMON.*
A. L. Villamizar Amado, M. Tebaldi, A. Velez Zea. EEOF TOPFPT 2023, 29 al 31 de mayo, Bernal, Argentina (2023)

- *Densidad de vórtices ópticos como cuantificador de la turbulencia atmosférica.*
D. Gulich, A. L. Villamizar Amado, M. Tebaldi, N. Cap. 108°
REUNION ANUAL DE FISICA RAFA 2023, 19 al 22 de
septiembre, Bahía Blanca, Argentina (2023)

Bibliografía

- [1] J.W. Goodman, Speckle phenomena in optics: theory and applications. Vol. 1 (Roberts & Co., Englewood, Colo., 2007).
- [2] Goodman, J. W. (1975). Statistical Properties of Laser Speckle Patterns. In Laser speckle and related phenomena, Dainty J. C., editor, pages 9-75. Springer-Verlag, Berlin
- [3] Rabal H. J., Braga R. A. Jr. (2008) Dynamic Laser Speckle and Applications CRC Press, Series: Optical Science and Engineering.
- [4] Dynamic speckle analysis using multivariate techniques. J. M López-Alonso, J. Alda, H. Rabal, E. Grumel, M. Trivi, Journal of Optics, Vol. 17, No. 3, 035609 (7pp) (2015).
- [5] Dainty, J.C. (1975). Laser speckle and related phenomena. In Berlin and NewYork, Springer-Verlag (Topics in Applied Physics. Vol. 9).
- [6] Dennis, M. R. O'Holleran, K., Padgett, M., J. (2009). Singular optics: optical vortices and polarization singularities. Progress in Optics, 53, 293-363
- [7] Optical vortex metrology for nanometric speckle displacement measurement. W., Wang, T., Yokozeki, R. Tshijima, A. Wada, Y. Miyamoto, M. Takeda, S.G. Hanson. Optics Express, Vol. 14, No. 1, 120-127. (2006).
- [8] Optical vortex metrology based on the core structures of phase singularities in Laguerre-Gauss transform of a speckle pattern. W. Wang, T. Yokozeki, R. Tshijima, M. Takeda, S.G. Hanson Optics Express, Vol. 14, No. 22, 10195-10206. (2006).
- [9] Phase singularities in analytic signal of white-light speckle pattern with application to micro-displacement measurement. W. Wang, N. Tshii, S.G. Hanson, Y. Miyamoto, M. Takeda. Optics Communications, Vol. 248, No. 1, 59-68. (2005).
- [10] Pseudophase information from the complex analytic signal of speckle fields and its applications. Part T: Micro displacement observation based on phase-only correlation in the signal domain. W. Wang, N. Tshii, S.G. Hanson, Y., Miyamoto, M. Takeda Applied Optics, Vol. 44, No. 23, 4909-4915. (2005).

- [11] Pan Guo, Yongjie Pu, Jie Zhu, Huinan Li, Minyu Fan, and Sha Wang. "Ultrafast vortex arrays generated from a mode-locked oscillator with dispersion management" *Opt. Lett.* 48, 4865-4868 (2023)
- [12] Jincheng Ni et al., "Multidimensional phase singularities nanophotonics". *Science* 374, eabj0039 (2021). DOI:10.1126/science.abj0039
- [13] Bustamante, C.J., Chemla, Y.R., Liu, S. et al. Optical tweezers in single-molecule biophysics. *Nat Rev Methods Primers* 1, 25 (2021). <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00021-6>
- [14] Francisco M. Muñoz-Pérez, Vicente Ferrando, Walter D. Furlan, Juan C. Castro-Palacio, J. Ricardo Arias-Gonzalez, Juan A. Monsoriu, "Multiplexed vortex beam-based optical tweezers generated with spiral phase mask" *Science*, 26, 10, (2023), <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107987>
- [15] Wan, C., Chong, A. y Zhan, Q. Vórtices espaciotemporales ópticos. *eLight* 3, 11 (2023). <https://doi.org/10.1186/s43593-023-00042-6>.
- [16] Zhou, HL., Fu, DZ., Dong, JJ. et al. Analizador de espectro complejo de momento angular orbital para luz de vórtice basado en el efecto Doppler rotacional. *Aplicación de ciencia ligera* 6, e16251 (2017). <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.251>
- [17] Fang, Y., Guo, Z., Ge, P. et al. Sondar el momento angular orbital de intensos pulsos de vórtice con ionización de campo fuerte. *Aplicación de ciencia ligera* 11, 34 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00726-7>
- [18] Wang, Jian, Liu, Jun, Li, Shuhui, Zhao, Yifan, Du, Jing and Zhu, Long. "Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications" *Nanophotonics*, vol. 11, no. 4, 2022, pp. 645-680. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0527>
- [19] Hecht E. J., (2000), *Optica*, Addison Wesley, Madrid.
- [20] Dainty J. C., (1977) The statics of speckle patterns, in *Progress in Optics*, Vol. 14, Elsevier.
- [21] Ennos A. E., *Laser Speckle experiments for students*, *Physics Education*, 31, 138-142, (1996).
- [22] Macdonald, J. R., Brachman, M. K. (1956). Linear-system integral transform relations. *Reviews of modern physics*, 28 (4), 393-422
- [23] Co, T. (2013). *Integral Transform Methods*. In *Methods of Applied Mathematics for Engineers and Scientists* (pp. 450-482). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139021821.017

- [24] Debnath, L., and D. Bhatta, (2010), Integral transforms and their applications: CRC press.
- [25] Freund, I., and V. Freilikher, (1997), Parameterization of anisotropic vortices: *Journal of the Optical Society of America A*, 14, 1902-1910.
- [26] W. Wang, M. R. Dennis, R. Ishijima, t. Yokozeki, A. Matsuda, S. G. Hanson, M. Takeda, "Poincare sphere representation for the anisotropy of phase singularities and its applications to optical vortex metrology for fluid mechanical analysis" *Optics Express* 15 (17), 11008-11019 (2007)
- [27] Rabal H. J, Braga R. A. Dynamic laser speckle and applications. CRC Press; (2009).
- [28] Cheng H, Luo Q, Wang Z, Gong H, Chen S, Liang W, Zeng S. Efficient characterization of regional mesenteric blood flow by use of laser speckle imaging. *Appl Opt* (2003) 42, 5759-5764.
- [29] Braga R. A, Dal Fabbro I. M, Borem F. M, Rabelo G, Arizaga R, Rabal H. J, Trivi M. Assesment of seed viability by laser speckle techniques. *Biosystems Engineering* (2003) 86, 287-294.
- [30] Amaral I. C, Braga R. A, Ramos E. M, Ramos A. L. S, Roxael E. A. R. Application of biospeckle laser technique for determining biological phenomena related to beef aging. *J Food Eng* (2013) 119, 135-139.
- [31] Pomarico J. A, Di Rocco H. O, Alvarez L, Lanusse C, Mottier L, Saumell C, Arizaga R, Rabal H, Trivi M. Speckle interferometry applied to pharmaco dynamics studies: Evaluation of parasite mobility. *Eur Biophys J* (2004) 33, 694-699.
- [32] Tearney G. J, Bouma B. E. Atherosclerotic plaque characterization by spatial and temporal speckle pattern. *Opt Lett* (2002) 27, 533-535.
- [33] Mojica-Sepulveda R. D, Mendoza-Herrera L. J, Agosto M. F, Grumel E. E, Soria D. B, Cabello C. I, Trivi M. Hydro adsorption study by dynamic laser speckle of natural zeolite for adsorbent and fertilizer applications. *Adv Chem Eng Sci (ACES)* (2016) 6, 570-583.
- [34] Fricke-Begemann T, Gulker G, Hinsch K. D, Wolff K. Corrosion monitoring with speckle correlation. *Appl Opt* (1999) 38, 5948-5955.
- [35] Application of dynamic speckle interferometry to the drying of coatings, J Amalvy, C. Lasquibar, R. Arizaga, H. Rabal, M. Trivi *Progress in organic coatings*, Vol. 42, No. 1-2, 89-99. (2001).
- [36] Oulamara A, Tribillon G, Duvemoy J. Biological activity measurement on surfaces using temporal decorrelation effect of laser speckle. *J Mod Opt* (1989) 36, 165-179.
- [37] R. Nothdurft, G. Yao, "Imaging obscured subsurface inhomogeneity", *Optics Express* 13 (25), 10034-10039 (2005)

- [38] Angel-Toro L, S. Tanaka, I. Takenaka, Y. Ohtsuka. "Statistical evaluation of phase fluctuations of light scattered from apple peel", *Optical Methods in Biomedical and Environmental Sciences*, 15-18 (1994)
- [39] H. Cummins, H. Swinney, "Light beating spectroscopy", *Progress in Optics* 8, 135-200 (1970).
- [40] Arizaga R, Trivi M, Rabal H. Speckle time evolution characterization by the co- occurrence matrix analysis. *Opt Laser Technol* (1999) 31, 163-169.
- [41] Blood flow observed by timevarying laser speckle, H. Fujii, T. Asakura, K. Nohira, Y. Shintomi, T. Ohura *Optics Letters* Vol. 10, No. 3, 104-106 (1985).
- [42] H. Fujii, K. Nohira, Y. Yamamoto, H. Ikawa, T. Ohura, "Evaluation of blood flow by laser speckle image sensing. Part 1" *Applied Optics* 26 (24), 5321-5325 (1987)
- [43] Angel-R. Arizaga, N Cap, H. Rabal, M. Trivi, "Display of local activity using dynamical speckle patterns" *Optical Engineering* 41 (02), 287-294 (2002).
- [44] J. Briers, S. Webster, "Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning fullfield technique for monitoring capillary blood flow", *Journal of Biomedical Optics* 1, 174 (1996)
- [45] Pion E, Asam C, Feder AL, Felthaus O, Heidekrueger PI, Prantl L, Haerteis S, Aung T. Laser speckle contrast analysis (LASCA) technology for the semiquantitative measurement of angiogenesis in in-ovo-tumor-model. *Microvasc Res.* 2021 Jan; 133:104072. doi: 10.1016/j.mvr.2020.104072. Epub 2020 Sep 17. PMID: 32949573.
- [46] Barsotti, S, d'Ascanio, A., Valentina, V. et al. Is there a role for laser speckle contrast analysis (LASCA) in predicting the outcome of digital ulcers in patients with systemic sclerosis? *Clin Rheumatol* 39, 69-75 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10067-019-04662-7>
- [47] Ruaro B, Bruni C, Wade B, Baratella E, Confalonieri P, Antonaglia C, Geri P, Biolo M, Confalonieri M, Salton F. Laser Speckle Contrast Analysis: Functional Evaluation of Microvascular Damage in Connective Tissue Diseases. Is There Evidence of Correlations with Organ Involvement, Such as Pulmonary Damage? *Front Physiol.* 2021
- [48] Daniel Sierra-Sosa, Myrian Tebaldi, Eduardo Grumel, Hector Rabal, Adel Elmaghraby. Localized analysis of paint-coat drying using dynamic speckle interferometry, *Optics and Lasers in Engineering*, 106 (2018) 61-67, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.02.013>.

- [49] Blotta E, Ballarin V, Brun M, Rabal H Evaluation of speckle-interferometry descriptors to measuring drying-of-coatings 91 (2011) <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2011.05.002> Signal Processing
- [50] Ruaro H.P. Blandin, J.C. David, J.M. Vergnaud, J.P. Illien, M. Malizewicz, Modelling of drying of coatings: Effect of the thickness, temperature and concentration of solvent, Progress in Organic Coatings, 15 (1987) [https://doi.org/10.1016/0033-0655\(87\)80005-5](https://doi.org/10.1016/0033-0655(87)80005-5).
- [51] Sendra G. H, Rabal H, Arizaga R, Trivi M. Vortex analysis in dynamic speckle images J Opt Soc Am A (2009) 26, 2634-2639.
- [52] Larry C. Andrews and Ronald L. Phillips. Laser Beam Propagation through Random Media, Second Edition (SPIE Press Monograph Vol. PM153) SPIE Publications, 2005
- [53] Gil Álvarez Pedro, Teoría matemática de la información. Matemática actual. ICE Ediciones, 1981.
- [54] Funes Gustavo, Gulich Damian, Zunino Luciano, Perez Dario G and Garavaglia Mario. Behavior of the laser beam wandering variance with the turbulent path length. Optics Communications, 272(2): 476-479, Apr 2007.
- [55] Obukov A.M, Structure of the temperatura fiel un turbulent Flow. Izv. AcadNauk. SSSR, Ser. Geofiz., 13:58-69, 1949.
- [56] Stanley Corrsin. On the spectrum of isotropic temperature fluctuations in an isotropic turbulence. Journal of Applied Physics, 22(4): 469-473, 1951.
- [57] Onur Keskin, Laurent Jolissaint, and Colin Bradley. "Hot-air optical turbulence generator for the testing of adaptive optics systems: principles and characterization". Applied Optics, 45(20):4888, 2006.
- [58] E. Masciadri and J. Vernin. Optical technique for inner-scale measurement: possible astronomical applications. Applied Optics, 36(6):1320,1997.
- [59] Gulich, D. (n.d.). Estadística de la propagación de luz en atmósferas turbulentas. Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/56727>
- [60] Erf, R. K. (ed) (1978) Speckle Metrology, Academic Press, New York.
- [61] Francon, M. (1979) Laser Speckle Applications in Optics, Academic Press, New York.
- [62] Ennos, A. E. (1984) Speckle Interferometry, in Laser Speckle and Related Phenomena, 2nd (ed J. C. Dainty), Springer-Verlag.
- [63] Sirohi, R. S. (ed.) (1993) Speckle Metrology, Marcel Dekker, New York.

- [64] Formi, N. A. (1998) *Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements*, Springer-Verlag, Berlin.
- [65] Sierra-Sosa, D. Estudio de singularidades de fase con aplicaciones a la metrología. Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/41104>
- [66] Nye, J. F., Berry, M. V. (1974) Dislocations in wave trains. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 366, 165-190.
- [67] Gerchberg R. W., Saxton, W. O. (1972) A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures *Optik* 35, 237-246.
- [68] Zhao Y, Cao L, Zhang H, Kong D, Jin G (2015) Accurate calculation of computer-generated holograms using angular-spectrum layer-oriented method. *Opt. Express*, 23, 25440-25449.
- [69] <https://cancerquest.org/es/para-los-pacientes/deteccion-y-diagnostico/ultrasonido>
- [70] <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/ultrasonido>
- [71] Canon-Montañez, Wilson, B.S. Santos, A., Foppa, Murilo. Strain longitudinal global: un parámetro útil para evaluar disfunción ventricular izquierda subclínica en el síndrome metabólico. *Revista Colombiana de Cardiología*, 23. 2 (2016)
- [72] Thomas H. Marwick, Rodol L. Leano, Joseph Brown, Jing-Ping Sun, Rainer Hoffmann, Peter Lysyansky, Michael Becker, James D. Thomas, Myocardial Strain Measurement With 2-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography: Definition of Normal Range, *JACC: Cardiovascular Imaging*, 2 80-84 (2009) <https://doi.org/10.1016/j.jcmg.2007.12.007>.
- [73] Blessberger Hermann, Binder Thomas. NON- invasive imaging: Two-dimensional speckle tracking echocardiography: Basic principles. *Heart (British Cardiac Society)*, 22, 716-722 (2010) <https://doi.org/10.1136/hrt.2007.141002>.
- [74] Bansal Manish, Kasliwal Ravi. How do I do it? Speckle Tracking echocardiography, *Indian Heart Journal*, 65, 117-123 (2013) <https://doi.org/10.1016/j.ihj.2012.12.004>.
- [75] Khamis H, Shimoni S, Hagendorff A, Smirin N, Friedman Z, Adam D. Optimization-Based Speckle Tracking Algorithm for Left Ventricle Strain Estimation: A Feasibility Study. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*. 2016 Aug;63(8):1093-106. doi: 10.1109/TUFFC.2016.2569619. Epub 2016 May 17. PMID: 27214894.
- [76] Barrera-Avellaneda Cesar E, Paz Manuel A, Salazar-Niño Jaime F. utilidad del “speckle tracking” en pacientes no oncológicos. *Revista*

- [77] Azarmehr, N., Ye, X., Howes, J.D. et al. An optimisation-based iterative approach for speckle tracking echocardiography. *Med Biol Eng Comput* 58, 1309–1323 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11517-020-02142-8>
- [78] Iacopo Fabiani, Nicola Riccardo Pugliese, Veronica Santini, Lorenzo Conte, Vitantonio Di Bello, “Speckle-Tracking Imaging Principles and Clinical Applications: A Review for Clinical Cardiologist” *Echocardiography in Heart Failure and Cardiac Electrophysiology*. Cap 5, 85-114 (2016)
- [79] Voigt JU, Pedrizzetti G, Lysyansky P, Marwick TH, Houle H, Baumann R, Pedri S, Ito Y, Abe Y, Metz S, Song JH, Hamilton J, Sengupta PP, Koliaas TJ, d'Hooge J, Aurigemma GP, Thomas JD, Badano LP. Definitions for a common standard for 2D speckle tracking echocardiography: consensus document of the EACVI/ASE/Industry Task Force to standardize deformation imaging. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2015 Jan;16(1):1-11. doi: 10.1093/ehjci/jeu184. Epub 2014 Dec 18. PMID: 25525063
- [80] Natalie Clark, Michael K. Giles, Sarah Harrison y Chris Hofer, “Tracking Speckle Patterns with Optical Correlation” *SPIE*, Vol. 1772, 77-87 (1992).
- [81] Angel-Toro L, Sierra-Sosa D, Tebaldi M, Bolognini N. (2012) Speckle decorrelation influence on measurements quality in vortex metrology. *Optics Communication*, 285, 4312-4316.
- [82] Wang W, Hanson S. G, Takeda M. (2011) Optical Vortex Metrology. In: *Advances in speckle metrology and related techniques*, pp 207- 238.
- [83] T. D. Yang, H-J. Kim, J. Lee, B. Kim, Y. Choi, Single-shot and phase-shifting digital holographic microscopy using a 2-D grating, *Opt. Express* 24, 9480 (2016)
- [84] P. Gao, C. Yuan. Resolution enhancement of digital holographic microscopy via synthetic aperture: a review, *Light Adv. Manuf.* 3, 105-120 (2022)
- [85] D. Hayat, M Kloeckner, J. Nahum, E. Ecochard-Dugelay, J. L. Dubois-Rand, D. Jean-Francois, P. Guret, P. Lim, Comparison of real-time-three-dimensional speckle tracking to magnetic resonance imaging in patients with coronary heart disease, *Am J. Cardiol.* 109, 180-186 (2012)
- [86] K. Taha, M. Bourfiss, A. S. J. M. Te Riele, M. J. M. Cramer, J. F. Van Der Heijde, F. W. Asselbergs, B. K. Velthuis, A. J. Teske, A hear-to-head comparison of speckle tracking echocardiography and feature

- tracking cardiovascular magnetic resonance imaging in right ventricular deformation, *Eur Heart J. Cardiovasc. Imaging* 22, 950-958 (2021)
- [87] N. Sahba, V. Tavakoli, a. Ahmadian, M. D. Abolhassani, M. Fotouhi. Hybrid local/global optical flow and spline multi-resolution analysis of myocardial motion in B-mode echocardiography images. *Tech Acoust* 2008. [Http://www.ejta.org](http://www.ejta.org)
- [88] N. Ouzir, J. -. Tourneret and A. Basarab, "Optical flow estimation in ultrasound images using a sparse representation," 2017 IEEE 7th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP), Curacao, 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/CAMSAP.2017.8313079.
- [89] V. Tavakoli, N. Sahba, A. Ahmadian, M. D. Abolhassani, F. Yousefi Rizi, A. Amini, Adaptive Multi-Resolution Myocardial Motion Analysis of B-Mode Echocardiography Images using Combined Local/Global Optical Flow, en 2008 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (IEEE,2008), pp. 2303-2306.
- [90] S. T. H. Shah, X. Xuezhi, Traditional and modern strategies for optical flow: an investigation, *SN Appl. Sci.* 3, 289 (2021)
- [91] J. W. Goodman, *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications*, 2a ed. (SPIE Press, 2013).
- [92] R. Grousson, S. Mallick, Study of flow pattern in a fluid by scattered laser light. *Appl. Opt.* 16, 2334 (1977)
- [93] Thirion J. P. (1998) Image matching as a diffusion process: an analogy with Maxwell's demons. *Medical Image Analysis*, Vol 2, 3, pp 243-260.
- [94] Vercauteren T, Pennec X, Perchant A, Ayache N (2009) Diffeomorphic demons: Efficient non-parametric image registration. *NeuroImage* 45, 561-572.
- [95] Aminfar A, Davoodzadeh N, Aguilar G, Princevac M. Application of optical flow algorithms to laser speckle imaging. *Microvasc Res* 2019 Mar; 122:52-59. doi: 10.1016/j.mvr.2018.11.001. Epub 2018 Nov 8. PMID: 30414869.
- [96] V. N. Wu, S. Haruyama, Real-time sound detection and regeneration based on optical flow algorithm of laser speckle images, 2019 28th Wirel. Opt. Commun. Conf. WOCC 2019 – Proc. 28, 4475-4488 (2019).
- [97] Poree J, Baudet M, Tournoux F, Cloutier G, Garcia D. A Dual Tissue-Doppler Optical-Flow Method for Speckle Tracking Echocardiography at High Frame Rate. *IEEE Trans Med Imaging*. 2018 Sep;37(9):2022-2032. doi: 10.1109/TMI.2018.2811483. Epub 2018 Mar 2. PMID: 29993598.

- [98] J. Wu, S. Liu, Z. Wang, X. Zhang, R. Guo. Dynamic depth estimation of weakly textured objects based on lightfield speckle projection and adaptive step length of optical flow method, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 214, 112834 (2023).
- [99] X. Huang, W. Guo, R. Yu, and X. Wang, “Real-time high sensitivity vibration detection based on phase correlation of line speckle patterns” *Opt. Laser Technol.* 148, 107759 (2022)
- [100] X. Pennec, P. Cachier, N. Ayache, Understanding the “demon’s algorithm”:3D non-rigid registration by gradient descent, *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)* 1679, 597-606 (1999)
- [101] Angel-Toro L, Sierra-Sosa D, Tebaldi M, Bolognini N. (2013) In-plane Displacement measurement in vortex metrology by synthetic networks correlation fringes. *Journal of Optical Society of America A*, 30, No 3, 462-469.