

**EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DE LA PIEL
HUMANA POR MEDIO DEL MÉTODO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS**

**DIANA MILENA ARIZA CASTILLO
ELIANA MARÍA VESGA DURÁN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

**EXTRACCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DE LA PIEL
HUMANA POR MEDIO DEL MÉTODO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS**

**DIANA MILENA ARIZA CASTILLO
ELIANA MARÍA VESGA DURÁN**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Electrónica**

Director

Dr. JAIME ENRIQUE MENESES FONSECA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

Al Señor Todo Poderoso como ofrenda amorosa y en Él a mi papi, mami, hermanita y abuelita.

Diana Milena Ariza Castillo

AGRADECIMIENTOS

A Dios Padre, Hijo y Espíritu Santo, mi Señor y Salvador, por permitirme conocerle y caminar de su mano. Por disponer Todo para mí bien: los éxitos, los fracasos, las maravillosas personas que me rodearon... Por valorar mi esfuerzo cuando no parecía suficiente y permitirme contemplarle en la ciencia y en lo humano.

A mi Madre Santísima por llevarme siempre de su mano.

Al ángel de mi guarda compañero permanente y fiel. A san José, ángeles, santos y santas del cielo por su intercesión.

A los que amorosamente y generosamente donaron de sí:

- Mi familia: papi, mami, hermanita y abuelita, tíos y primas, por su inmenso amor, esfuerzo, comprensión y por acompañarme siempre.
- Profesor Jaime Meneses por la formación, orientación, acompañamiento y comprensión.
- Mi compañera Eliana por su amistad, paciencia y amor.
- Mis amigos, compañeros y demás personas que el Señor dispuso en mi camino.

A la Universidad Industrial de Santander y a los docentes que me formaron como profesional y como persona.

Diana Milena Ariza Castillo

DEDICATORIA

A Dios y a la Reina de los cielos por su inmenso amor, por darle el sentido a mi vida, han sido mi fuerza y fortaleza para superar las dificultades y en especial para culminar este trabajó.

A mi madre María del Carmen Durán quien me enseñó a luchar para alcanzar mis ideales, por su valioso amor, dedicación y ayuda incondicional. Eres una gran mujer, te amo mami.

A mi padre Salomón Vesga quien a pesar de la distancia ha sido un buen padre, por su apoyo durante mi tiempo de estudio, eres un hombre valioso. Te amo papi.

A mis hermanos y familiares por su colaboración y aporte para hacer este sueño una realidad.

A mi novio Jorge Alberto Sánchez quien compartió y estuvo conmigo en los instantes de alegría y dificultad durante mi estudio.

Eliana María Vesga Durán

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por su ayuda incondicional y desinteresada, por corregirme y enseñarme el verdadero sentido del amor, tu eres y serás el guía de mis pasos y la luz en tiempos de oscuridad. Gracias Señor Dios.

Al director de este proyecto, por su valioso aporte, soporte y paciencia durante la realización de este trabajo. En general a todos los profesores que formaron y dirigieron mi aprendizaje.

A mis padres y familiares por su generosidad, ayuda y comprensión durante el proceso de formación.

A mi compañera Diana por su esfuerzo, dedicación y sincera amistad.

A todos mis amigos y compañeros por sus granitos de arena para alcanzar esta meta.

Eliana María Vesga Durán

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR PROYECCIÓN DE FRANJAS	21
1.1 SISTEMA ÓPTICO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS	21
1.1.1 Sistema de proyección	22
1.1.2 Sistema de adquisición	23
1.1.3 Sistema de procesamiento y control	23
1.1.4 Montaje del sistema de proyección de franjas clásico	25
1.2 MÉTODO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS	26
1.2.1 Relación fase - altura: proceso de calibración	29
1.2.1.1 Desplazamiento en Z del plano X-Y	30
1.2.1.2 Cálculo de la fase	32
1.2.1.3 Conversión fase - altura	35
1.2.1.4 Fase absoluta	36
1.2.1.5 Algoritmo de calibración	38
1.2.2 Reconstrucción 3D de objetos	41
2. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECONSTRUCCIÓN 3D	45
2.1 RUIDO PRESENTE EN LA R3D DE OBJETOS	45
2.1.1 Disminución del ruido aleatorio.	48
2.1.2 Influencia de los armónicos en el ruido de las franjas	50
2.1.2.1 Filtrado en las franjas	52
2.1.2.2 Filtrado en la R3D final	54

2.2	INFLUENCIA DEL PASO DE LAS FRANJAS	56
2.3	INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE PROYECCIÓN	59
2.4	INFLUENCIA DEL CONTRASTE DE LAS FRANJAS	62
2.5	RELACIÓN MATEMÁTICA ENTRE EL DETALLE Y LOS PARÁMETROS P_0 Y θ	65
3.	R3D DE LA PIEL HUMANA	66
3.1	CONTRASTE DE LAS FRANJAS EN LA PIEL	66
3.2	R3D DE LA CELULITIS	68
3.3	PRESENCIA DE VELLO Y MANCHAS EN LA PIEL	75
3.4	ESTIMACIÓN DEL ERROR Y LA RESOLUCIÓN DEL SISTEMA DE R3D POR PROYECCIÓN DE FRANJAS	77
4.	CONCLUSIONES	84
5.	RECOMENDACIONES	86
	BIBLIOGRAFÍA	87

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de los componentes de la interfaz gráfica.	24
Tabla 2. Características de los dispositivos que conforman el sistema de proyección de franjas.	26
Tabla 3. Valores de Δz y número de desplazamientos según el paso de las franjas.	31
Tabla 4. Desviación estándar promedio de los escalones para los distintos pasos.	48
Tabla 5. Coeficiente de asimetría para los distintos pasos de franjas.	59
Tabla 6. Coeficiente de asimetría para los distintos ángulos de proyección.	62
Tabla 7. Coeficientes de asimetría para los distintos niveles de gris.	64
Tabla 8. Parámetros para cuantificar la celulitis	75
Tabla 9. Medidas de la escalera con el sistema de R3D	80
Tabla 10. Error de medida del sistema R3D.	80

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema óptico de proyección de franjas clásico.	21
Figura 2. Ventana de la interfaz gráfica para el control de las imágenes.	24
Figura 3. Sistema óptico de proyección de franjas. (a) Montaje clásico (b) Montaje implementado.	25
Figura 4. Franjas proyectadas con $P_0 = 12$ y $NG = 180$. (a) Al plano de referencia, (b) Sobre un objeto	27
Figura 5. Relación fase de las franjas con altura del objeto.	28
Figura 6. Periodicidad de las franjas.	31
Figura 7. Perfil de la fase discontinua.	34
Figura 8. Perfil fase continua en X-Y.	35
Figura 9. Perfil fase continua para puntos de partida distintos.	37
Figura 10. Línea blanca proyectada	37
Figura 11. Matriz de calibración. (a) MA, (b) MB, (c) MC y (d) PXT	39
Figura 12. Franjas proyectadas a la escalera con $\delta_1 = 0$, $P_0 = 8$ y $NG = 180$.	42
Figura 13. Fase continua de la escalera.	43
Figura 14. R3D de la escalera con $P_0 = 8$ y $NG = 180$.	44
Figura 15. Perfil de la escalera para $P_0 = 8$.	44
Figura 16. Perfil del R3D de la escalera para diferentes pasos. (a) $P_0 = 4$, (b) $P_0 = 8$, (c) $P_0 = 12$, (d) $P_0 = 16$.	46
Figura 17. Perfiles de la escalera con y sin promediado para $P_0 = 8$.	49
Figura 18. Transformada de Fourier de las franjas proyectadas al plano X-Y con $P_0 = 16$.	50
Figura 19. Zoom de la imagen rango de la reconstrucción 3D de la escalera.	51

Figura 20. (a) Ventanas para el filtrado, (b) Respuesta impulsional de los filtros. Frecuencia normalizada.	52
Figura 21. Transformada de Fourier de las franjas para $P_0 = 8$. Frecuencia normalizada.	53
Figura 22. Perfil de la R3D de la escalera para las cuatro ventanas con $P_0 = 8$.	54
Figura 23. Transformada de Fourier del R3D de la escalera para $P_0 = 8$. Frecuencia normalizada	55
Figura 24. Perfil de la R3D de la escalera con $P_0 = 8$ para las cuatro ventanas.	55
Figura 25. R3D de la cartulina con textura de rombos con $\theta = 25.21^\circ$ y $NG = 180$. (a) $P_0 = 4$, (b) $P_0 = 24$	57
Figura 26. Coeficiente de asimetría R_{sk} , para diferentes tipos de superficies.	58
Figura 27. Ángulos de proyección del sistema de franjas para $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$.	60
Figura 28. R3D de la cartulina de rombos con $P_0 = 8$ y $NG = 180$. (a) $\theta_1 = 25.21^\circ$, (b) $\theta_2 = 35.95^\circ$, (c) $\theta_3 = 17.75^\circ$.	60
Figura 29. R3D de la cartulina de rombos con $P_0 = 8$ y $\theta = 25.21^\circ$. (a) $NG = 250$, (b) $NG = 50$.	63
Figura 30. Franjas proyectadas a la espalda de una persona de piel blanca con (a) $P_0 = 4$, (b) $P_0 = 8$.	67
Figura 31. Franjas proyectadas a una persona de piel morena con $NG = 255$.	68
Figura 32. (a) Imagen de franjas proyectadas al muslo de la modelo 1 con $P_0 = 8$, (b) Máscara generada para eliminar regiones negras de la (a).	69
Figura 33. R3D de la macro-topografía del muslo de la modelo 1.	70
Figura 34. Fotografía e imagen rango del muslo. (a) Modelo 1, (b) Modelo 2, (c) Modelo 3, (d) Modelo 4.	71
Figura 35. R3D de la celulitis en la región seleccionada con la máscara. (a) Modelo 1, (b) Modelo 2, (c) Modelo 3, (d) Modelo 4.	73
Figura 36. Franjas proyectadas con $P_0 = 8$ a una región de piel con presencia de pelos y manchas.	76
Figura 37. (a) Máscara diseñada para eliminar la mancha y los vellos de la Figura 35, (b) R3D de la Figura 35.	77

Figura 38. R3D de la escalera de papel con $P_0 = 8$ y $NG = 150$.	78
Figura 39. Imagen del montaje con el comparador de carátulas	79
Figura 40. Imagen de la medalla.	82
Figura 41. R3D medalla de futbol para $P_0 = 8$ y $NG = 150$.	82
Figura 42. Imagen rango de la Figura 41.	83

RESUMEN

TÍTULO: EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS DE LA PIEL HUMANA POR MEDIO DEL MÉTODO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS.*

AUTORAS: DIANA MILENA ARIZA CASTILLO, ELIANA MARIA VESGA DURÁN. **

PALABRAS CLAVE: Reconstrucción Tridimensional, Proyección de Franjas, Piel Humana, Celulitis.

En la industria cosmetológica y farmacéutica existen distintos productos y procedimientos terapéuticos para reducir la celulitis o variación en la dermis de la piel producida por la acumulación irregular de tejido adiposo. La valoración de estos procedimientos se hace por inspección visual y fotografías haciéndola subjetiva y poco confiable. Para cuantificar las variaciones topográficas de la piel inducidas por la celulitis se puede emplear uno de los métodos de reconstrucción tridimensional. En particular, el método por proyección de franjas permite ajustar la resolución según sea la aplicación por medio de la selección adecuada de los parámetros del sistema de franjas.

En este trabajo de investigación se implementó un modelo experimental de un sistema de reconstrucción 3D por el método de proyección de franjas compuesto de un video proyector, una cámara CCD y un computador portátil encargado de sincronizar, adquirir y procesar las imágenes a través de algoritmos desarrollados en MATLAB®. El estudio de la influencia de los parámetros del sistema de franjas en la reconstrucción 3D de objetos de dimensiones conocidas y la optimización del sistema para la piel humana, permitió realizar mediciones a la región de los muslos de cuatro modelos con presencia de celulitis para determinar las variaciones topográficas de la piel inducidas por esta.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca

ABSTRACT

TITLE: EXTRACTION CHARACTERISTICS TOPOGRAPHY OF HUMAN SKIN BY THE METHOD OF FRINGE PROJECTION. *

AUTHORS: DIANA MILENA ARIZA CASTILLO, ELIANA MARIA VESGA DURÁN. **

KEY WORDS: Three-dimensional reconstruction, fringe projection, human skin, cellulite.

In pharmaceutical and cosmetic industry there are different products and therapeutic methods for reducing cellulite or variation in dermis of skin caused by irregular accumulation of the adipose tissue. The evaluation of these procedures is performed by visual inspection and pictures making them subjective and unreliable. To quantify the topographic variations induced in skin by the cellulite can be used the methods of three-dimensional reconstruction. Particularly the fringe projection method allows adjust the resolution according to the application through appropriate selection of parameters of the system of fringes.

In this investigation was implemented an experimental model of a 3D reconstruction system by fringes projection method using a video projector, a CCD camera and a laptop computer that acquires and processes images using algorithms developed MATLAB ®. Studies of the parameters influence of the fringes system, the 3D reconstruction of objects of known dimensions and optimizing the system for the human skin, allowed to measure cellulite in thigh region of four models to determine topographical variations of skin.

* Graduate Project

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications School. Director: Dr. Jaime Enrique Meneses Fonseca

INTRODUCCIÓN

Con el transcurso del tiempo y a medida que la medicina avanza, ha dejado de ser ignorado uno de los problemas estéticos más comunes y con mayor incidencia en mujeres que en hombres, la celulitis. En el mundo estético, la celulitis se conoce como la variación topográfica de la dermis de la piel en forma de hoyuelos causada por la acumulación irregular de tejido adiposo. Este problema se presenta generalmente en zonas del cuerpo como glúteos, piernas, abdomen y brazos. En la industria cosmetológica y farmacéutica existen distintos productos y procedimientos terapéuticos para reducirla, los más conocidos son: cremas, inyecciones, masajes, y cirugías. Aunque la mayoría de estos métodos produce buenos resultados, la validación de ellos se hace por medio de inspección visual y fotografías, haciéndola subjetiva y poco confiable. De ahí surge la necesidad de encontrar la forma de cuantificar las variaciones topográficas de la piel para poder evaluar la disminución de la celulitis después aplicar algún método terapéutico.

Actualmente se utilizan sistemas de reconstrucción 3D (R3D) para la medición y estudio de la textura de la piel. Estos sistemas utilizan métodos ópticos como proyección de franjas o triangulación láser, ya que son no invasivos y fáciles de implementar. Los dispositivos de medición 3D que se encuentran en el mercado vienen diseñados para una región determinada de trabajo y con resoluciones fijas limitando sus aplicaciones. Un ejemplo es el PRIMOS que se ha usado en estudios de lesiones de la piel y profundidad de arrugas [1], permite hacer mediciones de contorno, micro-estructura y rugosidad de la superficie de la piel en una zona de de $4 \times 3 \text{ cm}^2$. Sin embargo, no puede emplearse para determinar variaciones de la celulitis ya que según investigaciones realizadas [2] el área de estudio debe estar cercana a los $10 \times 10 \text{ cm}^2$ (en la zona de los muslos).

El método óptico de reconstrucción 3D por proyección de franjas, según la aplicación o el área de trabajo, permite ajustar la resolución que más convenga cambiando los parámetros del sistema. Utilizando este método se puede realizar el estudio de las variaciones topográficas de la piel causadas por la celulitis.

De esta manera, surge el presente trabajo de investigación en el cual se desarrolla el estudio de la influencia de los parámetros que componen el sistema de R3D por proyección de franjas, con el fin de obtener la configuración adecuada para un modelo experimental, que sea capaz de resolver variaciones topográficas de la piel inducidas por la celulitis.

En el capítulo 1 de este documento, en base a la teoría de la proyección de franjas se describe el montaje del sistema y desarrollo de los algoritmos que permiten realizar la proyección, captura y procesamiento de las imágenes para obtener la reconstrucción 3D de objetos. En el capítulo 2 se estudia la influencia de los parámetros en la resolución del sistema. Posteriormente, el capítulo 3 contiene la adaptación del sistema para reconstruir la piel humana y disminuir los errores causados por las características propias de la piel como color, vellos y manchas. Luego se realizan las R3D de la celulitis para cuatro modelos junto con las mediciones de la topografía. Se determina el error de medida y se estima la resolución del sistema con la reconstrucción de objetos de dimensiones conocidas. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo realizado a partir de los resultados obtenidos.

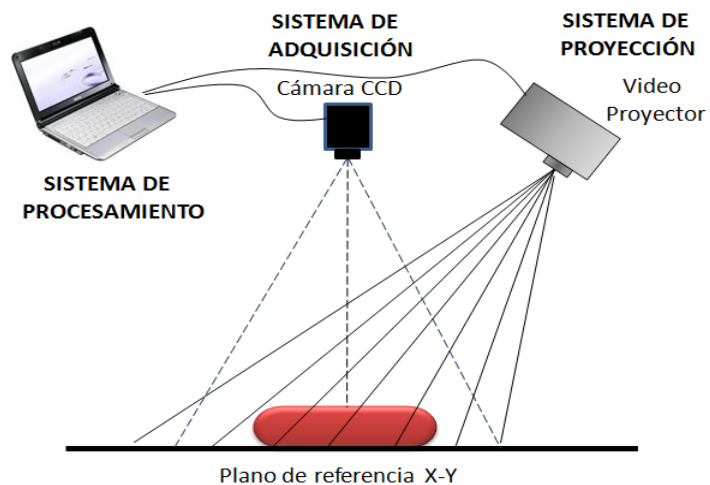
1. RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL POR PROYECCIÓN DE FRANJAS

El método de proyección de franjas como su nombre lo indica, consiste en proyectar franjas blancas y negras paralelas sobre la superficie de un objeto. La información de altura del objeto está codificada en la deformación que sufren las franjas por la topografía del cuerpo. Esta deformación se obtiene en términos de la fase de las franjas.

En este capítulo se da una breve descripción del montaje y los elementos que componen el sistema de R3D por proyección de franjas. Luego se desarrolla la teoría de la obtención de la fase y el proceso de calibración experimental del cual se obtiene la relación entre fase de las franjas y la altura del objeto. Finalmente se utiliza esta relación para la reconstrucción 3D.

1.1 SISTEMA ÓPTICO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS

Figura 1. Sistema óptico de proyección de franjas clásico.



Fuente: Autoras

Como se muestra en la Figura 1, el sistema de proyección de franjas clásico está compuesto por: sistema de proyección, sistema de adquisición y sistema de procesamiento.

1.1.1 Sistema de Proyección

Existen diferentes técnicas para proyectar franjas sobre la superficie de un cuerpo. Algunos métodos utilizan principios ópticos como por ejemplo proyección por red de difracción, efecto Talbot, interferometría monocromática. El sistema de la Figura 1 consta simplemente de un dispositivo proyector de pantalla de cristal líquido o LCD (*Liquid Crystal Display*), el cual está interfazado con la tarjeta gráfica del computador. Por medio de la opción de doble pantalla del computador, siendo el monitor 1 la pantalla del computador y el monitor 2 el video proyector, el computador genera la imagen de franjas en el monitor 2 y el video proyector las proyecta sobre la superficie del objeto.

El computador genera las franjas en una matriz de 800x600 pixeles con valores de 0 para las franjas negras y de 1 para las franjas blancas. Para poder variar el contraste de las franjas (sección 2.4), se varía el valor de la franjas blancas entre 0 y 1 que corresponde a rango de nivel de gris (NG) entre 0 y 255.

La separación entre el comienzo de dos franjas negras consecutivas, se llama Paso de las Franjas, P_0 . Cuyo valor $P_0 = 4, 8, 12, \dots, m$, donde m es un múltiplo de 4, indica la cantidad de pixeles de la matriz del video proyector que corresponden a esta separación. Por ejemplo, para $P_0 = 4$ se pinta una franja blanca y una franja negra cada una de un ancho de 2 pixeles, las cuales se repiten periódicamente hasta completar las dimensiones de la matriz

1.1.2 Sistema de Adquisición

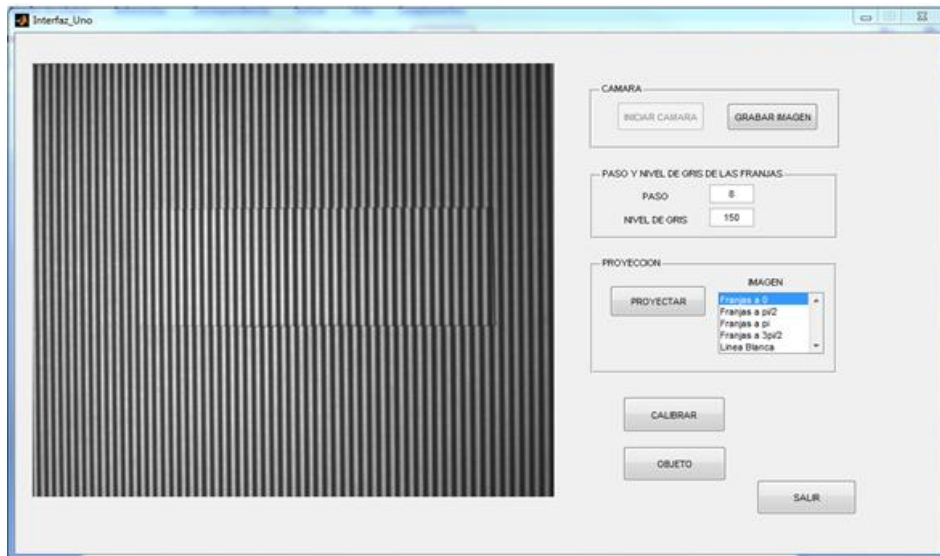
Este sistema consta de una cámara CCD (*Charge-Coupled Device*) que captura la imagen o imágenes de las franjas proyectadas sobre el objeto. La cámara CCD está formada por una matriz de $m \times n$ mircrosensores sensibles a la radiación luminosa. Cada uno genera un valor de tensión que es discretizado y forma un pixel de la imagen final. Frente a la matriz fotosensible, se ubica un objetivo o lente que forma la imagen del objeto sobre el plano que contiene la matriz.

1.1.3 Sistema de Procesamiento y Control

El computador sincroniza la proyección y almacena las imágenes capturadas por la cámara CCD. Luego, por medio de algoritmos implementados en un software específico, se realiza el procesamiento de las imágenes para recuperar la información 3D del objeto.

La proyección y captura de las imágenes se realizó con una interfaz gráfica en Matlab® que controla la cámara y genera las imágenes proyectadas. En la Figura 2 se muestra la ventana de la interfaz gráfica y en la Tabla 1 una breve descripción de la función de cada componente.

Figura 2. Ventana de la interfaz gráfica para el control de las imágenes.



Fuente: Autoras

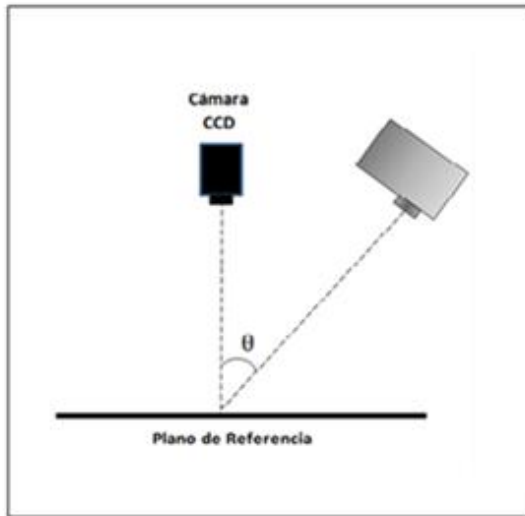
Tabla 1. Descripción de los componentes de la interfaz gráfica.

COMPONENTE	FUNCIÓN
Botón Inicializar Cámara	Da la orden a la cámara de comenzar la visualización.
Ventana de visualización	Permite al usuario de la interfaz ver lo que la cámara CCD esta visualizando.
Botón Grabar Imagen	Llama la ventana de guardar archivos de Windows para salvar la imagen visualizada en el momento.
Editores de Paso y Nivel de las Franjas	Es donde se ingresan los valores del paso y el nivel de gris con el que se desea proyectar las franjas.
Barra de selección de Imagen	En esta barra se selecciona el tipo de imagen que se desea proyectar: por ejemplo, franja a $\pi/2$ indica que es una imagen de franjas desplazada $\pi/2$ radianes. Línea Blanca como su nombre lo indica es una imagen de fondo negro con una línea blanca en el centro.
Botón Proyectar	Crea una ventana de Matlab® en el monitor 2 que contiene la imagen generada según la opción de la barra de selección de Imagen y los valores ingresados del paso y nivel de gris de las franjas.
Botón Calibrar	Despliega una ventana donde se ingresa el número y el nombre de imágenes, luego proyecta las imágenes de forma adecuada para el proceso de calibración y las almacena automáticamente.
Botón Objeto	Despliega una ventana donde se ingresa el nombre de las imágenes, proyecta y guarda automáticamente las imágenes adecuadas para la reconstrucción del objeto.

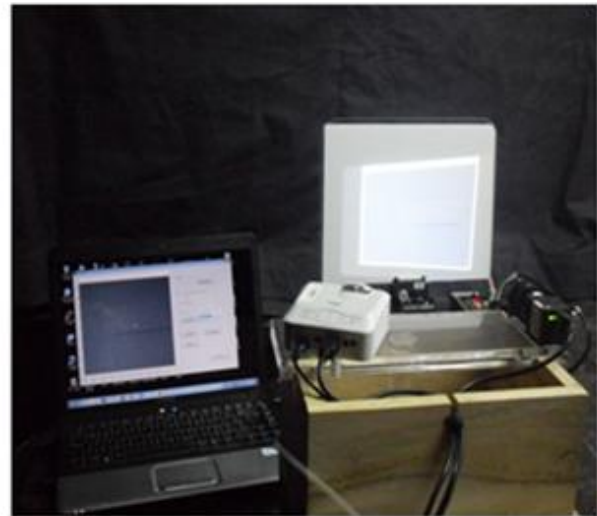
1.1.4 Montaje del Sistema de Proyección de Franjas Clásico

Tradicionalmente la cámara CCD está situada perpendicularmente al plano X-Y donde se ubicará el objeto, llamado plano de referencia. El eje óptico del video proyector se ubica formando un ángulo θ con el eje óptico de la cámara CCD, como se muestra en la Figura 3 (a). A este ángulo se le denomina ángulo de proyección. El montaje implementado para este trabajo de investigación se muestra en la Figura 3 (b).

Figura 3. Sistema óptico de proyección de franjas. (a) Montaje clásico (b) Montaje implementado.



(a)



(b)

Fuente: Autoras.

En la siguiente tabla se encuentran las características de los dispositivos que conforman el sistema de proyección de franjas.

Tabla 2. Características de los dispositivos que conforman el sistema de proyección de franjas.

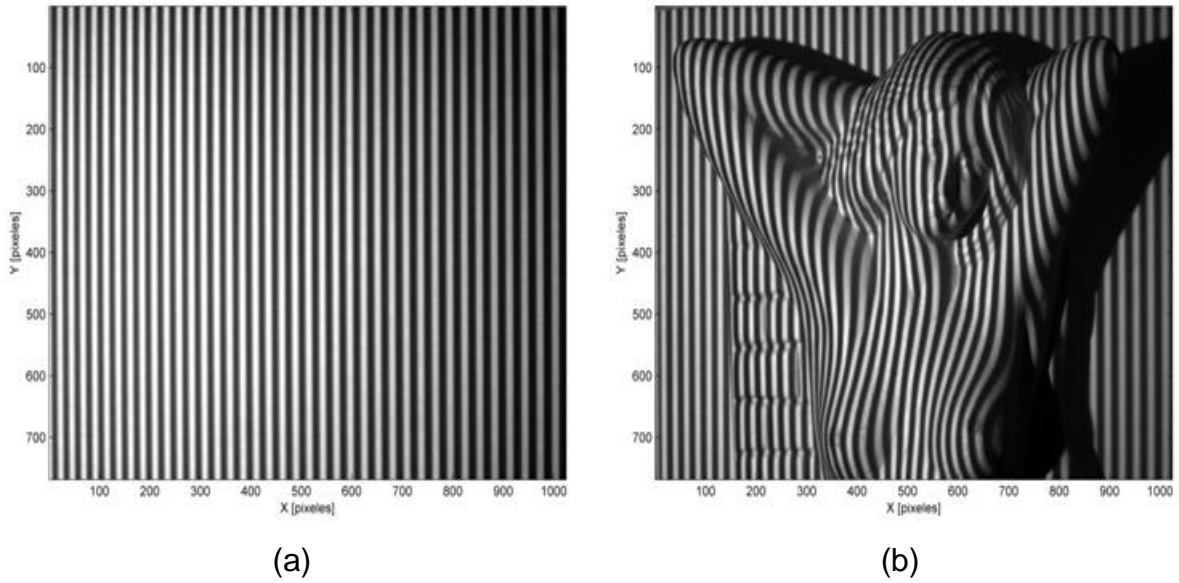
Cámara CCD	EO USB 2.0 CCD Machine Vision Camera Modelo EO-0813M 1/3" Tipo de sensor Sony ICX204 Pixeles 1024 x 768 (H x V) Tamaño del Pixel 4.65 x 4.65 H x V (μm) 30 frames por segundo (fps) Lente Japan AVENIR CCTV 12mm 1/2".
Video Proyector	Aigo Discovery Box PT 6216 2GB 100 Lumens Resolución 800x600 (SVGA)/ Contraste 200:01:00 Dimensión Proyectiva: 15" hasta 130" Formato de Imagen: JGP, BMP, GIF.
Computador	Notebook Compaq Presario CQ40-705LA Procesador Intel Celeron T4300 a 2.1GHz 2 GB de Memoria Disco duro 320 GB Sistema operativo Genuine Windows 7 Home Basic

Fuente: [3], [4]

1.2 MÉTODO DE PROYECCIÓN DE FRANJAS

Debido a que el método de proyección de franjas utiliza imágenes de naturaleza bidimensional (coordenadas X-Y), es necesario buscar una variable óptica que dependa de la altura (coordenada Z) para hacer la reconstrucción 3D del objeto. En la Figura 4 se muestran dos imágenes con franjas proyectadas: (a) al plano de referencia X-Y y (b) sobre un objeto. En la primera las franjas son paralelas entre si y de separación uniforme, mientras en la segunda las franjas se deforman por la topografía del objeto haciendo que se distorsionen en X. De esta manera, la topografía del cuerpo se codifica en la distorsión de las franjas, manifestada en alteraciones locales del paso y orientación de ellas.

Figura 4. Franjas Proyectadas con $P_0 = 12$ y $NG = 180$. (a) Al plano de referencia, (b) Sobre un objeto



Fuente: Autoras

Asumiendo que las franjas son sinusoidales, la distribución de la intensidad del sistema de franjas deformadas por la topografía del cuerpo y adquirido por la cámara CCD está dada por:

$$I(x,y) = I_0(x,y) + A(x,y)\cos(2\pi f_0 X + \phi_0 + \Delta\phi) \quad (1)$$

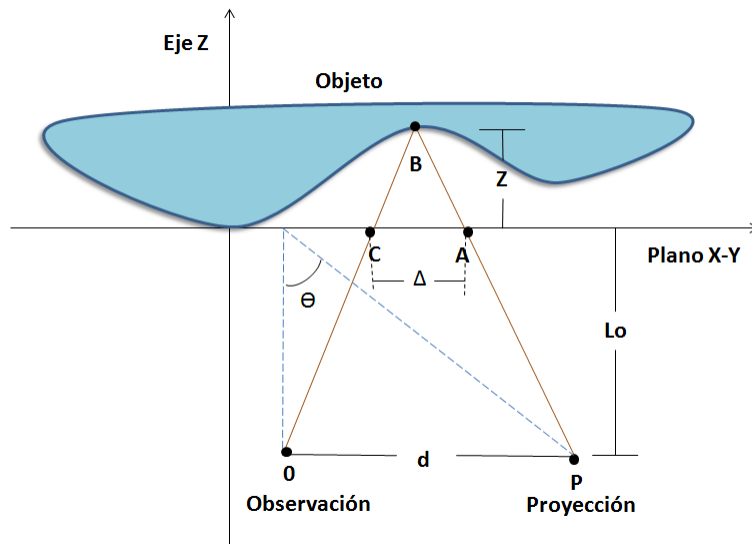
Donde I_0 es la intensidad base o fondo continuo, A es el contraste del sistema de franjas, f_0 es la frecuencia espacial promedio de las franjas, ϕ_0 es la fase que define la deformación inicial de las franjas y $\Delta\phi$ es la fase introducida exclusivamente por la topografía del cuerpo. $\Delta\phi$ es una variable del sistema de franjas que depende de la altura del objeto y de los parámetros del sistema como θ y f_0 . La ecuación (1) se puede escribir como

$$I = I_0 + A\cos(\phi) \quad (2)$$

Siendo ϕ la fase del sistema de franjas.

La relación entre la fase de las franjas y la coordenada Z del objeto [5] se muestra en la Figura 5. El punto P que corresponde a la pupila de salida del sistema de proyección, proyecta las franjas sobre el plano de referencia X-Y. Sobre el punto A incide una franja con fase inicial ϕ_A , al ubicar el objeto esta franja incide sobre la superficie en el punto B. Como el sistema es no telecéntrico, la pupila del sistema de observación, punto O, ve la franja sobre el objeto en el punto C.

Figura 5. Relación fase de las franjas con altura del objeto.



Fuente: Autoras

Es decir, las franjas proyectadas por el punto P tienen una fase inicial ϕ_A pero debido a la topografía del cuerpo esta fase se desplaza en el eje X al punto C, es decir

$$\Delta\phi = \phi_A - \phi_C \quad (3)$$

Por relación de triángulos de la Figura 5 se tiene:

$$\Delta = \frac{Z * d}{Z - L_0} \quad (4)$$

Para un corrimiento $\Delta = P_0$, la variación de la fase $\Delta\phi = 2\pi$ [rad]. Así para cualquier Δ corresponde un $\Delta\phi$:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta}{P_0} \quad (5)$$

Reemplazando (4) en (5) se tiene que

$$\Delta\phi = \frac{2\pi * Z * d}{P_0(Z - L_0)} \quad (6)$$

Donde $d/L_0 = \tan(\theta)$.

1.2.1 Relación Fase - Altura: Proceso de Calibración

El desarrollo matemático realizado anteriormente permite calcular $\Delta\phi$. De esta forma, conociendo $\Delta\phi$ y los parámetros del sistema (P_0 y θ), se puede obtener Z a partir de la ecuación (6). El problema de utilizar la ecuación (6) radica en la dificultad experimental para medir P_0 y θ . Tradicionalmente en la literatura especializada [6] se suele realizar un proceso de calibración experimental para reemplazar esta ecuación por una polinomial que asocie $\Delta\phi$ con Z a través de coeficientes obtenidos por mínimos cuadrados.

El proceso de calibración experimental consiste en proyectar franjas al plano de referencia, desplazarlo en Z cierto número de veces a intervalos regulares ΔZ y para cada posición de Z capturar las imágenes de franjas con las cuales se

obtiene la fase correspondiente. De esta forma, para cada pixel de la imagen se tienen valores de $\Delta\phi$ y Z en el rango Z calibrado. Estos datos son sintetizados en un polinomio de orden 2 o 3 dependiendo de la resolución deseada.

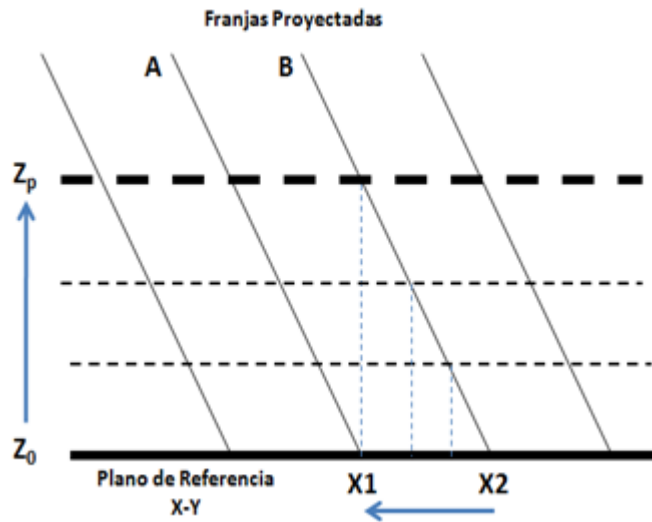
Finalmente esta información se almacena para ser utilizada en el proceso de reconstrucción 3D. El algoritmo que desarrolla el proceso de calibración se llamó Algoritmo de Calibración.

1.2.1.1 Desplazamiento en Z del Plano X-Y

Para establecer los desplazamientos ΔZ del plano de referencia X-Y se debe tener en cuenta que las franjas se repiten periódicamente con período 2π , al desplazar el plano de referencia en dirección de Z . Como se muestra en la Figura 6, inicialmente con el plano de referencia X-Y en Z_0 , la franja A se encuentra en la posición $X1$ y la franja B en $X2$, a medida que el plano de referencia se va acercando a la posición Z_p , la franja B se va desplazando de $X2$ a $X1$. Cuando el plano de referencia llega a Z_p la franja B tendrá la posición $X1$ que era la posición inicial de la franja A, es decir, que para Z_p cada franja del sistema toma la posición de la franja anterior a ella. Esto genera un inconveniente pues para Z_0 y Z_p la fase tendría la misma distribución, a pesar de tener valores diferentes de Z . Por lo tanto, se deben realizar desplazamientos ΔZ con valores inferiores a Z_p . De esta forma se escogió un valor tres veces menor.

$$\Delta Z = \frac{Z_p}{3} \quad (7)$$

Figura 6. Periodicidad de las franjas.



Fuente: Autoras

Como el ΔZ depende del paso de las franjas y dado que las variaciones topográficas de la piel debidas a la celulitis no superan los 2cm [2], al realizar la prueba para calcular ΔZ se obtuvo los siguientes resultados:

Tabla 3. Valores de ΔZ y número de desplazamientos según el paso de las franjas.

Paso de las franjas [píxeles]	Desplazamiento ΔZ [mm]	Recorrido total en Z [cm]	Número de desplazamientos ($Nl=Z/ \Delta Z$)
4	0.5	1.9	39
8	1	2.4	25
12	1	2.4	25
16	1	2.4	25

1.2.1.2 Cálculo de la Fase

Para recuperar la fase de un sistema de franjas existen varias técnicas. Las más usadas son el método de la Transformada de Fourier (TF) [7] y el de Corrimiento de Fase (*Phase Shifting*) [8]. En este proyecto, para el cálculo de la fase se implementó el método de corrimiento de fase ya que a diferencia del método de TF es independiente de la información de pixeles vecinos.

Para obtener la fase ϕ de la ecuación (2) se requiere conocer también los valores de I_0 y A , es decir, que se necesitan tres datos de intensidad linealmente independientes. Con el método de corrimiento de fase se obtienen estas tres incógnitas de forma experimental a partir de n imágenes de franjas, a las cuales se les introducen desplazamientos δ_i en un intervalo de 0 a 2π [8] como se muestra en la ecuación (9).

$$\delta_i = \left(\frac{2\pi}{n}\right)(i - 1) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) + A(x, y) \cos(\phi(x, y) + \delta_i) \quad (9)$$

Utilizando las propiedades ortogonales de las funciones sinusoidales se demuestra que:

$$\sum_{i=1}^n I_i \cos(\delta_i) = \frac{nA}{2} \cos(\phi) \quad (10.1)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i \sin(\delta_i) = \frac{nA}{2} \sin(\phi) \quad (10.2)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i = nI_0 \quad (10.3)$$

De donde se obtiene:

$$\tan(\phi) = \frac{\sum_{i=1}^n I_i \sin(\delta_i)}{\sum_{i=1}^n I_i \cos(\delta_i)} \quad (11.1)$$

$$\frac{nA}{2} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n I_i \sin(\delta_i)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n I_i \cos(\delta_i)\right)^2} \quad (11.2)$$

De las ecuaciones (11.1) y (11.2) se obtienen ϕ y A . Tomando $n = 4$ lo cual implica un desplazamiento de $\pi/2$ [rad]:

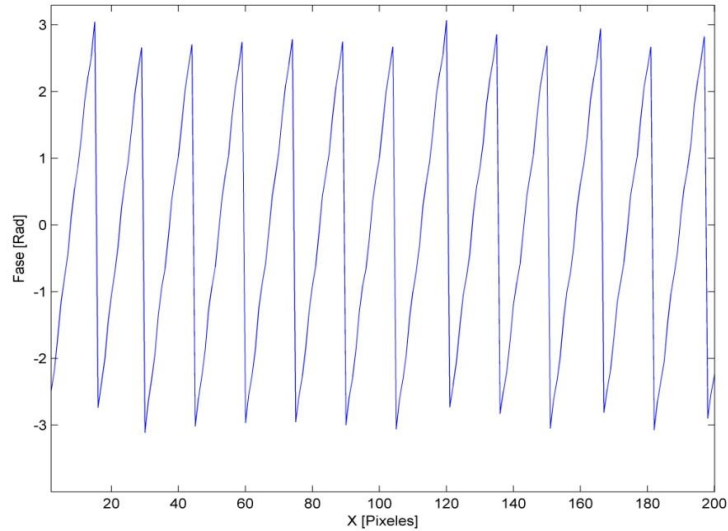
$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} \quad (12.1)$$

$$2A(x,y) = \sqrt{(I_4 - I_2)^2 + (I_3 - I_1)^2} \quad (12.2)$$

Siendo I_1 la primer imagen con $\delta_1 = 0$ [rad], I_2 la segunda imagen con $\delta_2 = \pi/2$ [rad], I_3 la tercera imagen con $\delta_3 = \pi$ [rad], y finalmente I_4 la última imagen con $\delta_4 = 3\pi/2$ [rad], cuyos valores corresponden a desplazamientos en las franjas de $0, P_0/4, P_0/2, 3P_0/4$ respectivamente. Estas 4 imágenes se capturan para cada posición de Z .

Aplicando la ecuación (12.1) en el algoritmo de calibración para franjas proyectadas a un objeto con $P_0 = 8$ y $NG = 180$, un zoom al perfil de la fase para el plano de referencia ubicado en Z_0 se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Perfil de la fase discontinua.



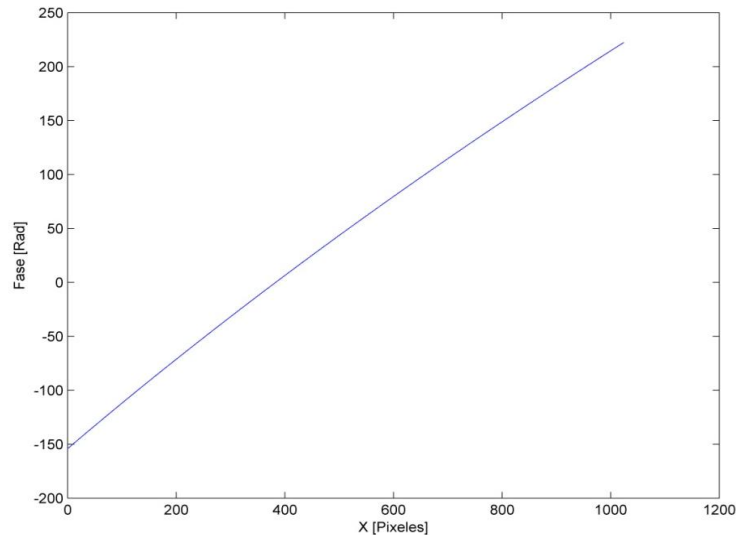
Fuente: Autoras

El perfil de la fase se esperaría que fuese continua ya que el argumento de la función coseno de la ecuación (1) es lineal, pero el perfil de la fase obtenido no lo es, esto es porque la función arcotangente esta acotada entre $-\pi$ y π [rad].

Entonces, para obtener una fase continua se emplea el método de desenvolvimiento de fase (*Unwrapping*) [10], en el cual se detectan las discontinuidades haciendo una resta entre vecinos. Cuando la resta da un valor cercano a 2π , significa que en ese punto se encuentra una discontinuidad, luego a estos puntos discontinuos se suma o se resta $2\pi N$, donde N es un número entero, obteniéndose así la fase continua. La búsqueda de discontinuidades y la corrección a fase continua, se realiza a partir de un punto de partida, para el cual se seleccionó el punto central de la imagen (X_0, Y_0). El algoritmo que desarrolla este método se llamó algoritmo de corrección de fase, el cual corrige la fase en el plano X-Y para sólo una posición Z del plano de referencia.

En la Figura 8, se muestra el perfil de la fase continua que se obtuvo al implementar el algoritmo de corrección de fase a la fase discontinua de la Figura 7.

Figura 8. Perfil fase continua en X-Y.



Fuente: Autoras

Ahora la fase es continua en X-Y pero en Z vuelve a quedar discontinua debido a que las franjas tienen periodicidad en Z. El proceso de corrección de la fase en Z, se realiza usando el método de desenvolvimiento de fase en dirección del eje Z usando como punto de partida la posición inicial $Z=0$.

1.2.1.3 Conversión Fase - Altura

Si las franjas proyectadas fueran paralelas unas con otras como en el caso de sistemas telecéntricos (Figura 6), la relación entre la fase y la altura sería lineal debido a que al aumentar la posición Z del plano X-Y aumenta también $\Delta\phi$. Pero como el sistema de proyección de franjas es no telecéntrico, las franjas se

proyectan en forma de ramillete (Figura 1), lo cual hace que no sean paralelas, y por tanto la relación sea no lineal.

Una primera corrección a la relación lineal consiste en adicionar un término cuadrático, obteniéndose una ecuación de calibración dada por:

$$\Delta\phi = \phi_z - \phi_o = a(x,y)Z^2 + b(x,y)Z + c(x,y) \quad (13)$$

Donde ϕ_z es la fase para cada posición Z , ϕ_o es la fase para la posición de referencia Z_o , $a(x,y)$, $b(x,y)$ y $c(x,y)$ son los coeficientes del polinomio de la ecuación (13) que se hayan haciendo un ajuste por mínimos cuadrados de la fase en cada punto (X,Y) para un Z específico. Entonces, conociendo el desplazamiento de fase $\Delta\phi$ de un punto del objeto se puede conocer su respectiva altura Z por medio de la ecuación (13).

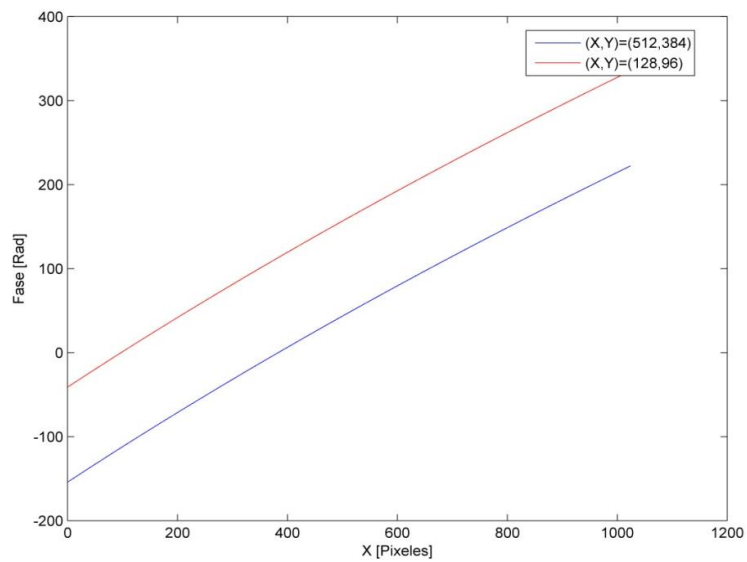
1.2.1.4 Fase Absoluta

La fase discontinua corregida en la sección 1.2.1.2 y que posteriormente se utiliza en la ecuación (13) para hallar los coeficientes, es relativa, debido a que en la corrección no importa el punto que se tome como punto de partida siempre la fase será creciente continua. Esto se puede ver en la Figura 9, donde la línea roja pertenece al perfil de la fase utilizando como punto de partida el punto central de la imagen y la línea azul es el perfil de la fase para uno distinto. Entonces, para los dos casos la fase es continua pero dependiendo del punto de partida, la recta estará arriba o abajo en un valor exacto de $2\pi N$.

Por esta razón, además de proyectar las 4 imágenes de franjas desplazadas para cada ΔZ , utilizando triangulación láser se proyecta una línea blanca, Figura 10, de la cual se obtienen los valores de Z para cada ΔZ en el rango de calibración. A partir de esto, en el algoritmo de R3D de la sección 1.2.2 se halla el factor de

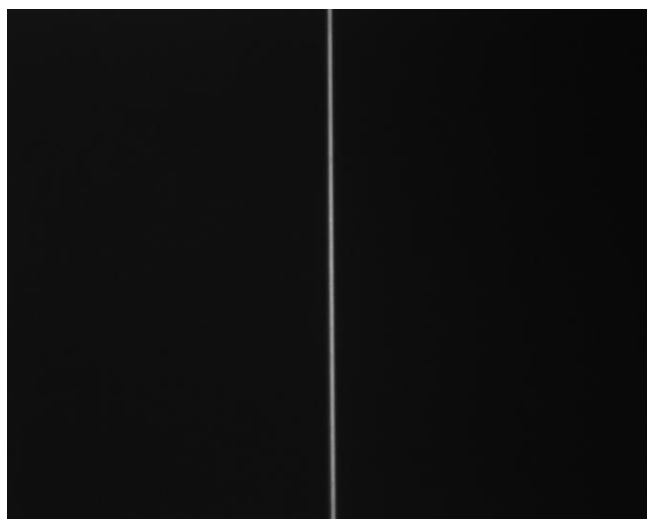
corrección $2\pi N$ el cual se resta a la fase relativa para obtener la fase absoluta que es la fase real en un Z específico.

Figura 9. Perfil fase continua para puntos de partida distintos.



Fuente: Autoras

Figura 10. Línea blanca proyectada



Fuente: Autoras

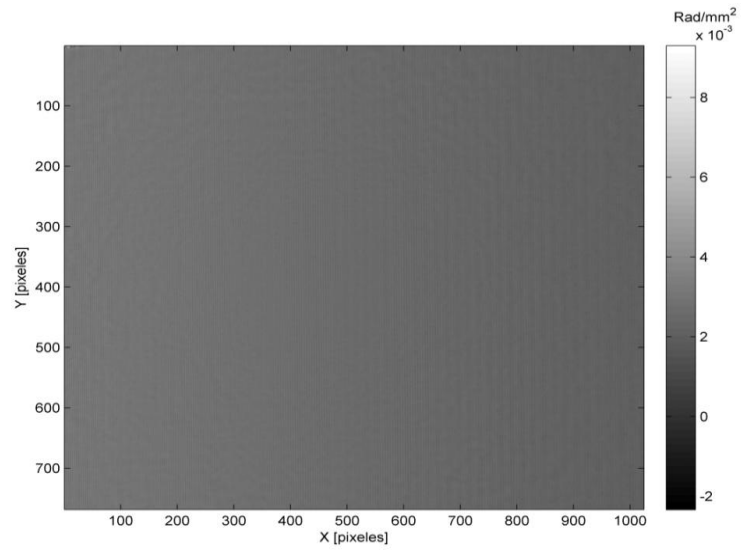
1.2.1.5 Algoritmo de Calibración

El proceso de calibración experimental que asocia $\Delta\phi$ con Z, consiste en variar la posición en Z del plano de referencia X-Y cada ΔZ (sección 1.1.1.1) y NI veces según sea el paso de las franjas y la región de trabajo (ver Tabla 2), proyectar las cuatro imágenes de franjas desplazadas y la imagen de la línea blanca para cada posición de Z. Estas imágenes se almacenan para posteriormente ser procesadas por medio del Algoritmo de Calibración desarrollado en Matlab®.

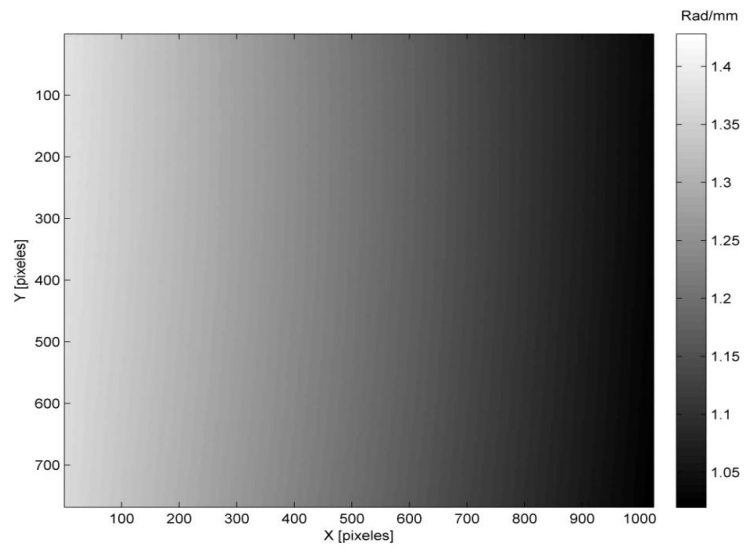
El Algoritmo de Calibración consiste en leer las 4 imágenes de franjas desplazadas para calcular la fase en cada posición Z, ϕ_z (sección 1.1.2.1). Seguidamente, calcular el diferencial de fase $\Delta\phi$ haciendo la resta entre la fase ϕ_z y la fase del punto de referencia ϕ_0 . Luego, a partir de NI se obtiene un vector ZP que contiene las posiciones Z a la que corresponde cada desplazamiento.

Con la fase calculada para cada punto (X,Y) y con el vector ZP por medio de un ajuste por mínimos cuadrados se obtienen los coeficientes del polinomio cuadrado de la ecuación (13) (sección 1.2.1.3), los cuales se almacenan en matrices separadas MA, MB y MC. Finalmente se leen las imágenes de la línea blanca proyectadas a cada ΔZ (sección 1.2.1.3) y a cada línea se le asigna el valor Z correspondiente a partir de los valores del vector ZP. Se almacenan estas líneas en una matriz llamada PXT. En las Figura 11, se muestran las matrices de calibración.

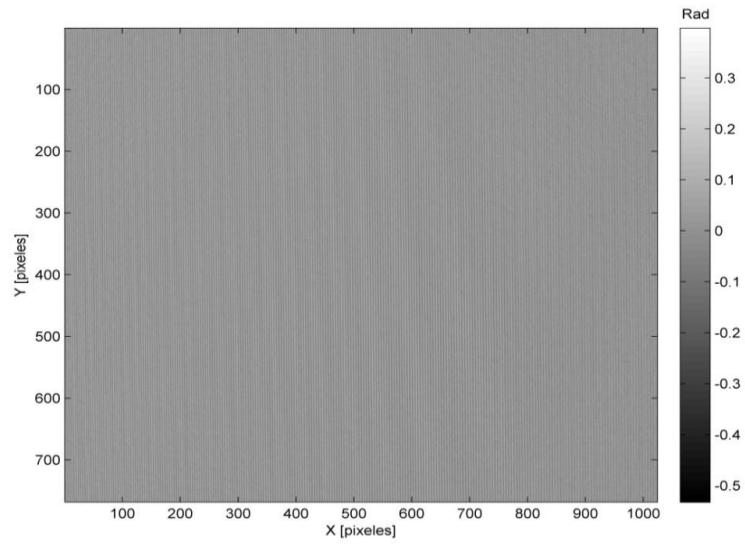
Figura 11. Matriz de Calibración. (a) MA, (b) MB, (c) MC y (d) PXT



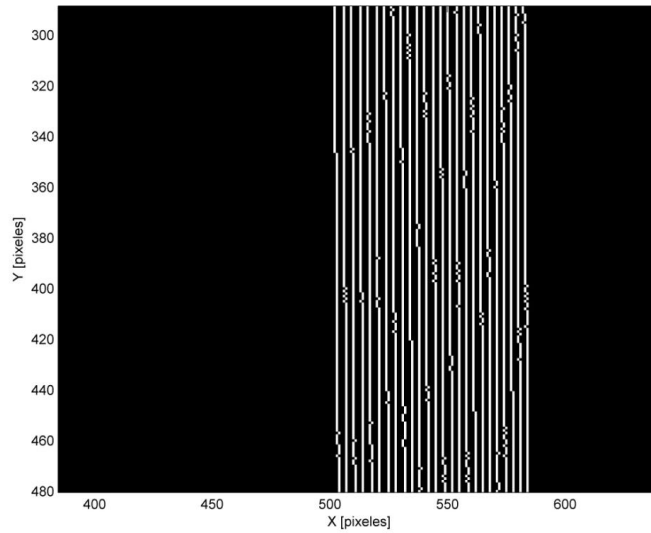
(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: Autoras.

Finalmente, las matrices MA, MB, MC, PXT, y la de la fase para el punto de referencia Phase0, se guardan para luego ser utilizadas en el algoritmo de R3D que se desarrolla en la siguiente sección.

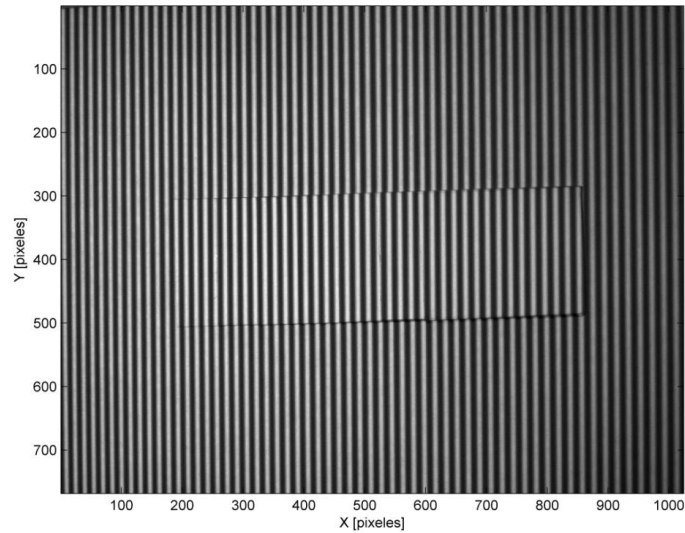
1.2.2 Reconstrucción 3D de Objetos

Para el desarrollo del proceso de R3D, se utiliza un objeto construido con siete láminas de papel adhesivo superpuestas de aproximadamente 100µm de espesor, de manera que formen una escalera.

El proceso de reconstrucción 3D se realiza del siguiente modo: primero, se ubica la escalera de forma que por lo menos un punto del objeto coincida con un punto de la matriz PXT, esto para garantizar que el objeto se encuentra en la zona de calibración. Luego se proyectan las 4 imágenes de franjas desplazadas y la imagen de la línea blanca, se almacenan y finalmente se procesan por medio del algoritmo de R3D desarrollado en Matlab®. Este algoritmo es similar al de calibración, ya que en él se aplican las secciones 1.2.1.2 y 1.2.1.3.

En el algoritmo de R3D se leen las imágenes de franjas desplazadas de la escalera Figura 12. Cuando el objeto que se quiere reconstruir debido a su topografía presenta sombras en las imágenes, se puede generar errores en la fase porque en estas regiones se pierde la información de franjas. Por tal razón, se debe generar una máscara de validación que asigne 0 a los valores de la sombra y 1 a las zonas útiles del objeto. Sin embargo, en las imágenes de la escalera no se presentaron sombras que generaran error en la fase, por esto no fue necesario usar máscara.

Figura 12. Franjas proyectadas a la escalera con $\delta_1 = 0$, $P_0 = 8$ y $NG = 180$.

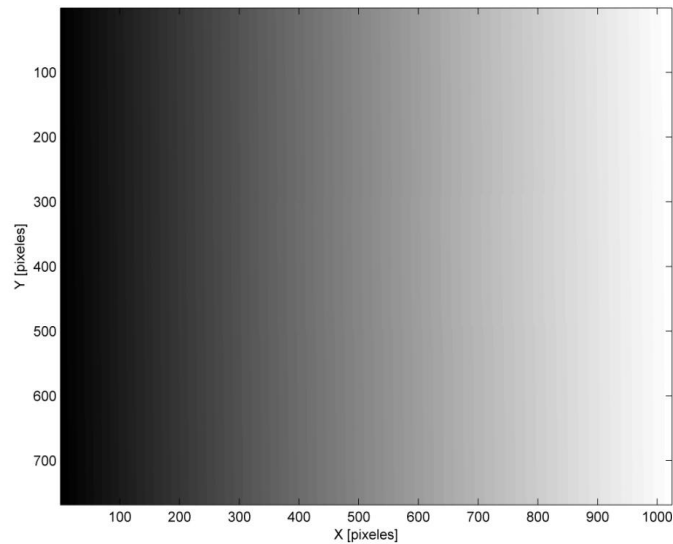


Fuente: Autoras.

En el proceso de calibración para obtener la fase continua se utilizó el método de corrección de fase clásico, en cambio en el R3D se utiliza el método de corrección de fase de la primera derivada el cual es más robusto que el anterior, porque tiene en cuenta el ruido que se puede presentar en la fase debido a sombras o a manchas del objeto que hayan quedado en las imágenes a pesar de la máscara. La fase continua se muestra en la Figura 13.

Posteriormente se cargan los parámetros obtenidos en la calibración MA, MB, MC, PXT y Phase0, se calcula el $\Delta\phi$ haciendo la resta entre la fase continua obtenida (con el método de la primera derivada) y Phase0; a este $\Delta\phi$ se le llamó PhaseC. Luego se lee la imagen de la línea blanca en donde se detecta la posición de cada punto que pertenece a esta línea, esto para obtener el valor de Z de la matriz PXT y el valor de los coeficientes MA, MB y MC, correspondientes a estas posiciones.

Figura 13. Fase continua de la escalera.

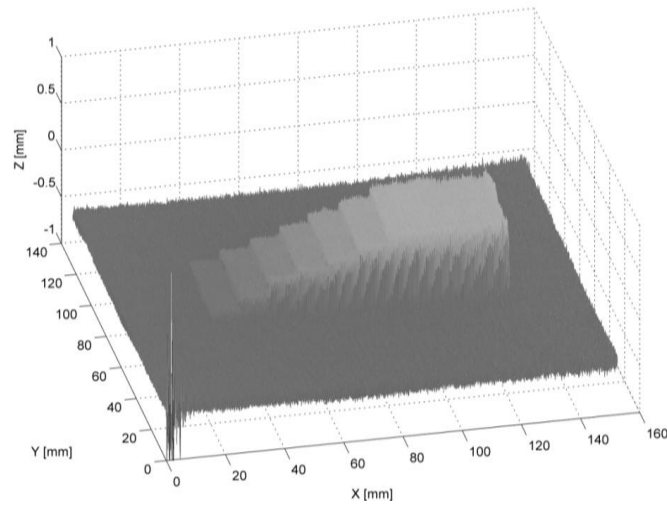


Fuente: Autoras

Teniendo Z y los coeficientes a , b , c , se calcula de la ecuación (13) el $\Delta\phi$ real, al cual se llamó PhaseA. La diferencia entre PhaseC y PhaseA es igual al factor de corrección $2\pi N$ y la fase absoluta se calcula restándole $2\pi N$ a PhaseC (sección 1.2.1.4).

Entonces, los valores de Z se obtienen a partir la fase absoluta hallada y los coeficientes a , b , c , despejando la ecuación (13). Finalmente, con el Z obtenido se hace la reconstrucción 3D de la escalera. La R3D resultante en X-Y está en pixeles mientras que en Z está en mm. Para convertir pixeles a milímetros se emplea una cuadrícula milimetrada ubicada en el plano de referencia, de esta manera se obtiene el factor de conversión en X de $102/685$ [mm/pixeles] y en Y de $30/184$ [mm/pixeles]. En la Figura 14 se muestra la R3D de la escalera con X-Y-Z en milímetros.

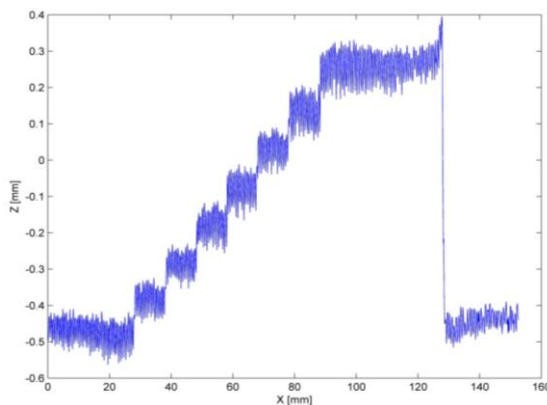
Figura 14. R3D de la escalera con $P_0 = 8$ y $NG = 180$.



Fuente: Autoras

En la Figura 15, se muestra el perfil del R3D de la escalera, allí se puede ver la presencia de ruido en cada escalón lo que puede generar errores en las medidas. Para reducir el error, en el capítulo siguiente se realiza la optimización de la reconstrucción 3D estudiando la variación de los parámetros del sistema de reconstrucción e implementando mejoras al algoritmo de R3D.

Figura 15. Perfil de la escalera para $P_0 = 8$.



Fuente: Autoras

2. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE RECONSTRUCCIÓN 3D

En este capítulo se desarrolla el estudio a la influencia de los parámetros del sistema de franjas sobre la R3D obtenida en el proceso anteriormente expuesto. Esto con el fin de seleccionar apropiadamente los parámetros, para obtener una configuración del sistema que sea capaz de detectar las variaciones topográficas de la piel debidas a la celulitis.

Los parámetros independientes del sistema son: paso de las franjas, ángulo de proyección y contraste de las franjas. Para analizar la influencia de cada parámetro en la resolución del sistema, se varía uno de ellos mientras los otros dos se mantienen constantes. A diferencia del paso de las franjas y el ángulo de proyección cuya variación se hace directa, la influencia del contraste de las franjas se determina a partir de la variación de la intensidad luminosa del video proyector o nivel de gris de las franjas en un rango de $NG = 0$ a 255.

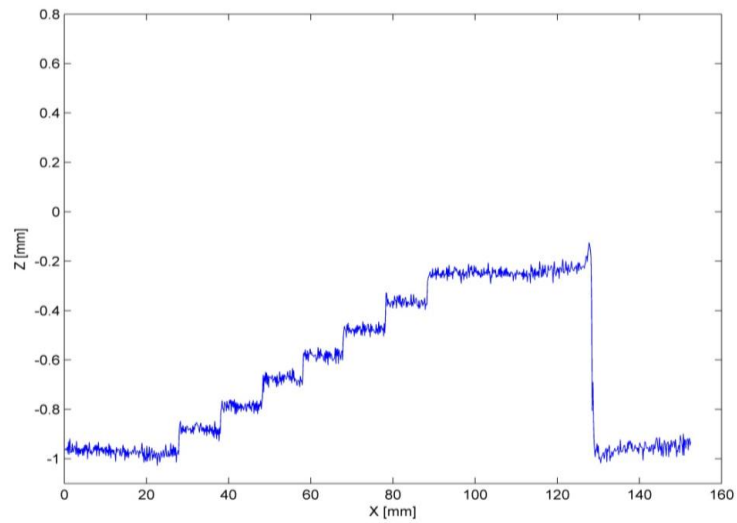
El capítulo comienza haciendo la reconstrucción 3D de un objeto para distinto paso de las franjas. Allí se hizo visible la presencia de ruido lo que llevó a que se incluyera una etapa de filtrado. Seguidamente, para el análisis de las variaciones de los parámetros se tomó como factor de comparación el detalle que el sistema era capaz de resolver a medida que se variaba cada parámetro, para esto se utilizó un objeto con topografía pequeña de $60\mu\text{m} \pm 10\mu\text{m}$. Primero se estudió la influencia del paso de las franjas, luego la influencia del ángulo de proyección y finalmente la influencia del contraste de las franjas.

2.1 RUIDO PRESENTE EN LA R3D DE OBJETOS

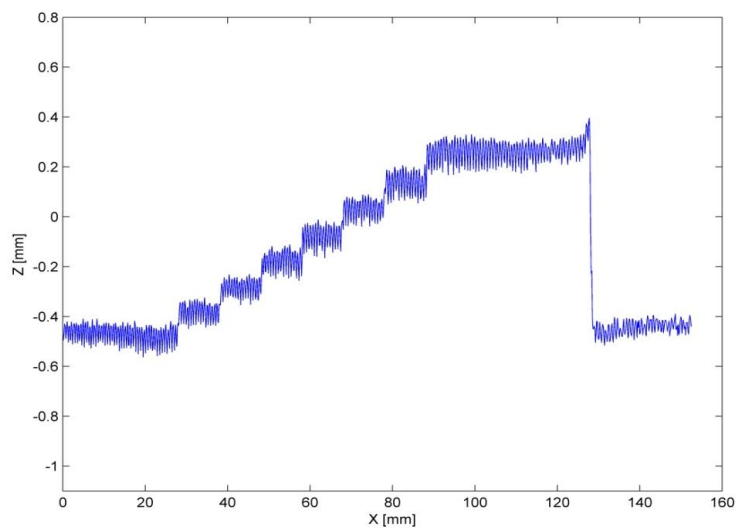
En la Figura 16 se muestra el perfil de la R3D de la escalera de papel, utilizada en la sección 1.2.2, para pasos de las franjas de 4, 8,12, y 16, con un ángulo de

$\theta = 25.21^\circ$ y un nivel de gris de las franjas $NG = 200$. Al hacer una comparación entre ellas se puede ver que para todos los pasos de franjas, la reconstrucción 3D tiene presencia de ruido, además de esto, a medida que aumenta P_0 el ruido también aumenta como se muestra en la Tabla 4.

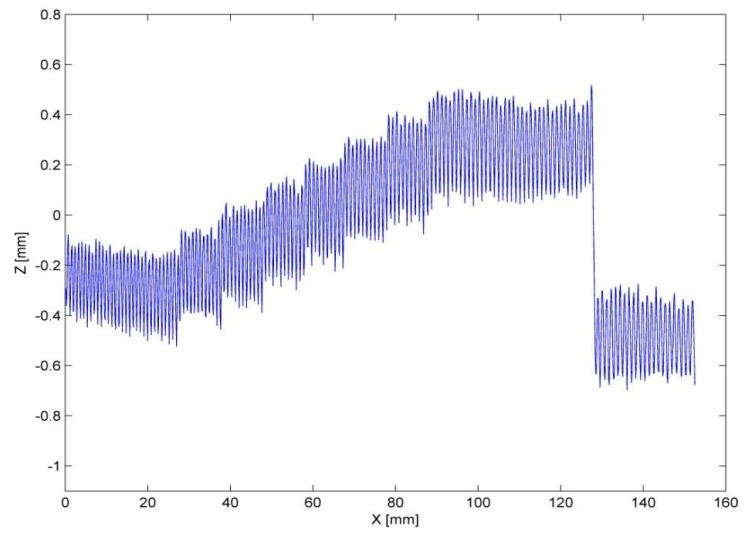
Figura 16. Perfil del R3D de la escalera para diferentes pasos. (a) $P_0 = 4$, (b) $P_0 = 8$, (c) $P_0 = 12$, (d) $P_0 = 16$.



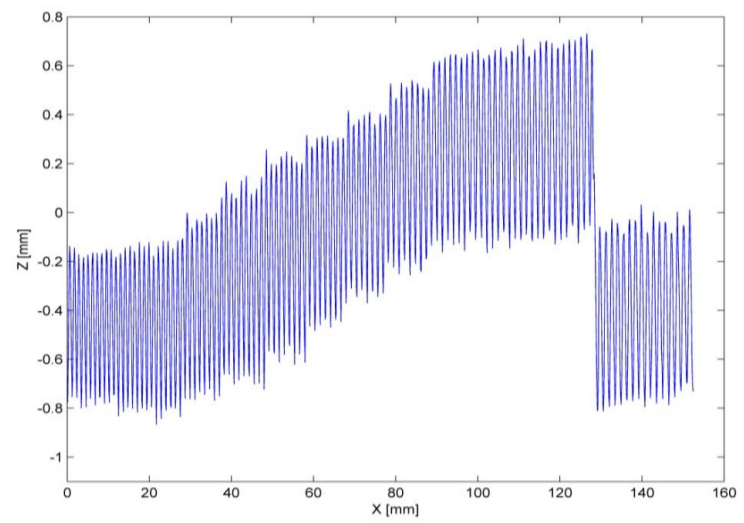
(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: Autoras

Tabla 4. Desviación estándar promedio de los escalones para los distintos pasos.

Paso de las Franjas	Desviación Estándar Promedio [mm]
4	± 0.0196
8	± 0.0457
12	± 0.1484
16	± 0.2761

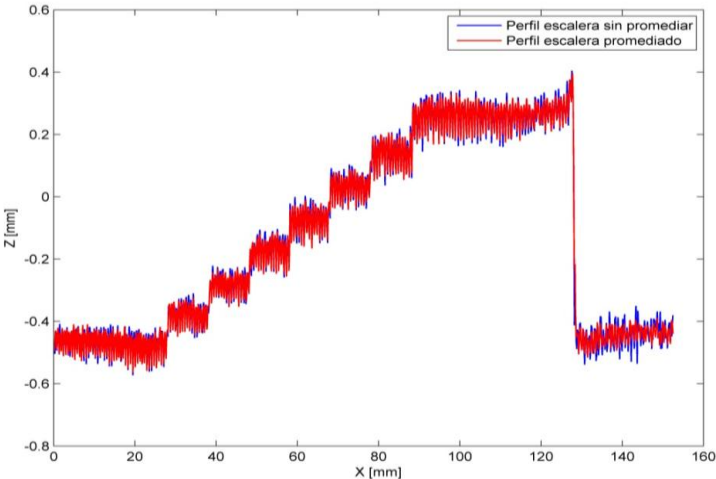
Al aumentar el ruido en la R3D, aumenta el error en la medida de la altura de cada escalón, hasta un punto tal, que no se puede resolver experimentalmente el objeto conocido. De ahí que sea de gran importancia eliminar el ruido para poder obtener mediciones confiables. A continuación se presentan las estrategias que se emplearon para solucionar este inconveniente.

2.1.1 Disminución del ruido aleatorio.

Del análisis estadístico se conoce que el error estándar es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número de muestras. Para una distribución de ruido normal si se tienen cuatro muestras, la desviación estándar se reduce a la mitad. De esta forma para reducir el ruido aleatorio generado por la luminosidad de la lámpara, en vez de capturar una sola imagen de franjas por desplazamiento en cada posición, se tomarán cuatro imágenes con el fin de promediarlas y reducir el ruido a la mitad.

En la Figura 17 se comparan los perfiles de la escalera de papel reconstruida con y sin el promedio de las cuatro imágenes. Allí se puede ver que la disminución del error en cada escalón haciendo el promedio, es muy poco. Esto indica que, el error aleatorio no es el causante dominante del ruido presente en la R3D.

Figura 17. Perfiles de la escalera con y sin promediado para $P_0 = 8$.

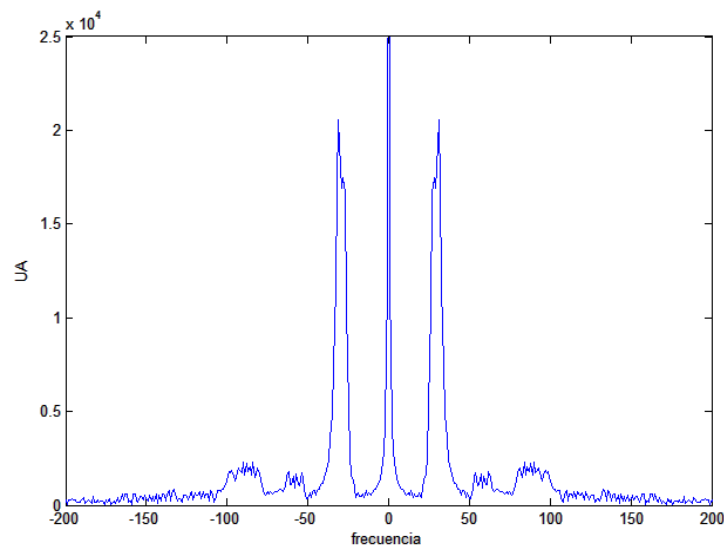


Fuente: Autoras

2.1.2 Influencia de los Armónicos en el Ruido de las Franjas

En el capítulo 1, la teoría formulada está basada en el supuesto que la intensidad de las franjas proyectadas tienen perfil sinusoidal, lo cual en la práctica no es cierto, pues las franjas proyectadas tienen un perfil que se asemeja más a una función cuadrada. En consecuencia, al asumir franjas sinusoidales, en el dominio de la frecuencia se esperaría que solo estuviera presente el primer armónico, pero en la realidad, no sólo aparece el primer armónico sino también el 2º y 3º, como se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Transformada de Fourier de las franjas proyectadas al plano X-Y con $P_0 = 16$.

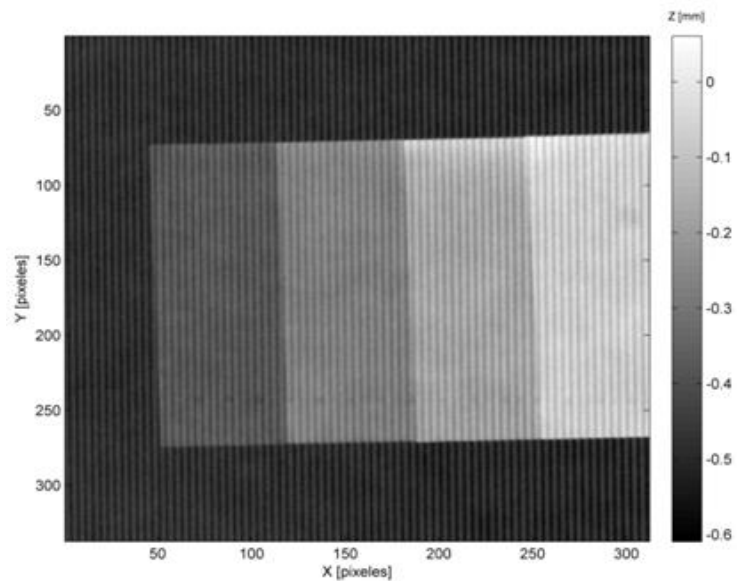


Fuente: Autoras

Como consecuencia, el error cometido al aproximar la intensidad de las franjas a una función sinusoidal, afecta la fase debido a que la ecuación utilizada para calcularla (ecuación 12.1) depende de la intensidad de las franjas [11]. Este efecto se puede ver en la Figura 19, en donde la imagen final de la reconstrucción 3D presenta unas líneas delgadas causantes del ruido en la R3D. Es decir la R3D

posee un patrón de franjas muy fino como ruido determinístico causado por los armónicos 2° , 3° , etc., del perfil de las franjas.

Figura 19. Zoom de la imagen rango de la reconstrucción 3D de la escalera.



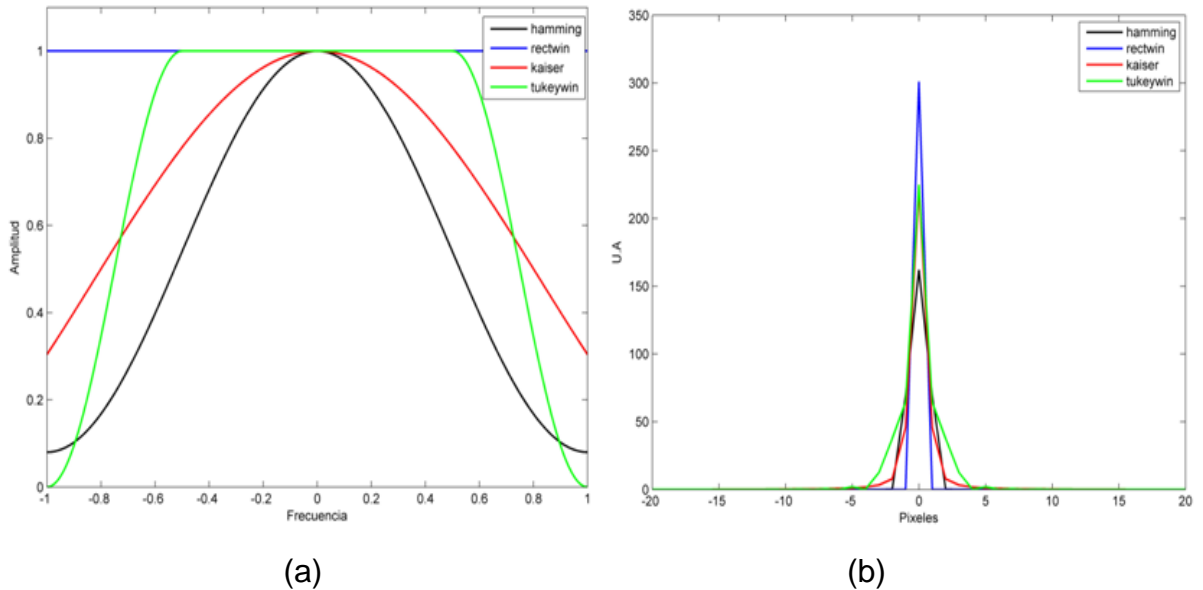
Fuente: Autoras

Por consiguiente, al algoritmo de R3D se debe incluir una etapa de filtrado para eliminar el ruido presente en la reconstrucción. El filtrado corresponde a un filtrado pasa bajo, cuya función de transferencia se aplica al contenido frecuencial de la intensidad de las franjas o a la R3D final. Es decir, se plantean dos estrategias de filtrado: filtrado en las franjas y filtrado en la R3D final.

Otro factor para tener en cuenta es el tipo de ventana con la cual se va a filtrar, para esto se seleccionaron cuatro ventanas de las que MATLAB® ofrece: Hamming, Rectangular (rectwin), Káiser y Tukey (tukeywin), Figura 20. Cada una de estas ventanas se implementa de forma independiente, tanto para el filtrado a

las franjas, como al filtrado de la R3D final. Todo esto con el fin de escoger la estrategia y la ventana que mejor resultado generen.

Figura 20. (a) Ventanas para el filtrado, (b) Respuesta impulsional de los filtros. Frecuencia normalizada.



Fuente: Autoras.

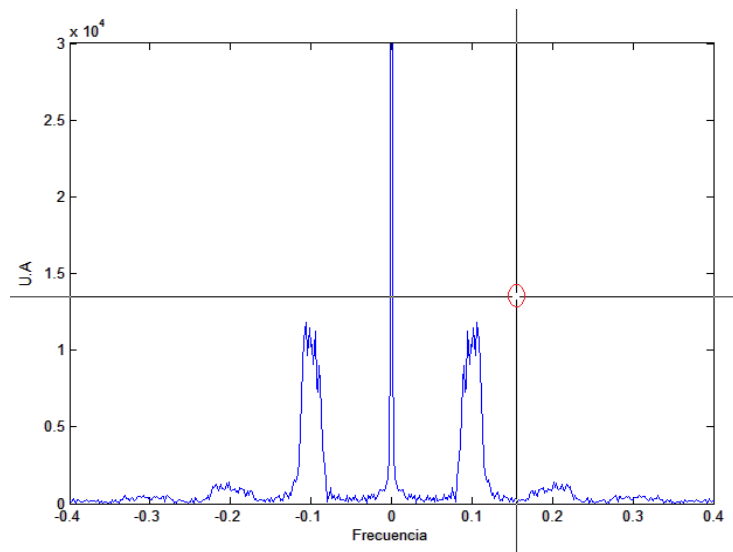
Para la etapa de filtrado, se mantienen todos los parámetros del sistema de franjas fijos de forma que se trabajó con $P_0 = 8$, $\theta = 25.21^\circ$ y $NG = 200$. El desarrollo de este proceso se encuentra a continuación.

2.1.2.1 Filtrado en las Franjas

Debido al ruido generado por los armónicos 2° y 3° presentes en las franjas, como se mencionó anteriormente, lo que aquí se pretende es eliminar estos armónicos por medio del filtrado y obtener un perfil aproximadamente sinusoidal. Para esto, se obtiene la Transformada de Fourier de una de las imágenes de franjas del

objeto y manualmente se selecciona la frecuencia de corte del filtro pasa bajo. Por ejemplo, en la Figura 21 el punto (círculo rojo) que se seleccionó se encuentra antes del 2° armónico, de esta forma toda la información que haya después de este punto quedará reducida dependiendo de la forma de la ventana empleada.

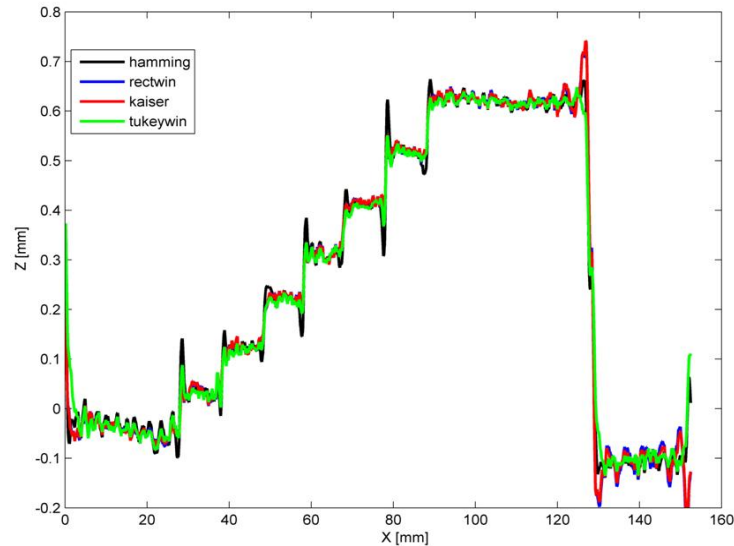
Figura 21. Transformada de Fourier de las franjas para $P_0 = 8$. Frecuencia normalizada.



Fuente: Autoras

Luego el filtro generado se aplica al promedio de las 4 imágenes y se continúa con el proceso del capítulo 1 para obtener la R3D del objeto. En la Figura 22, se muestra el perfil de la escalera reconstruida para las franjas filtradas con cada una de las ventanas seleccionadas.

Figura 22. Perfil de la R3D de la escalera para las cuatro ventanas con $P_0 = 8$.



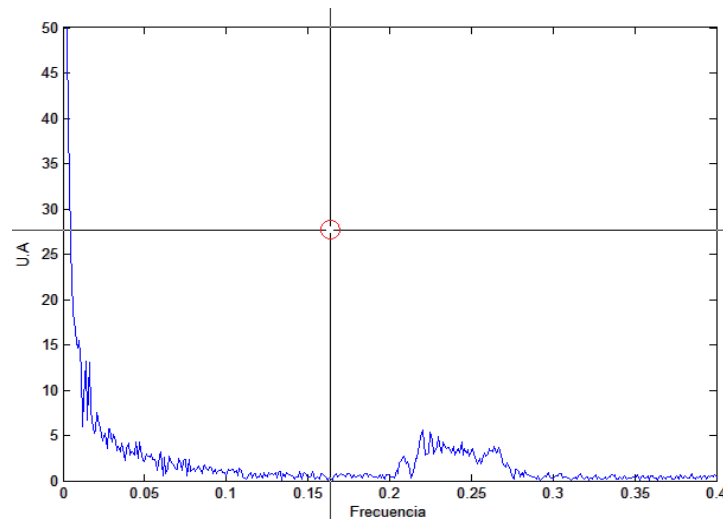
Fuente: Autoras

A partir de los resultados de la Figura 22 y comparándola con la Figura 16 (b), es bastante notoria la disminución del ruido en la R3D al filtrar con las diferentes ventanas. Sin embargo, la ventana que presenta menores picos en la terminación de cada escalón es la Tukeywin.

2.1.2.2 Filtrado en la R3D Final

Después de haber obtenido la reconstrucción 3D del objeto se halla la Transformada de Fourier, y al igual que en el caso anterior, se selecciona manualmente la frecuencia de corte del filtro. En la Figura 23 se muestra la Transformada de Fourier ampliada, donde se ve el 1° y 2° armónico de las franjas residuales obtenidas de la R3D del objeto. El objetivo es eliminar las franjas residuales filtrando el 1° y 2° armónico.

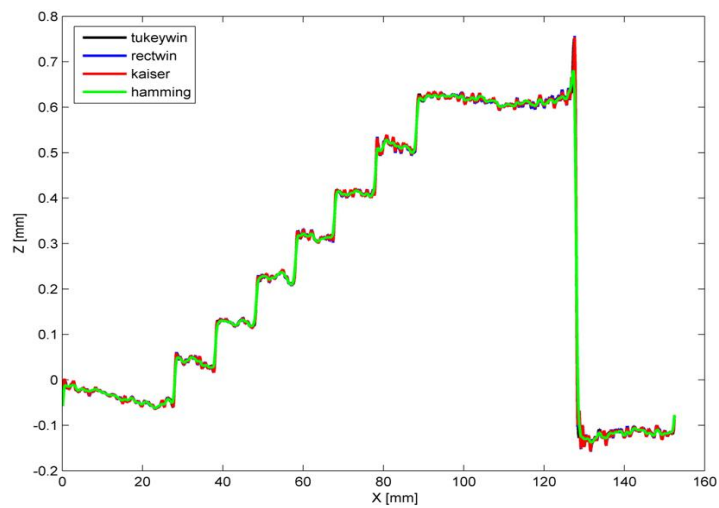
Figura 23. Transformada de Fourier del R3D de la escalera para $P_0 = 8$. Frecuencia normalizada



Fuente: Autoras

Finalmente se filtra la R3D de la escalera para cada una de las ventanas empleadas. En la Figura 24 claramente se ve que la ventana Hamming elimina mejor el ruido

Figura 24. Perfil de la R3D de la escalera con $P_0 = 8$ para las cuatro ventanas.



Fuente: Autoras

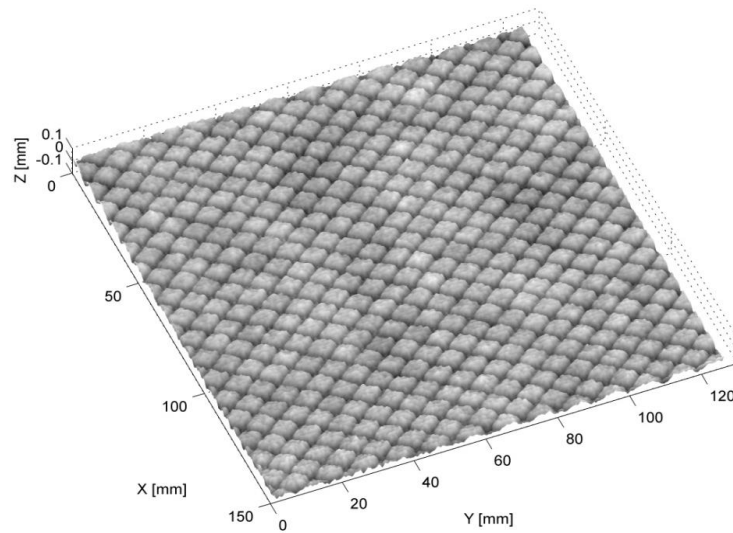
Comparando visualmente los resultados de las dos estrategias de filtrado: filtrado en las franjas y filtrado en la R3D final, mostrados en las Figura 22 y 24 respectivamente, es bastante claro que la segunda forma realiza un mayor suavizado al ruido que la primera, además solo se utiliza en una imagen (la R3D) haciendo el procesamiento más rápido que en el primer caso donde se aplica a cada imagen de franjas. Por tanto, se determina realizar el filtrado al final de la R3D del objeto utilizando una ventana Hamming.

2.2 INFLUENCIA DEL PASO DE LA FRANJAS

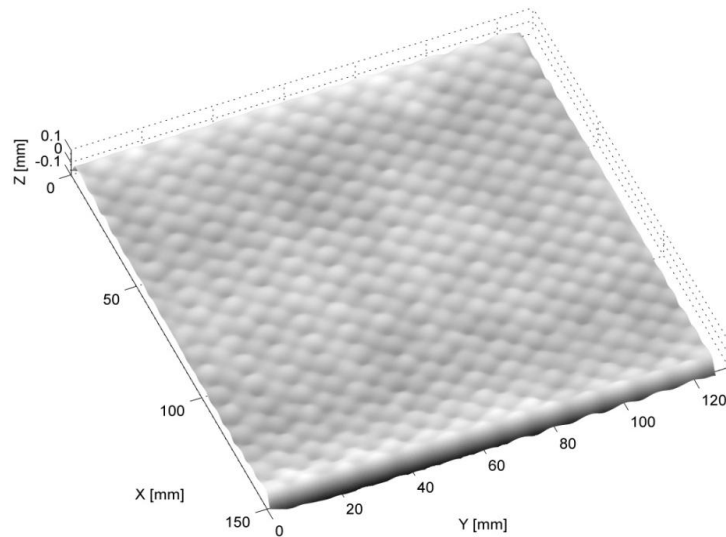
Para estudiar la influencia de los parámetros en función del detalle que el sistema de R3D es capaz de resolver, se utilizó una cartulina con textura de rombos la cual tiene una altura total de de 220 μm y los rombos de 60 μm . Pues bien, manteniendo un ángulo de proyección de $\theta = 25.21^\circ$ y $\text{NG} = 180$, se reconstruyó la cartulina para cada uno de los diferentes pasos de las franjas.

De las reconstrucciones tridimensionales obtenidas para cada paso, se pudo ver que para pasos pequeños como 4 y 8, el sistema era capaz de resolver la topografía del papel, Figura 25 (a). Pero a medida que el paso de las franjas se aumentaba se iba perdiendo detalle en la reconstrucción. Así, para $P_0 = 24$ el sistema ya no es capaz de resolver la forma del papel, como se muestra en la Figura 25 (b).

Figura 25. R3D de la cartulina con textura de rombos con $\theta = 25.21^\circ$ y $NG = 180$.
(a) $P_0 = 4$, (b) $P_0 = 24$



(a)



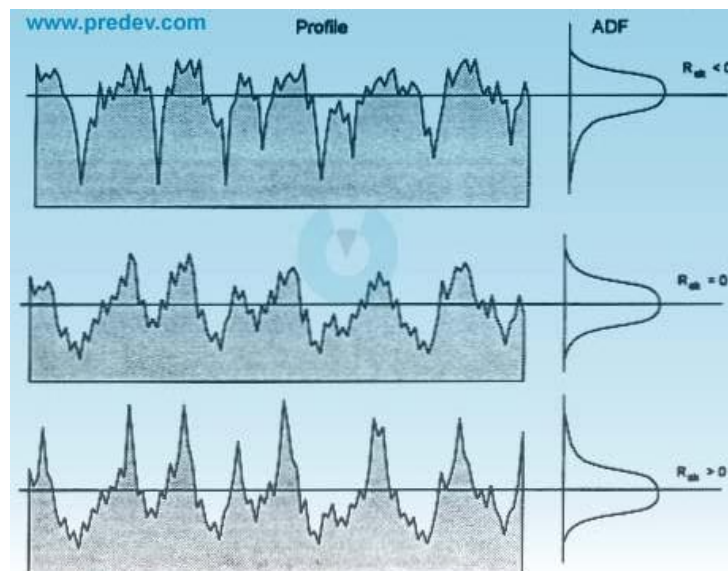
(b)

Fuente: Autoras

Debido a que la topografía de la cartulina es asimétrica con respecto a su valor medio, para cuantificar cómo cambia el perfil de la superficie de los rombos en la

reconstrucción 3D a medida que se varían los parámetros del sistema, de la teoría de probabilidad y estadística se utilizó el coeficiente de asimetría R_{sk} (*skewness*), el cual caracteriza la asimetría de una distribución alrededor de su línea media [12]. Como se muestra en la Figura 26, el coeficiente es positivo para superficies que presenten fuertes picos por encima de la línea media. Superficies con coeficiente negativo tienen valles profundos en mesetas más suaves y superficies de perfil aleatorio tienen coeficiente cero. Según la topografía original de los rombos en la cartulina el perfil de la superficie se asemeja a la que tiene coeficiente de asimetría negativo.

Figura 26. Coeficiente de asimetría R_{sk} , para diferentes tipos de superficies.



Fuente: [12]

Utilizando el comando `skewness` de Matlab® se obtuvo el valor del coeficiente de la R3D de la cartulina para diferentes pasos de franjas. A continuación se encuentran los resultados:

Tabla 5. Coeficiente de asimetría para los distintos pasos de franjas.

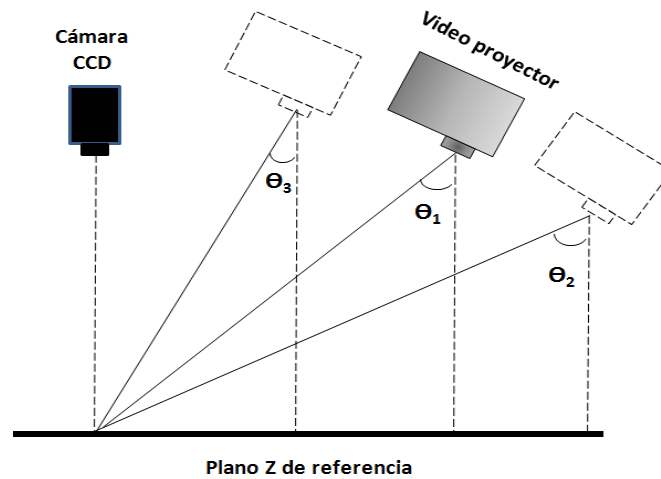
Paso de las Franjas	Skewness
4	-0.4579
8	-0.4095
12	-0.2703
16	-0.2283
24	-0.0104

Interpretando los valores de skewness de la Tabla 5, para P_0 pequeños el coeficiente es más negativo lo que indica que se asemeja más al perfil original de los rombos. Mientras que medida que P_0 aumenta ($P_0 > 24$) el skewness se hace más cercano a cero, es decir, el sistema no es capaz de reconstruir la superficie y cambia la forma original porque para pasos grandes se pierden los detalles y se introduce ruido como se vio en la Figura 25.

2.3 INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE PROYECCIÓN

Los ángulos de proyección se muestran en la Figura 27. Estos se obtienen desplazando radialmente el video proyector de su posición inicial (para θ_1) con el propósito de mantener igual la distancia entre el video proyector y el plano de referencia. En este sentido, los ángulos fueron $\theta_1 = 25.21^\circ$, $\theta_2 = 35.95^\circ$, $\theta_3 = 17.75^\circ$. Tomando $P_0 = 8$ y $NG = 180$, se hicieron las pruebas para cada ángulo.

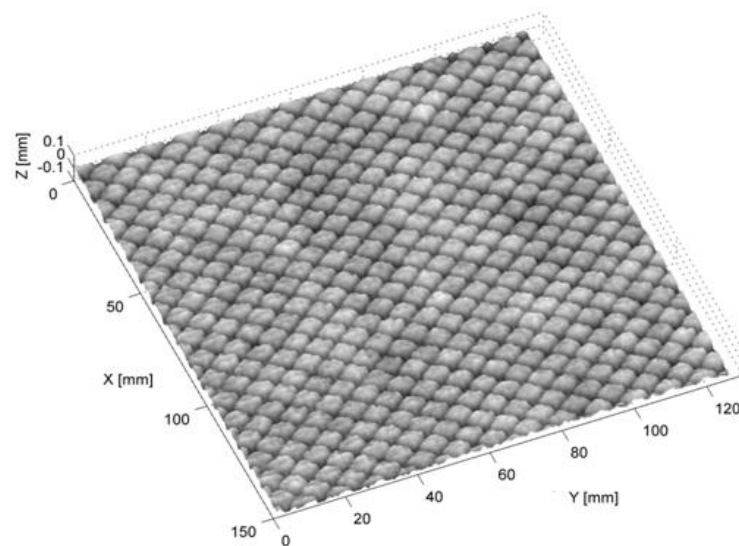
Figura 27. Ángulos de proyección del sistema de franjas para $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$.



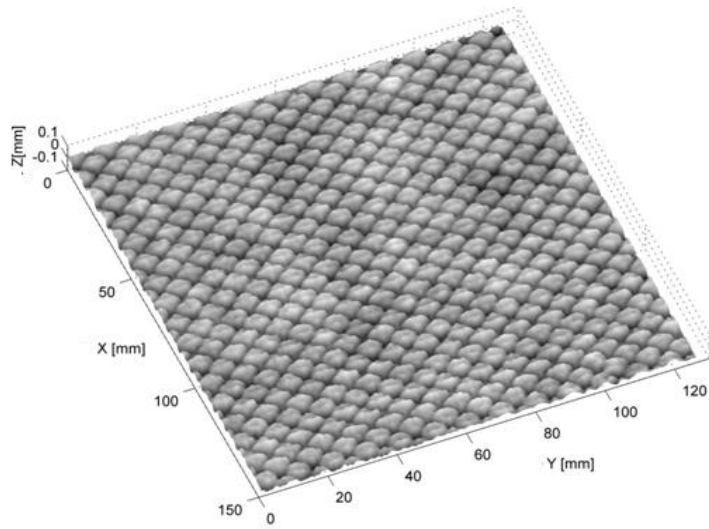
Fuente: Autoras

En la Figura 28 se muestra la R3D de la cartulina de rombos para cada uno de los ángulos. A medida que el ángulo de proyección es más grande se pierde resolución del detalle. Esto se puede corroborar cuantitativamente con los valores de skewness de la Tabla 6.

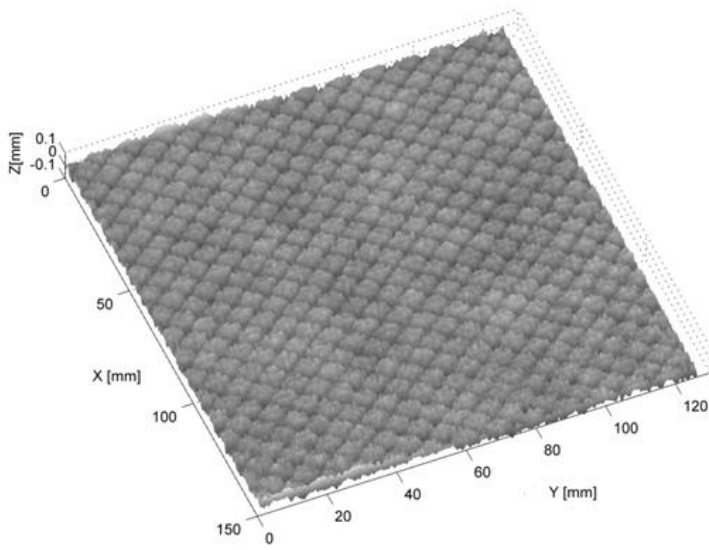
Figura 28. R3D de la cartulina de rombos con $P_0 = 8$ y $NG = 180$. (a) $\theta_1 = 25.21^\circ$, (b) $\theta_2 = 35.95^\circ$, (c) $\theta_3 = 17.75^\circ$.



(a)



(b)



(c)

Fuente: Autoras

Tabla 6. Coeficiente de asimetría para los distintos ángulos de proyección.

Ángulo de Proyección	Skewness
35.95°	-0.5843
25.21°	-0.5471
17.75°	-0.2986

De los resultados anteriores se puede ver que para ángulos más grandes el sistema reconstruye mejor la forma original de los rombos que para ángulos más pequeños.

2.4 INFLUENCIA DEL CONTRASTE DE LAS FRANJAS

El contraste de las franjas depende de tres variables: la abertura del diafragma de la cámara CCD (cantidad de luz que entra a la cámara), el color del objeto y el nivel de gris de las franjas. De modo que, lograr un alto o bajo contraste depende de la relación de estas tres variables, lo cual implicaría más esfuerzo en el análisis a diferencia de si sólo dependiera de una. En consecuencia, para hacer la relación directa de una de estas variables con el contraste es necesario mantener las otras dos fijas.

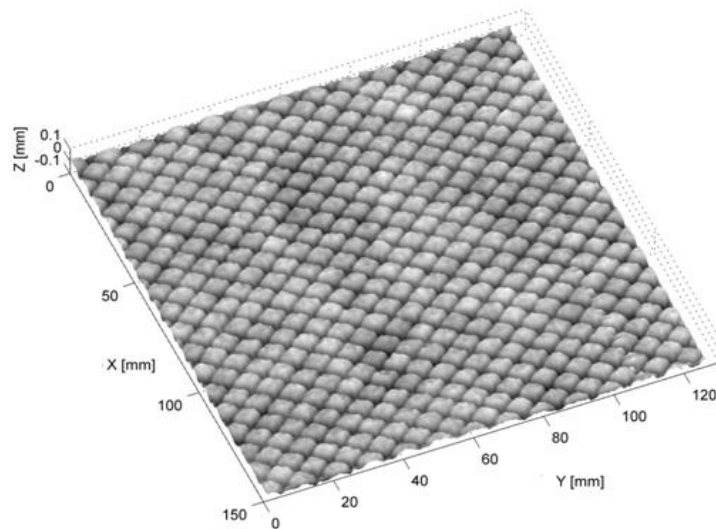
Variar el color del objeto no es adecuado, porque es una variable exógena al sistema de proyección de franjas y por ende no se puede controlar. La abertura del diafragma de la cámara y el nivel de gris de las franjas sí son variables controlables, sin embargo la lente no tiene medidas que puedan cuantificar la abertura del diafragma.

De esta forma, la influencia del contraste de las franjas en la R3D se determina a partir de la variación del nivel de gris de las franjas; con la cartulina de rombos de color blanco y con el diafragma abierto hasta la mitad (donde totalmente abierto

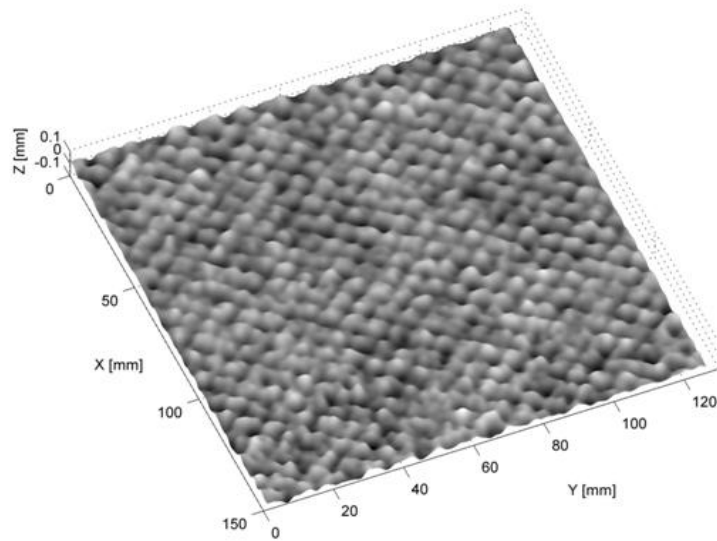
implica la máxima cantidad de luz que puede entrar a la cámara). Los niveles de gris que se tomaron de un rango de 0 a 255 fueron: 250, 200, 150, 100, y 50, donde 250 representa franjas de más alto contraste y 50 de más bajo contraste.

Haciendo la R3D de la cartulina de rombos para los distintos niveles de gris se obtuvo que para niveles altos como 250 el sistema pudo resolver los detalles de la cartulina, Figura 29 (a), mientras que para niveles de gris por debajo de 100 (bajo contraste) no fue capaz de resolverlos, Figura 29 (b). Esto se comprueba con los resultados del coeficiente de simetría de la Tabla 7, donde para NG grandes el skewness más negativo significa que el sistema R3D detecta mejor la topografía de los rombos que para NG pequeños.

Figura 29. R3D de la cartulina de rombos con $P_0 = 8$ y $\theta = 25.21^\circ$. (a) NG = 250, (b) NG = 50.



(a)



(b)

Fuente: Autoras

Tabla 7. Coeficientes de asimetría para los distintos niveles de gris.

Nivel de Gris	Skewness
250	-0.4132
200	-0.4097
150	-0.2741
100	-0.2335
50	-0.0495

Los anteriores resultados demuestran la importancia del contraste de las franjas en la reconstrucción 3D, pero esto no implica que lo concluido para la cartulina blanca se pueda aplicar a la piel, pues dependiendo de la persona, esta puede tener diferentes tonalidades. En efecto, para una piel oscura las franjas proyectadas a un cierto nivel de gris tendrán menos contraste que si se proyectan a una piel blanca, con el mismo nivel de gris. Dependiendo del color de la piel de

la persona habrá que seleccionar el nivel de gris adecuado para que las franjas tengan alto contraste.

2.5 RELACIÓN MATEMÁTICA ENTRE EL DETALLE Y LOS PARÁMETROS P_0 Y θ

La aproximación lineal de la relación entre la fase introducida por el objeto $\Delta\phi$ y la altura Z para el caso de un sistema telecéntrico está dada por [9]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi * \text{sen}(\theta)}{P_0} Z \quad (14.1)$$

El detalle más pequeño que se puede medir está dado por la variación más pequeña en $\Delta\phi$ que se puede calcular, para un valor de P_0 y θ fijos. El $\delta(\Delta\phi)$ depende principalmente de la resolución de la CCD, fijando este valor se obtiene que el valor más pequeño en δZ esta dado por

$$\delta Z = \frac{P_0}{2\pi * \text{sen}(\theta)} \delta(\Delta\phi) \quad (14.2)$$

De la ecuación (14.2) se concluye que para P_0 pequeños y ángulos θ grandes se obtiene δZ pequeños, ajustando $\delta(\Delta\phi)$ fijo. Los resultados obtenidos anteriormente demuestran esta tendencia entre la influencia de P_0 y θ en la R3D de un objeto.

En este sentido, se obtiene una mejor resolución para $P_0 = 4$ y un ángulo de proyección de $\theta = 35.95^\circ$. Sin embargo, como se quiere que el sistema de R3D por proyección de franjas en un futuro sea portable, no conviene que el video proyector este tan separado de la cámara CCD y como con ángulos grandes se genera más sombra sobre el objeto, se establece un ángulo de $\theta = 25.21^\circ$.

3. R3D DE LA PIEL HUMANA

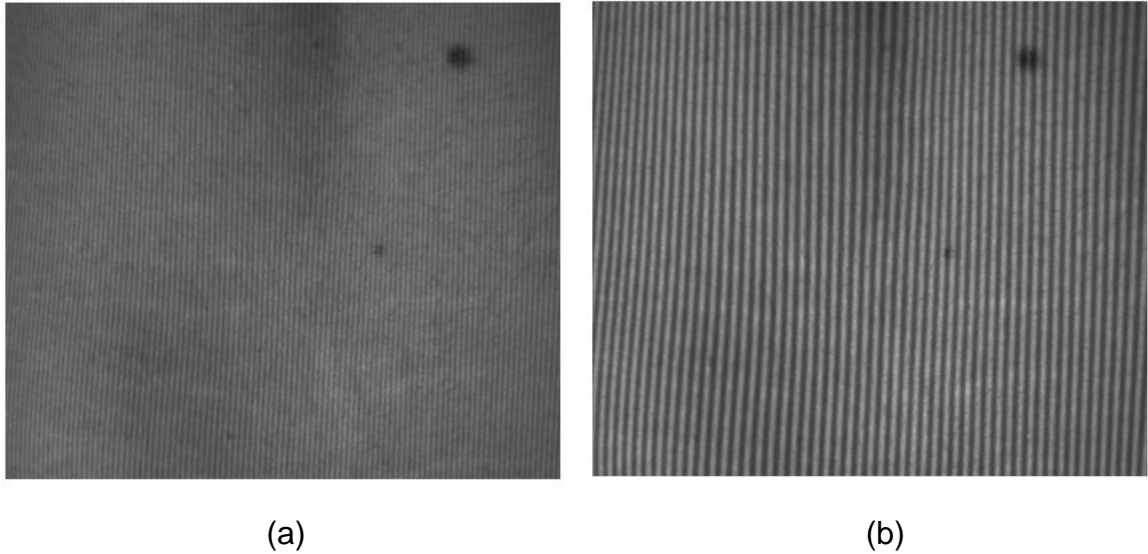
Después de haber desarrollado el proceso de R3D y realizado el estudio de la influencia de los parámetros del sistema, se procede a trabajar con la piel humana. Este capítulo se centra en la adaptación del sistema de R3D de forma que se disminuyan los errores que genera tanto en la reconstrucción 3D como en la medida de la topografía las condiciones propias de la piel como tonalidades diferentes, presencia de vellos o manchas, y macro-topografías.

En la primera parte se realiza el estudio de la pérdida del contraste de las franjas en la piel. Luego se hace la R3D de una zona del muslo para cuatro mujeres con el fin de obtener medidas de la topografía de la piel inducida por la celulitis. Después se analiza la influencia de vellos y/o manchas presentes en la piel. Finalmente se realiza la reconstrucción 3D de dos objetos con dimensiones conocidas para estimar el error en la medida y resolución del sistema de R3D por proyección de franjas implementado.

3.1 CONTRASTE DE LAS FRANJAS EN LA PIEL

A pesar que en la sección 2.2 el sistema de R3D resolvía mejor los detalles de la cartulina blanca para pasos pequeños como 4, en la piel humana la situación cambia, debido a que la luz se retrodifunde en las capas internas como se muestra en la Figura 30 (a), produciendo pérdida de contraste en las franjas. Situación que no ocurre para franjas con $P_0 = 8$, Figura 30 (b). En consecuencia se decide utilizar franjas de paso 8 para la piel.

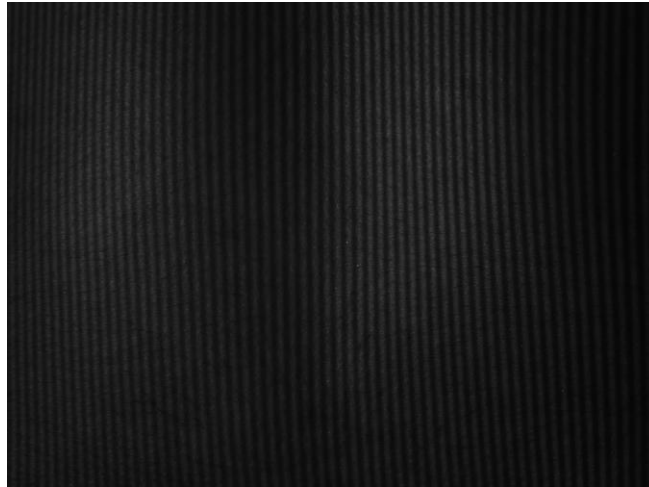
Figura 30. Franjas proyectadas a la espalda de una persona de piel blanca con (a) $P_0 = 4$, (b) $P_0 = 8$.



Fuente: Autoras.

Otro factor que influye en el contraste de las franjas es el color de la piel, como se mencionó al final de la sección 2.4, así para pieles oscuras se deben proyectar franjas con niveles de gris altos para evitar la pérdida de contraste. En la Figura 31 se muestran las franjas proyectadas a la espalda de una persona morena con un nivel de gris de 255, allí se puede ver que a pesar de utilizar el nivel de gris más alto, las franjas tienen poco contraste. Por esta razón se decidió abrir un poco el diafragma de la cámara con el fin de ampliar el rango de niveles de gris y así poder hacer la R3D para pieles morenas u oscuras sin ningún problema. La abertura del diafragma reduce la profundidad de campo, pero esta reducción no afecta si el objeto es plano o tiene baja topografía como es el caso de la celulitis.

Figura 31. Franjas proyectadas a una persona de piel morena con $NG = 255$.



Fuente: Autoras.

También se debe tener en cuenta que al haber abierto el diafragma de la cámara, si se desea reconstruir una piel muy blanca, se debe seleccionar un nivel de gris bajo de forma que el sistema de franjas no se sature.

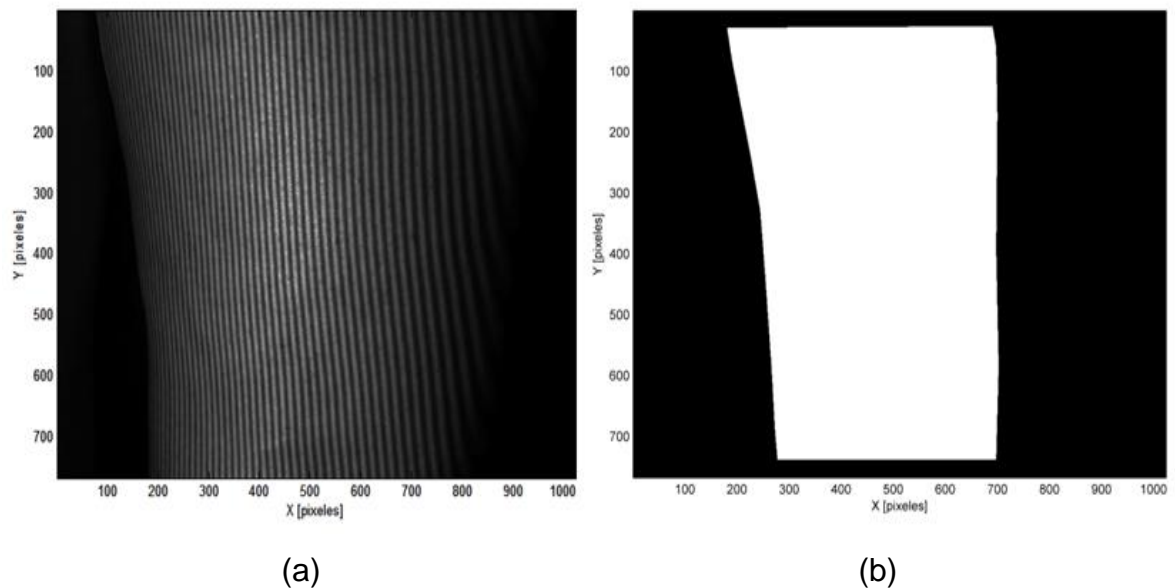
3.2 R3D DE LA CELULITIS

En esta sección se documenta la R3D de la celulitis que se realizó a los muslos de cuatro mujeres con edades comprendidas entre los 20 y 40 años, cada una con distinto grado de celulitis. Además de la reconstrucción 3D también se hizo mediciones a la topografía de la región seleccionada.

Para la toma de las imágenes de franjas se ubicó la persona de tal manera que por lo menos un punto de la línea blanca proyectada al muslo coincidiera con la línea Z_0 de la matriz PXT. De esta manera se aseguró que el sistema estuviera focalizado y la región a reconstruir se encontrara en el rango de calibración Z. Posteriormente las imágenes capturadas se procesaron con el algoritmo de R3D.

Como el muslo no ocupaba totalmente la región de captura de la cámara, en las imágenes obtenidas habían zonas negras que generaron errores en el cálculo de la fase, Figura 32 (a). Utilizando una máscara, se escogió la región útil de la imagen donde estuviera tanto la zona del muslo que se quería reconstruir como la línea blanca proyectada y así el procesamiento de R3D se realizara de forma correcta. La máscara generada se muestra en la Figura 32 (b).

Figura 32. (a) Imagen de franjas proyectadas al muslo de la modelo 1 con $P_0 = 8$, (b) Máscara generada para eliminar regiones negras de la (a).

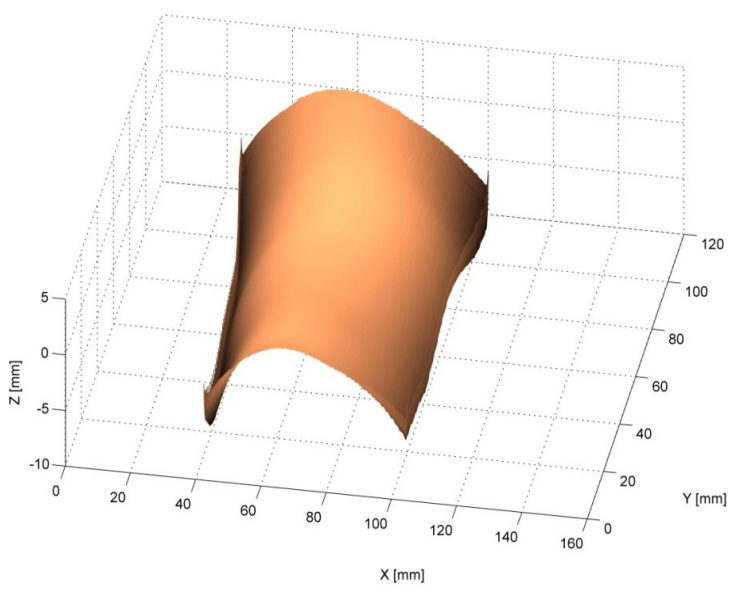


Fuente: Autoras.

Finalmente después de terminado el proceso de R3D se obtuvo la reconstrucción del muslo de la modelo 1. Sin embargo debido a la fuerte macro-topografía del muslo no fue posible visualizar la celulitis Figura 33. Para solucionar esto, se empleó un polinomio de orden 6, con el cual se obtuvo un modelo matemático aproximado de la curvatura del muslo y esta se restó a la R3D total, de forma que únicamente se pudiera visualizar la celulitis. En la Figura 34 se muestra para las

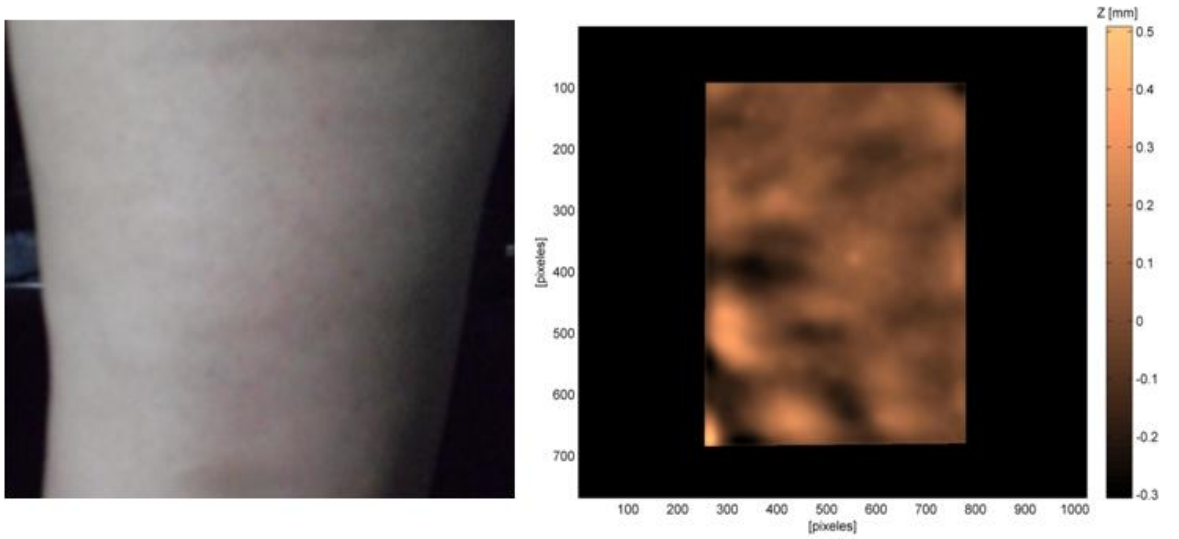
cuatro modelos la fotografía del muslo y la imagen rango obtenida de la reconstrucción 3D en la región seleccionada con la máscara. En la Figura 35 se muestra la R3D de la celulitis del muslo de cada una de las modelos.

Figura 33. R3D de la macro-topografía del muslo de la modelo 1.

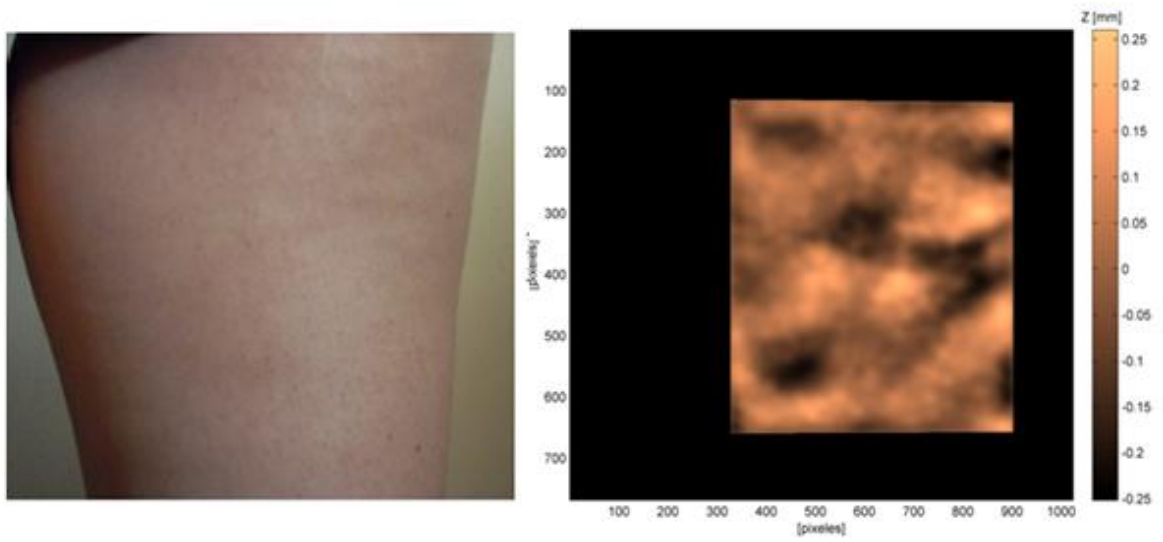


Fuente: Autoras.

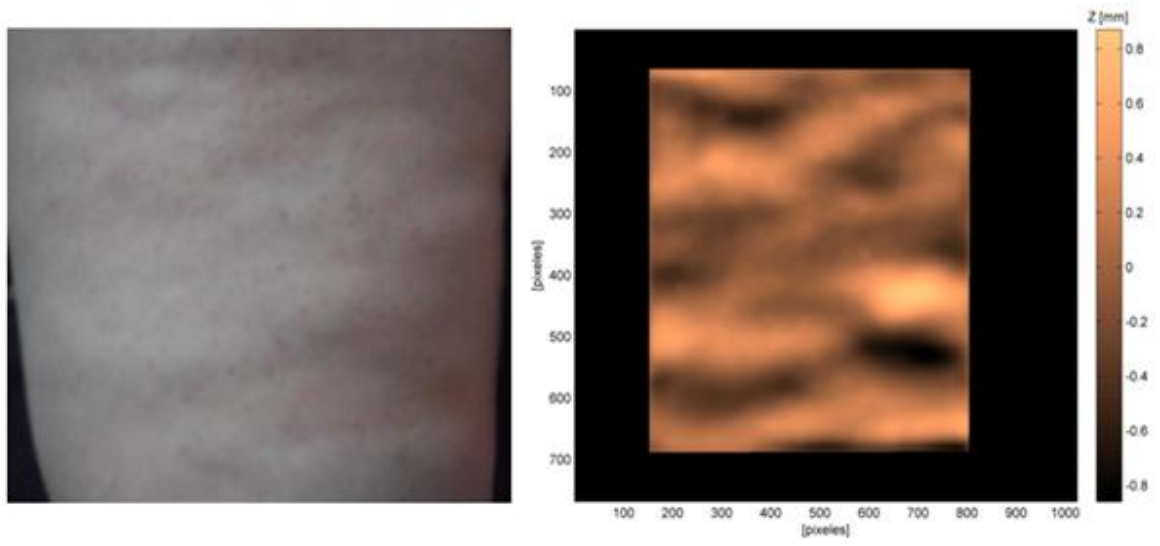
Figura 34. Fotografía e imagen rango del muslo. (a) Modelo 1, (b) Modelo 2, (c) Modelo 3, (c) Modelo 4.



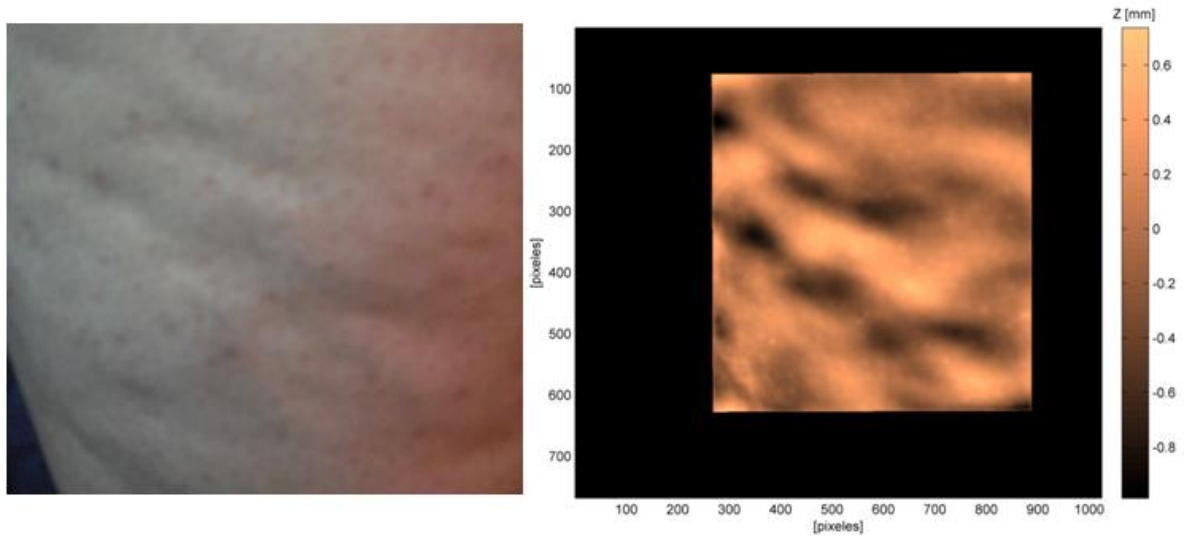
(a)



(b)



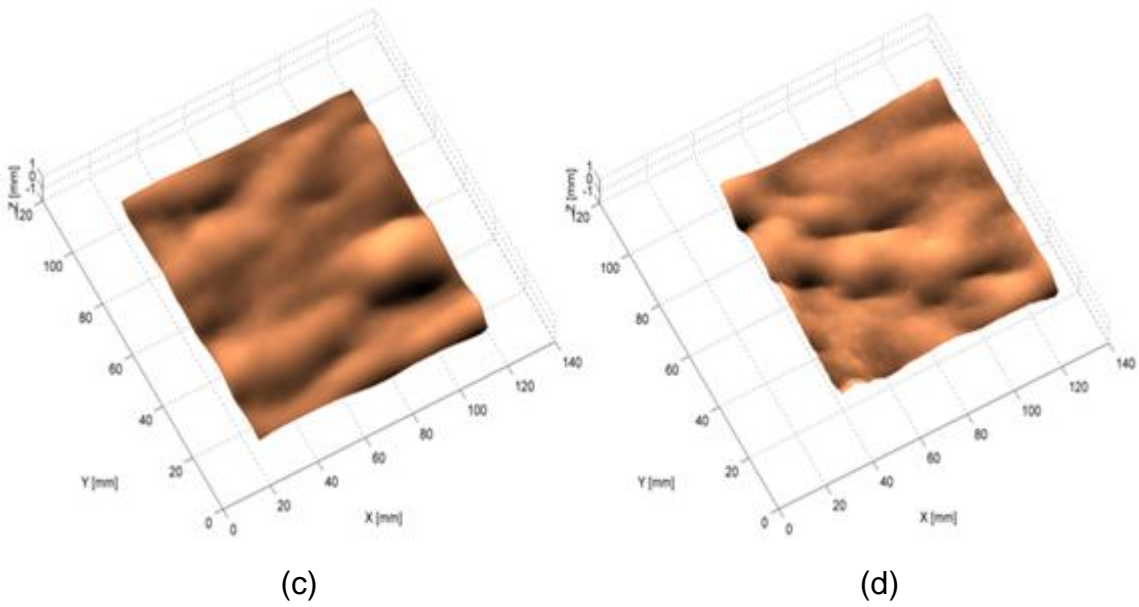
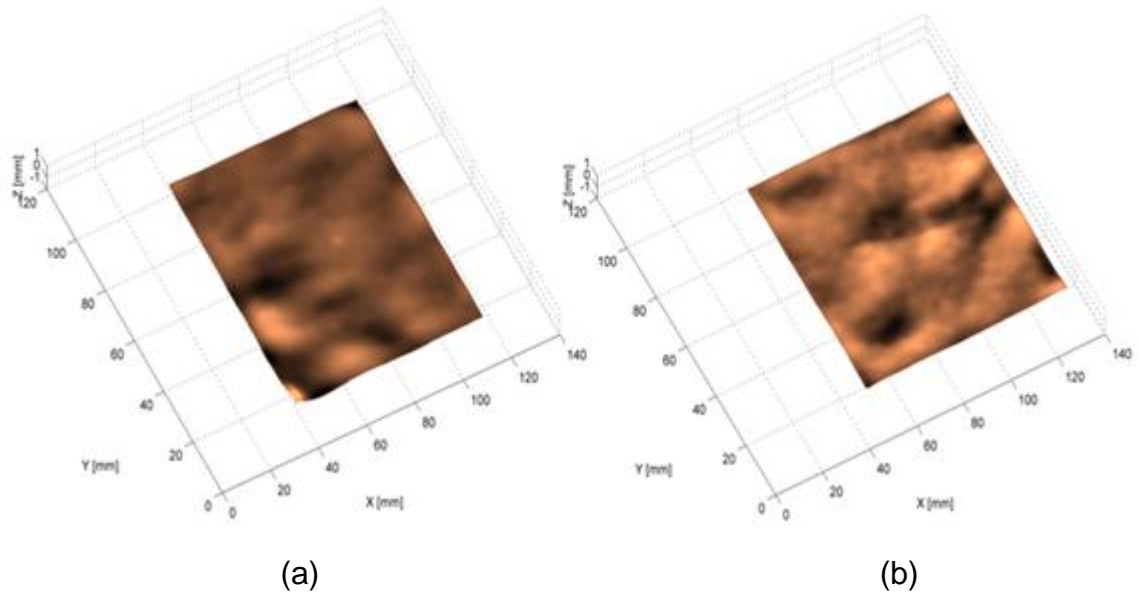
(c)



(d)

Fuente: Autoras.

Figura 35. R3D de la celulitis en la región seleccionada con la máscara.
(a) Modelo 1, (b) Modelo 2, (c) Modelo 3, (d) Modelo 4.



Fuente: Autoras.

En base a estudios realizados para modelar cuantitativamente la celulitis [2], se seleccionó los parámetros de medida que permiten cuantificar las variaciones en la topografía de la piel causadas por la celulitis. Estos parámetros son: la razón entre el área de la superficie y el área del plano de referencia (A_s), el punto de altura máxima o pico de la superficie (S_p), el punto de altura mínima o valle de la superficie (S_v) y la distancia entre las aturas máxima y mínima de la superficie $S_t = S_p - S_v$.

La razón entre el área de la superficie y el área del plano de referencia A_s se definió como

$$A_s = \frac{A_T - A_P}{A_P} \times 100\% \quad (15.1)$$

Donde A_T es el área total de la superficie de la celulitis y A_P el área del plano de de la celulitis.

Para calcular el área de la superficie de la celulitis se subdividió la superficie en regiones pequeñas de manera que se pudieran suponer planas. La suma de todas las áreas de las regiones es igual al área total de la superficie. Para una región de vértices (u, v) , $(u + i, v)$, $(u, v + j)$ y $(u + i, v + j)$ el área es:

$$A_k = \left\| \overrightarrow{(u_k + i, v_k) - (u_k, v_k)} \times \overrightarrow{(u_k + i, v_k + j) - (u_k, v_k + j)} \right\| \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (15.2)$$

$$A_T = \sum_1^k A_k \quad (15.3)$$

Los parámetros medidos se realizaron con cada una de las regiones seleccionadas de las modelos, Tabla 8.

Tabla 8. Parámetros para cuantificar la celulitis

Parámetros de Medida	Modelo1	Modelo2	Modelo3	Modelo4
A_s [%]	$0.0347 \pm 1.31e-4$	$0.0349 \pm 1.29e-4$	$0.2569 \pm 8.68e-4$	$0.375 \pm 1.34e-3$
S_p [mm]	0.508 ± 0.005	0.260 ± 0.005	0.870 ± 0.005	0.737 ± 0.005
S_v [mm]	-0.288 ± 0.005	-0.252 ± 0.005	-0.860 ± 0.005	-0.977 ± 0.005
$S_t = S_p - S_v$ [mm]	0.80 ± 0.01	0.51 ± 0.01	1.73 ± 0.01	1.71 ± 0.01

El valor A_s representa el porcentaje de celulitis que hay en una región. Según los valores obtenidos de A_s , los modelos 1 y 2 tienen menos presencia de celulitis que la de los modelos 3 y 4.

El parámetro S_t da la estimación del rango de variación en altura que le adhiere la celulitis a la topografía normal de la piel, a pesar que los modelos 2 y 4 comparados con los modelos 1 y 3 respectivamente tienen mayor presencia de celulitis, su celulitis es más leve que la de las otras porque es menos profunda.

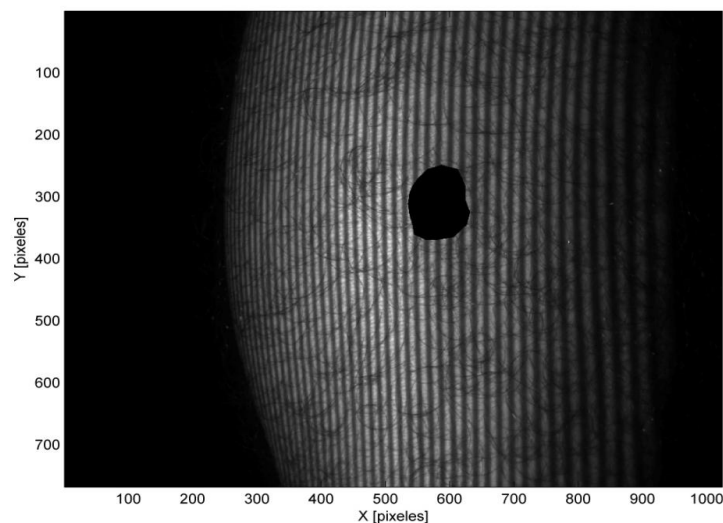
3.3 PRESENCIA DE VELLAS Y MANCHAS EN LA PIEL

La presencia de vello y/o manchas en la piel no son problema cuando los vellos son cortos y delgados, las manchas pequeñas y claras, debido a que el algoritmo de corrección de fase de la primera derivada utilizado en la R3D, está diseñado para evadir ruidos pequeños que se puedan presentar en las imágenes.

Pero cuando en la piel hay vellos largos y gruesos o manchas grandes y oscuras, se pueden propagar errores en la fase y por ende en la reconstrucción final. Entonces, la estrategia propuesta es mejorar el diseño de la máscara en el algoritmo de R3D, de forma que el sistema no calcule la fase para los vellos que propaguen errores, ni en la región donde se encuentra la mancha.

Para realizar el diseño de la máscara en una región de piel con presencia de vello, se tomaron imágenes de franjas con $P_0 = 8$ a la pantorrilla un hombre. A esta imagen se le agregó una mancha negra para simular el peor caso que puede ocurrir: la pérdida de las franjas. La imagen se muestra en la Figura 36.

Figura 36. Franjas proyectadas con $P_0 = 8$ a una región de piel con presencia de pelos y manchas.

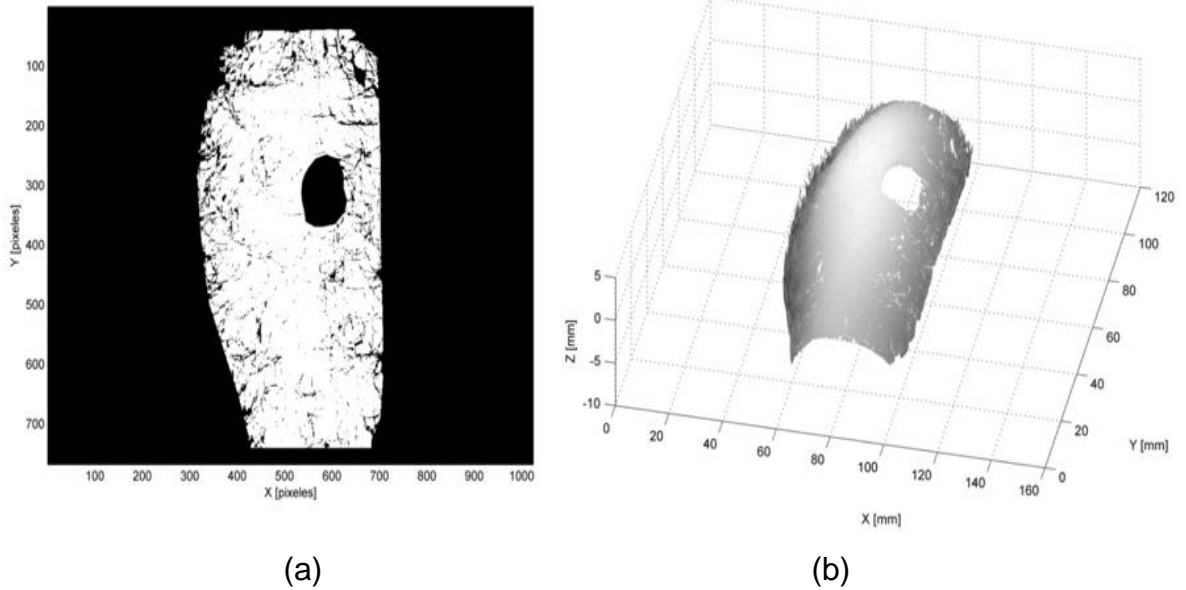


Fuente: Autoras.

Al igual que en la sección anterior en la máscara se selecciona la región a reconstruir, además por medio de un umbral se eliminan los vellos que quedan en la región. Para obtener el umbral se calcula el contraste de las franjas con la ecuación (12.2) y se normaliza, el valor del umbral se refiere al valor de contraste que tienen los vellos. Después de eliminar los vellos de la región útil, para calcular la fase se escoge el punto de partida manualmente para evitar que esté entre los puntos eliminados por la máscara. Si aún se encuentran errores en la fase, se repite el proceso de selección del umbral hasta que la fase esté libre de ellos. La

máscara diseñada para la Figura 36 se muestra en la Figura 37 (a). y la reconstrucción 3D en la Figura 37 (b).

Figura 37. (a) Máscara diseñada para eliminar la mancha y los vellos de la Figura 35, (b) R3D de la Figura 35.



Fuente: Autoras.

Aún para la Figura 37(b) se pueden hacer mediciones de topografía, pero en casos donde la vellosidad sea más poblada o manchas demasiado grandes la región útil sería mucho más pequeña y ya no se podría hacer las mediciones.

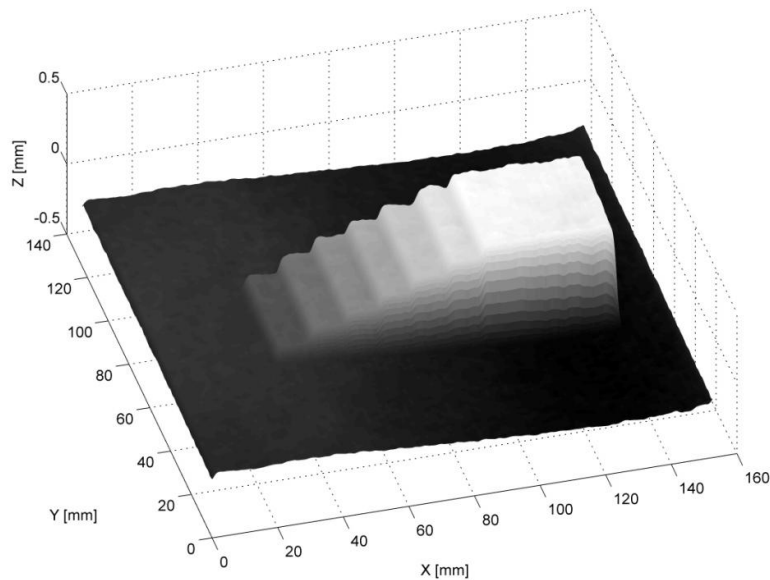
3.4 ESTIMACIÓN DEL ERROR Y LA RESOLUCIÓN DEL SISTEMA DE R3D POR PROYECCIÓN DE FRANJAS

Para estimar el error que se introduce en las mediciones topográficas de la piel se realizó la reconstrucción 3D de objetos de dimensiones conocidas. Entonces, se compararon las mediciones obtenidas con el sistema de R3D por proyección de

franjas final y las obtenidas con un comparador de carátulas para determinar el error de medida y estimar la resolución del sistema.

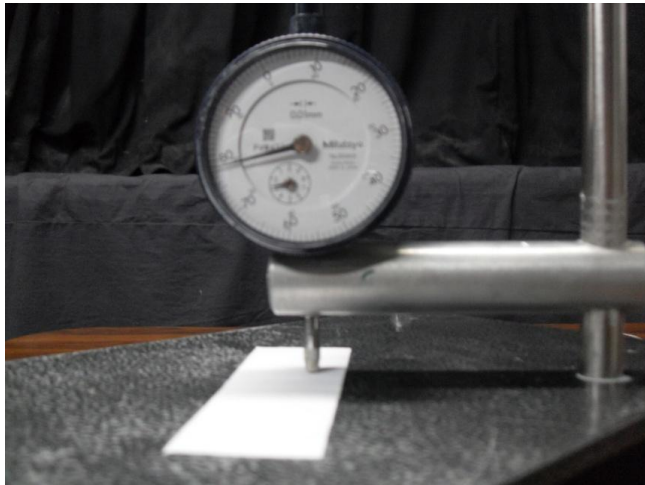
El comparador de carátulas mide la variación de profundidad entre dos puntos de un objeto por medio del desplazamiento de una punta metálica; el rango de medida del comparador es de 10mm con una resolución 0.01mm. Debido a la topografía regular de la escalera de papel que se usó en el capítulo 1 y a que es fácil de medir con el comparador de carátulas se tomó como parámetro de comparación. La reconstrucción 3D de la escalera se muestra en la Figura 38 y en la Figura 39 el montaje que se realizó para medir las dimensiones de la escalera con el comparador de carátulas.

Figura 38. R3D de la escalera de papel con $P_0 = 8$ y $NG = 150$.



Fuente: Autoras.

Figura 39. Imagen del montaje con el comparador de carátulas



Fuente: Autoras.

En la Tabla 9 se encuentran las mediciones hechas a la escalera con el sistema de R3D por proyección de franjas. El valor medio corresponde al valor medio de la coordenada Z obtenido en cada escalón y la desviación estándar corresponde a la desviación estándar de cada escalón. Se espera un valor constante de Z pero debido al ruido final introducido se obtiene una distribución ruidosa, cuya desviación estándar estima la precisión en la medida. Según los datos obtenidos, la desviación estándar promedio para una medida de altura con el sistema de R3D es de ± 0.0053 [mm], lo que implica que la altura límite que el sistema puede resolver es aproximadamente 0.0053 [mm].

Tabla 9. Medidas de la escalera con el sistema de R3D

Escalón	Superficie base		Superficie escalón		Altura del escalón	
	Valor medio [mm]	Desviación estándar [mm]	Valor medio [mm]	Desviación estándar [mm]	Valor medio [mm]	Desviación estándar [mm]
1	-0.0382	0.0035	0.0655	0.0052	0.1037	0.0087
2	-0.0512	0.0034	0.1555	0.0042	0.2067	0.0076
3	-0.0787	0.0064	0.2347	0.0054	0.3134	0.0118
4	-0.0956	0.0056	0.3100	0.0041	0.4056	0.0097
5	-0.1092	0.0054	0.4005	0.0049	0.5097	0.0103
6	-0.1235	0.0046	0.4870	0.0080	0.6105	0.0126
7	-0.1563	0.0051	0.5512	0.0089	0.7075	0.0140

De los valores de altura obtenidos del sistema R3D para cada escalón que se encuentran en la Tabla 9, se obtiene el error de medida tomando como referencia las medidas resultantes con el comparador de carátulas. De la Tabla 10 el error de medida promedio es de 0.0073 [mm].

Tabla 10. Error de medida del sistema R3D.

Escalón	Método R3D		Comparador de carátulas		Error de medida [mm]
	Valor medio de la altura [mm]	Desviación estándar [mm]	Valor medio de la altura [mm]	Desviación estándar [mm]	
1	0.1037	0.0087	0.10	0.01	0.0037
2	0.2067	0.0076	0.20	0.01	0.0067
3	0.3134	0.0118	0.30	0.01	0.0134
4	0.4056	0.0097	0.40	0.01	0.0056
5	0.5097	0.0103	0.50	0.01	0.0097
6	0.6105	0.0126	0.60	0.01	0.0105
7	0.7075	0.0140	0.70	0.01	0.0075

Los resultados anteriores (Tablas 9 y 10) demuestran que el sistema de R3D implementado puede medir fácilmente un objeto de 100 μm introduciendo un error del orden 5 μm .

Para estimar el detalle más pequeño que el sistema implementado puede reconstruir en la piel humana, se calculó el contraste normalizado en las imágenes de franjas de la escalera y de la piel humana como $(m - n)/(m + n)$ donde m es el nivel de gris máximo del perfil de las franjas y n es el nivel mínimo. Para la escalera se obtuvo un contraste normalizado de 0.6648 y para la piel de 0.4475, lo que indica que el contraste de las franjas en la piel comparado con las escaleras se redujo en un 33%. Es decir, la reducción del contraste de la piel comparado con el de las franjas no es tan significativa. Se puede estimar que el detalle más pequeño que reconstruye el sistema implementado para reconstruir la piel está en el orden de 10 [μm].

Para evaluar metrológicamente el sistema de R3D con otros tipos de topografías, se utilizó la medalla que se muestra en la Figura 40, de la cual se determinó la altura del balón (región cuadro rojo) midiendo la diferencia entre las alturas de los puntos rojos tanto con el sistema R3D como con el comparador.

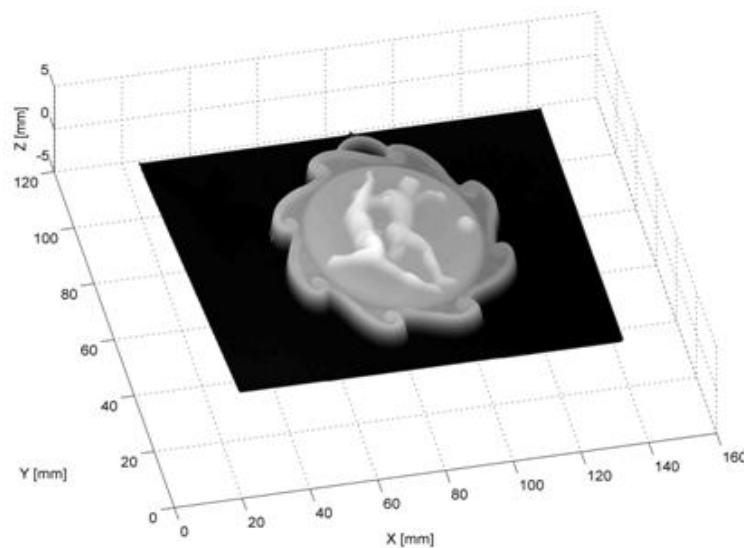
Figura 40. Imagen de la medalla.



Fuente: Autoras

A partir de la R3D de la medalla (Figura 41), la altura del balón fue de 0.6726 [mm] mientras que con el comparador de carátulas fue de 0.6750 [mm] resultando un error de medida de 0.0024 [mm] que comprueba la exactitud del sistema.

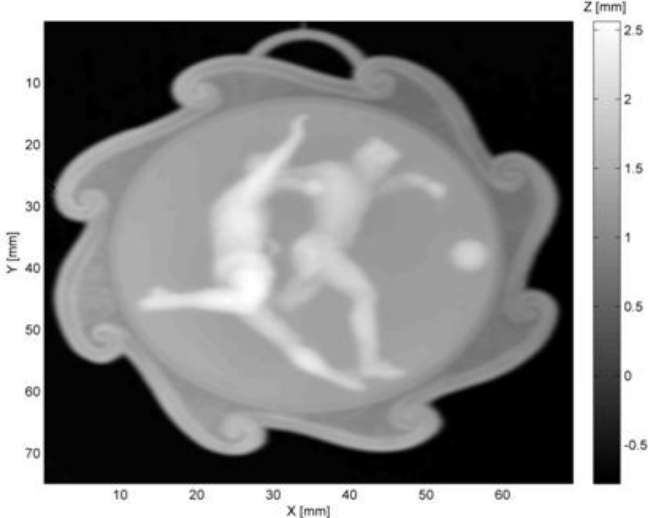
Figura 41. R3D medalla de futbol para $P_0 = 8$ y $NG = 150$.



Fuente: Autoras

Visualmente de la Figura 42, se puede destacar la capacidad del sistema R3D para resolver detalles pequeños de la medalla como la cara y la ropa de los jugadores, lo cual da una apreciación visual de la resolución del sistema.

Figura 42. Imagen rango de la Figura 41.



Fuente: Autoras.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se logró implementar un modelo experimental de un sistema de reconstrucción tridimensional por el método de proyección de franjas conformado por una cámara CCD, un video proyector y un computador portátil. La proyección, captura y procesamiento de las imágenes se optimizó para hacer la R3D de regiones de la piel humana.

A partir de las imágenes reconstruidas y los resultados obtenidos con la variación de los parámetros del sistema de R3D por proyección de franjas, se determinó que a mayor ángulo de proyección y menor paso de las franjas se pueden resolver variaciones de altura más pequeñas. De esta manera, inicialmente la configuración más adecuada del sistema para el estudio de la topografía de la piel, se estableció en un ángulo de 35.95° y un paso de franjas de 4 píxeles sobre el proyector. Sin embargo, como esta investigación está enfocada a la futura construcción de un dispositivo de medida R3D portátil para la piel, se estableció un ángulo de 25.21° debido a que el video proyector debe estar ubicado cerca de la cámara. Además, se comprobó que las franjas de paso 4 proyectadas en la piel perdían contraste, por esta razón en la piel se trabajó con un paso de franjas de 8.

Como el contraste de las franjas depende de la reflectividad del objeto, para que el sistema de R3D se pudiera adaptar al color de piel de las personas sin perder resolución, se estableció un rango de niveles de gris de las franjas de manera que si el color de piel es oscura, se proyecten franjas con niveles de gris altos y si la persona es de piel blanca se utilizan los niveles más bajos.

La adaptación del sistema de R3D a la piel humana permitió obtener la resolución suficiente para detectar las variaciones de la topografía causadas por la celulitis y

así de la R3D determinar la profundidad de estas variaciones y el porcentaje de celulitis en una región.

Con la máscara de selección mejorada se pudo evitar los errores que se generan en la reconstrucción de la piel humana por presencia de vellos o manchas. Sin embargo al no tener en cuenta estas regiones en el procesamiento de las imágenes hace que haya menos región útil para tomar mediciones, es decir, en regiones de piel con demasiada población de vellos y/o con presencia de manchas muy grandes no se podrían hacer mediciones.

A partir de las pruebas realizadas con el sistema implementado de R3D por proyección de franjas, se obtuvo un error de medida promedio para la escalera de 0.008 [mm] y para la medalla de 0.0023 [mm], lo que demuestra la exactitud en la medida y valida al sistema como método de medición.

Se estimó que para la piel humana la resolución del sistema de R3D implementado está en el orden de 10 [μm] para un rango de medición de -12 [mm] a 12 [mm].

5. RECOMENDACIONES

Si se desea reconstruir un objeto con variaciones topográficas fuertes y abruptas, para reducir la influencia de los armónicos en la R3D se puede emplear otras estrategias diferentes al filtrado, ya que con el filtrado se eliminan componentes frecuenciales del objeto. Una de las estrategias utilizadas consiste en proyectar franjas con perfil cercano al sinusoidal teniendo en cuenta las funciones de transmitancia del sistema.

Dado que durante el proceso de captura de las imágenes de franjas la persona no se debe mover, para trabajos futuros se recomienda emplear un sistema que permita inmovilizar la zona a reconstruir o emplear un sistema de adquisición rápido. Estos sistemas emplean tarjetas de digitalización de imágenes conectadas a un bus PCI-E con suficiente memoria RAM para garantizar almacenamiento de imágenes a frecuencias cercanas a la frecuencia de muestreo de imágenes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hani AFM, Fitriyah H, Prakasa E, et al. In vivo 3D thickness measurement of skin lesion. *IEEE*; 2010:155–160.
- [2] Smalls LK, Lee CY, Whitestone J, et al. Quantitative model of cellulite: three-dimensional skin surface topography, biophysical characterization, and relationship to human perception. *Journal of cosmetic science*. 2005;56(2):105–20. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15868063>.
- [3] Anon. EO USB 2.0 CCD Machine Vision Cameras | Edmund Optics. Disponible en: <http://www.edmundoptics.com/imaging/cameras/usb-cameras/eo-usb-2-0-ccd-machine-vision-cameras/3049>. Consulta Febrero 26, 2012.
- [4] Anon. Aigo Discovery Box PT 6216 2GB | Aigo Latinoamérica | Pagina Oficial. Disponible en: <http://www.aigo.com.ve/productos/aigo-discovery-box-pt-6216-2gb>. Consulta Febrero 26, 2012.
- [5] Perez Z., Romero Leny. Sistema óptico de reconstrucción tridimensional para la detección de ampollas en recubrimientos. [Trabajo de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander; 2004.
- [6] Liu H, Su W-H, Reichard K, Yin S. Calibration-based phase-shifting projected fringe profilometry for accurate absolute 3D surface profile measurement. *Optics Communications*. 2003; 216(1-3):65–80.
- [7] Zappa E, Busca G. Fourier-transform profilometry calibration based on an exhaustive geometric model of the system. *Optics and Lasers in Engineering*. 2009;47(7-8):754–767.

- [8] Yang F, He X. Two-step phase-shifting fringe projection profilometry: intensity derivative approach. *Applied Optics*. 2007;46(29):7172–7178.
- [9] Gomez D. Dispositivo óptico para la reconstrucción tridimensional de la piel humana por el método de proyección de franjas. [Trabajo de grado] Popayán: Universidad del Cauca; 2008.
- [10] Meneses J, Gharbi T, Humbert P. Phase-unwrapping algorithm for images with high noise content based on a local histogram. *Applied optics*. 2005;44(7):1207–15.
- [11] Meneses J. Systeme optique pour la mesure des deformation de la voute plantaire sous charges statique. [Tesis de doctorado]. Université de Franche-Comté; 1993.
- [12] Anon. Surface Metrology Guide - Precision Devices, Inc. Available at: <http://www.predev.com/smglogin.php3>. Consulta Agosto 13, 2012.
- [13] González R., Woods R. Digital Image Processing. 3 ed. Prentice Hall PTR; 1992. 730 p. ISBN-10-0201508036.
- [14] González R., Woods R. Digital Image Processing.Using MATLAB. Prentice Hall PTR; 2003. 624 p. ISBN-10-0130085197.