



Tecnológico de Monterrey

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey

Análisis de Sistemas de Imagenología (Grupo 201 y 202)

Reporte Laboratorio #1. Muestreo

Profesor

Dr. José Gerardo Tamez Peña

Equipo Pegaso:

Daniela Alejandra Valdes Torres	A00832312
Diego De La Barreda Martínez	A01197739
Alexa María de León Durán	A01382990
Juan Luis Flores Sánchez	A01383088
Azul Sofía Moctezuma Enríquez	A01562585

30 de marzo de 2023

Laboratorio #1. Muestreo

1. Introducción

En este reporte se presentan los pasos para aplicar las frecuencias espaciales, verificar el teorema de muestreo, trabajar con la transformada de Fourier y la función de transferencia, y utilizar el interpolador SINC. El objetivo principal es comprender las frecuencias espaciales y cómo éstas se relacionan con los diferentes niveles de iluminación de una estructura, y cómo se emplea una imagen de rayos X como ejemplo para realizar las diferentes pruebas y análisis mediante el uso de MATLAB.

2. Objetivo

- Entender las frecuencias espaciales
- Verificar el teorema de muestreo
- Transformada de Fourier y Función de Transferencia
- Interpolador SINC

3. Marco Teórico

Frecuencias Espaciales

La frecuencia espacial es una característica de cualquier estructura que varía periódicamente a través de la posición espacial. Las frecuencias espaciales tratan de la descomposición y análisis cuantitativo de cualquier estímulo según sus diferentes niveles de luminancia que hay en sus partes más oscuras, brillantes y claras. Es una medida de la frecuencia con la que el componente sinusoidal de la estructura se repite por unidad de distancia. (Romero, s.f.)

Transformada de Fourier

La transformada de Fourier transforma las señales del dominio del tiempo y el dominio de frecuencia, esta herramienta es utilizada para obtener la información frecuencial de una función. La idea básica de la transformada de Fourier asociada a las ecuaciones diferenciales parciales es transformar un problema complejo en uno más fácil de resolver para luego obtener la solución del problema original como la transformada inversa de Fourier de la solución al problema. (Folland, 2009)

Teorema de Nyquist-Shanon

El teorema de muestreo de Nyquist-Shannon especifica un límite superior en el intervalo de muestreo de una señal discretizada en el dominio del tiempo de modo que la muestra contenga toda la información de frecuencia disponible de la señal. Este límite superior es $\pi/\Delta\omega$, donde ω es el ancho de banda de frecuencia angular de la señal. $\pi/\Delta\omega$ se conoce comúnmente como el intervalo de Nyquist. Una señal continua o discreta muestreada en una cuadrícula más fina que el intervalo de Nyquist puede reconstruirse perfectamente mediante interpolación, ya que el muestreo no compromete el contenido de información de la señal (Farrow et al. 2011). En adición, la frecuencia de Nyquist es la mínima frecuencia de muestreo a la que se debe someter una señal para reconocer la señal sin pérdidas o sesgos,

correspondiendo a mínimo 2 veces la frecuencia de la señal muestreada (1), donde f_N corresponde a la frecuencia de Nyquist, y f_s a la máxima frecuencia de la señal muestreada.

$$f_N > 2f_s \quad (1)$$

Interpolador SINC

La fórmula de interpolación sinc (también conocida como fórmula de interpolación de Whittaker-Shannon) es un método para construir funciones de tiempo continuo con un límite de banda a partir de secuencias de números reales. Esta técnica se puede utilizar para la reconstrucción de formas de onda analógicas muestreadas, para la inserción de puntos intermedios entre los datos originales o para el remuestreo en una nueva secuencia que tenga el espaciado y la propiedad deseados. (Shanze, 1995)

4. Metodología

4.1 Materiales

- Computadora
- MATLAB (MathWorks, Versión 2022b)
- Script (Véase Anexo 1)
- Imagen “x-rayjumbo.jpg”

4.2 Método

Frecuencias espaciales

1. Establecer el campo de visión a 501mm
2. Establecer longitud de onda
3. Establecer la fase
4. Calcular los ciclos por minuto
5. Calcular la frecuencia máxima
6. Obtener el muestreo y número de muestras
7. Generar señal sinusoidal
8. Obtener gráfica frecuencia vs milímetros
9. Obtener las dos convolución bidimensional y graficarlas

Transformada de Fourier

10. Calcular la Transformada de Fourier Discreta Rápida (TFDR)
11. Calcular vector de frecuencia
12. Graficar frecuencia vs TFDR absoluta
13. Graficar frecuencia vs TFDR absoluta desplazada al centro del arreglo
14. Obtener imagen en escala de grises de las dos transformada bidimensional desplazada al centro

Abrir la imagen

15. Abrir imagen a usar
16. Convertir datos a dobles de la primera capa

17. Normalizar los datos
18. Obtener imagen en escala de grises

Muestreo (*Sampling*)

19. Reducir tamaño de la imagen a escala 0.1 por el método Nearest Neighbor
20. Obtener imagen en escala de grises

Transformada de Fourier

21. Calcular la Transformada Rápida de Fourier bidimensional de los datos de normalización de la imagen abierta
22. Mostrar imagen en escala de grises absoluta
23. Mostrar imagen en escala logarítmica
24. Mostrar imagen en escala logarítmica con desplazamiento al centro

Filtro paso bajo

25. Hacer filtro paso bajo gaussiano rotacionalmente simétrico con tamaño 64 y desviación estándar sigma de 5
26. Obtener tamaño de la matriz de datos normalizados
27. Hacer la Transformada de Fourier Rápida bidimensional con el filtro paso bajo
28. Obtener imagen en escala de grises del desplazamiento al centro absoluto de la transformada de fourier
29. Graficar en 3D la transformada de fourier rápida bidimensional con desplazamiento al centro absoluto
30. Hacer la convolución bidimensional de la matriz de datos normalizados y el paso bajo
31. Obtener imagen en escala de grises la convolución y de la imagen reducida
32. Reducir tamaño de la imagen a escala 0.1 por el método Nearest Neighbor de la convolución bidimensional del paso bajo y matriz normalizada
33. Obtener imagen en escala de grises de la imagen reducida
34. Aumentar a escala 10 la imagen reducida por el método Nearest Neighbor
35. Obtener imagen en escala de grises de imagen aumentada

Interpolación SINC

36. Calcular la transformada rápida de fourier bidimensional de la imagen reducida
37. Calcular la transformada de fourier bidimensional inversa absoluta (500x500) aplicada al desplazamiento de la transformada de fourier calculada anteriormente
38. Calcular la transformada de fourier bidimensional inversa absoluta (1024x1024) aplicada al desplazamiento de la transformada de fourier calculada anteriormente
39. Obtener imagen en escala de grises de ambas transformadas

Repetición de experimento

40. Repetir proceso cambiando longitud de onda a 50mm, 25mm, 10mm, 5mm, 2.5mm, 1.9mm, 1.05mm, 1.01mm y 1.0mm
41. Con la longitud de onda de 1.0mm cambiar la fase a 0.0, 0.1 y 0.2

5. Resultados y Discusión

Análisis a Profundidad de una Longitud de Onda de 5 mm

Para el análisis a profundidad se decidió tomar en cuenta el experimento 4, el cual consta de aplicar una longitud de onda de 5mm, para ello se procede a analizar cada una de las 21 imágenes que representan las transformaciones realizadas a la imagen (Nota: con el fin de cumplir los requisitos planteados del reporte, en la Figura 1 se incluyen todas las figuras creadas para el análisis de la longitud de onda de 5 mm, no obstante, se incluye en cada una el anexo donde se puede consultar la imagen con mayor resolución):

- **Figura 1.1** Representación gráfica de las ondas sinusoidales que varían a lo largo del eje x, donde la amplitud de onda cambia en función de la posición X. (**Anexo 1.1**)
- **Figura 1.2** Imagen bidimensional que se generó a partir de la función sinusoidal de la figura 2.1. Se genera convulsionando la función sinusoidal con una línea constante en Y. (**Anexo 1.2**)
- **Figura 1.3** Convolución de la función sinusoidal con una línea constante en X. (**Anexo 1.3**)
- **Figura 1.4** Espectro de amplitud de la transformada de Fourier de la función sinusoidal unidimensional. En el eje x se encuentra la frecuencia espacial en ciclos por milímetro, y en el eje Y la magnitud de la amplitud de cada componente de frecuencia. La figura 1.4 se puede contemplar como errónea, ya que no hay una aplicación de la transformada de Fourier, es decir, no hay una descomposición en los componentes de frecuencia, lo que nos permitiría identificar los patrones, o características específicas de la imagen que estamos analizando, ya que la presencia de altas frecuencias como lo es en la figura 4 puede indicar la transición entre las regiones de niveles de gris significativamente distintos y los detalles que la figura representa. Al realizar una transformación de Fourier sobre una imagen, se convierte la información de la imagen en una representación en el dominio de la frecuencia. (**Anexo 1.4**)
- **Figura 1.5** Espectro de amplitud de la transformada de Fourier centrado en cero de la función sinusoidal unidimensional. En el eje X se encuentra la frecuencia espacial en ciclos por milímetro, y en el eje Y encuentra la magnitud de la amplitud de cada componente de frecuencia. (**Anexo 1.5**)
- **Figura 1.6** Muestra la transformada de Fourier bidimensional centrada en cero de la imagen generada a partir de la convolución de la función sinusoidal unidimensional con una línea constante en y. Esta transformada de Fourier muestra cómo la imagen se compone de diferentes componentes de frecuencia espacial en dos dimensiones. (**Anexo 1.6**)
- **Figura 1.7** Transformada de Fourier bidimensional centrada en cero de la imagen generada a partir de la convolución de la función sinusoidal unidimensional con una línea constante en x. Al igual que la figura 1.6, esta transformada de Fourier muestra cómo la imagen se compone de diferentes componentes de frecuencia espacial en dos dimensiones, pero en este caso las componentes están orientadas en una dirección diferente debido a la orientación de la línea constante utilizada en la convolución. (**Anexo 1.7**)

- **Figura 1.8** La figura muestra una imagen de rayos X en escala de grises que se escala para que su intensidad máxima sea 1, donde las regiones más oscuras indican una menor absorción de rayos X por parte del tejido del cuerpo, y las regiones más claras indican una mayor absorción. (**Anexo 1.8**)
- **Figura 1.9** La siguiente figura muestra la imagen redimensionada "small" utilizando la función "imshow" y se le asigna un título 'small'. La imagen resultante es una versión en miniatura de la imagen original a una escala al 10%, con una resolución mucho menor y menos detalles visibles. (**Anexo 1.9**)
- **Figura 1.10.** La figura muestra una imagen en escala de grises del absoluto de la matriz de datos normalizados de la imagen de rayos X. (**Anexo 1.10**)
- **Figura 1.11.** Imagen en escala logarítmica de la figura 2.10, en esta figura se puede observar que los extremos representan una baja frecuencia y el centro donde oscurece son las altas frecuencias de la imagen, es por ello que las esquinas son más brillantes. (**Anexo 1.11**)
- **Figura 1.12** Se juntan las bajas frecuencias al centro de la imagen creando un efecto gradual hacia las altas frecuencias, esto se obtiene al intercambiar los cuadrantes 1-3 y 2-4. (**Anexo 1.12**)
- **Figura 1.13** Transformada de Fourier del filtro paso bajo en el dominio de la frecuencia, donde los valores más brillantes representan las frecuencias más bajas. Se utiliza la función fftshift para reorganizar los valores de la matriz de Fourier de tal manera que el componente de frecuencia cero se encuentre en el centro de la imagen. (**Anexo 1.13**)
- **Figura 1.14** Demostración tridimensional del filtro en el dominio de la frecuencia. Los valores más brillantes representan las frecuencias más bajas, y el eje z representa la amplitud de la transformada de Fourier en cada punto de frecuencia. (**Anexo 1.14**)
- **Figura 1.15** Imagen que se arroja luego de aplicar filtro de paso bajo, lo que provoca una convolución bidimensional entre la imagen original y el filtro paso bajo. La función de la convolución es suavizar la imagen, atenuando las altas frecuencias y manteniendo las bajas frecuencias, lo que resulta en una imagen borrosa. (**Anexo 1.15**)
- **Figura 1.16** Imagen con reducción de tamaño a la imagen suavizada provocando un menor detallamiento. (**Anexo 1.16**)
- **Figura 1.17** Muestra la imagen resultante después de aplicar aumento de tamaño a la imagen reducida en la figura 2.16, provocando una mayor resolución y tamaño. (**Anexo 1.17**)
- **Figura 1.18** Imagen original después de aplicar un aumento de tamaño. (**Anexo 1.18**)
- **Figura 1.19** La imagen se somete a un filtro e interpolación. (**Anexo 1.19**)
- **Figura 1.20** Muestra del resultado al aplicar una operación de aumento en el dominio de Fourier utilizando interpolación de sincronización a la imagen que fué previamente suavizada y reducida. (**Anexo 1.20**)
- **Figura 1.21.** Muestra el resultado al aplicar aumento con interpolación de sincronización a la imagen reducida con transformada de Fourier. (**Anexo 1.21**)

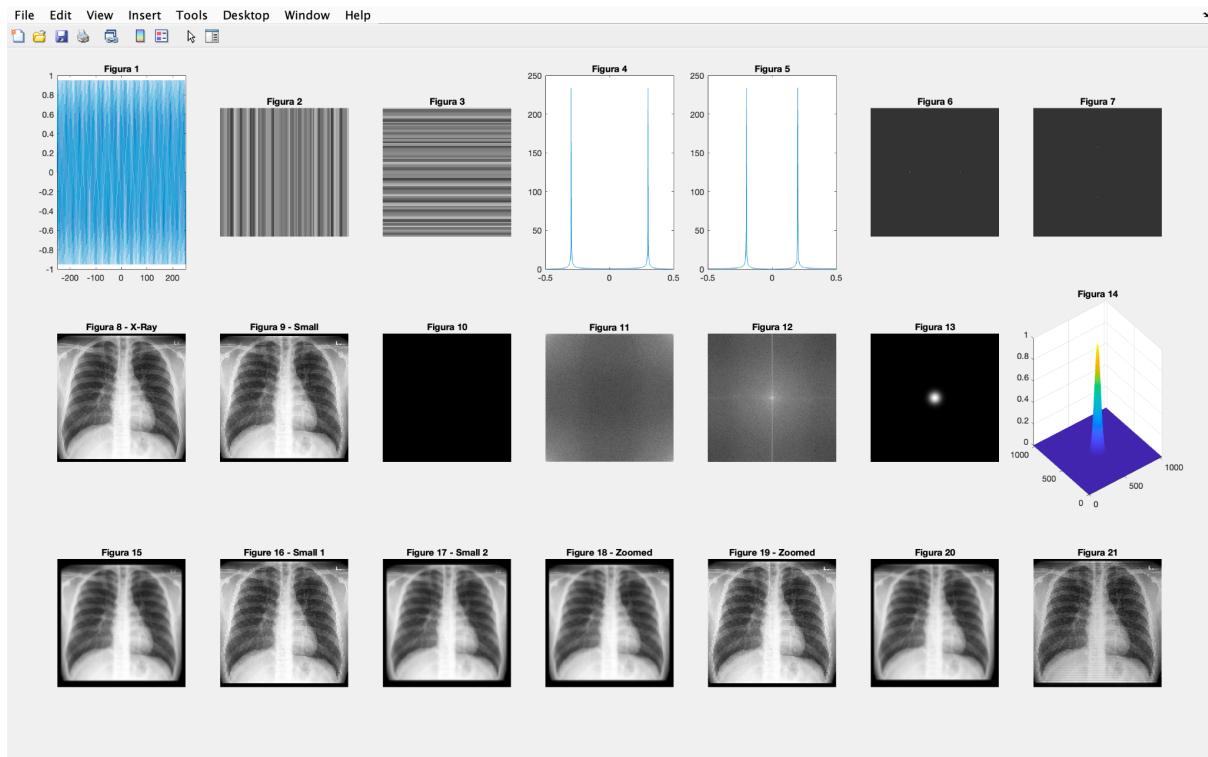


Figura 1. Imágenes en conjunto con Longitud de Onda de 5 mm.

En cuanto a la frecuencia espacial la cuál se determina gracias a la transformada de Fourier que se está implementando dentro del código, donde se nos arroja un valor de 0.200 (**Anexo 2.22**) el cual se representa en la variable creada con el nombre *spatialfrequency* en la cual se aplica la siguiente fórmula (1):

$$Frecuencia Espacial (SF) = \frac{1}{Longitud\ de\ Onda} = \frac{1}{5.00} = 0.2000 \quad (1)$$

La frecuencia espacial refiere a la cantidad de variación de los niveles de gris en la imagen en función de la posición espacial la cual se puede describir en términos de dos componentes principales; frecuencia baja y frecuencia alta.

Análisis Comparativa con Diversas Longitudes de Onda

Una vez concluido el proceso de repetición del experimento al cambiar la longitud de onda (50mm, 25mm, 10mm, 5mm, 2.5mm, 1.9mm, 1.05mm, 1.01mm y 1.0mm) y la fase (0.0, 0.1 y 0.2) en el caso de la longitud de onda en 1.0 mm, se obtuvieron distintas imágenes las cuales fueron analizadas según su función, todas estas se encuentran en el apartado **Anexos 3.1 - 3.11**. Es importante establecer que el sistema no fue estable con una longitud de onda como se puede observar en la Figura 1 de los Anexos 3.9 - 3.11. En adición, se aprecia que la longitud de onda establecida impacta directamente en la separación de los píxeles, la fidelidad de la imagen y la cantidad de artefactos percibidos. En cuanto al cambio de fase en la longitud de onda de 1 mm, se visualiza un cambio en la distribución frecuencial, como se observa en las figuras 1, 4 y 5 de cada una de las pruebas.

6. Conclusiones

Azul Sofía Moctezuma Enriquez: Gracias a la práctica realizada, pudimos confirmar la importancia de los conceptos que se utilizaron, es decir, la transformada de Fourier la cual utilizamos para analizar la distribución de frecuencias en la imagen de rayos x proporcionada en clase, lo que puede revelar detalles ocultos que no son visibles a simple vista. El sampleo adecuado nos garantiza la captura de toda la información de la imagen para evitar la pérdida de detalles importantes, mientras que el filtro de paso bajo fue útil para eliminar los ruidos existentes y las altas frecuencias no deseadas, por último la interpolación SINC se utilizó para mejorar la resolución y reducir los artefactos en la imagen.

Para realizar este proceso fué utilizado el código de MATLAB proporcionado en clase, el cual nos permite realizar una serie de operaciones generando señales sinusoidales en el dominio espacial, realizando la transformada de Fourier para analizar el contenido frecuencial, posteriormente se ejecutan operaciones de remuestreo, aplicación de filtros y finalmente la interpolación SINC para suavizar la imagen.

Como conclusión creo que las técnicas utilizadas son fundamentales para el análisis de las imágenes Rayos X, ya que nos permiten obtener información detallada sobre la estructura interna de los objetos examinados y mejorar la calidad de la imagen nos facilita la interpretación de esta.

Diego Alejandro De la Barreda Martínez: En la práctica aplicamos conceptos relacionados a frecuencias de imágenes y señales. Los principales teoremas usados fueron de ayuda en entender el proceso hecho en las imágenes. Se utilizó una imagen de rayos x ya proporcionada donde utilizamos filtros y transformaciones de fourier para poder cambiar la resolución de los píxeles en la imagen. A través del código de MATLAB y las diferentes secciones indicando lo que se tenía que hacer fuimos capaces de entender el efecto que tenía en la imagen. Con la función interpolada sinc y aplicando un zoom a la imagen pudimos suavizar y apreciar más de cerca la imagen ya filtrada para poder observar el resultado final con la mejor resolución de imagen sin desperdiciar información y poder tener un mejor diagnóstico. Este proceso ayuda mucho a amplificar las imágenes sin perder información y sin sacrificar la calidad de las imágenes en los estudios.

Alexa María de León Durán: En este reporte se describió la metodología adecuada para aplicar estos conceptos de las frecuencias espaciales, la transformada de Fourier, el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon y el interpolador a la imagen de rayos X proporcionada utilizando el software MATLAB, se realizaron las modificaciones sugeridas al código proporcionado para obtener la Transformada de Fourier, reducir el tamaño de la imagen, aplicar un filtro, entre otras funciones. Una vez que se aplicaron estos filtros a la imagen pudimos comparar los resultados de cada una de las muestras y observar sus diferencias para poder identificar cual es la opción que nos brinda una mejor calidad en la imagen, esto desacuerdo a la característica de la imagen que se quiera analizar.

Juan Luis Flores Sánchez: Con base en la práctica realizada, fue posible reforzar y poner en práctica los conocimientos teóricos y prácticos de sistemas de obtención y transformación de

imágenes, relacionándolos con tópicos como frecuencias espaciales, la Transformada de Fourier, filtros, reducción, ampliación, interpolación y suavizado de las imágenes. De esta manera, utilizando un ejemplo de Rayos X, fue posible comprender y dimensionar el procesamiento de las imágenes y lo necesario para obtener una excelente representación de las mismas, aunque se le hayan aplicado diversas modificaciones que pongan en riesgo su calidad, definición y que por lo tanto, puedan representar un mayor nivel de incertidumbre al momento de diagnosticar enfermedades. Para ello, fue necesario la utilización de herramientas computacionales como MATLAB, así como un claro entendimiento de sus comandos, funciones y el orden de aplicación de las mismas, puesto que en este caso, su orden puede representar un producto diferente.

Daniela Alejandra Valdes Torres: En esta práctica para comprender las frecuencias de imágenes y las señales que surgen de estas. Con ayuda de el software de MATLAB se pudo contemplar cómo es que se comportan las señales y con las funciones como transformada de fourier determinar cuál es la información en dominio de frecuencia, además de que podemos observar en las figuras como se presenta magnitud en cada componente, los filtros que se aplican a las señales, todas estas modificaciones en las que pudimos de igual forma mejorar la calidad de las imágenes con respecto a los píxeles, las dimensiones que tiene cada una. Con la convolución de las funciones unidimensionales se podía observar cómo es que la imagen está compuesta por diferentes componentes de frecuencia espacial, la interpretación de cómo es que las frecuencias bajas tienen valores más brillantes y viceversa, los vectores que se generaron a partir de las muestras aplicando transformada de fourier donde se calcula el vector de frecuencia y a partir de esto se pudo observar la escala de colores que se mostraron en las imágenes en escala.

7. Referencias

- [1]. Farrow, C. L., Shaw, M., Kim, H., Juhás, P., & Billinge, S. J. L. (2011). *Nyquist-Shannon sampling theorem applied to refinements of the atomic pair distribution function*. *Physical Review B*, 84(13). doi:10.1103/physrevb.84.134105
- [2]. Folland, G. (2009). *Fourier Analysis and Its Applications (Pure and Applied Undergraduate Texts)*. American Mathematical Society.
- [3]. Medina, A. R. Frecuencia espacial visual y limitaciones en la capacidad de procesamiento: I. Revisión de la evidencia en estudios de. *Psiquis*, 79, 88.
- [4]. Schanze, T. (1995). *Sinc interpolation of discrete periodic signals*. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 43(6), 1502–1503. doi:10.1109/78.388863

8. Anexos

Anexo 1. Script de MATLAB (“Resampling.m”)

```
%% BI2007B Análisis de Sistemas de Imagenología
%% Equipo Pegaso

%% Frecuencias Espaciales
FOV = 501; % Campo de Visión en Milímetros
longituddeOnda = 5.0; % Longitud de Onda en Milímetros
fase = 0.0; % Fase de 0
spatialfrequency = 1.0 / longituddeOnda; % Ciclos por Milímetros
maxfrquency = 0.5 / FOV; % Frecuencia Máxima calculada diviendo 0.5 entre el Campo de Visión
sinesampling = linspace(-(FOV - 1) / 2,(FOV - 1) / 2,FOV); % Muestreo de con Paso de 1 Milímetro
nsamples = size(sinesampling); % Obtener el número de muestras mediante el tamaño de sinesampling
yline = ones(nsamples); % Generar un vector de unos de tamaño nsamples
sineline = sin(2 * pi * (spatialfrequency * sinesampling + fase)); % Genera la señal sinusoidal con los parámetros
calculados previamente
figure(1)
plot(sinesampling,sineline); % Gráfica Frecuencia vs. Milímetros
figure(2);
xsineimage = conv2(sineline,yline'); % Convolución bidimensional de sineline y yline transpuesta
imshow(xsineimage,[]); % Muestra xsineimage en escala de grises, escalando la visualización en función del intervalo
de valores
figure(3);
ysineimage = conv2(yline,sineline'); % Convolución bidimensional de yline y sineline transpuesta
imshow(ysineimage,[]); % Muestra ysineimage en escala de grises, escalando la visualización en función del intervalo
de valores

%% Tranformadas de Fourier
SINELINE = fft(sineline); % Calculo de la Transformada de Fourier Discreta Rápida (TFDR)
figure(1)
freq = linspace(-1000 * maxfrquency / 2,1000 * maxfrquency / 2,FOV); % Cálculo de Vector de Frecuencia
plot(freq,abs(SINELINE)) % Gráfica Frecuencia vs TFDR Absoluta de Sineline
figure(2)
```

```

plot(freq,fftshift(abs(SINELINE))) % Gráfica de Frecuencia vs TFDR Absoluta de Sineline desplazada al centro del
arreglo
figure(3)
imshow(fftshift(fft2(xsineimage)),[]) % Imagen en Escala de Grises de la Transformada Bidimensional Desplazada al
Centro de xsineimage
figure(4)
imshow(fftshift(fft2(ysineimage)),[]) % Imagen en Escala de Grises de la Transformada Bidimensional Desplazada al
Centro de ysineimage

%% Resampling, 2022

%% Open Image
f = imread("x-rayjumbo.jpg"); % Lectura de la imagen x-rayjumbo.jpg
f = double(f(:,:,1)); % Conversión de datos uint8 a double de la la capa obtenida del paso anterior
f = f / max(max(f)); % Proceso de normalización de los datos anteriores
figure(1)
imshow(f) % Imagen en escala de grises de los datos calculados
title('xray')

%% Sampling
small = imresize(f,0.1,"nearest"); % Reducción de tamaño de la imagen al una escala de 0.1 mediante el método de
interpolación por el vecino más cercano
figure(2)
imshow(small) % Imagen en escala de grises de la imagen reducida
title('small')

%% Fourier transform
F = fft2(f); % Cálculo de la Transformada Rápida de Fourier bidimensional de los datos de la matriz f
figure(2)
imshow(abs(F),[]) % Imagen en escala de grises del absoluto de la matrzi F calculada previamente
figure(3)
imshow(log(abs(F)),[]) % Imagen Previa en Escala Logarítmica
%imshow((abs(F)),[])
figure(4)

```

```

imshow(fftshift(log(abs(F))),[]) % Imagen Previa con Desplazamiento al Centro
%imshow(fftshift((abs(F))),[])

%% Low pass filter
lowpass = fspecial('gaussian',64,5); % Filtro Pasobajo Gaussiano Rotacionalmente Simétrico de tamaño 64 y desviación
estándar sigma de 5
sz = size(f); % Tamaño de la matriz f
LOW = fft2(lowpass,sz(1),sz(2)); % Transformada de Fourier Rápida Bidimensional con base en el Filtro Pasobajo con
dimensiones de la matriz f
figure(2)
%imshow(fftshift(log(abs(LOW))),[])
imshow(fftshift((abs(LOW))),[]) % Imagen en Escala de Grises del Desplazamiento al centro Absoluto de la
Transformada de Fourier Rápida Bidimensional Calculada Previamente
figure(3)
mesh(fftshift(abs(LOW))) % Gráfica 3D del Desplazamiento al centro Absoluto de la Transformada de Fourier Rápida
Bidimensional Calculada Previamente

g = conv2(f,lowpass); % Convolución Bidimensional de f y lowpass
figure(2)
imshow(g,[]) % Imagen en Escala de Grises de dicha Convolución
figure(3)
imshow(small) % Imagen en Escala de Grises de la Imagen Reducida
title('small 1')
figure(4)
smallg = imresize(g,0.1,"nearest"); % Imagen Reducida a la escala 0.1 mediante el método de vecinos más cercanos de
la convolución bidimensional de f y lowpass
imshow(smallg) % Imagen en Escala de Grises de la Imagen Reducida g
title('small 2')
figure(5)
zoomg = imresize(smallg,10,"nearest"); % Imagen Aumentada a la escala 10 mediante el método de vecinos más cercanos
de la imagen reducida g
imshow(zoomg) % Imagen en Escala de Grises de la Imagen Aumentada g
title('zoomed')
figure(6)

```

```

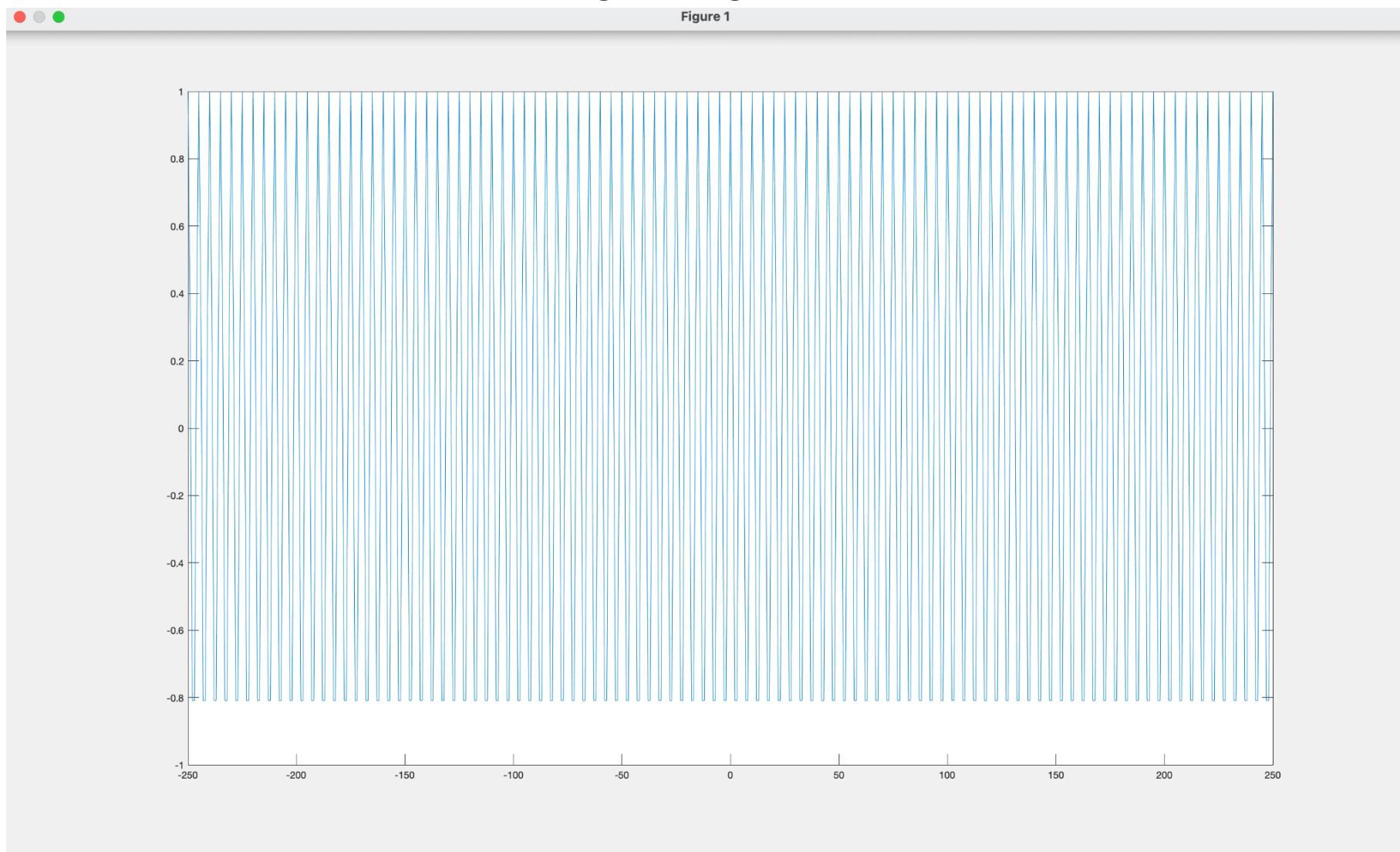
zoomg = imresize(small,10,"nearest"); % Imagen Aumentada a la Escala 10 mediante el método de vecinos más cercanos
de la imagen reducida
imshow(zoomg) % Imagen en Escala de Grises de la Imagen Aumentada
title('zoomed')

%% Zoom in fourier (SINC interpolation)
SMALLG = fft2(smallg); % Transformada de Fourier Rápida bidimensional de la imagen reducida g
%zomg = abs(ifft2(fftshift(SMALLG),sz(1),sz(2)));
zomg = abs(ifft2(fftshift(SMALLG),500,500)); % Transformada de Fourier bidimensional inversa absoluta (500x500)
aplicada al desplazamiento de la Transformada de Fourier Previamente Calculada
figure(6)
imshow(zomg,[]) % Imagen en Escala de Grises de SMALLG

%% Zoom in fourier (SINC interpolation)
SMALLG = fft2(small); % Transformada de Fourier Rápida bidimensional de la imagen reducida g
zomg = abs(ifft2(fftshift(SMALLG),sz(1),sz(2))); % Transformada de Fourier bidimensional inversa absoluta
(1024x1024) aplicada al desplazamiento de la Transformada de Fourier Previamente Calculada
%zomg = abs(ifft2(fftshift(SMALLG),2000,2000));
figure(7)
imshow(zomg,[]) % Imagen en Escala de Grises de SMALLG

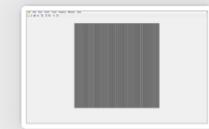
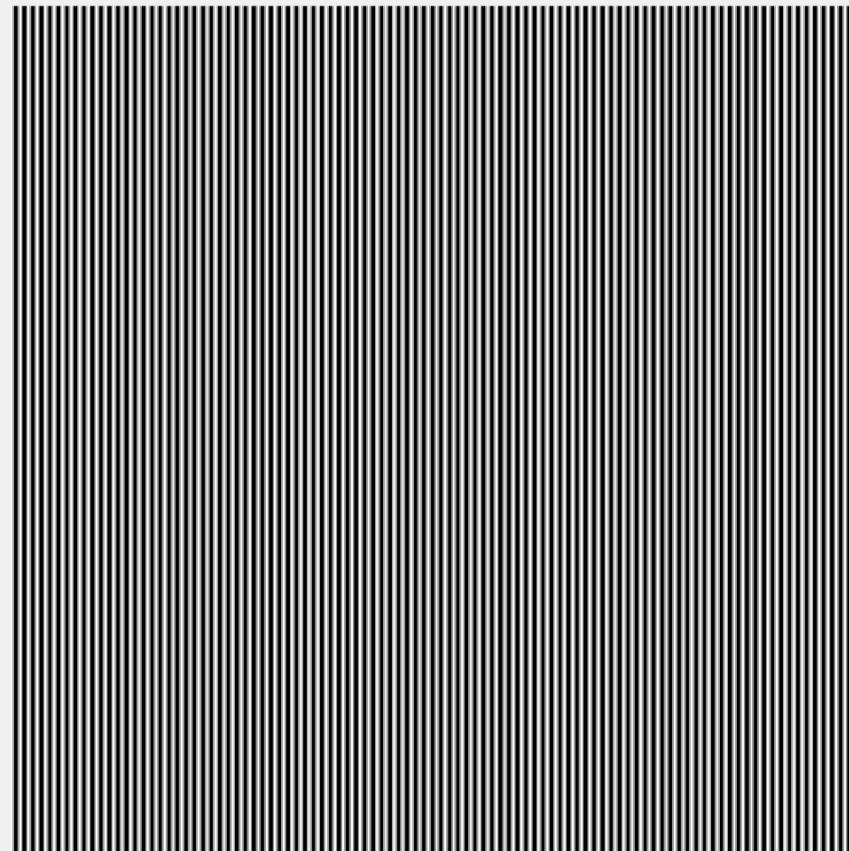
```

Anexo 2.1 Figura 1 - Longitud de Onda de 5 mm



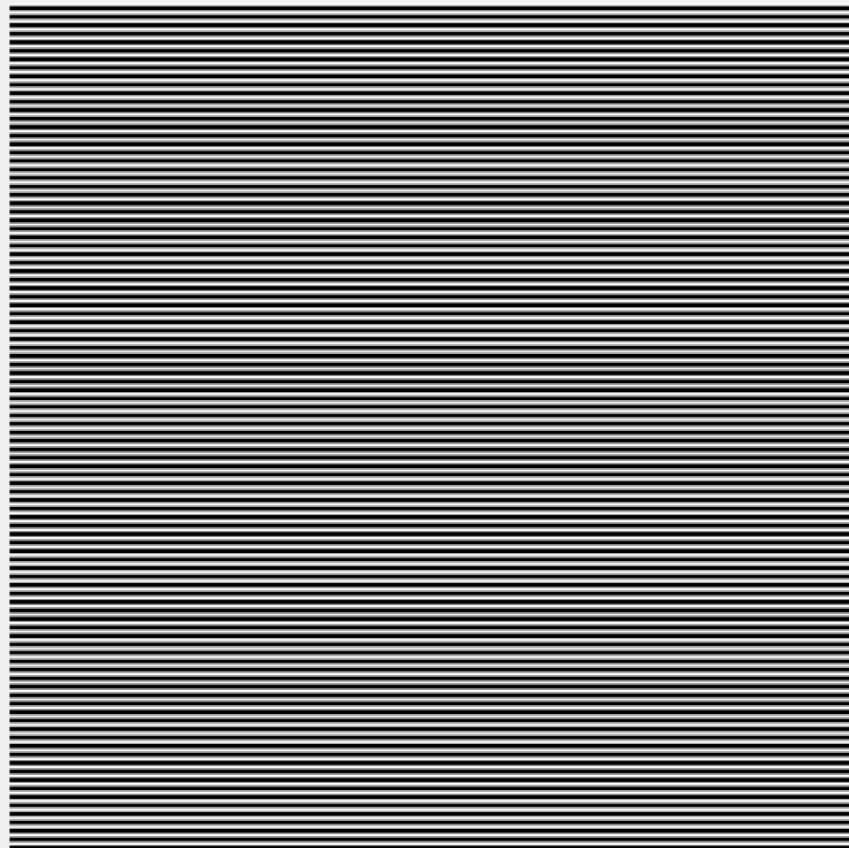
Anexo 2.2 Figura 2 - Longitud de Onda de 5 mm

Figure 2

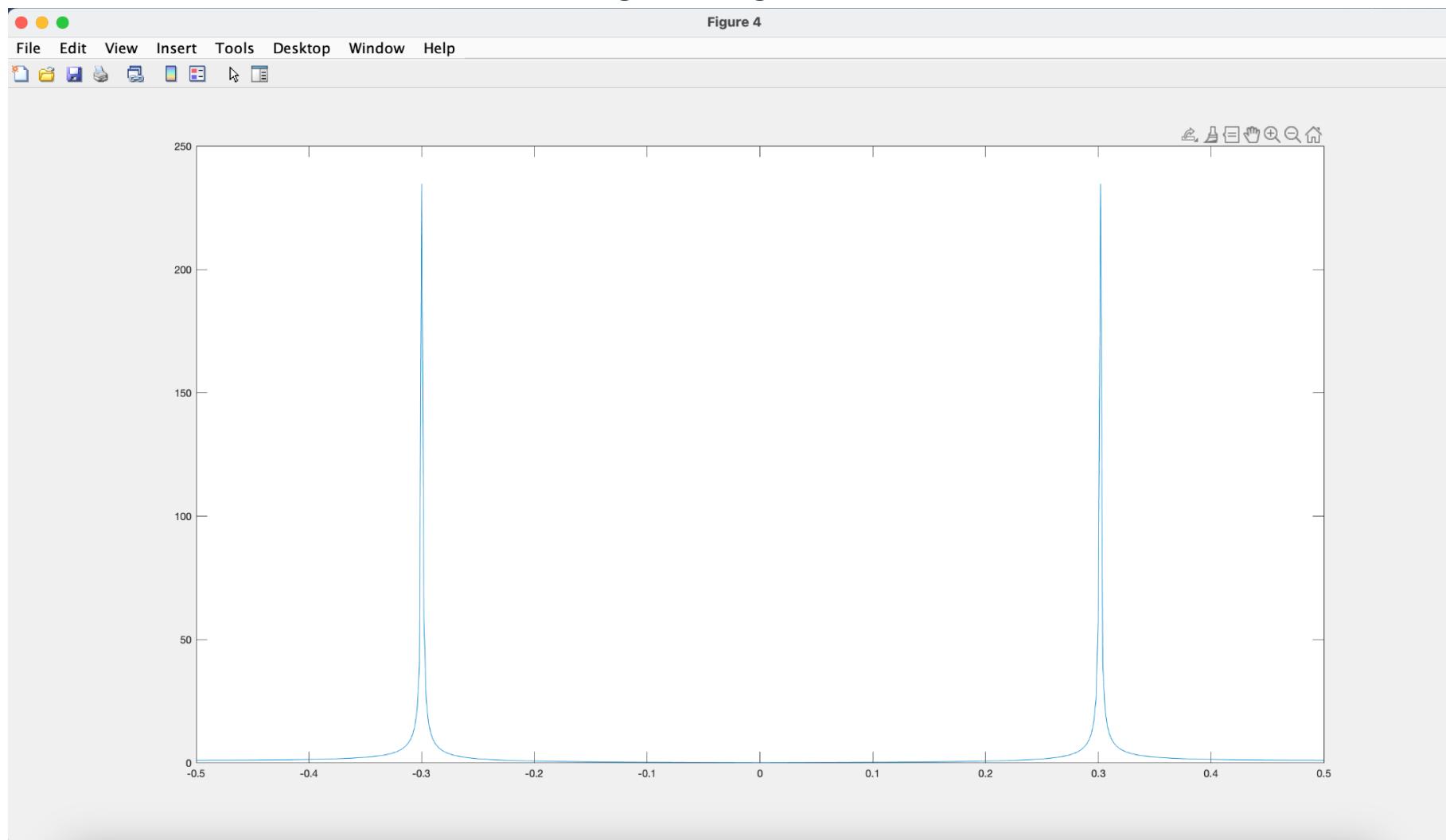


Anexo 2.3 Figura 3 - Longitud de Onda de 5 mm

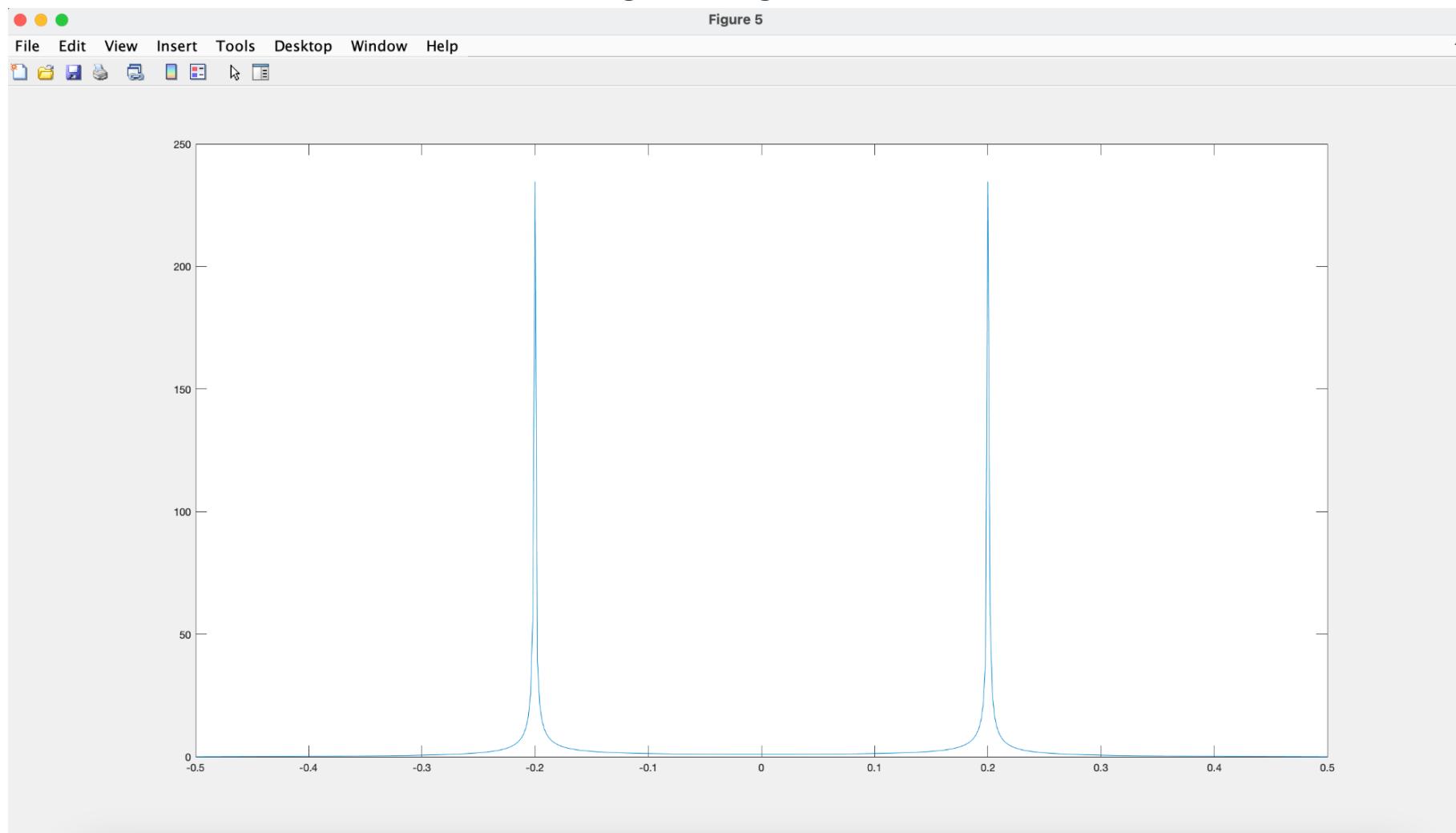
Figure 3



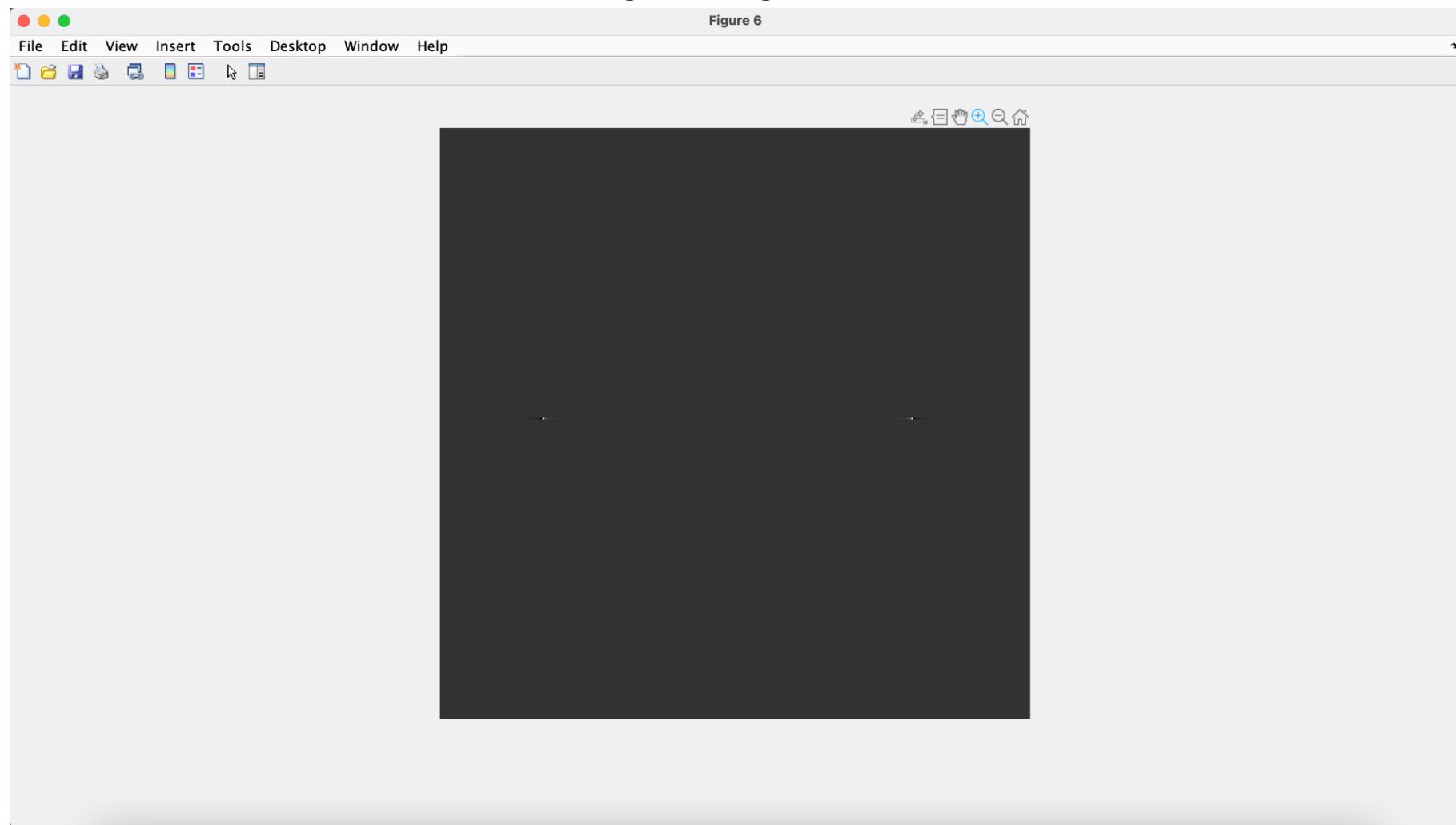
Anexo 2.4 Figura 4 - Longitud de Onda de 5 mm



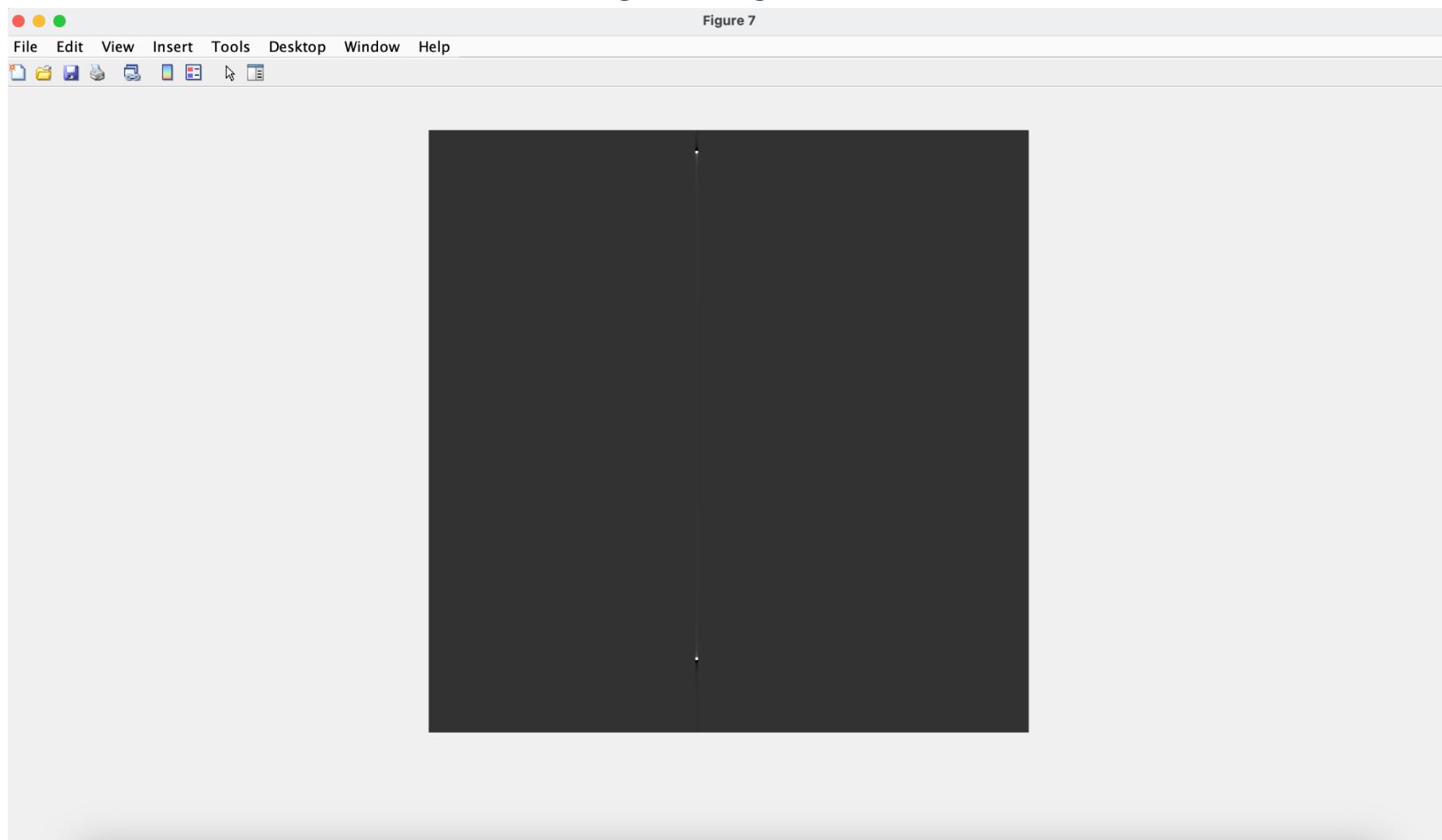
Anexo 2.5 Figura 5 - Longitud de Onda de 5 mm



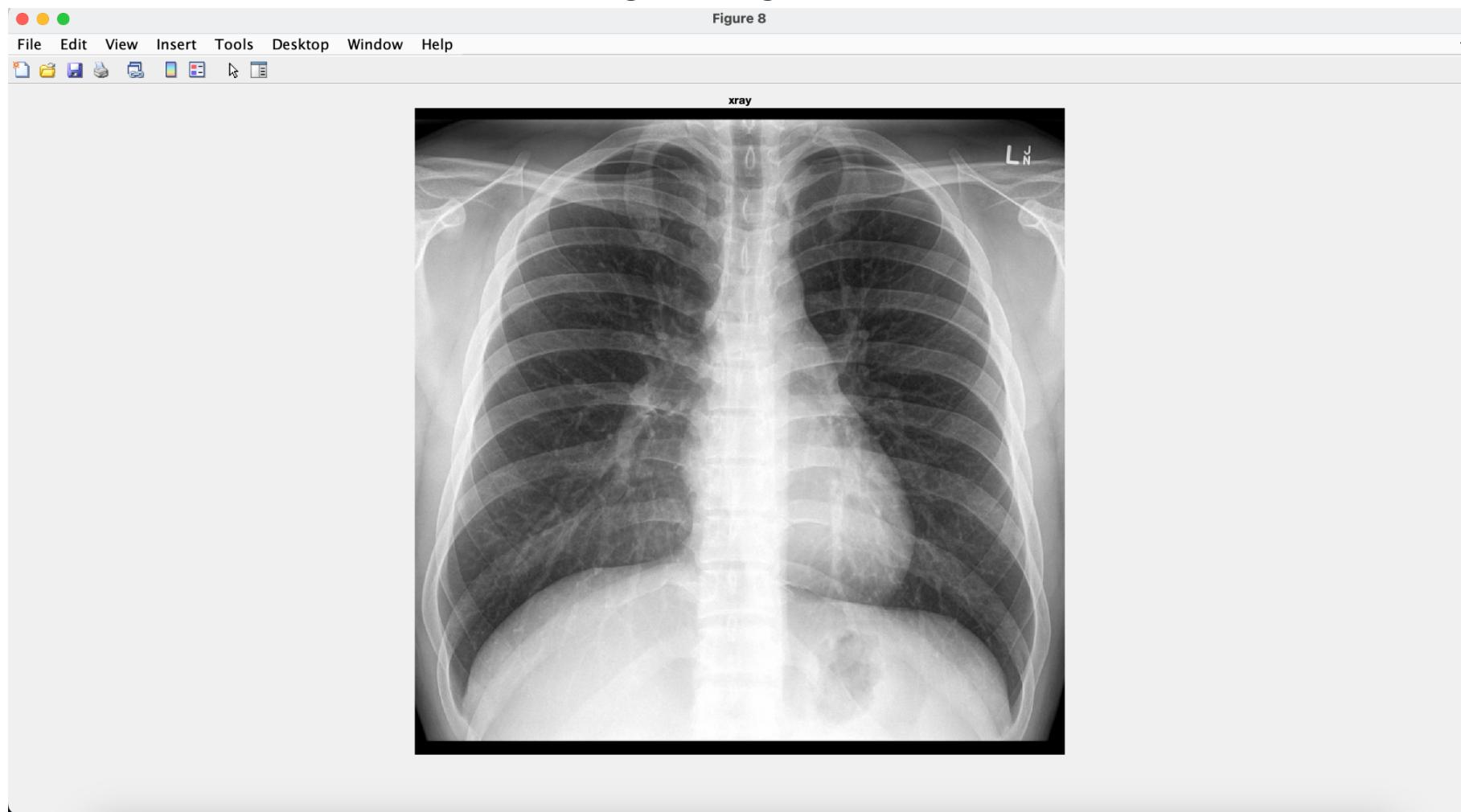
Anexo 2.6 Figura 6 - Longitud de Onda de 5 mm



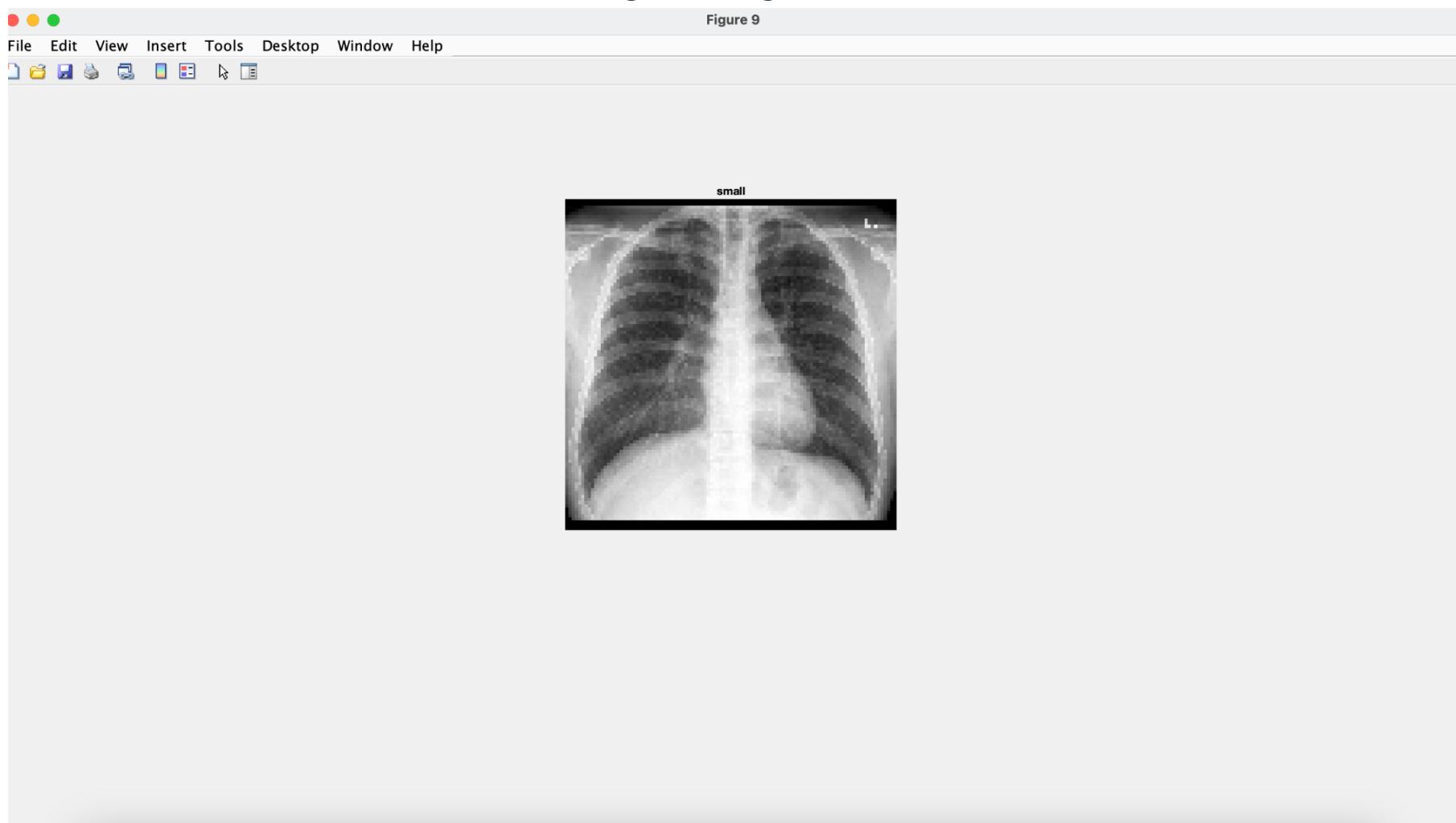
Anexo 2.7 Figura 7 - Longitud de Onda de 5 mm



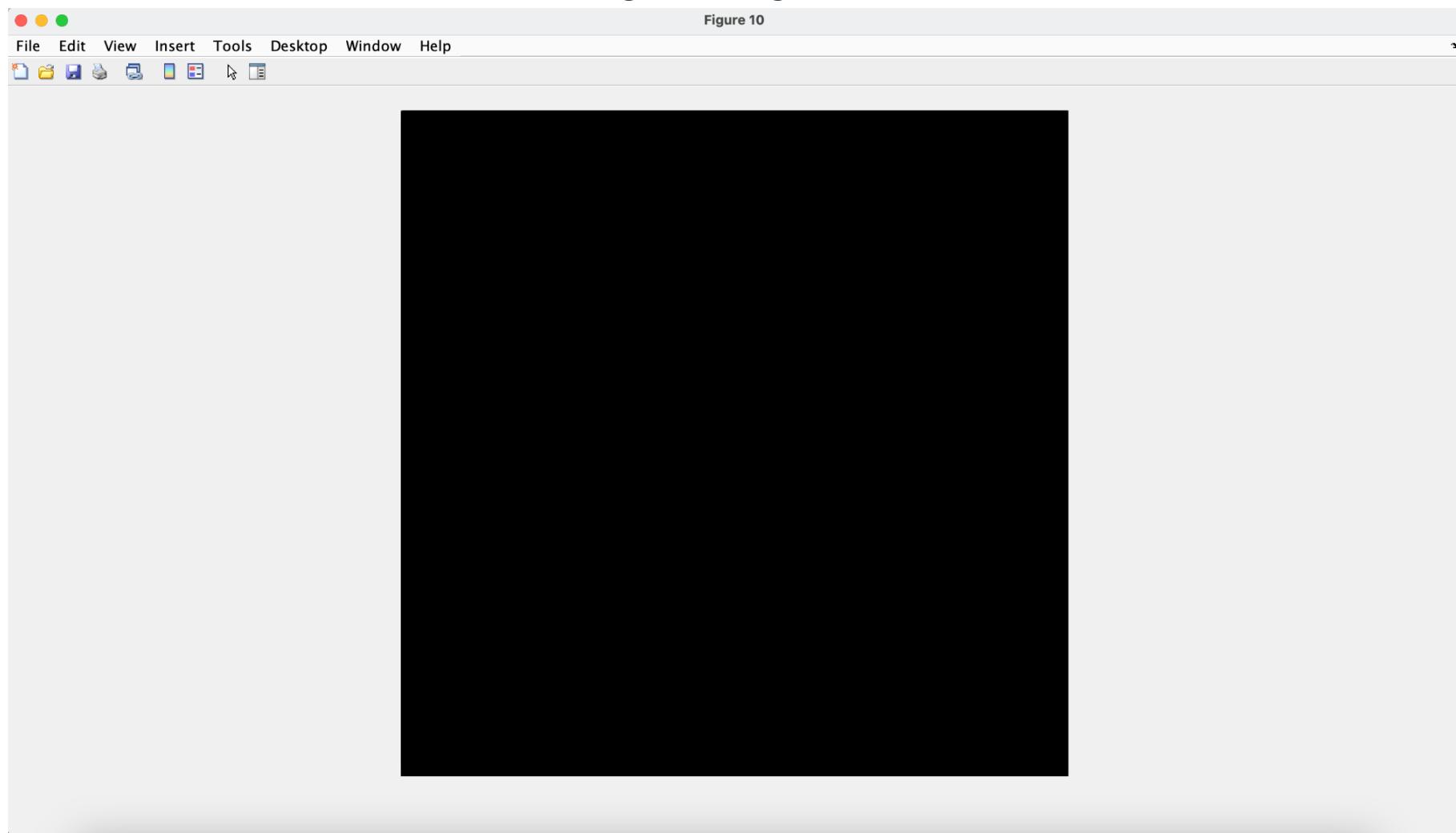
Anexo 2.8 Figura 8 - Longitud de Onda de 5 mm



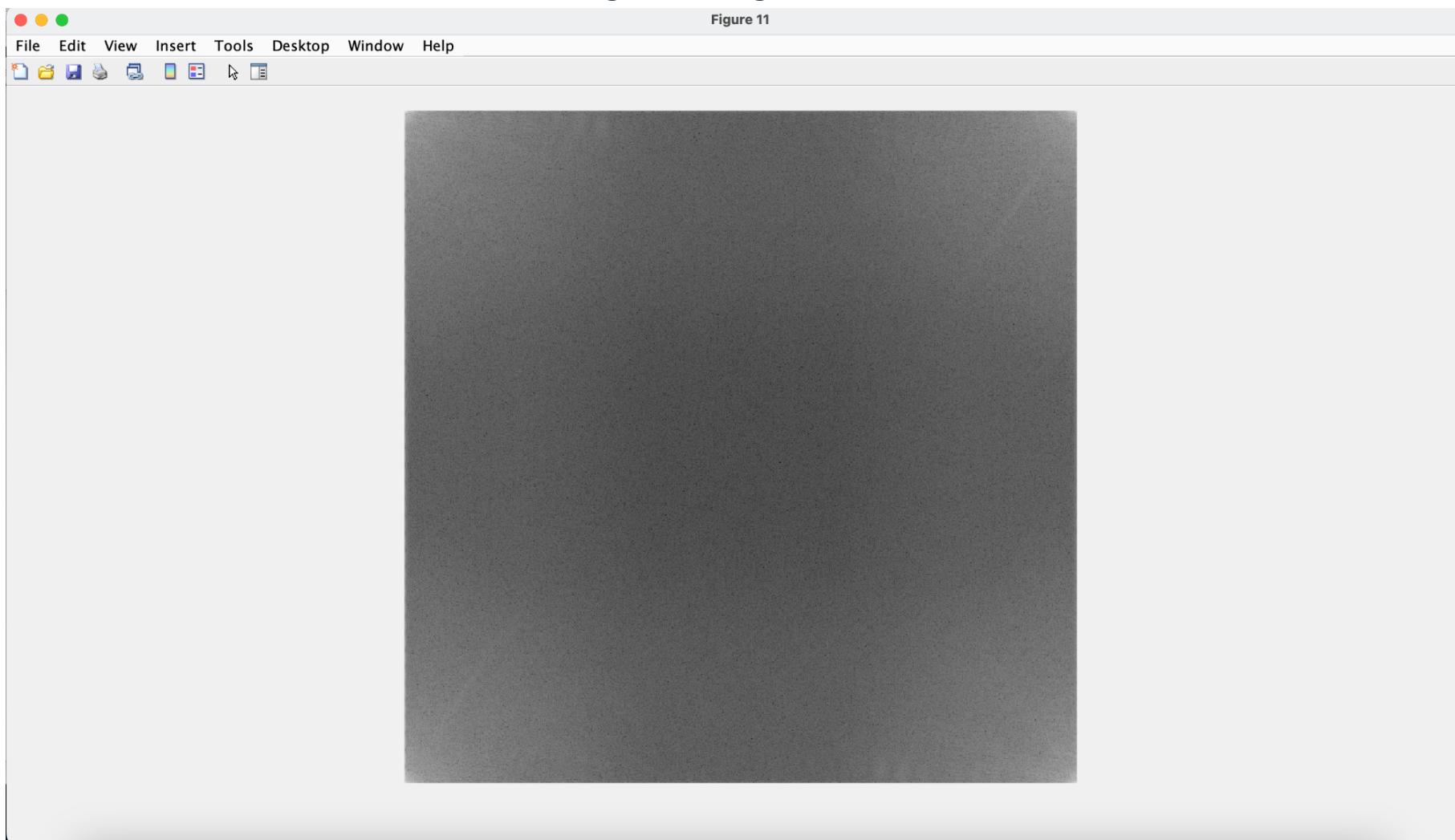
Anexo 2.9 Figura 9 - Longitud de Onda de 5 mm



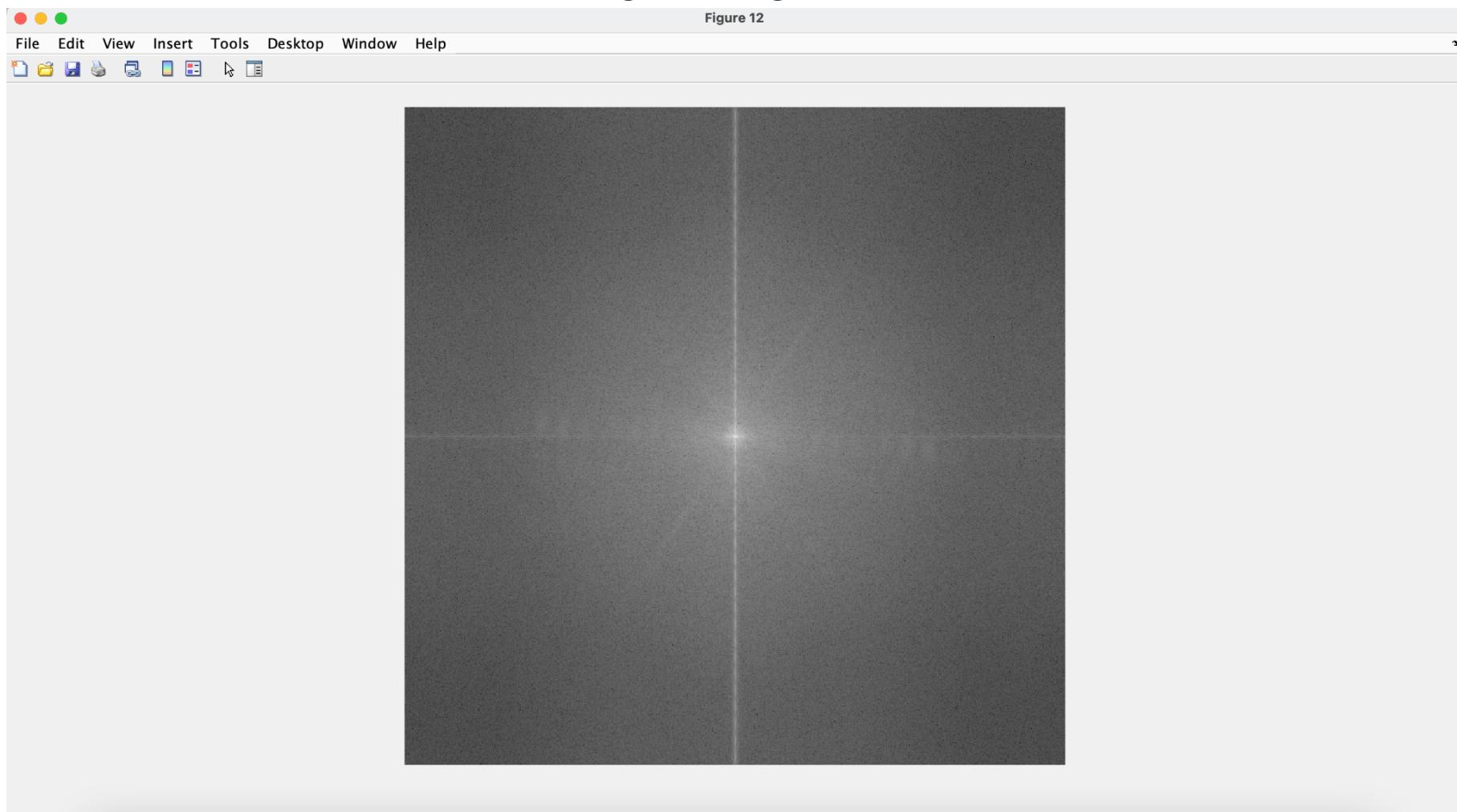
Anexo 2.10 Figura 10 - Longitud de Onda de 5 mm



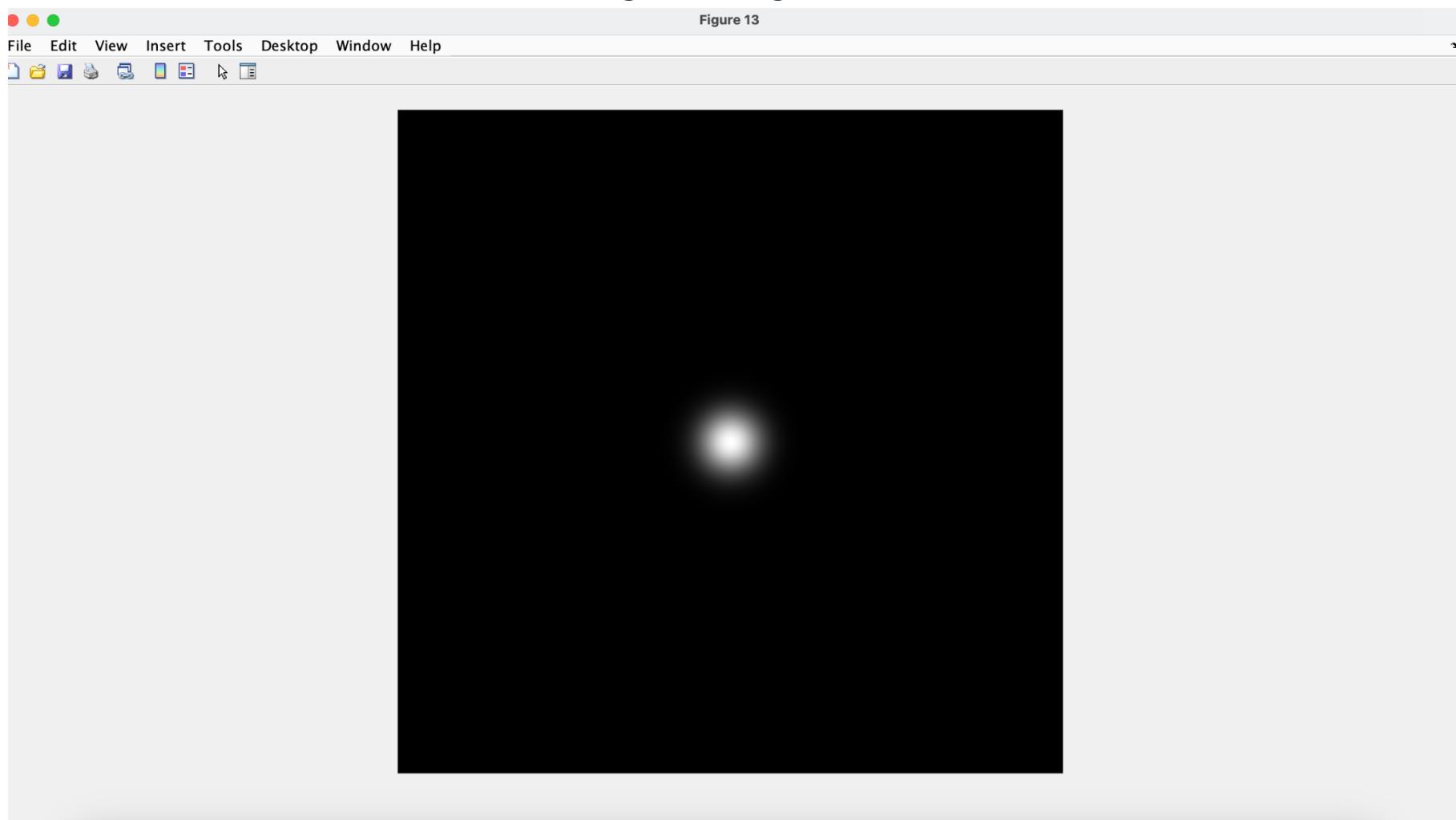
Anexo 2.11 Figura 11 - Longitud de Onda de 5 mm



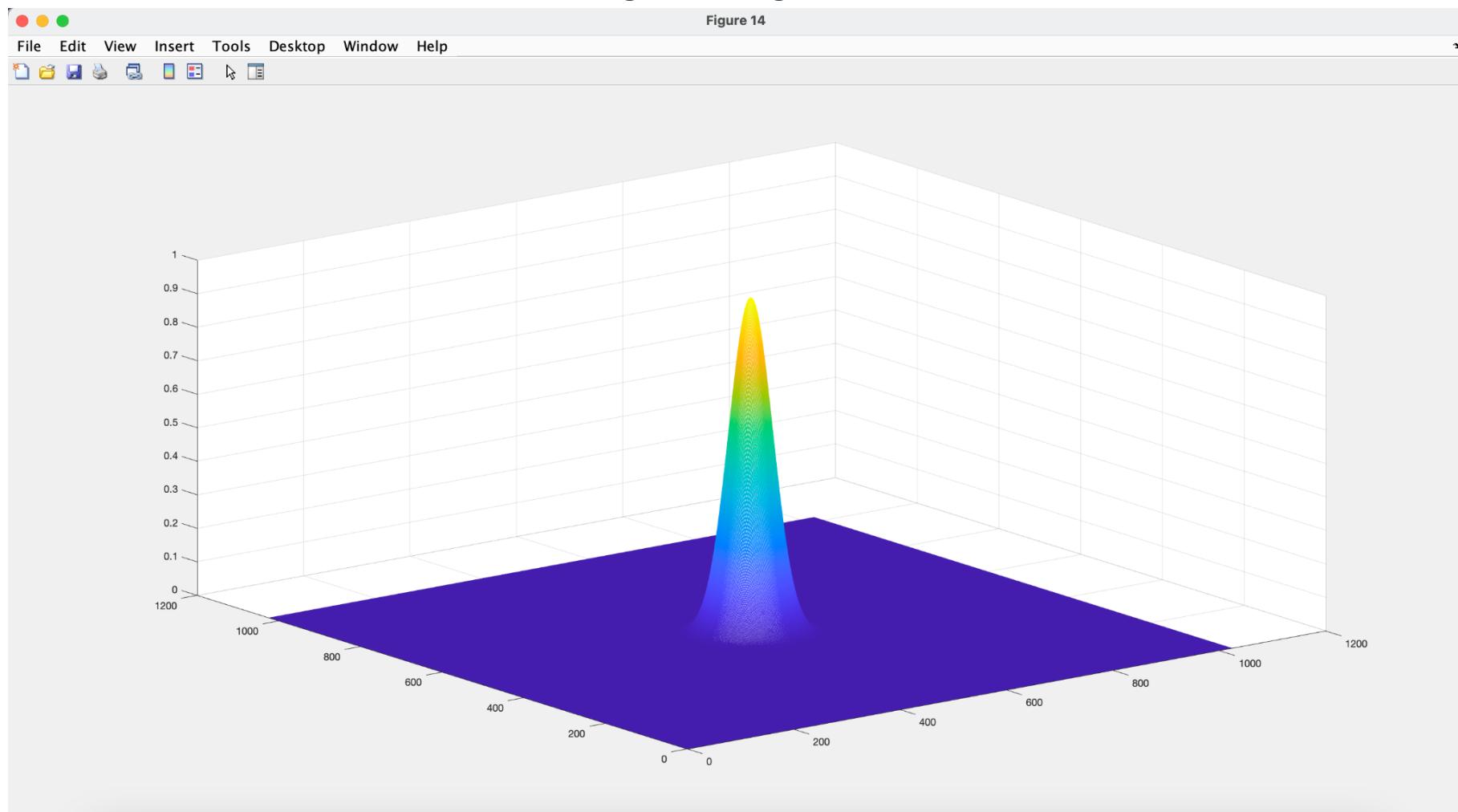
Anexo 2.12 Figura 12 - Longitud de Onda de 5 mm



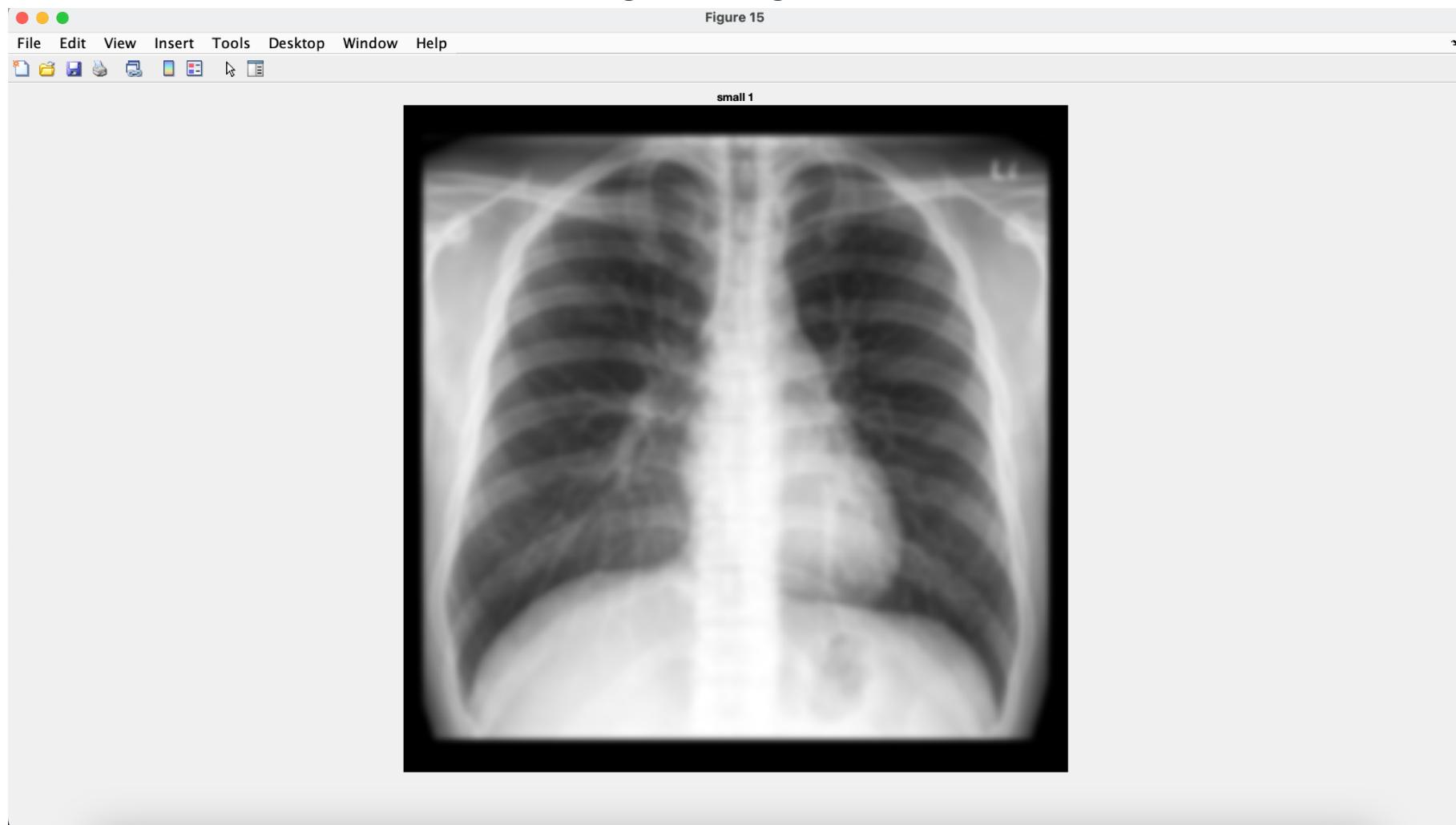
Anexo 2.13 Figura 13 - Longitud de Onda de 5 mm



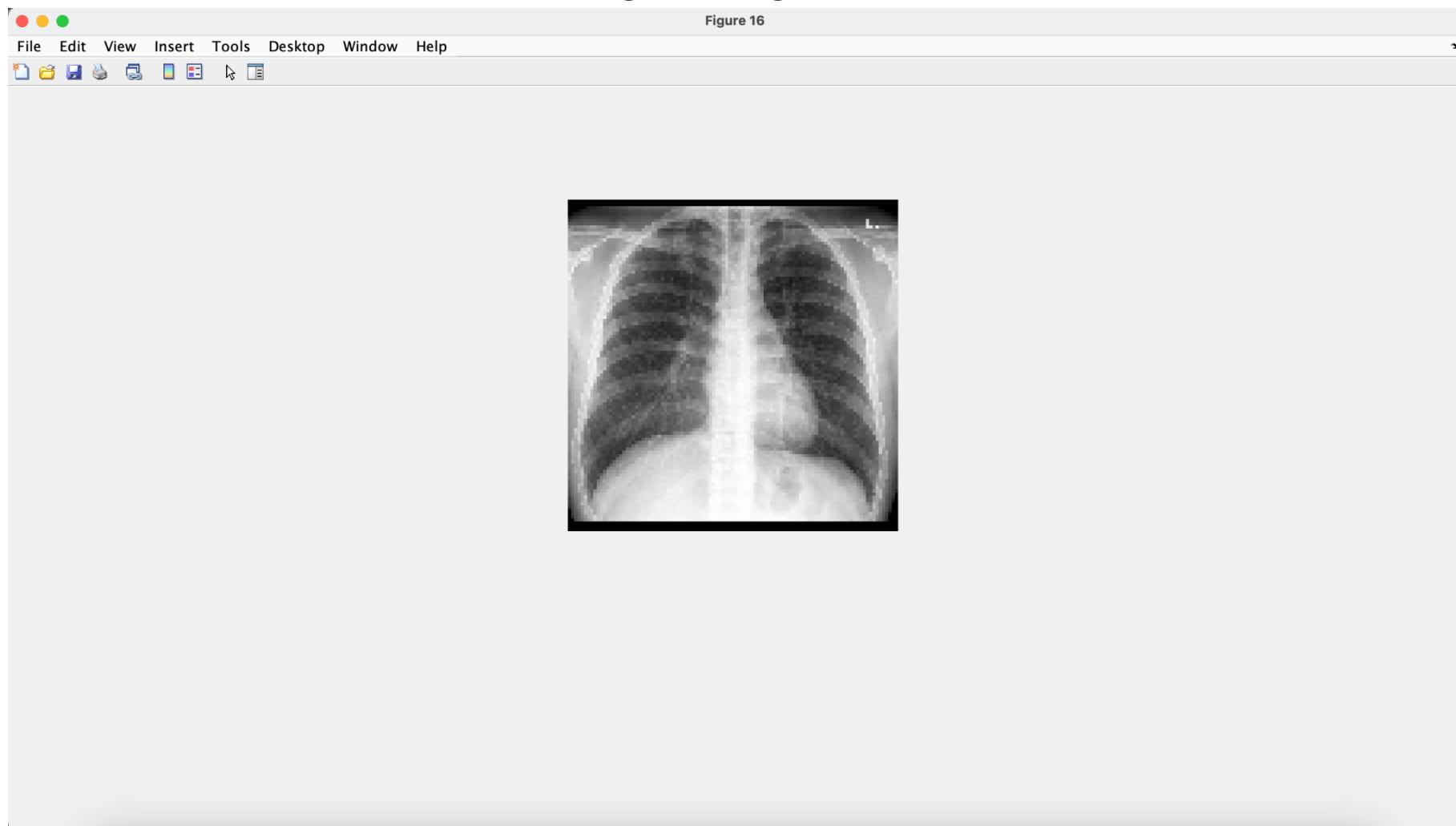
Anexo 2.14 Figura 14 - Longitud de Onda de 5 mm



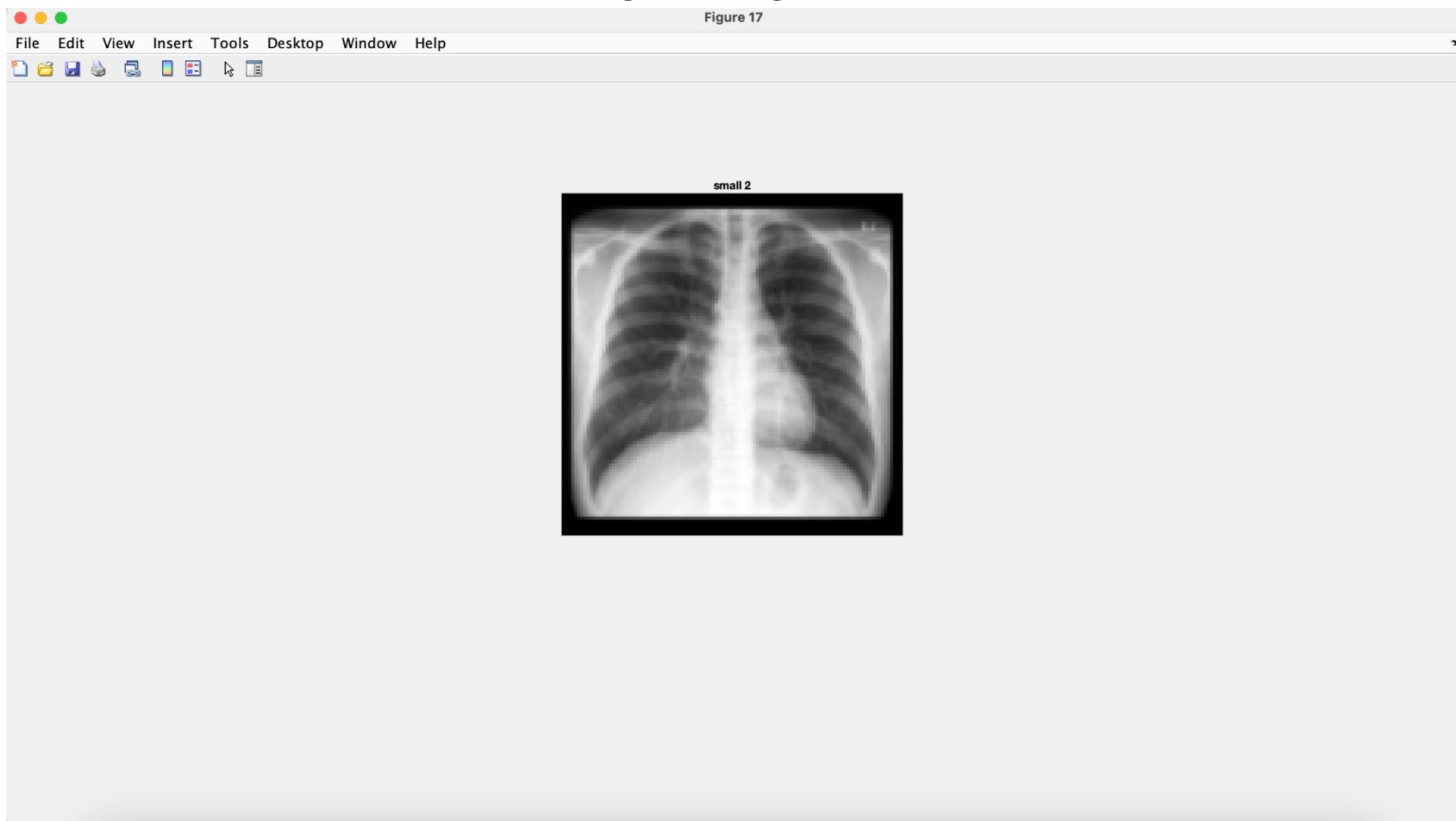
Anexo 2.15 Figura 15 - Longitud de Onda de 5 mm



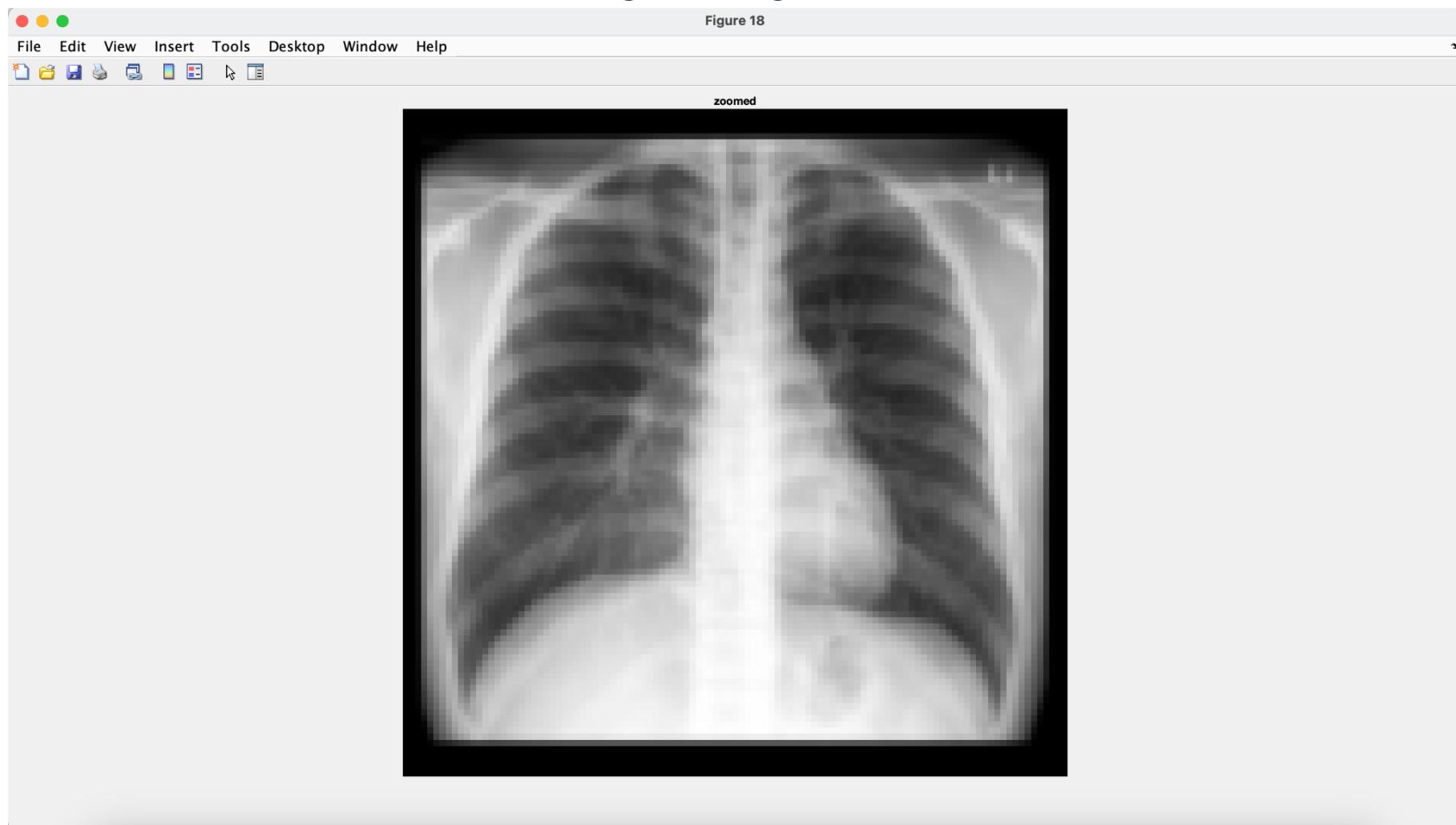
Anexo 2.16 Figura 16 - Longitud de Onda de 5 mm



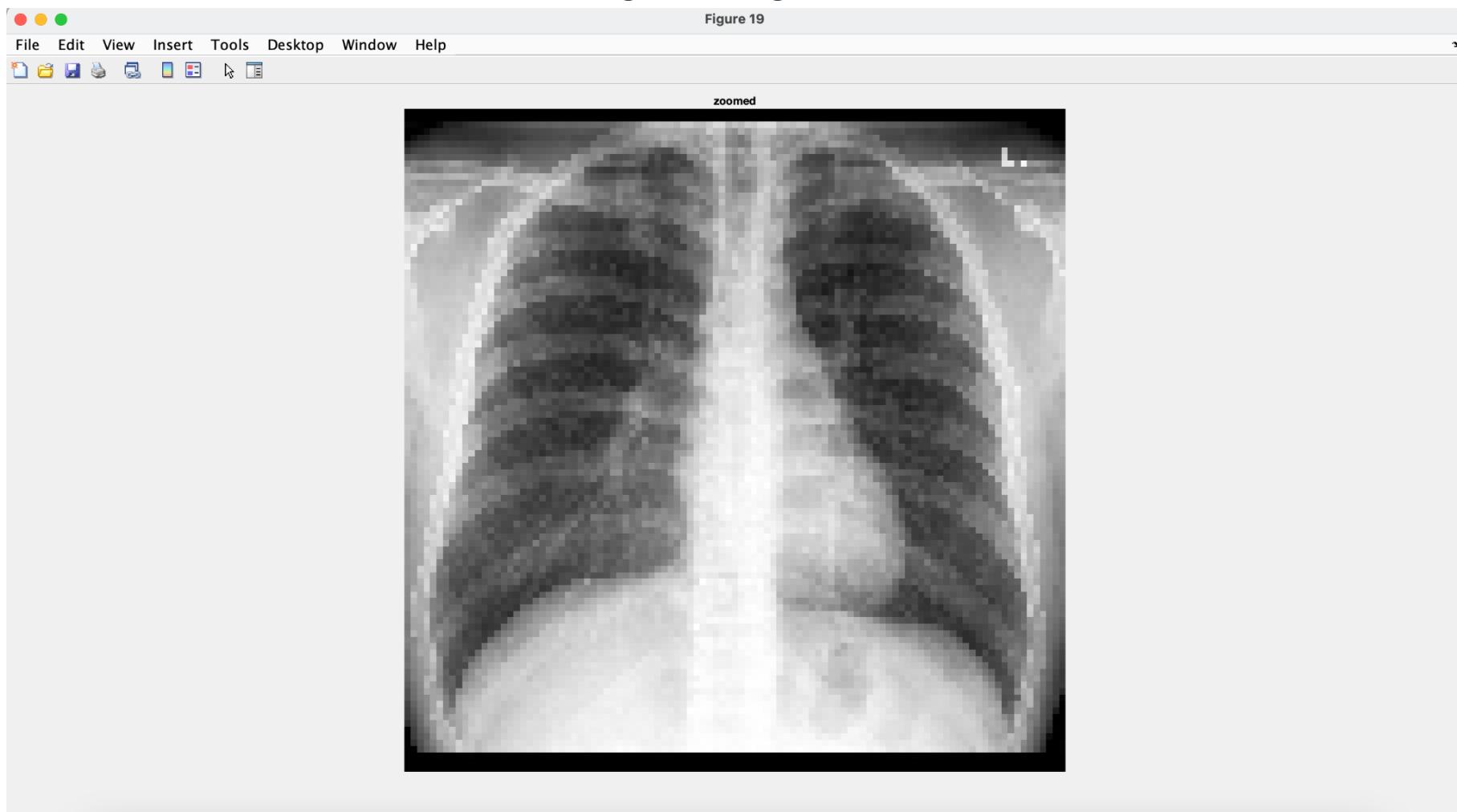
Anexo 2.17 Figura 17 - Longitud de Onda de 5 mm



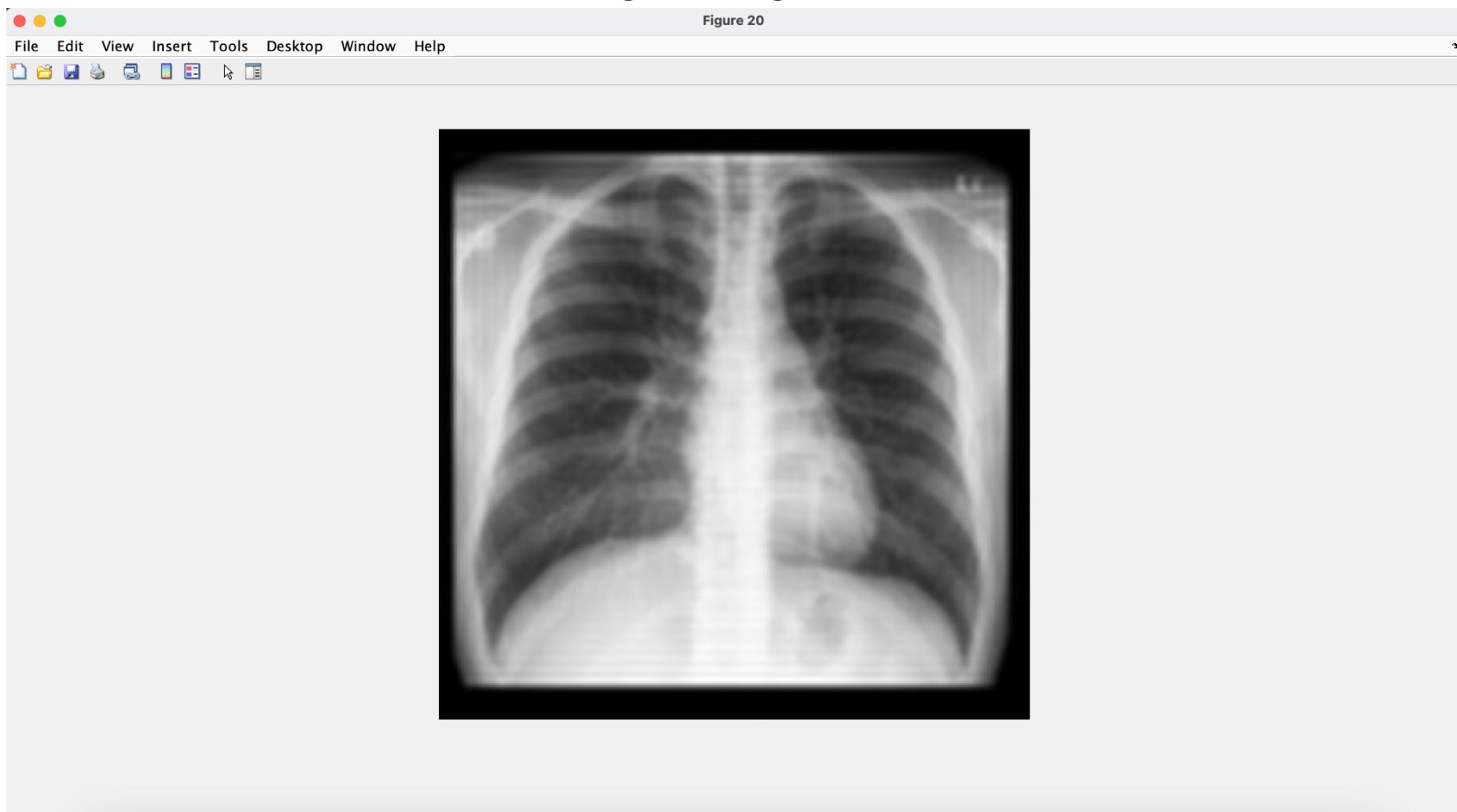
Anexo 2.18 Figura 18 - Longitud de Onda de 5 mm



Anexo 2.19 Figura 19 - Longitud de Onda de 5 mm



Anexo 2.20 Figura 20 - Longitud de Onda de 5 mm



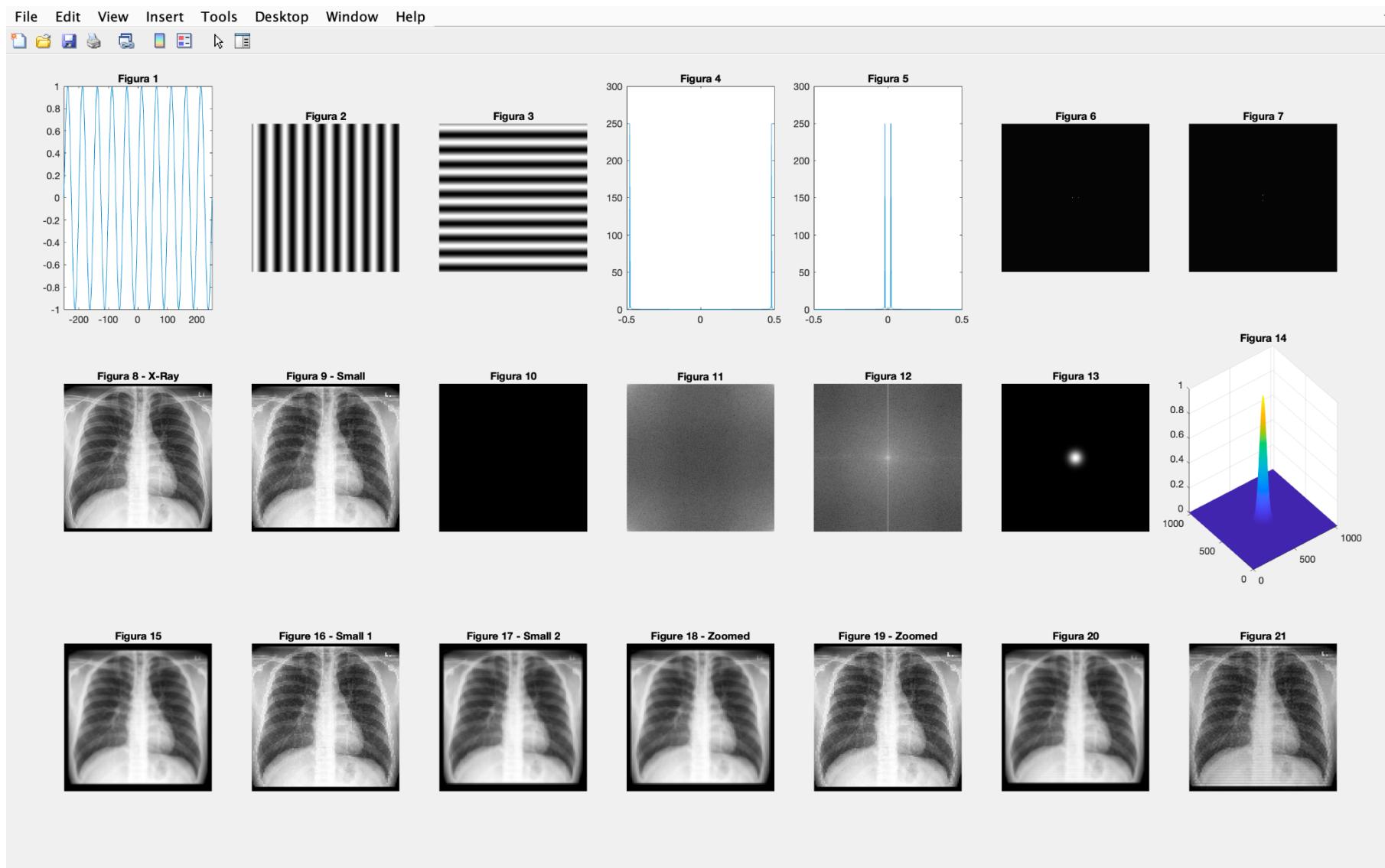
Anexo 2.21 Figura 21 - Longitud de Onda de 5 mm



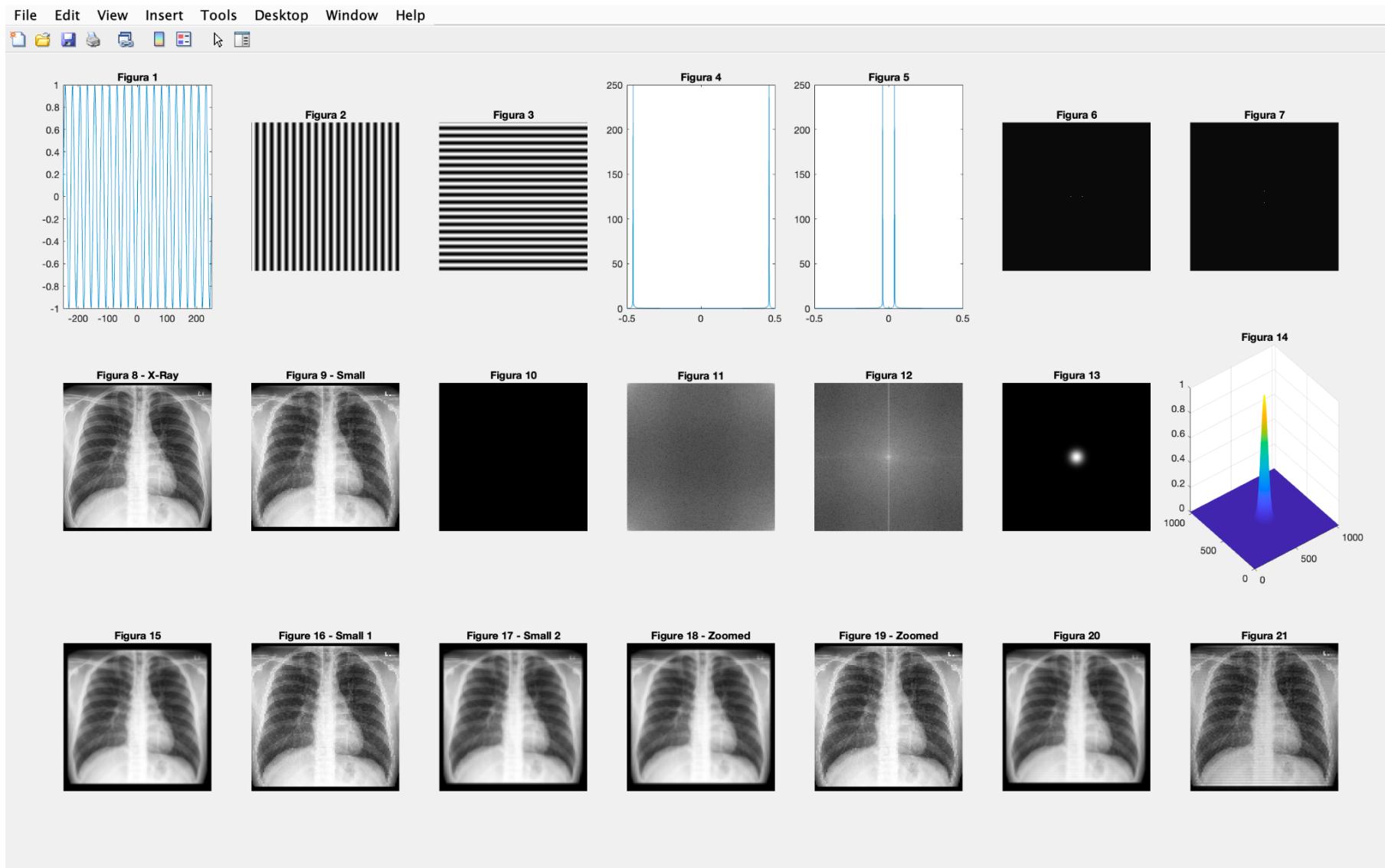
Anexo 2.22 Figura 22 - Longitud de Onda de 5 mm

Name	Value
f	1024x1024 double
F	1024x1024 com...
fase	0
FOV	501
freq	1x501 double
g	1087x1087 double
longituddeOnda	5
LOW	1024x1024 com...
lowpass	64x64 double
maxfrquency	0.5000
nsamples	[1,501]
sineline	1x501 double
SINELINE	1x501 complex d...
sinesampling	1x501 double
small	103x103 double
smallg	109x109 double
SMALLG	103x103 comple...
spatialfrequency	0.2000
sz	[1024,1024]
xsineimage	501x501 double
yline	1x501 double
ysineimage	501x501 double
zomg	1024x1024 double
zoomg	1030x1030 double

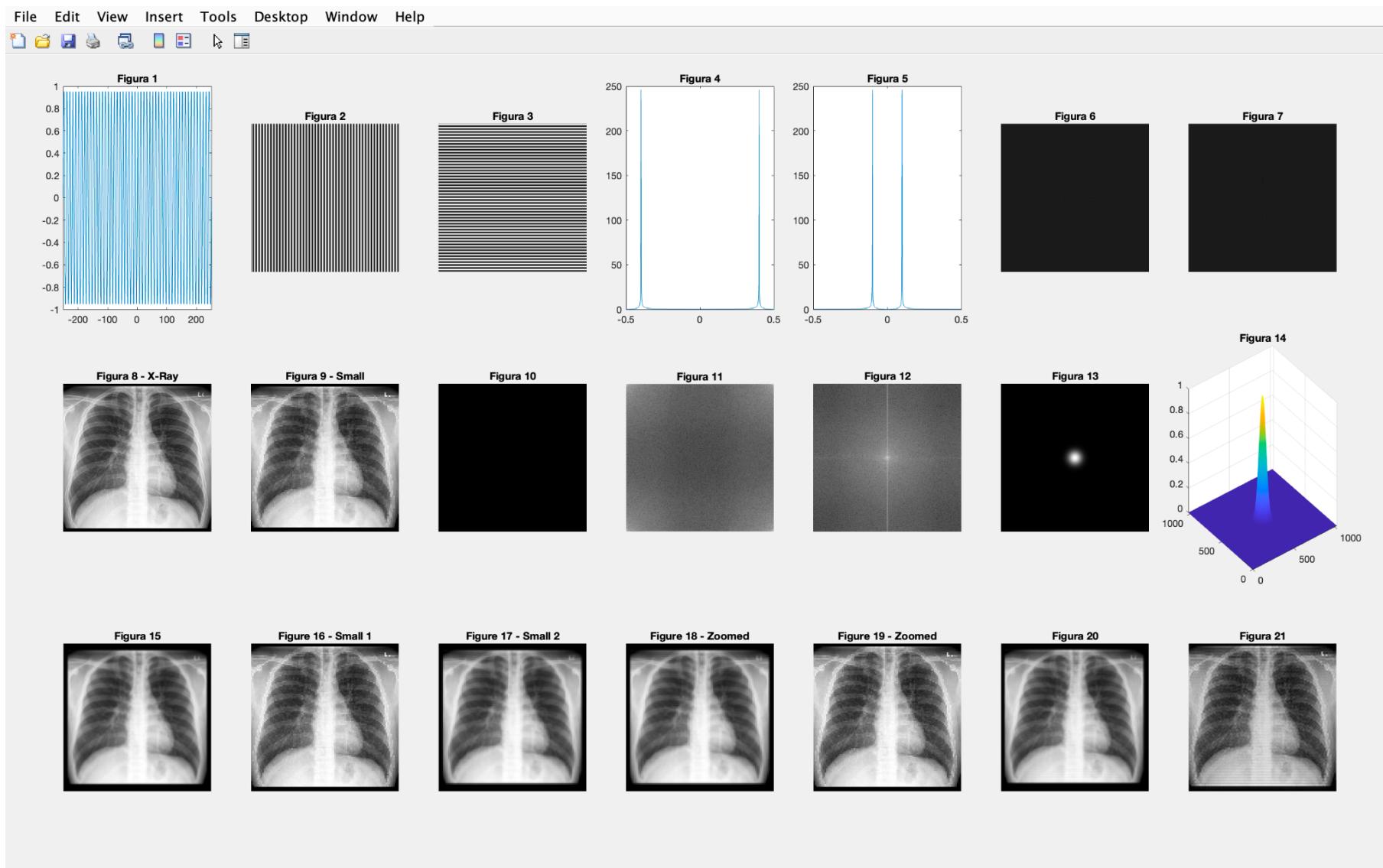
Anexo 3.1 Análisis con Longitud de Onda de 50 mm, frecuencia espacial 0.02.



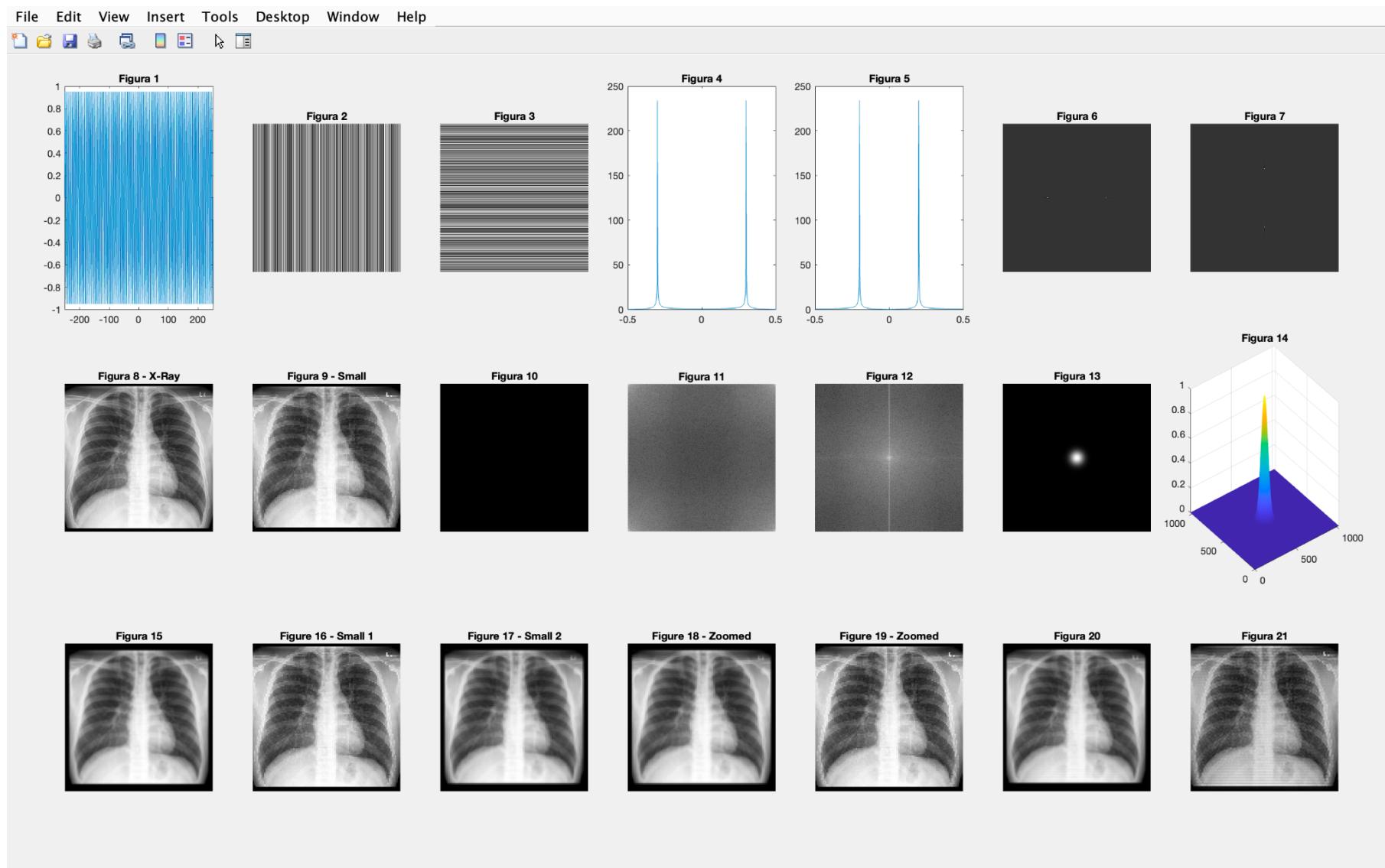
Anexo 3.2 Análisis con Longitud de Onda de 25 mm, frecuencia espacial 0.04.



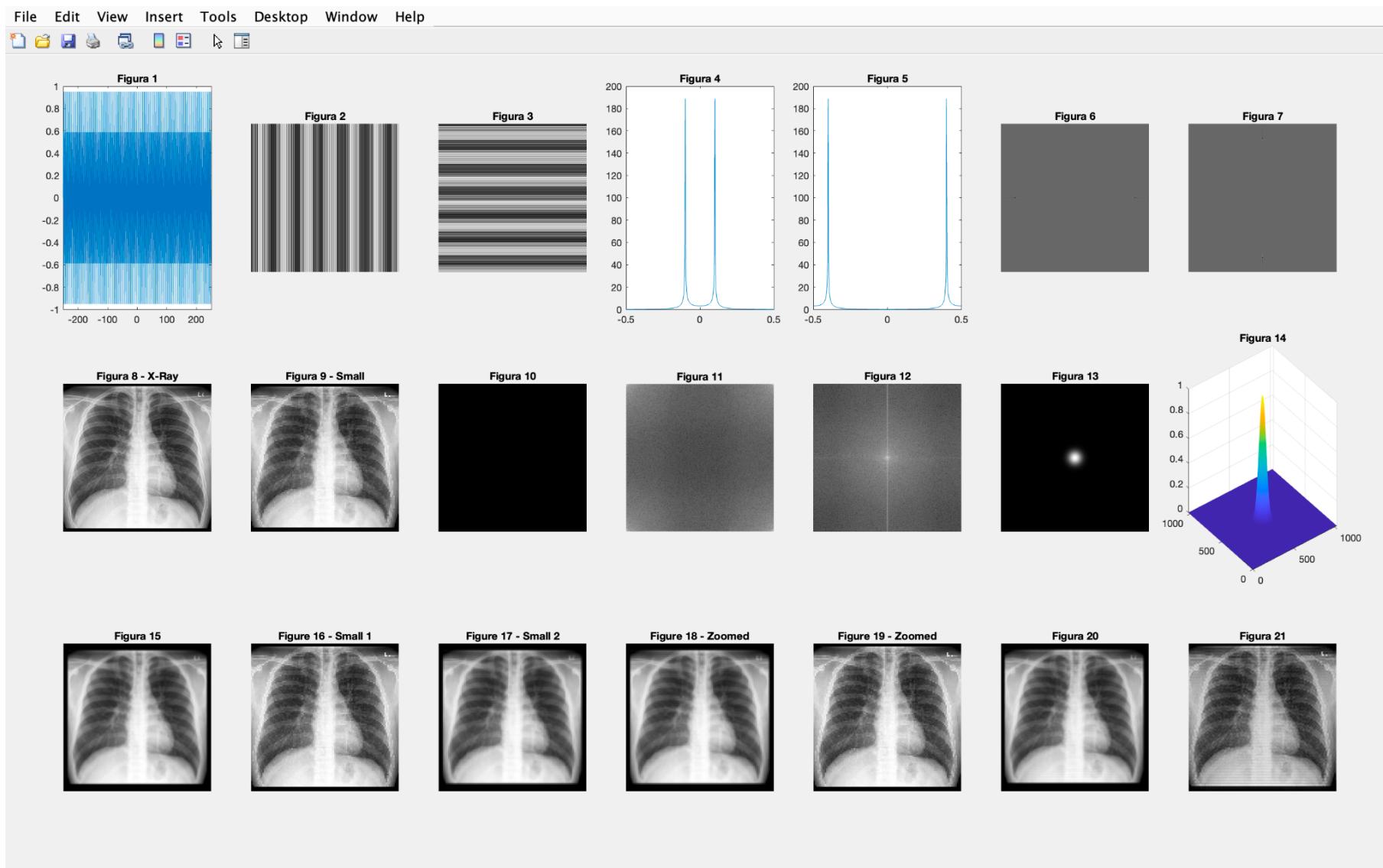
Anexo 3.3 Análisis con Longitud de Onda de 10 mm, frecuencia espacial 0.1



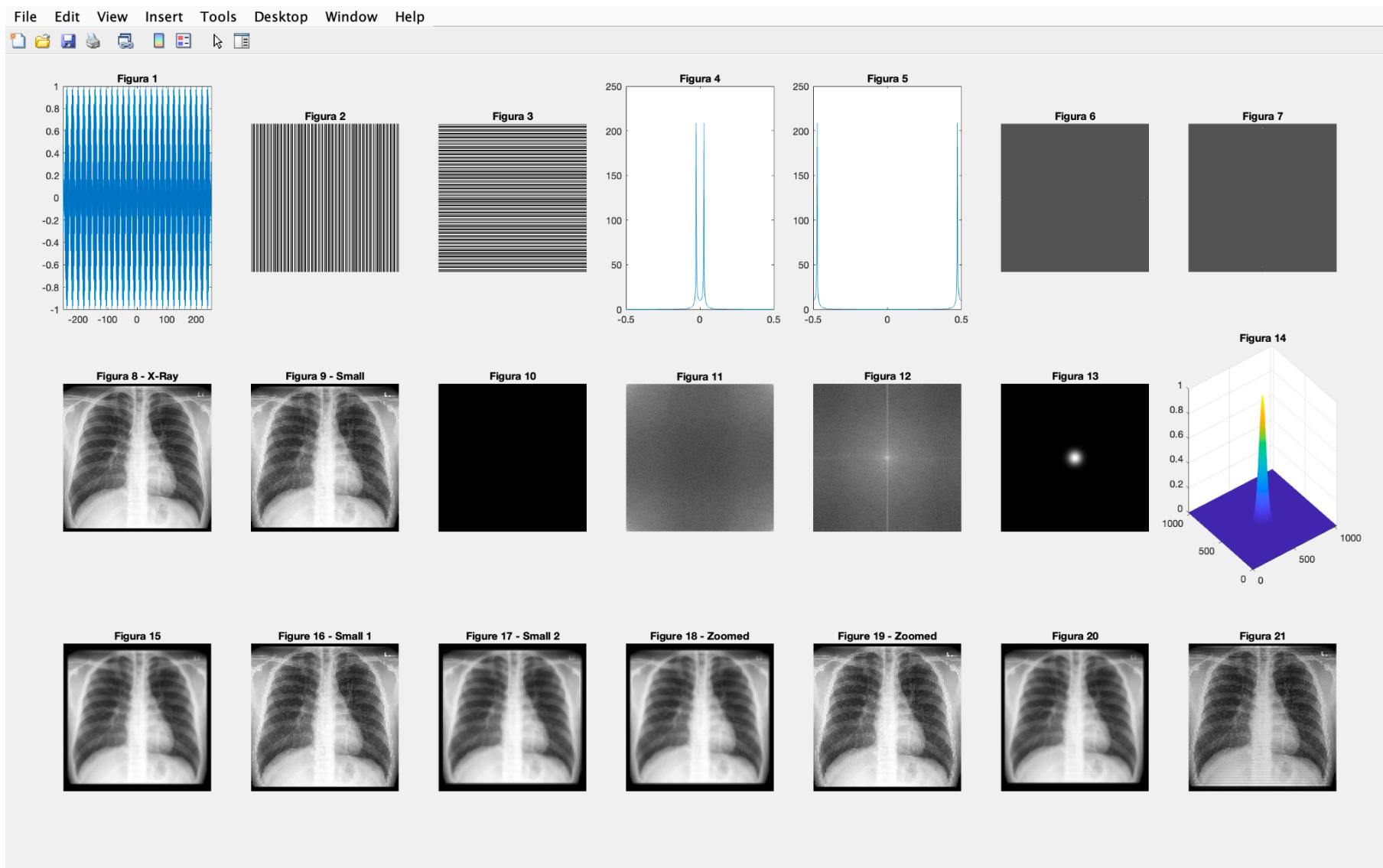
Anexo 3.4 Análisis con Longitud de Onda de 5 mm, frecuencia espacial 0.2.



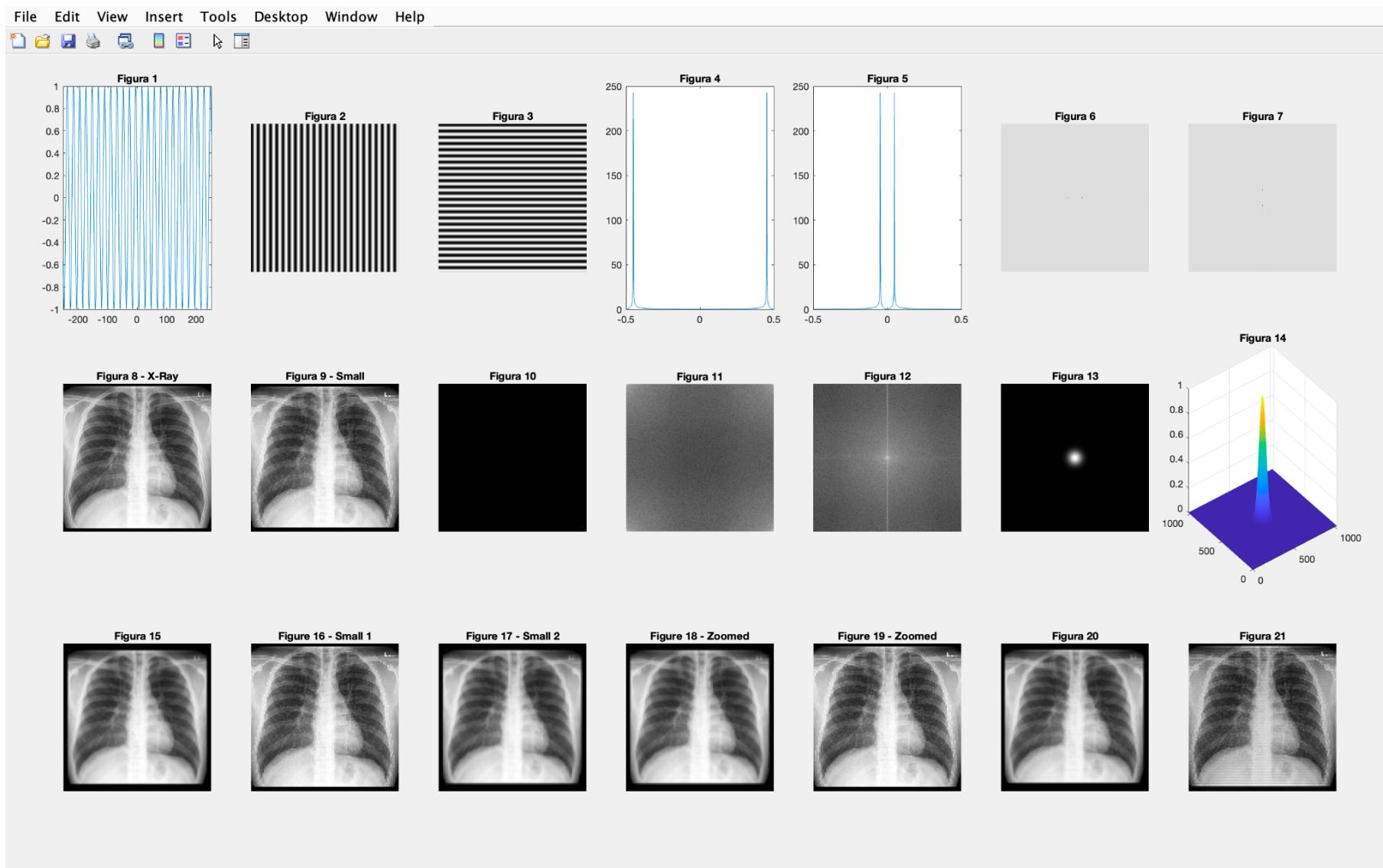
Anexo 3.5 Análisis con Longitud de Onda de 2.5 mm, frecuencia espacial 0.4



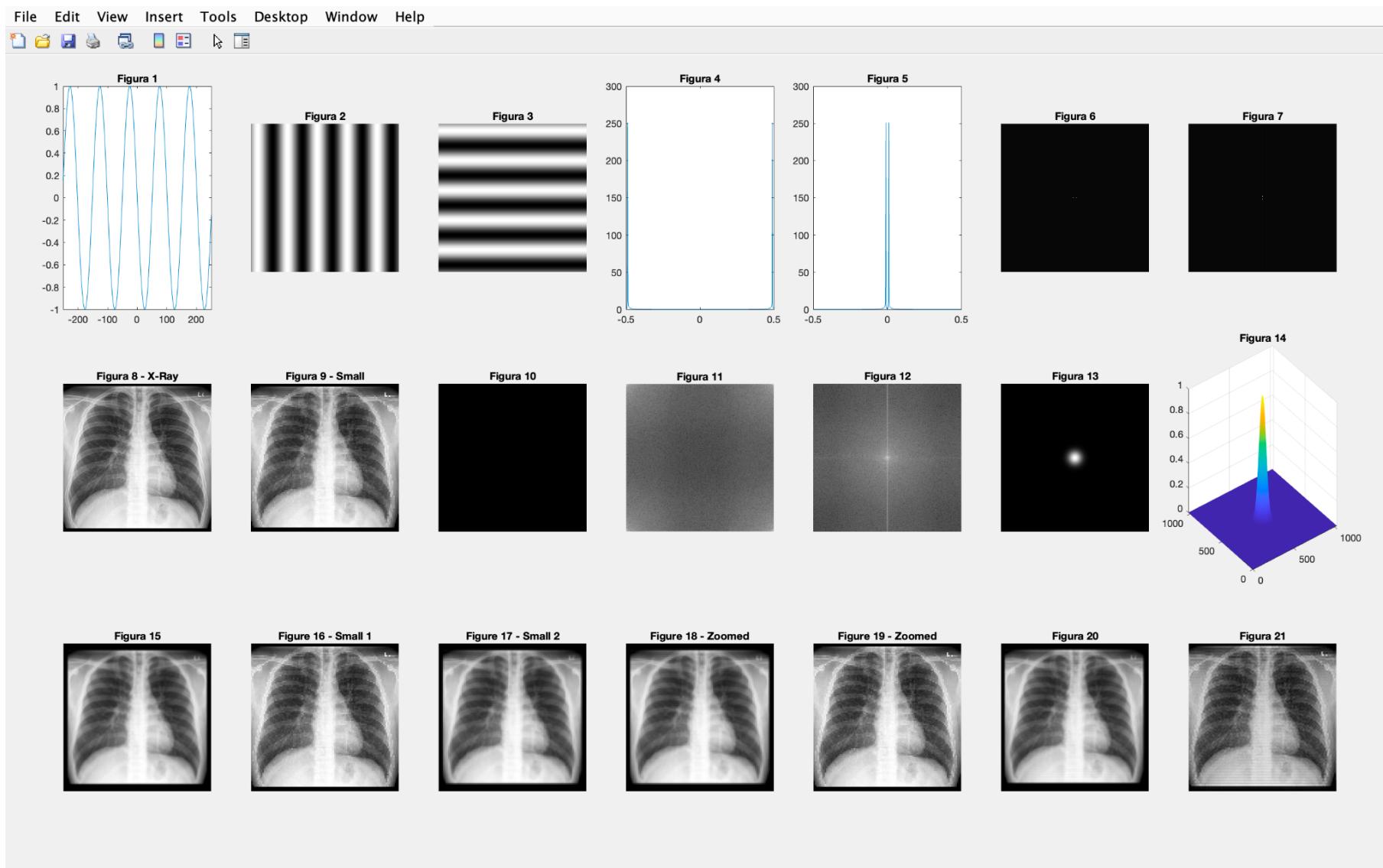
Anexo 3.6 Análisis con Longitud de Onda de 1.9 mm, frecuencia espacial 0.5263.



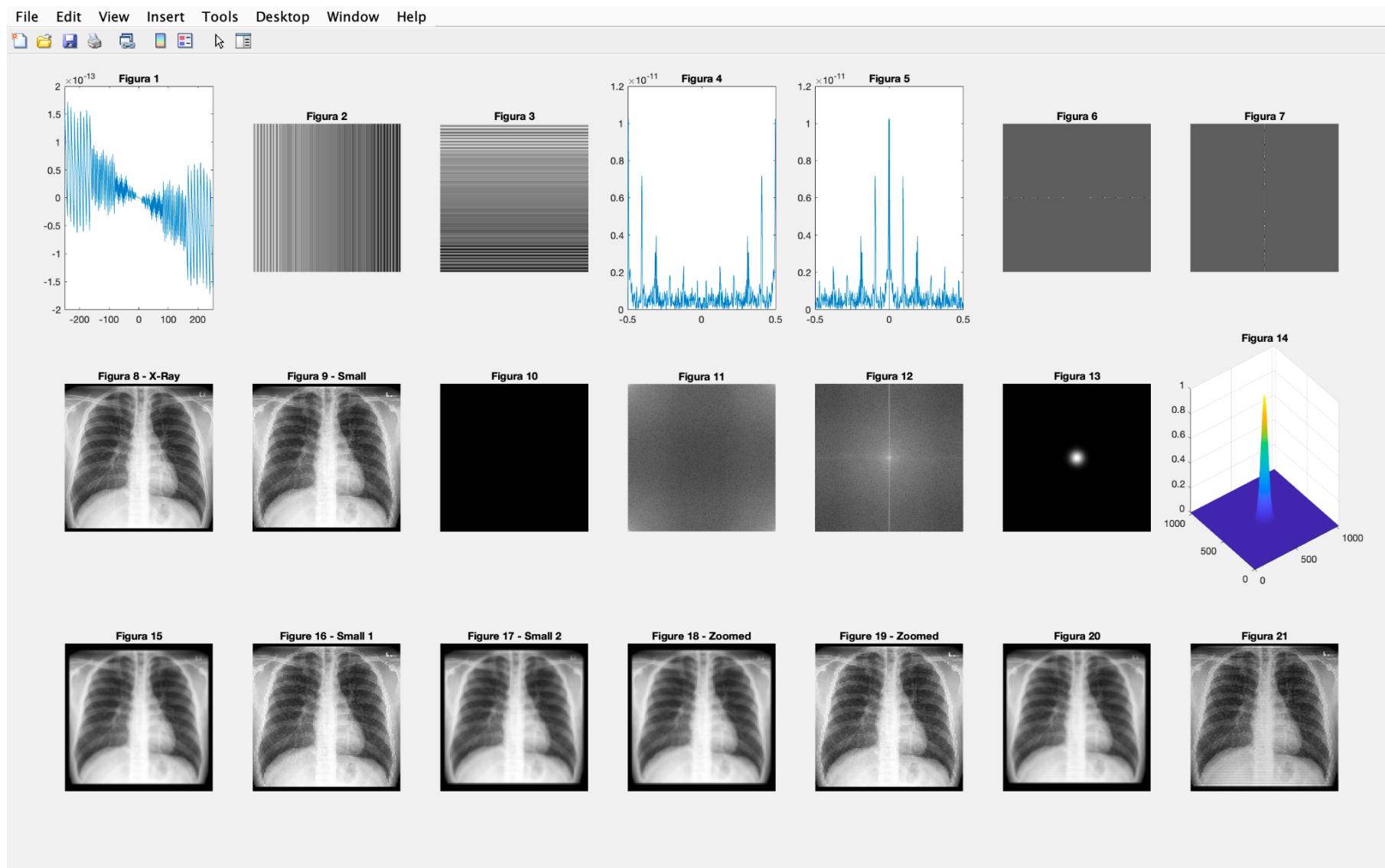
Anexo 3.7 Análisis con Longitud de Onda de 1.05 mm, 0.9524.



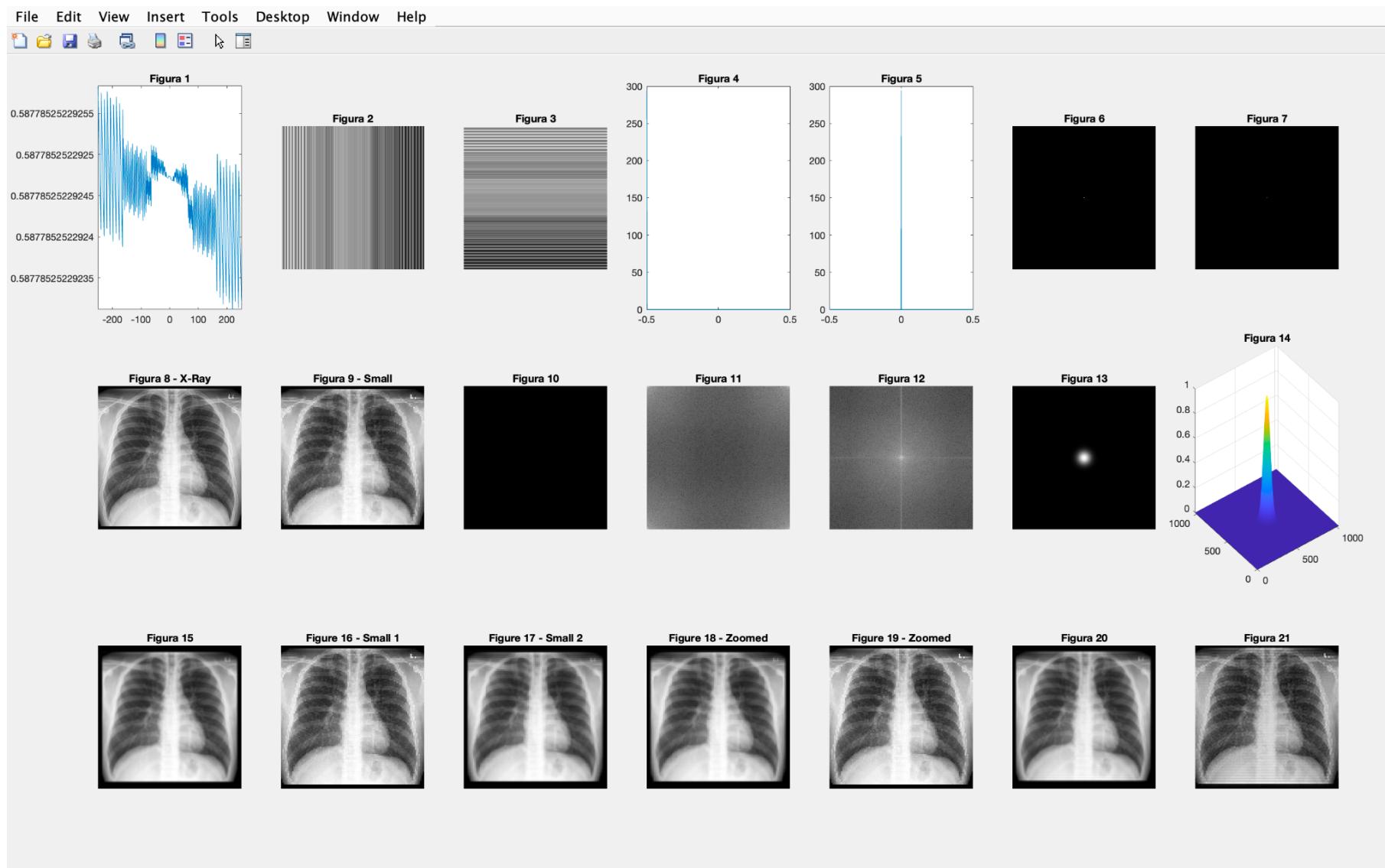
Anexo 3.8 Análisis con Longitud de Onda de 1.01 mm, frecuencia espacial 0.9901.



Anexo 3.9 Análisis con Longitud de Onda de 1.00 mm con Fase de 0.0, frecuencia espacial 1.



Anexo 3.10 Análisis con Longitud de Onda de 1.00 mm con Fase de 0.1, frecuencia espacial 1.



Anexo 3.11 Análisis con Longitud de Onda de 1.00 mm con Fase de 0.2, frecuencia espacial 1.

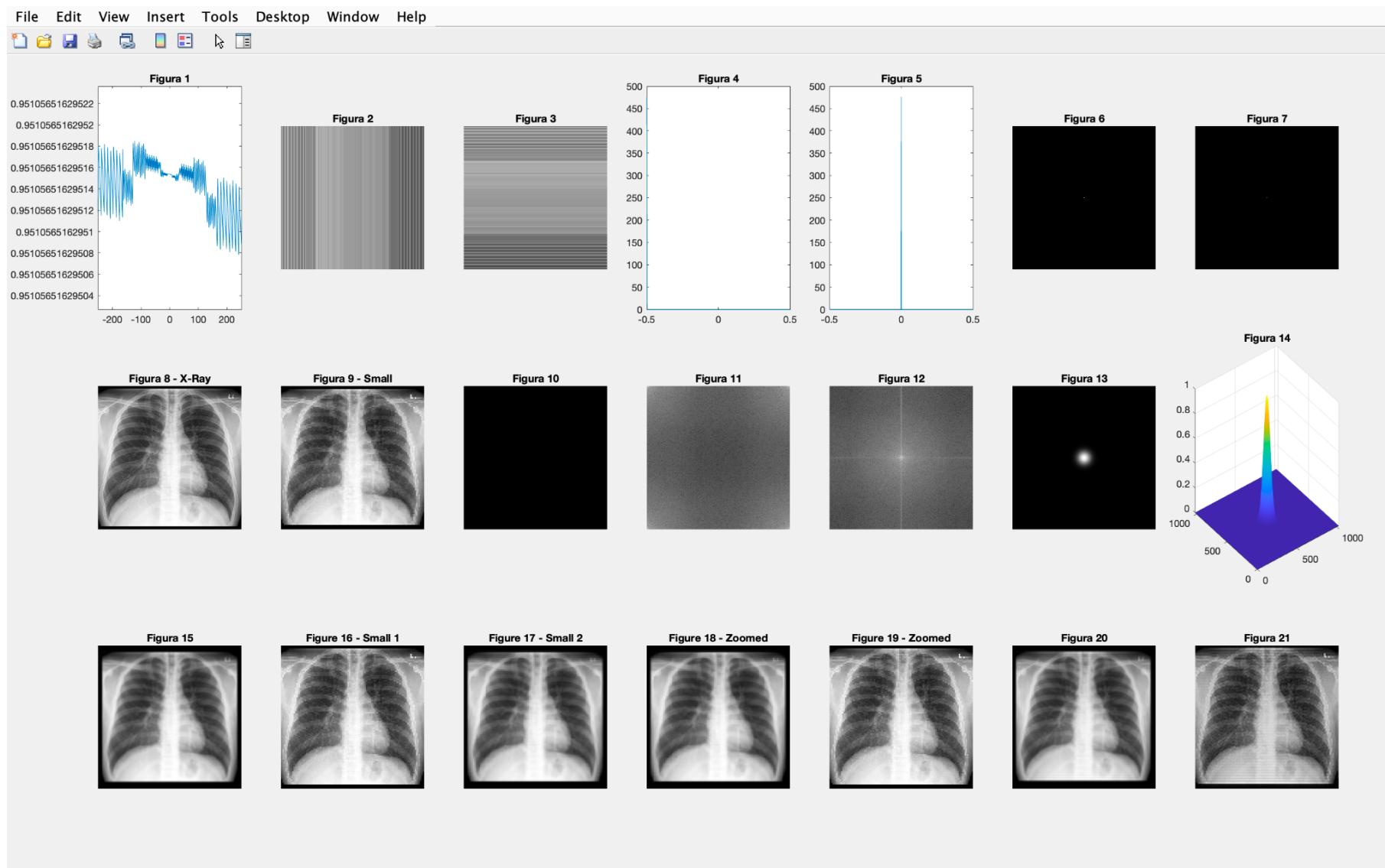


Figura 5

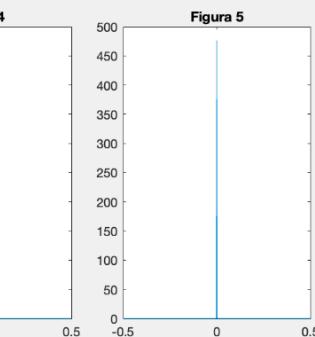


Figura 6

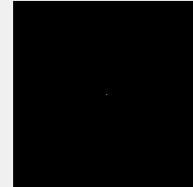


Figura 7



Figura 14

