



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS**

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**“RECONOCIMIENTO DACTILAR POR IMÁGENES”.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:**  
**Licenciatura en Tecnología con Área Terminal en Física Aplicada**

**PRESENTA:**  
**C. Fernando Quiñones Colin.**

**DIRECTOR DE TESIS: DR. Omar Palillero Sandoval**

**SINODALES:**  
**DR. Pedro Antonio Márquez Aguilar**  
**DR. José Antonio Marbán Salgado**  
**DR. Héctor Manuel Castro Beltrán**  
**DR. J Jesús Escobedo Alatorre**

**CUERNAVACA, MORELOS**

**Mayo, 2021.**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Instituto de  
Investigación en  
Ciencias  
Básicas y  
Aplicadas

## INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS



Control Escolar de Licenciatura

### VOTOS DE APROBATORIOS

Secretaria ejecutiva del Instituto de Investigación en Ciencias Básicas Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos.  
P r e s e n t e .

Por medio de la presente le informamos que después de revisar la versión escrita de la tesis que realizó el C. **QUIÑONES COLÍN FERNANDO** con número de matrícula **20144009086** cuyo título es:

#### “RECONOCIMIENTO DACTILAR POR IMÁGENES”

Consideramos que **SI** reúne los méritos que son necesarios para continuar los trámites para obtener el título de **Licenciado en Tecnología con Área Terminal en Física Aplicada**.

Cuernavaca, Mor a 10 de agosto del 2021

Atentamente  
Por una universidad culta

Se adiciona página con la e-firma UAEM de los siguientes:

**DR. PEDRO ANTONIO MÁRQUEZ AGUILAR**  
**DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO**  
**DR. OMAR PALILLERO SANDOVAL**  
**DR. J. JESÚS ESCOBEDO ALATORRE**  
**DR. HÉCTOR MANUEL CASTRO BELTRÁN**

**PRESIDENTE**  
**SECRETARIO**  
**VOCAL**  
**PRIMER SUPLENTE**  
**SEGUNDO SUPLENTE**



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**OMAR PALILLERO SANDOVAL | Fecha:2021-08-10 15:51:23 | Firmante**

dPII7uSMtUDQgd6lYEets6JDixnfNgALpsnVwEP1zyblNeQq8teeB+mWf3VrjSN5PggXwg+OXDIKkDRRmVjBbdWj/ZkEhpqdt4/acDDyo8DWf38k70qRI566NJz05VQzpwG+dOjsx04SuvlWnC+5UjGJ2cLYmRzuaXMGDNly4WgTsI97PM7a/BPL3oS/+NCzRPmbmZJvTpu+jVEXkL/e/S4ZakB4dkf20m+QrjMM7fB7HecDawW6pi+gbMRkdxljbTBWps0I2b7WPF++ICwtwZgFLw000FEq13B7hasw0DKxD3y7Zq54J8xb31s0WHIAZRYZ0eNi+L/sCjidBA==

**PEDRO ANTONIO MARQUEZ AGUILAR | Fecha:2021-08-10 16:01:09 | Firmante**

qEXwMv3fLOHAorPwKsuH6JhDwd0i21HS66/kPbQ/DxiOgNimFdDMGBswxCf1TTVMqAzlgrDGCucm+x1BFJajFbMq++cFQmUjVbRxB29nbor7OXnMvUJbeUQziudEr3+vmmrNnKAoB4w10oDvDYjQWj5cUqDua61jvyjMb2pEGcrq336uKSK1CXwem48x9UPm06+NlvBbcAMFITfpdEwyKCK4upcts00KOIFnCeGvPGGsbNzXRKfATHFsl+qaD2V8Pk+/rxfsaowh3mAwKQQQZscq4DmdmbBA/L0UIIKbsMCPz3M35uDJjepn1P5t7k2e+/QBUB8VSGfujoidIA==

**JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2021-08-10 16:18:06 | Firmante**

QL42ETxB2o+WFNYghJeVa0jj7DHVwEqLpY94aNBNIr14V92K9/AspGbl6ZH1YQMSAK6Q7VnFhLWTsmK+hcm67Ai89ReKxKoCo0+fe4k0sCZrcqLvfGNjkRBx2gVEPYHS3YzqV8Kp3NjkakeTjCJJKcRNiC6b3ZVL1fEpPPglejMM75kBl/+ztC/Na926dTW7Rr7KidqBCa2JbGvvUowYs/JKpxzXcK7UHDxtheOuhSGfvWpk/YXLVtEQDwmwAR0fYEMMdfZKulEKy2qwPd+shF9V+3Cn70Rv//zVcw4xWMYrRhARL/k89WSSv3UzXk7bistLq2Tf88ZmSrolUFNQ==

**HECTOR MANUEL CASTRO BELTRAN | Fecha:2021-08-10 17:19:26 | Firmante**

X3RHSfJDRsNhn7TmR7jb72O/imyYBkHmipreNN5kaRaK5NSQaF00EoCijlGzljNetfh14PztmlrcB1rFuDQcBL7deB6xdz5b/8QTWm972G5Magq9reF8jXWGgbTIULLdeGImT1rW4NzyvKG8fNePk52zcDkD/gqZVqVszTWWr9XitqfVq14ueLORtRbQxSN2UzP9xEtIUwUmBJGBykgjZi5GFene4QMjzAK60/OIQHPcH5T1ol3xgnAPk4cl6WFR0fibCPOXI31d5HHcHkESzGKcA60/YsfkNjS/RJfbBejlupN5QVtA5KIKurVlxZ55kxFRzZkPvptHiV3NMw==

**J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2021-08-10 17:31:38 | Firmante**

McGGqbp6GINrhDXXQXnt5u1FPiB8/5jtz4mZMS/CSKksZKGVlu3b9PTsIrJzQpdniEb6yZS1S4aqZHnhfUsOahzpb+vAK7WH6V7oe47neV2JcSb/bsqHjUD2oFb8CSJblQygm7uPi3sGtMWoyh+7icURvvcEQKokUfMtaoARriwKrgy5Rfpu3XpnskVUnzUT6XBan1Lqeufx2K3FjtJhgF1cMzdpR9QjwhXOSNytKZs20Gaeb9HjwilGOCFilyxHh8Sd88vp12GR5dZ1P5XJ1gcXhkzJQYjt5OIXUUG7pVfSpji4slytyC0PjIkzyVfte4MiV+im+3yt9UgMV3wYQw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



7XWP6h

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/zk68JvPwriqzRzIRME33MHaFHxhnqgQD>



# Índice general

0.1. Agradecimiento . . . . .	<b>1</b>
<b>1. Resumen</b>	<b>2</b>
1.1. Summary . . . . .	<b>2</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>3</b>
2.1. Problemática . . . . .	<b>5</b>
2.2. Hipótesis . . . . .	<b>5</b>
2.3. Objetivo General . . . . .	<b>5</b>
2.4. Objetivo particular 1 . . . . .	<b>6</b>
2.5. Objetivo particular 2 . . . . .	<b>6</b>
<b>3. Teoría de formación de imágenes</b>	<b>7</b>
3.1. Formación de imágenes con trazado de rayos en lentes delgadas	<b>8</b>
3.1.1. Puntos conjugados y amplificación lateral . . . . .	<b>8</b>
3.2. Formación de imágenes con iluminación coherente . . . . .	<b>11</b>
3.2.1. Respuesta al impulso de una lente positiva . . . . .	<b>15</b>
3.3. Formación de imágenes con iluminación incoherente . . . . .	<b>19</b>
3.4. Sistema formador de imágenes como sistema lineal. . . . .	<b>20</b>

---

3.4.1. Respuesta en Frecuencia del caso coherente . . . . .	<b>21</b>
3.4.2. Respuesta en Frecuencia del caso incoherente . . . . .	<b>22</b>
3.5. Coeficiente de correlación de Pearson . . . . .	<b>24</b>
<b>4. Metodología</b>	<b>26</b>
4.1. Diseño del sistema óptico . . . . .	<b>26</b>
4.2. Desarrollo del programa . . . . .	<b>29</b>
4.3. Simulación . . . . .	<b>30</b>
<b>5. Resultados</b>	<b>34</b>
5.1. Discusión . . . . .	<b>46</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>49</b>
6.1. Objetivo particular 1 . . . . .	<b>49</b>
6.2. Objetivo particular 2 . . . . .	<b>50</b>
<b>7. Apendice</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>76</b>

# Índice de figuras

3.1. Posición del objeto y la imagen, o puntos conjugados. . . . .	9
3.2. La abertura está colocada en un punto $P_1$ arbitrario al plano de la abertura representada en azul, la propagación de la perturbación viene de izquierda a derecha y el plano de observación esta colocado en un punto arbitrario $P_0$ . . . . .	12
3.3. Sistemas de coordenadas rectangulares para el tratamiento del problema de difracción. . . . .	13
3.4. Geometría de la formación de imágenes. . . . .	15
3.5. Sistema formador de imágenes. . . . .	17
3.6. MTF de una función de pupila de forma circular. . . . .	23
4.1. esquema de sistema óptico. . . . .	27
4.2. esquema del prototipo. . . . .	28
4.3. soportes del dispositivo. . . . .	28
4.4. diseño final. . . . .	29
4.5. Huellas dactilares simuladas. . . . .	30
4.6. Prueba de huellas. . . . .	32
5.1. Huella 1 a la 4. . . . .	35

---

5.2. Huella 5 a la 8. . . . .	<b>36</b>
5.3. Huella 9 a la 12. . . . .	<b>37</b>
5.4. Huella 13 a la 16. . . . .	<b>38</b>
5.5. Huella 17 a la 20. . . . .	<b>39</b>
5.6. Huella 21 a la 24. . . . .	<b>40</b>
5.7. Huella 25 a la 28. . . . .	<b>41</b>
5.8. Huella 29 a la 32. . . . .	<b>42</b>
5.9. comparación de huella 15. . . . .	<b>43</b>
5.10. comparación de huella 16. . . . .	<b>43</b>
5.11. comparación de huella 17. . . . .	<b>44</b>
5.12. comparación de huella 18. . . . .	<b>45</b>
5.13. comparación de huella 31. . . . .	<b>45</b>
5.14. comparación de huella 32. . . . .	<b>46</b>
7.1. comparación de huella 1. . . . .	<b>51</b>
7.2. comparación de huella 2. . . . .	<b>52</b>
7.3. comparación de huella 3. . . . .	<b>52</b>
7.4. comparación de huella 4. . . . .	<b>53</b>
7.5. comparación de huella 5. . . . .	<b>54</b>
7.6. comparación de huella 6. . . . .	<b>54</b>
7.7. comparación de huella 7. . . . .	<b>55</b>
7.8. comparación de huella 8. . . . .	<b>56</b>
7.9. comparación de huella 9. . . . .	<b>56</b>
7.10. comparación de huella 10. . . . .	<b>57</b>
7.11. comparación de huella 11. . . . .	<b>57</b>
7.12. comparación de huella 12. . . . .	<b>58</b>

---

7.13. comparación de huella 13. . . . .	58
7.14. comparación de huella 14. . . . .	59
7.15. comparación de huella 15. . . . .	59
7.16. comparación de huella 16. . . . .	60
7.17. comparación de huella 17. . . . .	60
7.18. comparación de huella 18. . . . .	61
7.19. comparación de huella 19. . . . .	61
7.20. comparación de huella 20. . . . .	62
7.21. comparación de huella 21. . . . .	62
7.22. comparación de huella 22. . . . .	63
7.23. comparación de huella 23. . . . .	63
7.24. comparación de huella 24. . . . .	64
7.25. comparación de huella 25. . . . .	64
7.26. comparación de huella 26. . . . .	65
7.27. comparación de huella 27. . . . .	65
7.28. comparación de huella 28. . . . .	66
7.29. comparación de huella 29. . . . .	66
7.30. comparación de huella 30. . . . .	67
7.31. comparación de huella 31. . . . .	67
7.32. comparación de huella 32. . . . .	68



# Índice de Tablas

4.1. Simulación ideal . . . . .	<b>31</b>
4.2. Ruido sal y pimienta . . . . .	<b>31</b>
4.3. Ruido Gaussiano . . . . .	<b>32</b>
4.4. Pruebas con el dispositivo . . . . .	<b>33</b>

---

## 0.1. Agradecimiento

A mi familia por el apoyo, mi asesor por su confianza y mis profesores por construir el conocimiento que hizo posible este trabajo

# Capítulo 1

## Resumen

Se realizó un tratamiento de imágenes con propósitos de bioseguridad, mediante el uso de huellas dactilares. Un diseño híbrido óptico-digital se presenta como una alternativa a las aplicaciones utilizadas hoy en día. El uso de la transformada de Fourier y sus propiedades permiten tratar el problema como un sistema lineal.

### 1.1. Summary

Image processing was carried out for biosafety purposes, through the use of fingerprints. An optical-digital hybrid design is presented as an alternative to the applications used today. The use of the Fourier transform and its properties allow treating the problem as a linear system.

# Capítulo 2

## Introducción

Las técnicas de reconocimiento en huellas se inician en el siglo XIX por Sir Francis Galton [1] quien da comienzo a la alternativa de uso de las huellas dactilares como complemento a la firma en el uso de identificación, haciendo el desarrollo de otras formas de reconocimiento como el de retina o facial pero siendo las huellas dactilares las más fáciles en un uso ordinario en dispositivos portátiles en tema de seguridad donde se tiene la accesibilidad con el mayor número de usuarios, lo que permite hacer optimizaciones en los detectores cada vez más portátiles con diferentes implementaciones, se menciona tres tipos: sensor de estado sólido, ultrasónicos y ópticos, los cuales han logrado un auge en la investigación de algoritmos e implementación en sistema de seguridad en la información en comparación con otros métodos PIN (personal identification number) o contraseña los cuales dependen del cifrado de datos. En los años 80's y 90's se desarrollan varias propuestas en algoritmos de reconocimiento y recopilación de huellas dactilares con el fin de tener un control de seguridad en las fronteras de los países el cual permite tener el historial

---

del sujeto con restricciones al viajar, es en la actualidad donde es utilizado en sistemas de desbloqueo o pagos electrónicos debido a su fiabilidad, donde los sensores de estado sólido son los más comunes.

El Dr. Anil K. por su trabajo de 1996 usando Minutia Extraction y Minutia Matching [2, 3, 4, 5], es el referente en el análisis de huellas dactilares. Los demás trabajos usan segmentar las direcciones de las huellas, lo que representa una región en niveles de grises uniformes, de tal manera que al usar métodos estadísticos se logra recrear vectores de posición en puntos clave. Otra propuesta fue hecha por el Dr. Andrew K. Hrechakn, quien manejó la automatización del reconocimiento de huellas dactilares usando emparejamiento estructural, mediante un sistema antropométrico para el reconocimiento de patrones, además un estándar cualitativo global de la estructura buscando patrones y clasificando cada uno de los tipos de formas [6]. B.G. Sherlock y colaboradores proponen el uso de filtros direccionales de Fourier, con el fin de mejorar las imágenes de las huellas dactilares haciéndolas más nítidas, mediante el uso de filtros pasa bandas esto significa que la transformada de Fourier solo se utiliza para mejora de la imagen, no para el reconocimiento de las huellas dactilares [7]. El siguiente artículo del 2018 [8], hace una interpretación de usar la huella dactilar como una señal con cierta frecuencia y amplitud, donde se basa con los principios del Dr. Anil K. Jain. El siguiente del 2020 [9], la reconstrucción de las huellas con poca resolución a través de filtros para conseguir mayor nitidez comparándola con la original, el último artículo del 2021 [10], siendo el artículo con la metodología más cercana al trabajo, donde usan métodos no táctiles para la captura de los dedos para poder sacar las huellas dactilares usando la cámara de los teléfonos celulares.

---

## 2.1. Problemática

En la actualidad mantener los datos personales protegidos es un reto en un mundo conectado donde ya todo es digital, siendo la seguridad uno de los mayores problemas contra el robo o clonación de la información, por eso los sistemas actuales se basan en escáneres biométricos como lectores de huellas dactilares y reconocimiento de rostro con el fin de salvaguardar la privacidad de los usuarios.

## 2.2. Hipótesis

Los sistemas ópticos formadores de imágenes, como las cámaras fotográficas réflex, los telescopios, los microscopios o los endoscopios, capturan toda la luz que pasa por la pupila del sistema óptico, y está limitada a la frecuencia de corte del sistema lo cual representa una gran ventaja al segmentar la imagen usando la transformada de Fourier. En este sentido, usar de manera natural el sistema óptico formador de imágenes como un sistema lineal híbrido, óptico-digital, es una solución factible y económica.

## 2.3. Objetivo General

Diseñar un sistema óptico-digital formador de imágenes bajo iluminación natural (incoherente) bajo condiciones no controladas, que pueda ser utilizado como alternativa de los otros métodos, sin limitar el de estudio en las huellas dactilares. El beneficio no solo con capturar los detalles de los dedos, sino también obtener color, tamaño y forma, para hacer un algoritmo de re-

---

conocimiento de los patrones usando las propiedades de la transformada de Fourier.

## **2.4. Objetivo particular 1**

A partir de las imagenes capturadas mediante el sistema óptico, realizar el reconocimiento de patrones de las huellas.

## **2.5. Objetivo particular 2**

Generar un dispositivo fácil de replicar y bajo costo con el fin de generar otra propuesta de adquisición de las huellas para futuros trabajos.

# Capítulo 3

## Teoría de formación de imágenes

El objetivo de este capítulo es introducir los conceptos básicos para modelar el proceso de formación de imágenes. El tipo de iluminación, el tamaño y la forma de la función de pupila son solo algunas características que determinan el sistema óptico.

Por otro lado, la teoría de sistemas lineales es una herramienta útil para describir el proceso de formación de imágenes, y permite representar al sistema óptico mediante una función característica que lo define. Usualmente esta se obtiene cuando se forma la imagen de un punto luminoso y se le conoce como función de punto extendido, lo que en la teoría de sistemas lineales se le conoce como respuesta al impulso unitario. A continuación, se presentan los dos tratamientos típicos en la teoría de formación de imágenes que son una iluminación coherente y con iluminación incoherente.



---

## 3.1. Formación de imágenes con trazado de rayos en lentes delgadas

Una lente es una placa de vidrio, cuyas caras son por lo general esféricas y casi paralelas en el centro de una lente muy delgada. Consideramos un haz de rayos paralelos que inciden en una lente muy delgada. Si la lente hace que los haz de luz refractados converjan, se dice que la lente es convergente, y si hace que diverja, que la lente es divergente, también se dice que la lente divergente es negativa y la convergente es positiva. La función primordial de una lente es formar imágenes, por lo que es deseable estudiar esta propiedad de las lentes con algún detalle.

### 3.1.1. Puntos conjugados y amplificación lateral

Se parte de la siguiente ecuación donde  $l_1$ ,  $l_2'$  son las distancias de los objetos, si el grueso de las lentes es muy pequeña,

$$\frac{1}{f^2} = \frac{1}{l_2'} - \frac{n_1}{n_2' l_1}. \quad (3.1)$$

Pero si  $n_1 = n_2'$ , siendo  $n$  son coeficiente de reflexión, esta expresión se reduce de la siguiente forma, la cual se le conoce como ecuación general de las lentes delgadas,

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{l_2'} - \frac{1}{l_1}. \quad (3.2)$$

Con esta relación se puede calcular la posición de la imagen, dada la posición del objeto y la distancia focal. Las posiciones del objeto y su imagen

respectiva sobre el eje óptico se dice que son dos puntos conjugados. Por la definición de distancia focal, un rayo que llega a la lente paralelo al eje óptico pasa por el foco  $F_2$ . En forma simultánea a un rayo que llega a la lente después de pasar por el foco  $F_1$  saldrá de ella paralelo al eje óptico.

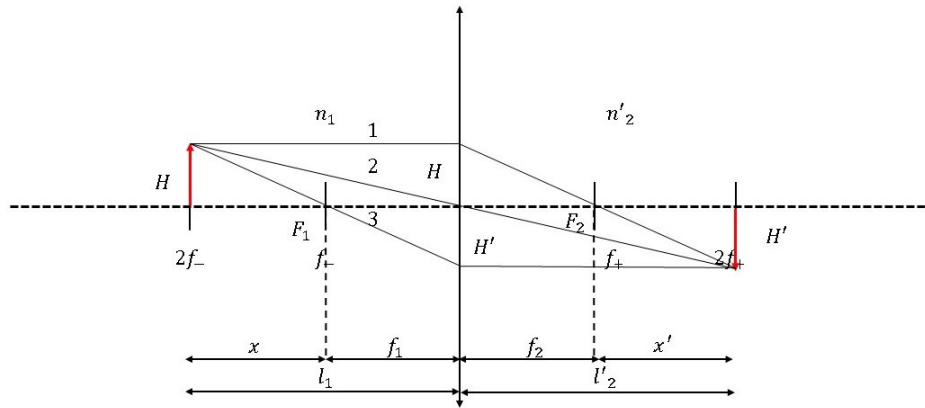


Figura 3.1: Posición del objeto y la imagen, o puntos conjugados.

Como se muestra en la figura [3.1](#) el rayo 1 llega paralelo al eje óptico y por lo tanto pasa por el foco  $F_2$  después de refractarse. El rayo pasa por  $f_1$ , por lo que sale de la lente paralelo al eje óptico. En la figura [3.1](#) las distancias  $l_1$  y  $H'$  son negativas, de acuerdo con nuestra notación de signos ya establecida. las distancias  $x$  y  $x'$  de la figura [3.1](#) quedan dadas por,

$$x' = l_2' - f_2, \quad (3.3)$$

y

$$x = -l_1 - f_1, \quad (3.4)$$

---

considerando el lado izquierdo de la lente tenemos que,

$$\frac{H}{-H'} = \frac{x}{f_1}, \quad (3.5)$$

y considerando el lado derecho,

$$\frac{H}{-H'} = \frac{f_2}{x'}, \quad (3.6)$$

de donde, igualando estas dos expansiones, se obtiene,

$$xx' = f_1 f_2. \quad (3.7)$$

Ésta es la forma en que Newton relacionó las posiciones del objeto y su imagen, por lo que a esta expresión se la conoce como fórmula de Newton. Si sustituimos en la fórmula de Newton los valores de  $x$  y  $x'$  dados por las ecuaciones [3.3](#) y [3.4](#) obtenemos,

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{l_2'} - \frac{f_1}{f_2 l_1}. \quad (3.8)$$

la amplificación lateral está definida como,

$$M = -\frac{H'}{H}. \quad (3.9)$$

Algunas propiedades importantes relativas a la formación de imágenes, como un sistema de lentes, se puede encontrar con el uso de la definición de distancias focales efectivas y el teorema de Lagrange. La amplificación lateral se puede encontrar utilizando el teorema de Lagrange como,

---


$$M = -\frac{H'}{H} = -\frac{z_2}{z_1} = \frac{nu}{n'u'}, \quad (3.10)$$

por lo tanto, de las ecuaciones 3.6 y 3.3 se puede ver que,

$$M = -\frac{x'}{f_2} = 1 - \frac{l_2'}{f_2}, \quad (3.11)$$

usando ahora el valor de  $f_2$  de la ecuación 3.1, obtenemos la siguiente expresión para la amplificación lateral,

$$M = \frac{n_1 l_2'}{n_2' l_1}, \quad (3.12)$$

cuando  $n_1 = n_2'$ , esta relación se reduce a,

$$M = \frac{l_2'}{l_1}. \quad (3.13)$$

Si igualamos la ecuación 3.13 con la 3.9 podemos demostrar que un rayo que pase por el centro de un lente no cambia su dirección después de salir de la lente si y solamente si  $n_1 = n_2'$  [11].

## 3.2. Formación de imágenes con iluminación coherente

La formación de imágenes tiene como punto de partida la teoría escalar de la difracción. La perturbación óptica cuando pasa a través de una abertura finita produce una distribución en el llamado plano de observación, cuando la perturbación es de tipo coherente el tratamiento es en amplitud compleja. La

iluminación coherente se debe a las contribuciones de cada punto luminoso de un frente de onda y que además cada uno de los puntos luminosos presenta la misma fase [12]. La siguiente figura representa el paso de la perturbación a través de una abertura.

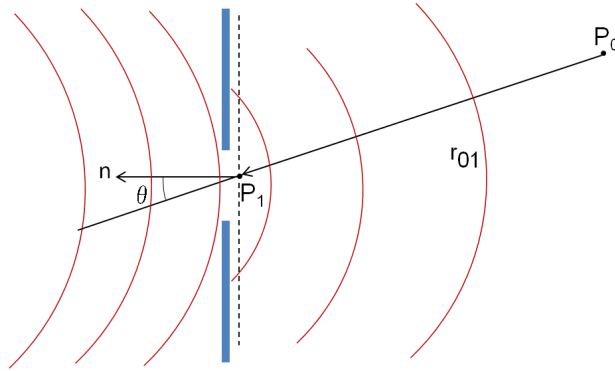


Figura 3.2: La abertura está colocada en un punto  $P_1$  arbitrario al plano de la abertura representada en azul, la propagación de la perturbación viene de izquierda a derecha y el plano de observación está colocado en un punto arbitrario  $P_0$ .

Bajo la consideración de usar una iluminación coherente escalar, *Huygens–Fresnel* proponen una superposición de ondas esféricas al atravesar esta abertura y esta formulación da como resultado la siguiente ecuación [13, 14, 15],

$$U(P_0) = \frac{1}{i\lambda} \iint U(P_1) \frac{e^{(ikr_{01})}}{r_{01}} \cos \theta ds, \quad (3.14)$$

donde  $U(P_0)$  es el campo en el punto  $P_0$  producido por la perturbación proveniente de la abertura,  $P_1$  es un punto arbitrario en el plano de la abertura,  $i$  es la raíz cuadrada de  $-1$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $r_{01}$  es la distancia desde el punto  $P_0$  al punto  $P_1$ ,  $\theta$  es el ángulo que se forma entre el vector de la normal y el de la distancia  $r_{01}$  y  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  que corresponde al número de onda, ver figura 3.2.

Sin embargo, al expresar el  $\cos \theta = \frac{z}{r_{01}}$  y además ejemplificando la figura 3.2 usando un nuevo esquema como el de la siguiente figura, se puede reescribir la ecuación 3.14 usando el caso de coordenadas rectangulares.

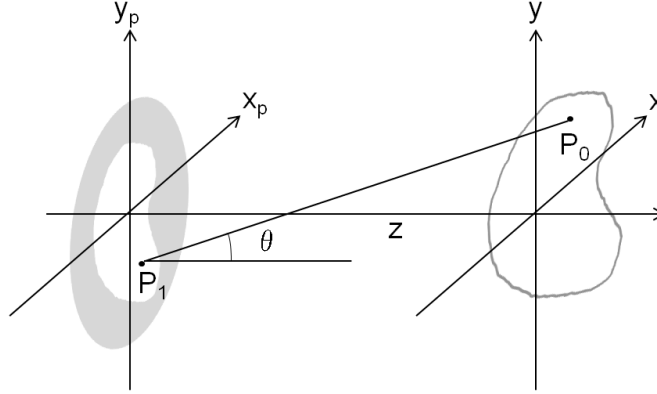


Figura 3.3: Sistemas de coordenadas rectangulares para el tratamiento del problema de difracción.

Como se muestra en la figura 3.3, la abertura de difracción se supone en el plano  $(x_p, y_p)$  y el plano  $(x, y)$  contiene el punto de observación  $P_0$  por lo que el campo difractado se expresa de la siguiente manera,

$$U(x, y) = \frac{z}{i\lambda} \iint U(x_p, y_p) \frac{e^{(ikr_{01})}}{r_{01}^2} dx_p dy_p, \quad (3.15)$$

donde  $r_{01} = \sqrt{z + (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2}$  para la figura 3.3, utilizando una expansión binomial,  $r_{01}$  queda expresada de la siguiente manera,

$$r_{01} \approx z \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{x - x_p}{z} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{y - y_p}{z} \right)^2 \right]. \quad (3.16)$$

Al utilizar la expansión dada por la ecuación 3.16 se puede realizar una aproximación conocida como aproximación paraxial, obteniendo la siguiente ecuación [13],

---


$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \int \int U(x_p, y_p) e^{i\frac{k}{2z}(x_p^2+y_p^2)} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_p x + y_p y)} dx_p dy_p. \quad (3.17)$$

A la ecuación [3.17](#) se le conoce aproximación de *Fresnel* ó difracción de campo cercano, y se observa que se puede calcular realizando la transformada de Fourier del producto de la amplitud compleja en la abertura con un factor de fase cuadrático.

Existe otra aproximación que se puede realizar a partir de la difracción de Fresnel. Si  $z$  es más grande que el factor de fase cuadrático, es decir, si  $z \gg \frac{k(x_p^2+y_p^2)}{2}$ , este término cuadrático se puede aproximar a la unidad y por lo tanto la perturbación en el punto de observación queda expresada en,

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \int \int U(x_p, y_p) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda z}(x_p x + y_p y)} dx_p dy_p. \quad (3.18)$$

La aproximación dada por la ecuación [3.18](#) es conocida como difracción de Fraunhofer ó de campo lejano y puede también escribir de la siguiente manera,

$$U(x, y) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{i\frac{k}{2z}(x^2+y^2)} \int \int U(u, v) e^{-i2\pi(ux+vy)} dudv, \quad (3.19)$$

donde hemos introducido las variables  $u$  y  $v$ , que se conocen como las frecuencias espaciales y se definen de la forma  $u = \frac{x_p}{\lambda z}$  y  $v = \frac{y_p}{\lambda z}$ . Se observa que la difracción de Fraunhofer coincide con la transformada de Fourier de la amplitud compleja en el plano de la abertura.

---

### 3.2.1. Respuesta al impulso de una lente positiva

Debido a la intención de formar imágenes con un sistema formador de imágenes es importante mencionar el caso mas general para cuando se hace uso de una lente. Se propone el esquema del arreglo de la figura 3.4 donde se puede observar que está colocada una abertura a una distancia  $z_1$  con una transmitancia de  $At_a(x, y)$ , donde  $A$  es la amplitud de la perturbación y  $t_a(x, y)$  es la transmitancia de la perturbación en amplitud compleja; una lente delgada está colocada entre las distancias  $z_1$  y  $z_2$  y finalmente el plano de observación está colocado a una distancia  $z_2$ .

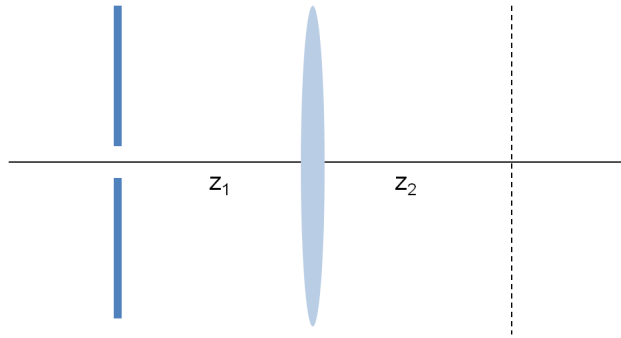


Figura 3.4: Geometría de la formación de imágenes.

La lente tiene una distancia focal  $f$  con un tamaño finito que está asociada con una función de pupila  $P(x_p, y_p)$  la transmitancia de la lente,  $t_l$ , se expresa por la ecuación [13],

$$t_l(x, y) = P(x_p, y_p)e^{-i\frac{k}{2f}(x^2+y^2)}. \quad (3.20)$$

Se asume que la aproximación de Fresnel es válida para la propagación de la abertura a la distancia  $z_1$ , también la propagación desde la lente al plano de observación en la distancia  $z_2$  y además tomando en cuenta la transmitancia



---

de la lente con su distancia focal  $f$ . Entonces la relación de estas distancias contiene todos estos factores cuadráticos de fase y se expresa por la siguiente expresión,

$$e^{\left[ \frac{ik}{2} \left( \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{f} \right) (x^2 + y^2) \right]}. \quad (3.21)$$

Se puede notar de la expresión anterior que el argumento de la fase tiene una expresión donde se relacionan las distancias como,

$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{f} = 0. \quad (3.22)$$

Esta relación es conocida como la ecuación de lentes delgadas si se cumple esta expresión entonces queda una transformada de Fourier exacta.

Si se toma en cuenta la linealidad del fenómeno de propagación de ondas, se puede tomar en cuenta una integral de superposición de la forma,

$$U_i(x, y) = \int \int \tilde{h}(x, y; x_o, y_o) U(x_o, y_o) dx_o dy_o, \quad (3.23)$$

donde  $\tilde{h}(x, y; x_o, y_o)$  es el campo en amplitud compleja en coordenadas  $(x, y)$  producido por un punto luminoso en coordenadas del objeto  $(x_o, y_o)$ ,  $U_i(x, y)$  es la distribución compleja en el plano de la imagen. La respuesta por el punto luminoso queda de la siguiente manera,

$$\tilde{h}(x, y; x_o, y_o) = \frac{1}{\lambda^2 z_1 z_2} \int \int P(x_p, y_p) e^{-i \left[ \frac{2\pi}{\lambda z_2} (x - M x_o) x_p + (y - M y_o) y_p \right]} dx_p dy_p, \quad (3.24)$$

donde la ecuación [3.10](#) se refiere a la amplificación, por lo tanto si la ley

de las lentes delgadas se cumple, la respuesta al punto luminoso esta dada por la difracción de aproximación de Fraunhofer de la abertura de la lente, centrada sobre las coordenadas de la imagen ( $u = Mx_o, v = My_o$ ).

Tomando en cuenta el caso general de una lente, se representa un sistema óptico formador de imágenes es mediante el esquema de la figura [3.5](#).

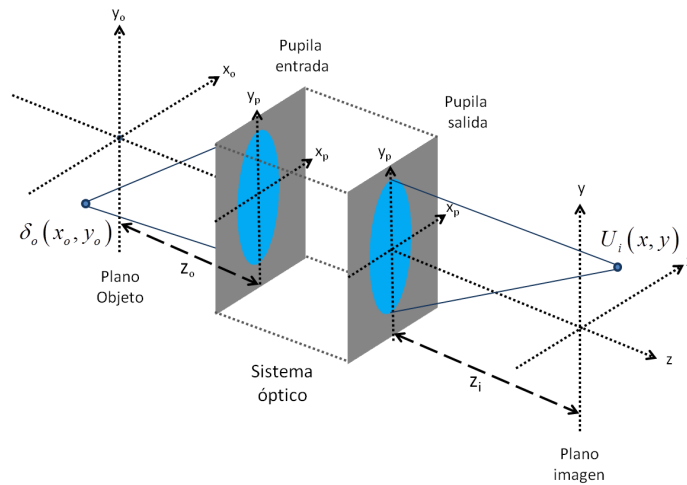


Figura 3.5: Sistema formador de imágenes.

en donde se observa que está conformado por dos planos, el plano del objeto el cual esta localizado a una distancia  $z_o$  de la pupila de entrada al sistema óptico y el plano de la imagen a una distancia  $z_i$  a la pupila de salida del sistema óptico; el sistema óptico puede contener muchos elementos ópticos pero siempre contiene una pupila de entrada y una pupila de salida y es posible hacer esta simplificación dado que una es imagen de la otra.

En términos de la teoría de sistemas lineales el plano del objeto puede ser identificado como el plano de entrada y el plano de la imagen como el plano de la salida. Suponiendo entonces válido el principio de superposición se puede escribir una expresión que defina el proceso de formación de imágenes en

---

términos de un estímulo puntual lo cual en este caso correspondería con un objeto que consiste de un punto luminoso y se expresaría como,

$$g_a(x, y) = \int \int \tilde{h}(x - x_o, y - y_o) \delta(x_o, y_o) dx_o dy_o, \quad (3.25)$$

donde  $g_a(x, y)$  es la salida del sistema óptico en su función compleja,  $\tilde{h}(x - x_o, y - y_o)$  es la función característica del sistema óptico y  $\delta(x_o, y_o)$  es el estímulo producido por un punto luminoso en el plano del objeto. Por lo tanto la salida se le conoce a la llamada *apsf* (amplitude point spread function). Entonces, tomando en cuenta la ecuación [3.24](#) la *psf* (point spread function) corresponde a la transformada de Fourier de la función de pupila  $P(x_p, y_p)$  y se expresa por la siguiente ecuación,

$$\tilde{h}(x, y) = \int \int P(u, v) e^{-i2\pi(ux+vy)} dudv \quad (3.26)$$

donde  $u = \frac{x_p}{\lambda z_i}$  y  $v = \frac{y_p}{\lambda z_i}$  son las variables espaciales y están en términos de las coordenadas del plano de la pupila. Si ahora el objeto es representado por una distribución de amplitud compleja  $o_a(x_o, y_o)$ , la imagen correspondiente a partir de la ecuación [3.25](#) queda de la siguiente manera,

$$g_a(x, y) = \int \int \tilde{h}(x - x_o, y - y_o) o_a(x_o, y_o) dx_o dy_o. \quad (3.27)$$

Se observa que la ecuación [3.27](#) es una integral de convolución, de ahí se puede concluir que los sistemas ópticos formadores de imágenes con iluminación coherente son lineales en amplitud compleja. Hasta aquí se ha tratado el caso de iluminación coherente, a continuación se estudiará el caso para iluminación incoherente.

---

### 3.3. Formación de imágenes con iluminación incoherente

En la sección anterior se presentó una formulación para el proceso de formación de imágenes usando luz coherente, en cambio cuando se usa iluminación incoherente el tratamiento es distinto. En este caso la iluminación presenta una fase aleatoria, es decir, la naturaleza de este tipo de luz es estadística y existe una dependencia tanto del tiempo como del espacio, así que es necesario realizar un promedio temporal con lo cual la ecuación de formación de imágenes queda de la siguiente manera,

$$g_i(x, y) = \langle |\int \int \tilde{h}(x - x_o, y - y_o) o_a(x_o, y_o; t) dx_o dy_o|^2 \rangle, \quad (3.28)$$

donde  $g_i(x, y)$  es la salida del sistema óptico en intensidad, sin embargo al tomar módulo cuadrado de  $g_i(x, y)$  queda la siguiente expresión,

$$\begin{aligned} g_i(x, y) &= \int \int dx_o dy_o \int \int dx_o dy_o \tilde{h}(x - x_o, y - y_o) \tilde{h}^*(x - x_o, y - y_o) \\ &\times \langle o_a(x_o, y_o; t) o_a^*(x_o, y_o; t) \rangle, \end{aligned} \quad (3.29)$$

donde  $o_i(x_o, y_o) = \langle o_a(x_o, y_o; t) o_a^*(x_o, y_o; t) \rangle$  y  $h(x - x_o, y - y_o) = \tilde{h}(x - x_o, y - y_o) \tilde{h}^*(x - x_o, y - y_o)$  utilizando la teoría de coherencia, por lo que la ecuación de formación de imágenes en este caso resulta [\[13\]](#),

---


$$g_i(x, y) = \int \int h(x - x_o, y - y_o) o_i(x_o, y_o) dx_o dy_o, \quad (3.30)$$

donde  $g_i(x, y)$  es la salida del sistema óptico en intensidad,  $o_i$  es la transmitancia en intensidad del objeto y  $h(x, y)$  es conocida como ipsf (intensity point spread function). La ecuación anterior es también una integral de convolución con lo cual se concluye que un sistema óptico formador de imágenes con iluminación incoherente es lineal en intensidad.

### 3.4. Sistema formador de imágenes como sistema lineal.

Se usarán las ventajas de la teoría sistemas lineales para el tratamiento de sistemas formadores de imágenes. La ecuación [3.27](#) se expresa de manera muy simple de la siguiente forma,

$$g_a(x, y) = \tilde{h}(x, y) \star o_a(x, y), \quad (3.31)$$

donde  $g_a(x, y)$  es la distribución de amplitud compleja en el plano de salida,  $o_a(x, y)$  es la transmitancia del objeto en amplitud compleja,  $\tilde{h}(x, y)$  es la *psf* y  $\star$  significa operación de convolución.

Por otro lado, en el caso de iluminación incoherente se puede escribir la ecuación [3.28](#) de la siguiente manera,

---


$$g_i(x, y) = h(x, y) \star o_i(x, y), \quad (3.32)$$

donde  $g_i(x, y)$  es la distribución en intensidad en el plano de salida,  $h(x, y)$  es la función de punto extendido en intensidad,  $o_i(x_o, y_o)$  es la transmitancia del objeto en intensidad y  $[\star]$  indica convolución.

### 3.4.1. Respuesta en Frecuencia del caso coherente

Cuando se realiza un tratamiento usando la transformada de *Fourier* se dice que el tratamiento es en el espacio de Fourier o espacio de frecuencia. Al observar que la integral de la ecuación [3.27](#) es una integral de convolución y hacer un análisis en el espacio de las frecuencias se tiene como resultado una simple multiplicación de los espectros y así definimos la ATF (Amplitude Transference Function), la cual es la transformada de *Fourier* de la *psf*, y se escribe de la siguiente forma,

$$H(u, v) = F\{\tilde{h}(x, y)\}, \quad (3.33)$$

donde  $H(u, v)$  se le conoce como *Función de Transferencia Coherente*, y  $u$  y  $v$  son las variables en el espacio de las frecuencias antes mencionadas. Es necesario reconocer que las distribuciones de amplitud compleja del objeto y de la imagen se les puede expresar en el dominio de las frecuencias, es decir, encontrar el espectro de la ecuación [3.31](#) quedando como sigue,

---


$$G_a(u, v) = H(u, v) O_a(u, v), \quad (3.34)$$

donde  $O_a(u, v)$  corresponde al espectro del objeto,  $G_a(u, v)$  es el espectro de la imagen. Para el caso de una abertura circular con función de pupila  $P(x, y)$  como la siguiente expresión,

$$P(x_p, y_p) = \text{circ} \left( \sqrt{\frac{x_p^2 + y_p^2}{r}} \right), \quad (3.35)$$

donde  $r$  es el radio de la abertura circular y  $x, y$  corresponden a las coordenadas espaciales. Entonces, la función de transferencia se puede escribir de la siguiente forma,

$$H(u, v) = \text{circ} \left( \sqrt{\frac{u^2 + v^2}{\rho_c}} \right), \quad (3.36)$$

donde  $(u, v)$  corresponde a las frecuencias espaciales donde  $u = \frac{x_p}{\lambda z_i}$  y  $v = \frac{y_p}{\lambda z_i}$ ,  $\rho_c = \frac{r}{\lambda z_i}$  es la frecuencia de corte del sistema,  $\lambda$  la longitud de onda y  $z$  la distancia al plano imagen. Con este ejemplo se concluye el estudio en frecuencias de sistemas formadores de imágenes en iluminación coherente y a continuación se describe el caso de iluminación incoherente.

### 3.4.2. Respuesta en Frecuencia del caso incoherente

Para representar el caso incoherente en el espacio de frecuencias, es realizar la transformada Fourier de la ecuación [3.32](#), con lo que se obtiene,

$$G_i(u, v) = OTF(u, v) O_i(u, v), \quad (3.37)$$

donde  $O_i(u, v)$  corresponde al espectro de la distribución de intensidad del objeto,  $G_i(u, v)$  es el espectro de la imagen y la transformada de Fourier de  $h(x, y)$  se le conoce como OTF (optical transference function). Al módulo de la función de transferencia óptica,  $|OTF(u, v)|$ , se le conoce como MTF (Modulation Transference Function). Particularmente se puede verificar que la función de transferencia óptica de la siguiente manera,

$$OTF(u, v) = H(u, v)H^*(u, v), \quad (3.38)$$

donde  $OTF(u, v)$  es la transformada de Fourier de  $\tilde{h}(x, y)$  por la transformada de Fourier de su complejo conjugado. Para el caso de una abertura circular con función de pupila  $P(x, y)$  como la ecuación [3.35](#), la función de transferencia óptica queda de la siguiente forma,

$$OTF(u, v) = \frac{\int \int P(x_p + \lambda z_i u, y_p + \lambda z_i v) P(x_p - \lambda z_i u, y_p - \lambda z_i v) dx_p dy_p}{\int \int P(x_p, y_p) dx_p dy_p} \quad (3.39)$$

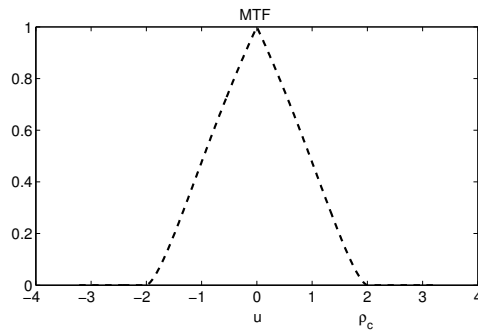


Figura 3.6: MTF de una función de pupila de forma circular.

En la figura anterior se muestra la MTF de una función de pupila circular,



---

se muestra que la frecuencia de corte esta normalizada y también que es el doble de la frecuencia de corte coherente. Con este ejemplo se concluye el estudio en frecuencias de sistemas formadores de imágenes en iluminación incoherente y a continuación comienza el estudio central de este trabajo.

### 3.5. Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) es una medida de la asociación lineal de dos variables. El análisis de correlación generalmente comienza con una representación gráfica de la relación de pares de datos utilizando un diagrama de dispersión. Los valores del coeficiente de correlación varían de  $-1$  a  $+1$ . Los valores positivos del coeficiente de correlación indican una tendencia de una variable a aumentar o disminuir junto con otra variable. Los valores negativos del coeficiente de correlación indican una tendencia a que el aumento de los valores de una variable esté asociado con la disminución de los valores de la otra variable y viceversa. Los valores del coeficiente de correlación cercanos a cero indican una asociación baja entre variables, y aquellos cercanos a  $-1$  o  $+1$  indican una fuerte asociación lineal entre dos variables. El cuadrado del coeficiente de correlación es el coeficiente de determinación, que da la proporción de la variación en una variable que se puede explicar a partir de la variación de la otra variable, definición tomada de [10, 16].

Aquí lo consideramos como el fundamento que nos va a permitir encontrar réplicas de una subimagen  $w(x, y)$  de tamaño  $J \times K$  dentro de una imagen  $f(x, y)$  de dimensión  $M \times N$ , donde se supone que  $J \leq M$  y  $K \leq N$ . Aunque el enfoque de las correlaciones se puede formular en forma vectorial, resulta más

---

intuitivo trabajar directamente con el formato de imágenes o de subimágenes. En su forma más simple, la correlación entre  $f(x, y)$  y  $w(x, y)$  es,

$$c(s, t) = \sum_x \sum_y f(x, y)w(x - s, y - t), \quad (3.40)$$

donde  $s = 0, 1, 2, \dots, M - 1, t = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ , y la sumatoria se calcula para la región de la imagen donde se solapan  $w$  y  $f$ . La función de correlación dada por la ecuación [3.40](#) tiene la desventaja de ser sensible a los cambios de amplitud de  $f(x, y)$  y  $w(x, y)$ . Por ejemplo, si duplicamos todo los valores  $f(x, y)$ , se duplica el valor de  $c(s, t)$ . Una técnica utilizada con frecuencia para superar esta dificultad consiste en realizar la correspondencia mediante el coeficiente de correlación, que se define como,

$$r(s, t) = \frac{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)][w(x - s, y - t) - \bar{w}]}{\sum_x \sum_y [f(x, y) - \bar{f}(x, y)]^2 [w(x - s, y - t) - \bar{w}]^2}, \quad (3.41)$$

donde  $s = 0, 1, 2, \dots, M - 1, t = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ ,  $\bar{w}$  es el valor medio de los pixeles de  $w(x, y)$ ,  $\bar{f}(x, y)$  es el valor medio de  $f(x, y)$  en la región coincidente con la actual ubicación de  $w$ , y las sumatorias se calculan para las coordenadas comunes a  $f$  y  $w$ . El coeficiente de correlación  $r(s, t)$  esta normalizado en el rango de  $-1$  a  $1$ , y es independiente de los cambios de escala aplicados a la amplitud de  $f(x, y)$  y  $w(x, y)$ .

# Capítulo 4

## Metodología

En este capítulo se observa el desarrollo de la construcción del dispositivo donde se obtiene las huellas dactilares, donde se toma en cuenta la iluminación natural en una lente tubular, por una cámara Logitech C920 y procesada por Matlab para análisis de los resultados.

### 4.1. Diseño del sistema óptico

El diseño del sistema óptico formador de imágenes para el análisis de las huellas dactilares, está basado en el uso de luz incoherente como se muestra en el esquema [4.1](#), donde se muestra los planos,  $(x, y)$  y  $(u, v)$  que corresponde a el plano del objeto y la imagen en los planos  $(x, y)$  y el plano frecuencial  $(u, v)$  correspondiendo a la pupila o al sistema óptico

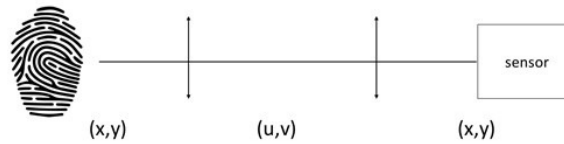


Figura 4.1: esquema de sistema óptico.

Con esto hacemos la captura de las huellas donde los primeros bocetos, son una captación similar a como se observa los microorganismos en un microscopio, teniendo una lámina delgada para poder capturar la imagen, pero debido al cambio de medios que afecta la formación de la imagen como se observa en esta ecuación [3.1](#), se opta por un sistema donde se presenta una lente tubular para la amplificación en arreglos de tres lentes de manera similar a los telescopios de refracción el cual amplía la imagen al detector; el cual nos permite tener una imagen más detallada y tener la facilidad de un mayor control de la captación de cada imagen al poder formar el objeto con tener un fondo definido y la flexibilidad de capturar diferentes formas o en casos extremos de personas con enfermedades cutáneas el cual no tienen definido los patrones de huellas dactilares. Al ser luz ambiental (iluminación incoherente) nos dan ventajas de convertirlo en un sistema lineal con un mayor rango de información, con esto tener el siguiente esquema del sistema óptico.

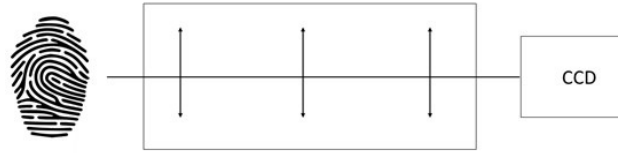


Figura 4.2: esquema del prototipo.

La cámara es una Logitech C920 el cual nos da una imagen de resolución 720X720 pixeles, al tener la idea de ser portable y de bajo costo no se opta tener otro tipo de dispositivo y al ser un sensor de dimensión 1/3" no se tiene problema de ruido térmico en las imágenes por largos periodos de uso además de tener enfocado la mayor parte de la imagen.

El prototipo final consta de la impresión 3D de las uniones de la lente tubular a la cámara el cual tiene la rosca para poder unirlo al dispositivo que nos permite ajustar la distancia de la lente junto con tres soportes con los cuales podemos variar en altura lo que nos permite colocarlo en cualquier posición sin tener problemas de estabilidad; este dispositivo está diseñado en SolidWorks en base a las medidas de la cámara y el soporte de las lentes tubulares.



Figura 4.3: soportes del dispositivo.

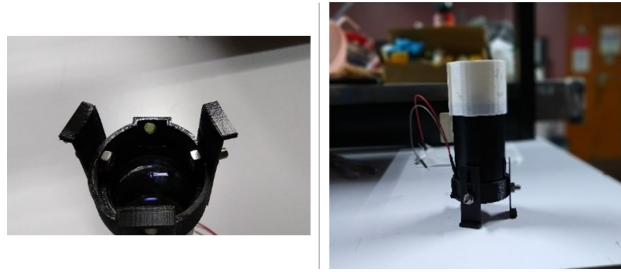


Figura 4.4: diseño final.

## 4.2. Desarrollo del programa

Matemáticamente se debe de hacer una interpretación de las fórmulas que representan la formación de imagen con luz incoherente, esto por el límite del S.O., por la construcción de la lente tubular y junto con la cámara debido a que esta última tiene integrado su propio sistema de detección; es necesario realizar un post procesado de las imágenes capturadas, se hace uso de la ecuación [3.37](#) que refiere a la formación de imágenes en el espacio frecuencial y que naturalmente se realiza el filtrado en este espacio.

Dentro del filtraje para esta aplicación se tienen dos opciones, filtrar frecuencias altas o bajas; cuando se hace el cambio de dominio espacial al frecuencial tenemos una matriz donde la mayor parte de la información del detalle de la huella digital esta albergada en las altas frecuencias, y es aquí donde se aprovecha analizar y realizar la similitud de una imagen con la otra.

Esto se ve observado en la tecnología reciente de las cámaras digitales de los equipos electrónicos, las cuales tienen la misma donde se limita de no poder hacer modificaciones al S.O., por lo cual se recurre a procesado de la imagen por medio de filtraje.

---

En la figura [3.6](#) se puede observar a partir de la MTF que la frecuencia de corte de un sistema óptico con iluminación incoherente es del doble de la frecuencia de corte con iluminación coherente, por esta razón es por ello por lo que se usó iluminación incoherente.

### 4.3. Simulación

Se usaron 4 imágenes que demuestran ejemplos representativos de cada huella dactilar para poner a prueba el programa y obtener el porcentaje de semejanza con cada imagen, debido que es de fondo blanco, esto para observar los casos ideales.



Figura 4.5: Huellas dactilares simuladas.

En la tabla [4.1](#) muestra el porcentaje de similitud de las imágenes con un caso ideal.

---

%	Huella 1	Huella 2	Huella 3	Huella 4
Huella 1	1.00	0.32	0.36	0.41
Huella 2	0.32	1.00	0.26	0.33
Huella 3	0.36	0.26	1.00	0.34
Huella 4	0.41	0.33	0.34	1.00

Tabla 4.1: Simulación ideal

Ahora se agregará ruido de tipo Gaussiano [4.3](#) junto con sal y pimienta [4.2](#) usando las funciones del Matlab siendo estos ruidos los más invasivos, con esto se podrá tener idea de los cambios, es debido que tener dos imágenes con variantes de la misma huella digital, con esto se tendría un margen para determinar un porcentaje de error.

%	Huella 1	Huella 2	Huella 3	Huella 4
Huella 1	0.72	0.19	0.26	0.29
Huella 2	0.23	0.61	0.18	0.23
Huella 3	0.26	0.16	0.70	0.24
Huella 4	0.3	0.20	0.24	0.71

Tabla 4.2: Ruido sal y pimienta



---

%	Huella 1	Huella 2	Huella 3	Huella 4
Huella 1	0.69	0.18	0.23	0.27
Huella 2	0.22	0.57	0.17	0.22
Huella 3	0.25	0.15	0.66	0.22
Huella 4	0.29	0.18	0.22	0.66

Tabla 4.3: Ruido Gaussiano

Con el resultado de la simulación, ahora se hacen pruebas con las fotos del dispositivo para obtener otra tabla de valores para ver la diferencia con cada huella antes de los resultados en un ambiente con luz variable y hacer las fotos de la misma huella con diferencia de horarios e iluminación de esta.

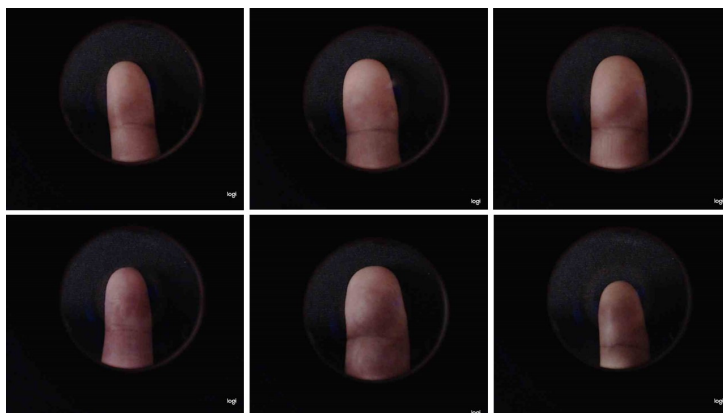


Figura 4.6: Prueba de huellas.

En la tabla [4.4](#) muestran los resultados de la comparación de las imágenes tomadas por el dispositivo, debido a las escalas de grises se muestran altos porcentajes de similitud.

---

%	Huella 1	Huella 2	Huella 3	Huella 4	Huella 5	Huella 6
Huella 1	1.0000	0.9886	0.9727	0.9359	0.9783	0.9487
Huella 2	0.9886	1.0000	0.9734	0.9313	0.9797	0.9454
Huella 3	0.9727	0.9734	1.0000	0.9583	0.9824	0.9554
Huella 4	0.9359	0.9313	0.9583	1.0000	0.9278	0.9715
Huella 5	0.9783	0.9797	0.9278	0.9278	1.0000	0.9369
Huella 6	0.9487	0.9454	0.9554	0.9715	0.9369	1.0000

Tabla 4.4: Pruebas con el dispositivo

# Capítulo 5

## Resultados

Con la información obtenidos en la simulación se pueden apreciar los porcentajes en un entorno controlado e ideal donde el valor de 1 se refiere a que son idénticos, cuando se introduce ruido gaussiano o sal y pimienta, se piensa que se puede simular imágenes para casos extremos.

En la tabla [4.4](#) se aprecia una muestra pequeña de la población a analizar, aquí se muestran los porcentajes de similitud entre las imágenes tomadas por el sistema óptico, como observamos con la tabla [4.2](#) y [4.3](#), el análisis de ruido nos permite tener una idea aproximada de la información sobre las imágenes capturadas, con el fin de crear un filtro que permita reducir la información del sistema y obtener imágenes más nítidas. Ahora se lleva al límite el dispositivo junto con el software, esto para conocer las áreas de mejoras y ver como optimizar la cámara con las lentes para implementación de un filtro. las imágenes se tomaron en una zona no controlada con variaciones en la iluminación debido al sol aparte de ser en distintos días, siendo 32 imágenes las cuales se tiene de la misma persona para hacer el análisis posterior con

---

el filtro. en cada imagen se anexa las gráficas de cada huella comparada con cada de las otras imágenes de esta, esto para observar las similitudes.

Este trabajo participo en el concurso nacional de aparatos y experimentos en septiembre del 2019 y fue presentado en el congreso nacional de física en octubre del 2019.

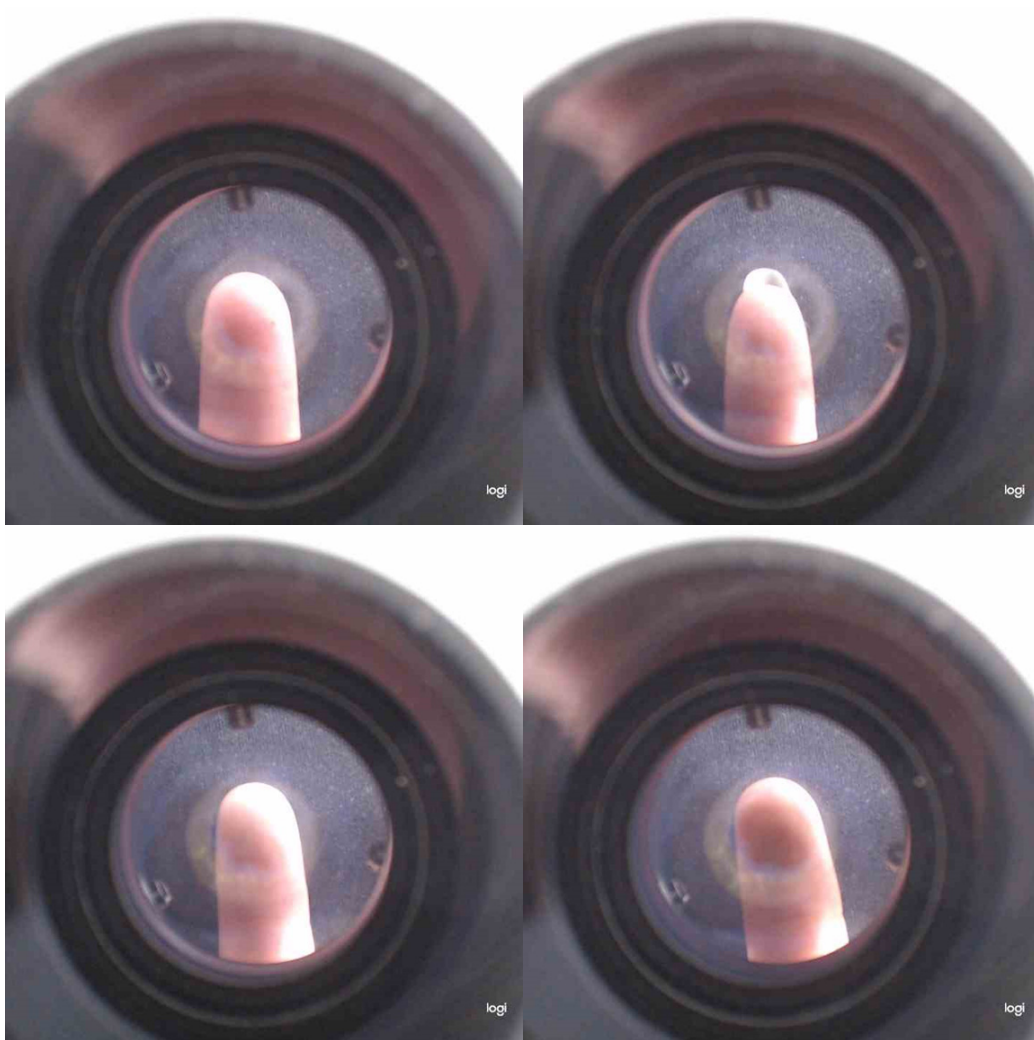


Figura 5.1: Huella 1 a la 4.

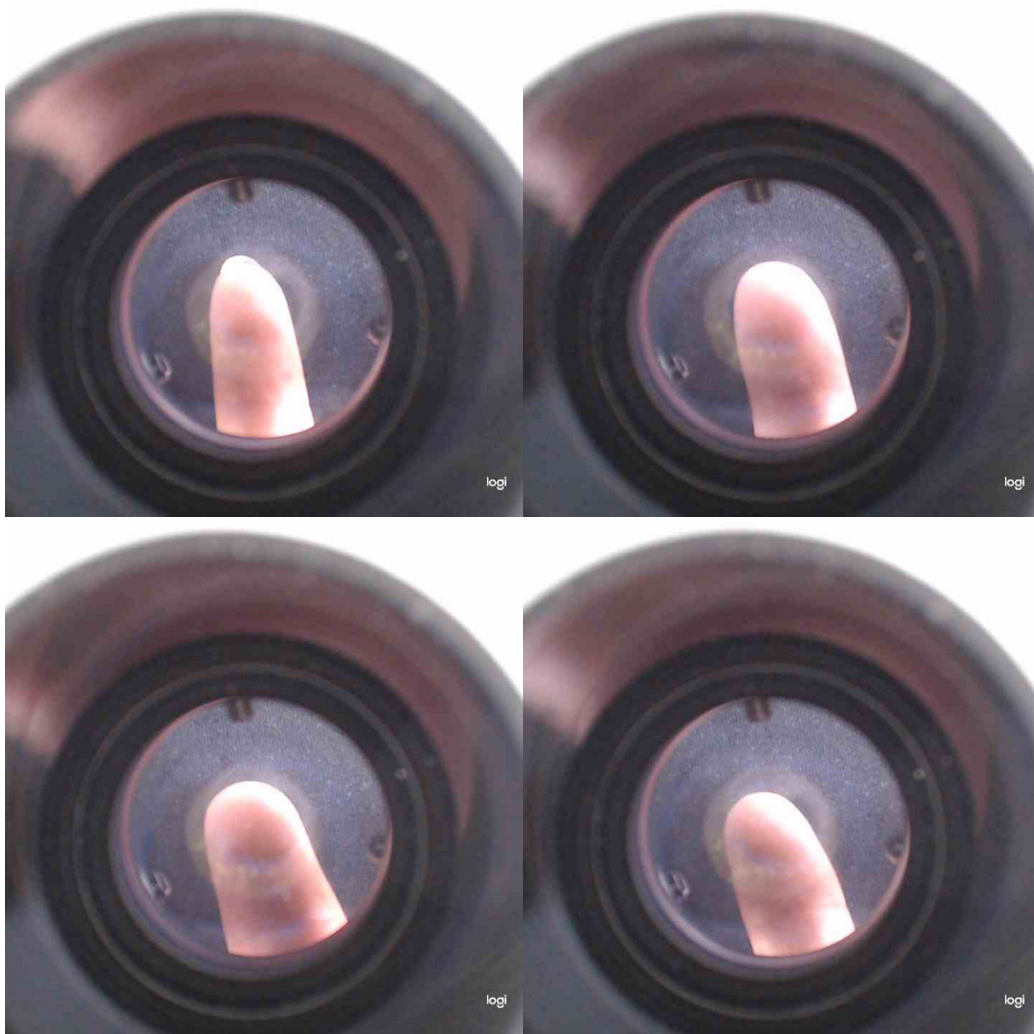


Figura 5.2: Huella 5 a la 8.

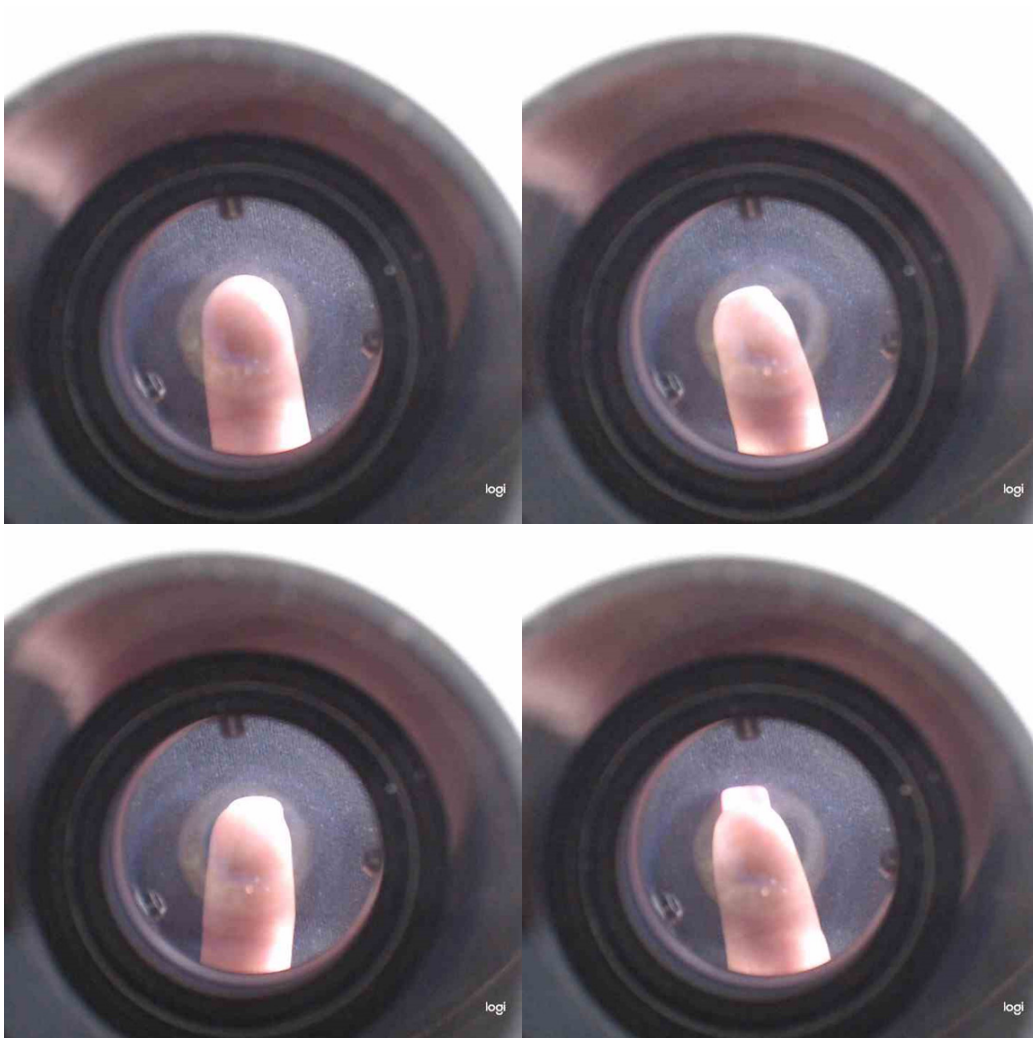


Figura 5.3: Huella 9 a la 12.

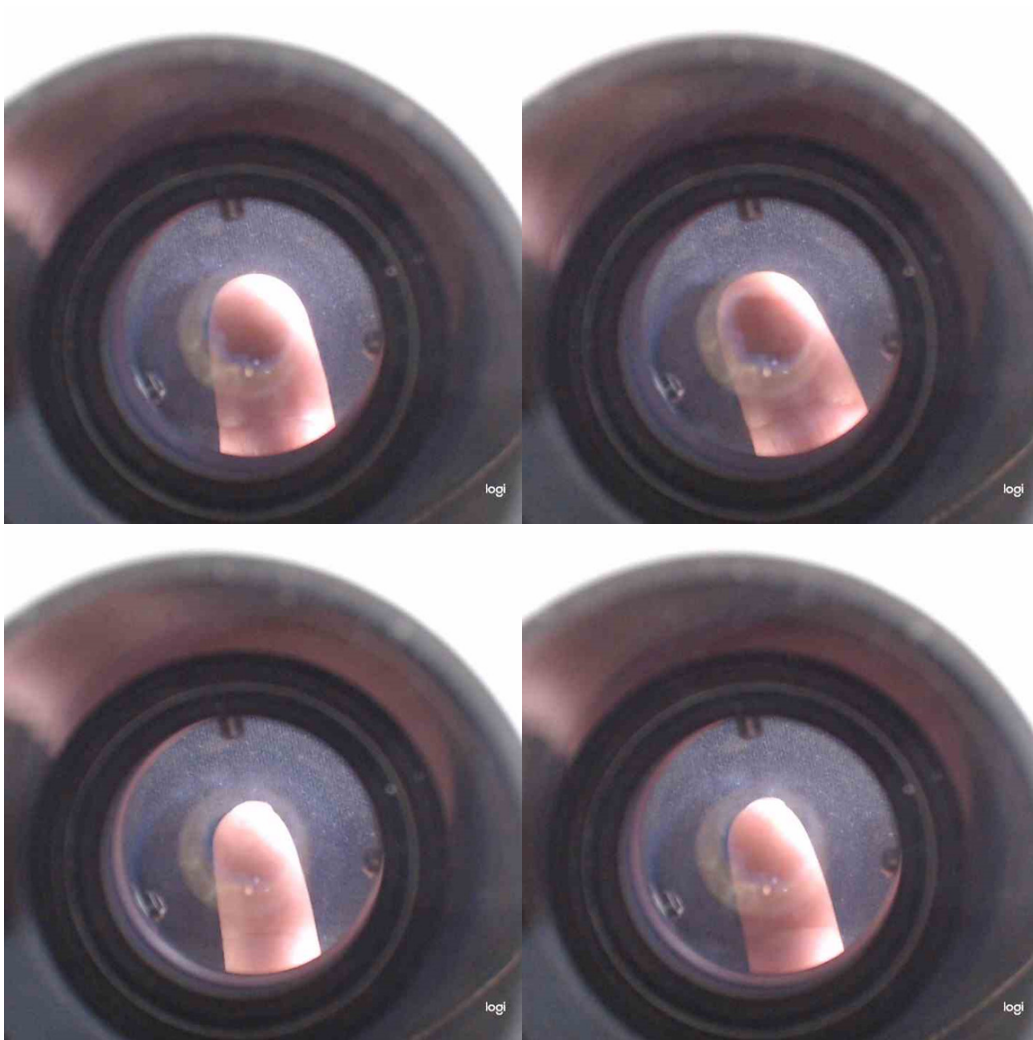


Figura 5.4: Huella 13 a la 16.

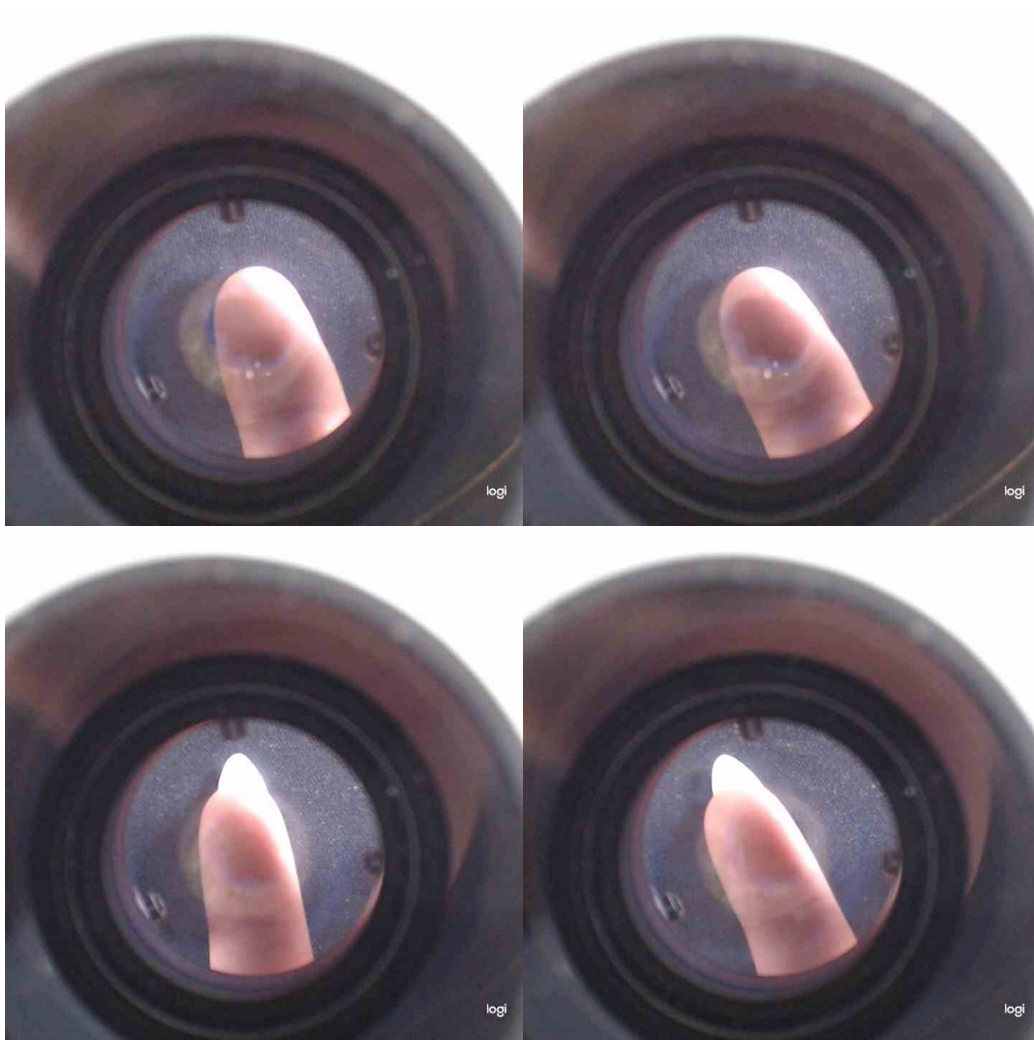


Figura 5.5: Huella 17 a la 20.



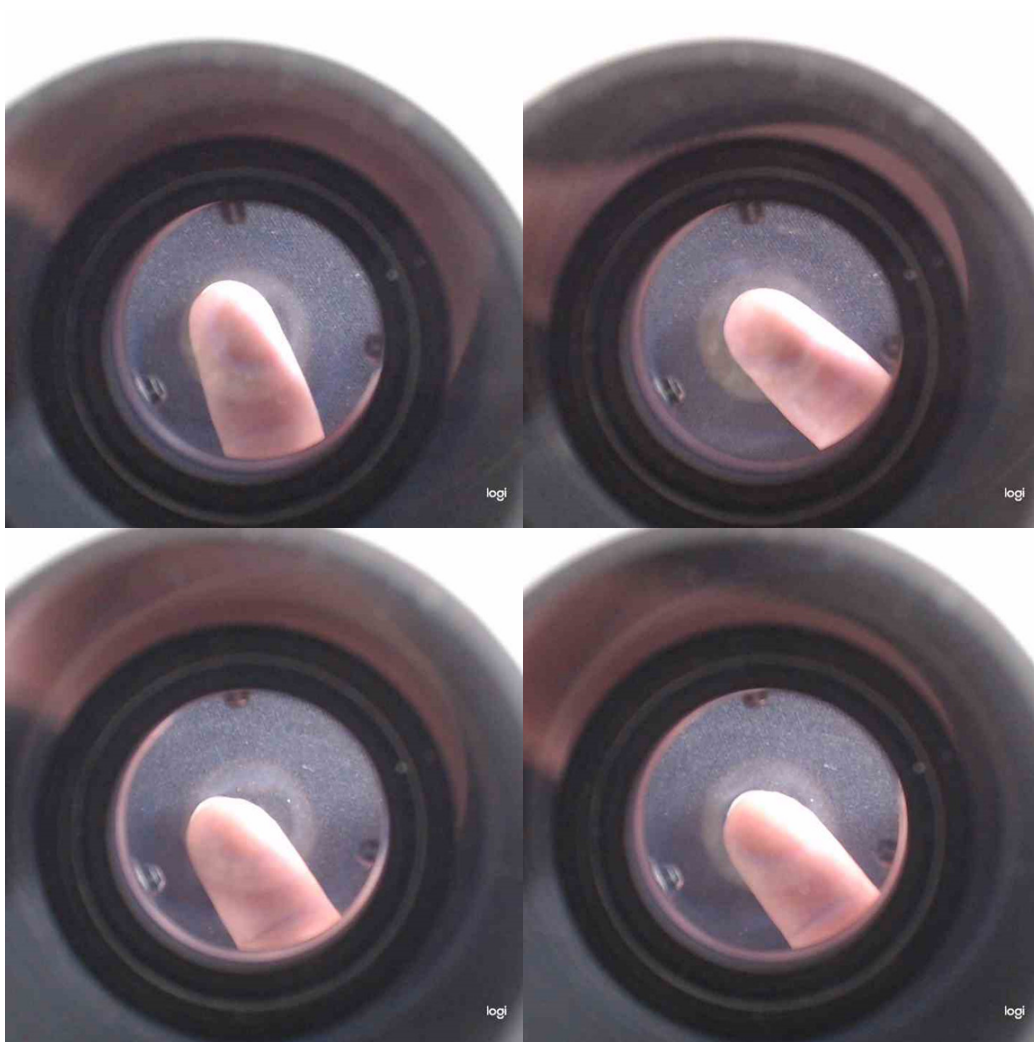


Figura 5.6: Huella 21 a la 24.

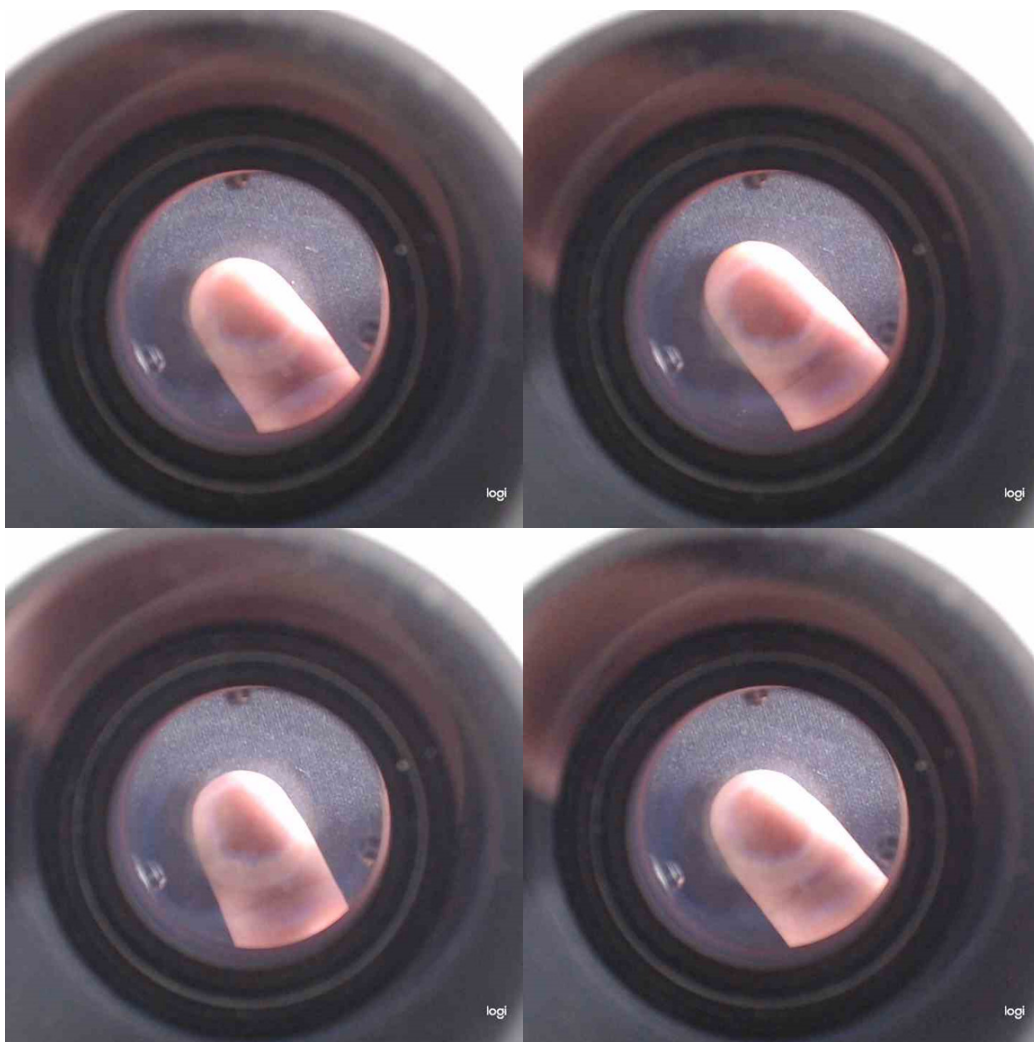


Figura 5.7: Huella 25 a la 28.

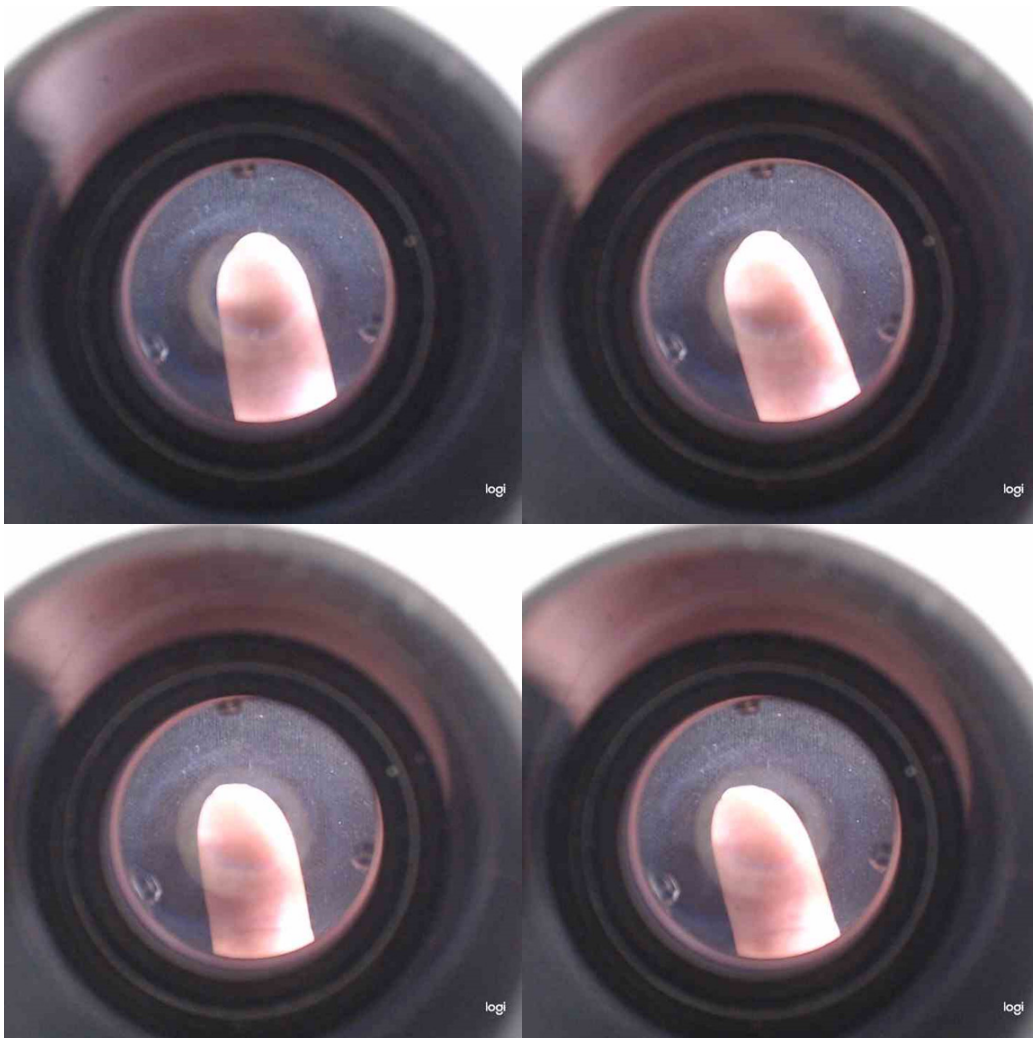


Figura 5.8: Huella 29 a la 32.

A continuación se observa las gráficas más representativas donde las demás están en el apéndice, la gráfica 7.1 se muestra como el umbral de error donde debajo de la línea roja son las huellas con un porcentaje de similitud menor de 95 %.

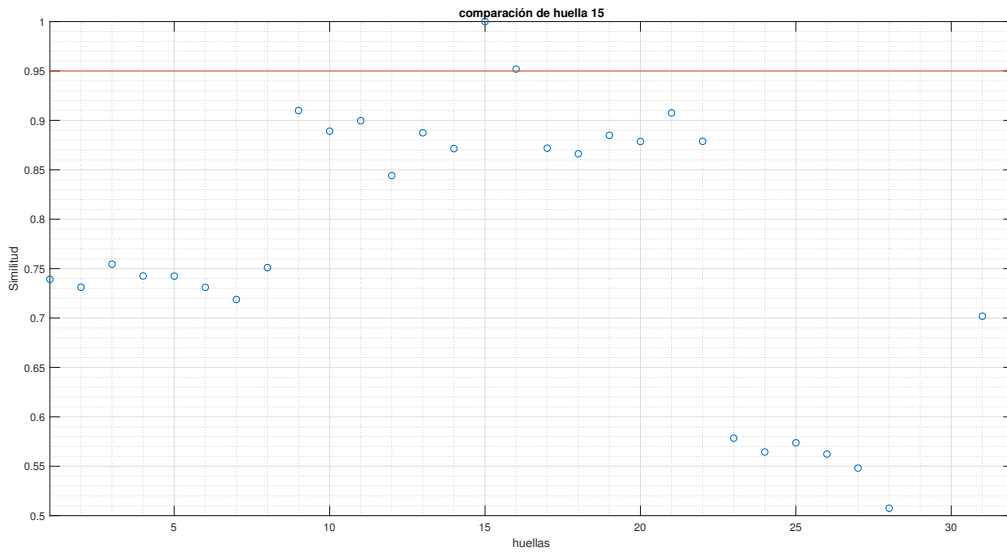


Figura 5.9: comparación de huella 15.

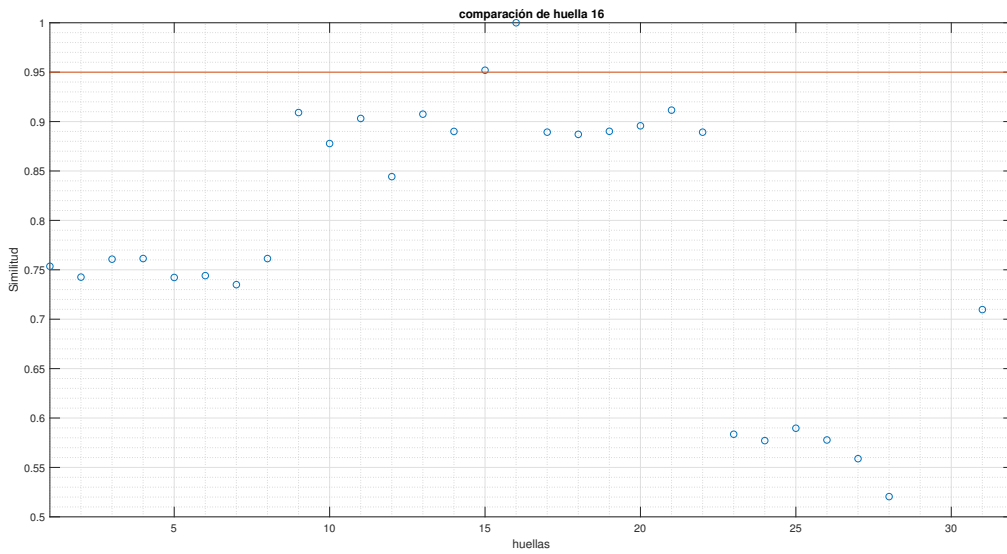


Figura 5.10: comparación de huella 16.

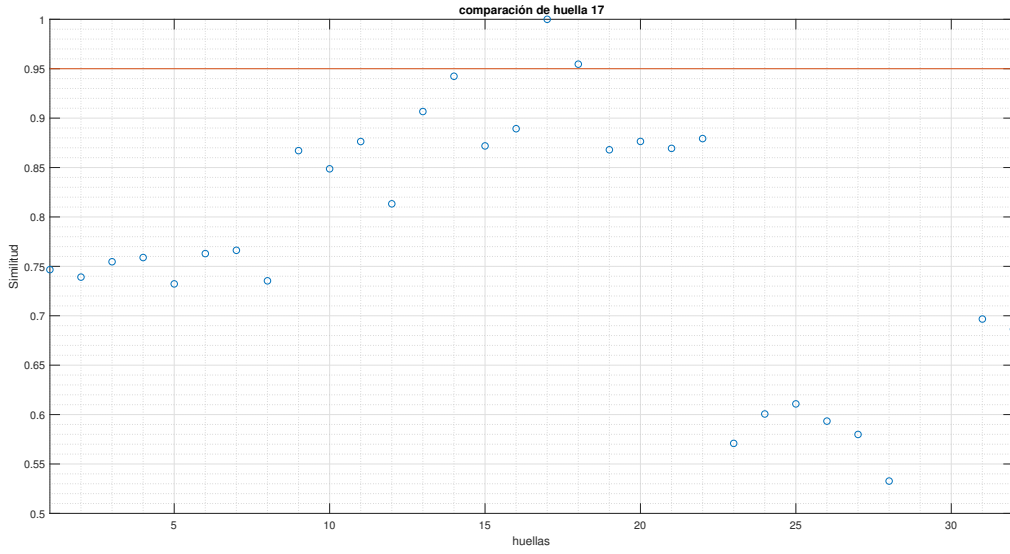


Figura 5.11: comparación de huella 17.

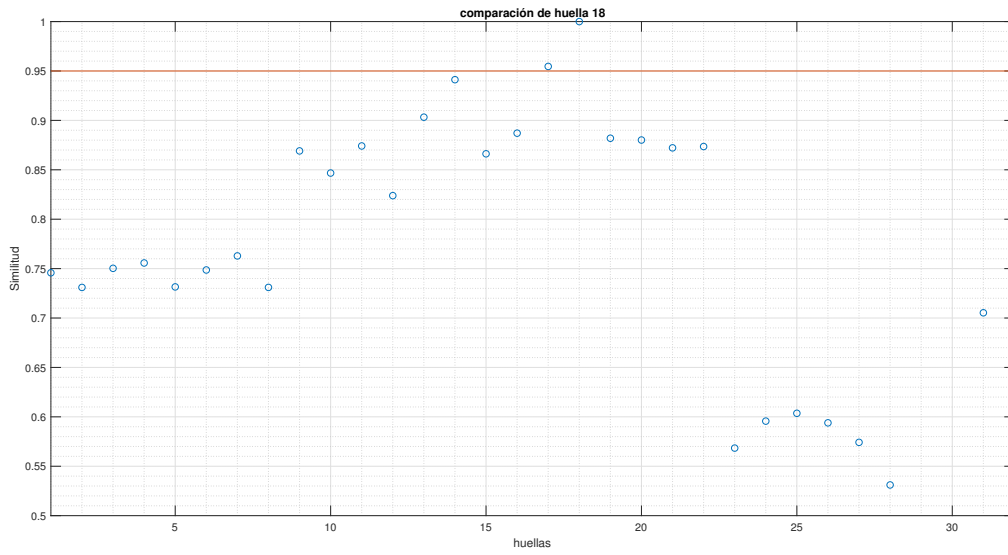


Figura 5.12: comparación de huella 18.

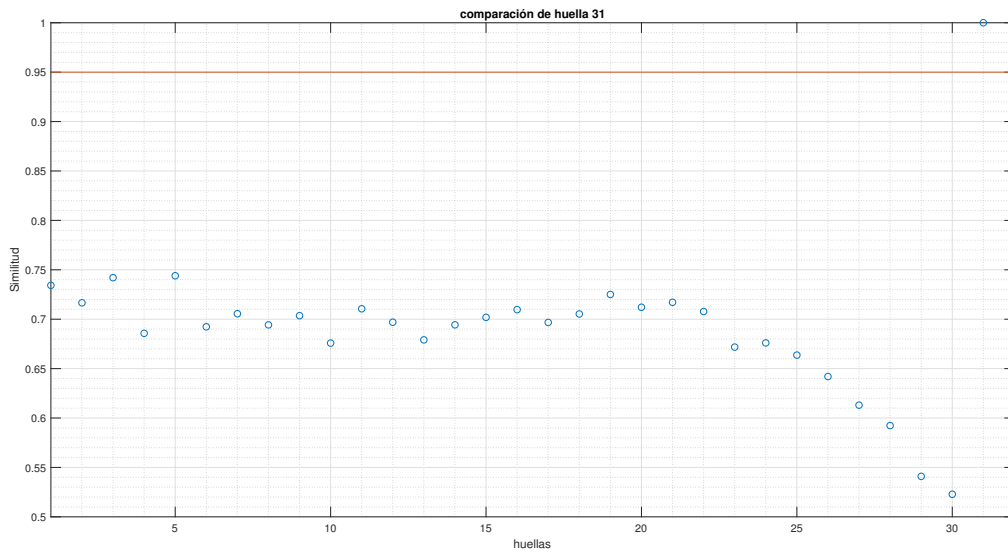


Figura 5.13: comparación de huella 31.

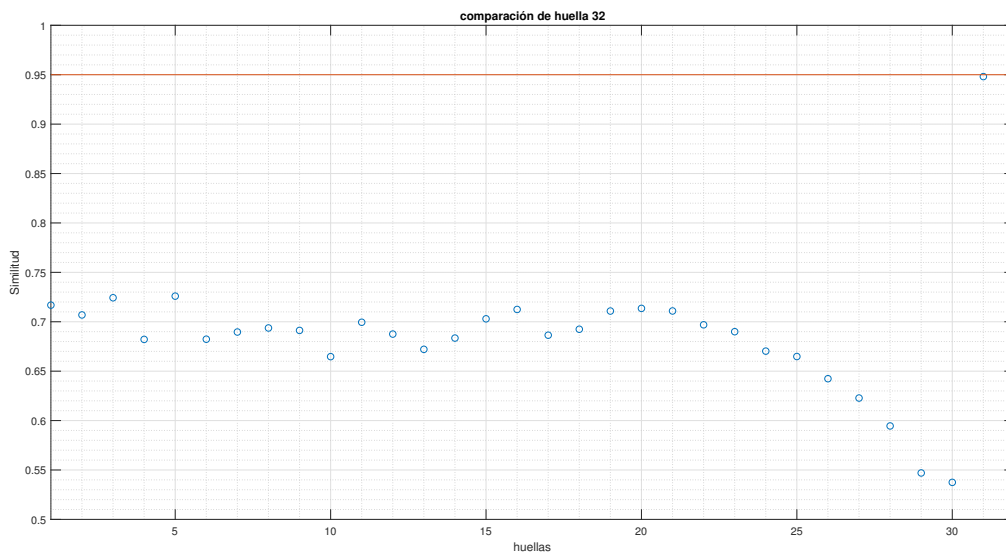


Figura 5.14: comparación de huella 32.

## 5.1. Discusión

- Cuando se hace la toma de muestra en un espacio controlado los porcentajes de similitud entre las muestras tienden a ser la mayoría de los casos un 90% de similitud, esto debido al fondo negro el cual limita los espacios de colores a la cámara si se toma en cuenta que el sensor no presenta una especificación de los bits de color por tratarse de una cámara sin especificaciones. si se observa las imágenes capturadas en un entorno no controlado como la reflexión de las huellas con las lentes, las uñas de los usuarios que pueden generar un error al hacer la compa-

---

ración, por ejemplo, en el caso de las huellas [5.9](#), [5.10](#), [5.11](#), [5.12](#), [5.13](#) y [5.14](#) superan el margen de error del 95 % demostrando su potencial en el dispositivo.

- Una variable no prevista como las uñas mostrará mayor detalle en los dedos además de las huellas dactilares, así se obtendría más información como el tono de piel, tamaño, forma, hidratación o si tiene alguna enfermedad capilar que impide usar las huellas dactilares para el uso de los sensores que requieran un contacto de estas.
- Con la huella [5.11](#) y [5.12](#) se demuestra que no importa la posición de captura de la imagen, el algoritmo es capaz de reconocer la huella con un alto porcentaje de similitud.
- Uno de los retos en la planificación de este trabajo fue el costo del dispositivo, esto con el objetivo de ser fácil de replicar junto con un software como valor agregado, debido a este planteamiento el trabajo conlleva a tener los compromisos de usar un sensor, el cual no se tiene ninguna información por parte del fabricante, esta accesibilidad del equipo no especializado da un margen para la implementación de otras técnicas para poder solventar los límites físicos.
- Las Pruebas del dispositivo en un área de iluminación natural, el astro sol como fuente de iluminación, permite ver la importancia de tener una intensidad lumínica controlada en el área de análisis, tal como se realiza la iluminación que se usa en microscopía, una iluminación uniforme y controlada para evitar daño a las muestras y saturación del sensor CMOS o CCD.



- 
- Un área de oportunidad del dispositivo es la optimización de la cámara con las lentes, debido a la poca información del sensor y las lentes integradas, se puede optar como usar una cámara réflex de lentes intercambiables donde se conocen el tamaño y respuesta del sensor para una implementación sistema óptico formando de imágenes, esto para tener la respuesta del sistema y el diseño y aplicación de un filtro específico con el fin de reducir el error de semejanza en la aplicación del algoritmo de comparación en las imágenes.

# Capítulo 6

## Conclusiones

El objetivo general se cumplió, pero con varias áreas de mejora, no se hizo la comparación de la misma persona con diferentes dedos de cada mano para observar las diferencias de porcentaje de similitud en las imágenes. El dispositivo al no tener optimizado la cámara con la lente tubular reduce la nitidez de las huellas dactilares con el cual perdemos la información necesaria para hacer la comparación con otra y saber las diferencias, con esta pérdida de información solo se tiene detalles como tamaño, color y forma.

### 6.1. Objetivo particular 1

Se cumplió el objetivo de hacer comparaciones de las imágenes con la correlación de Pearson, esto debido a la asociación línea que maneja dicha correlación, donde podemos interpretar como la superposición en términos físicos, haciéndolo de manera estadística como es este caso, se maneja una relación -1, 0 y 1, donde este trabajo solo manejamos correlaciones positivas.

---

Debido al uso de promedios y desviación estándar, se debe de normalizar las imanes y tomar en cuenta las escalas de grises en las comparaciones, debido que los resultados de la primera del dispositivo dan mucho margen de error por la manera que se ilumino las muestras.

## **6.2. Objetivo particular 2**

Se cumplió el objetivo pero los resultados de las imágenes no son útiles para tener las huellas dactilares definidas, esto debido al uso de la lente tubular para hacer la ampliación, al no estar optimizada con la cámara y la poca resolución de la misma no se logró tener nitidez. En futuros trabajos se propone usar una cámara sin los lentes para poder hacer el análisis de las lentes y poder optimizar las imágenes debido a los problemas de difracción cuando se agrega una lente en un sistema el cual no está pensado en distancias focales tan cortas.

# Capítulo 7

## Apendice

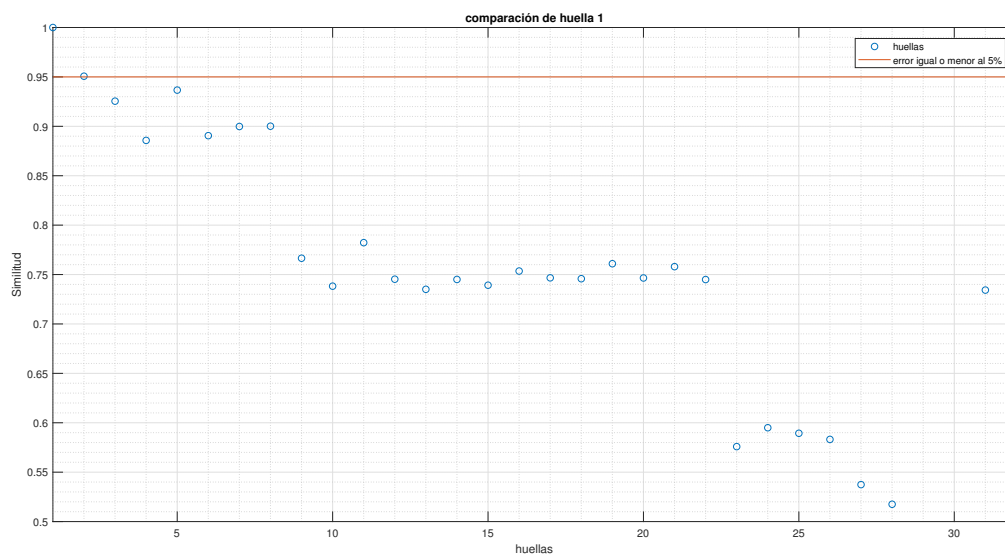


Figura 7.1: comparación de huella 1.

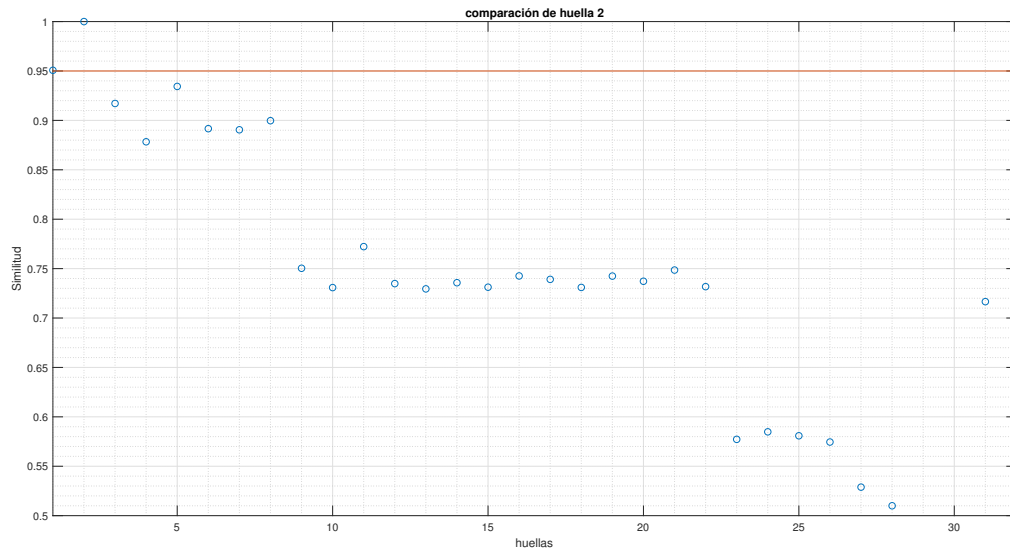


Figura 7.2: comparación de huella 2.

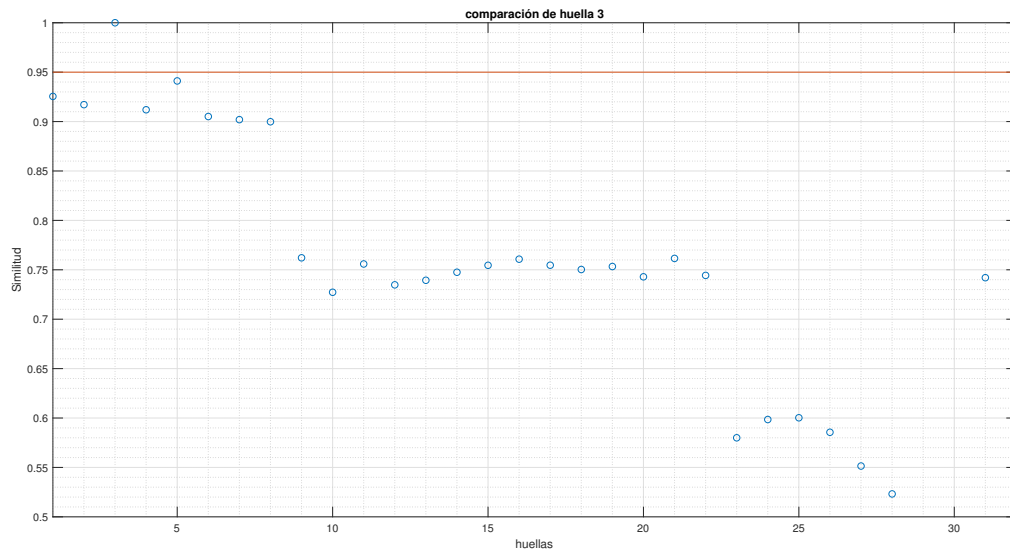


Figura 7.3: comparación de huella 3.

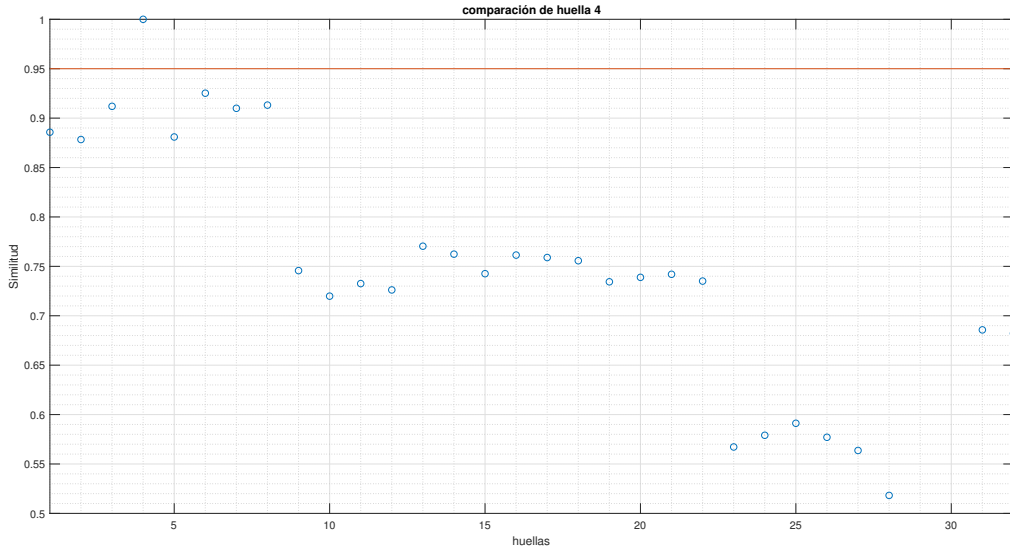


Figura 7.4: comparación de huella 4.

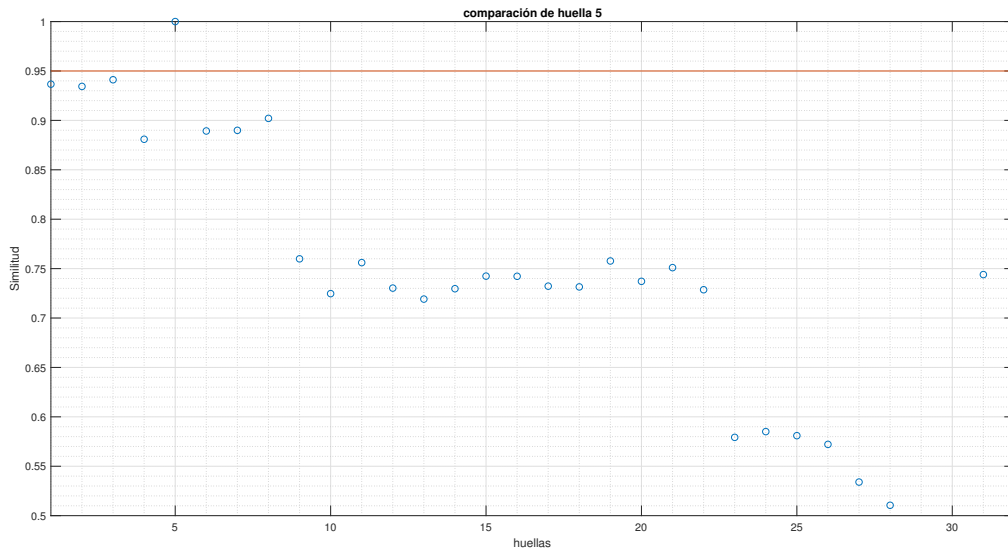


Figura 7.5: comparación de huella 5.

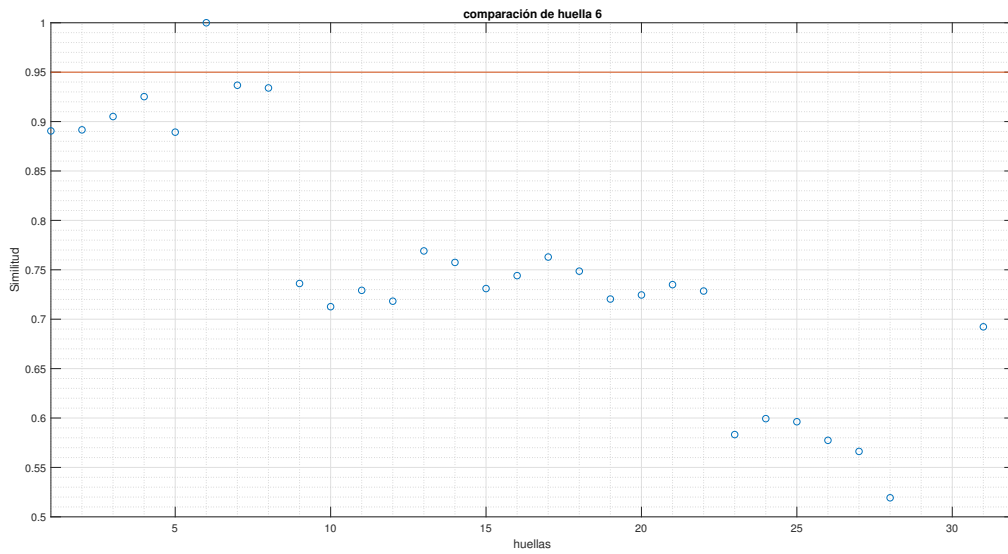


Figura 7.6: comparación de huella 6.

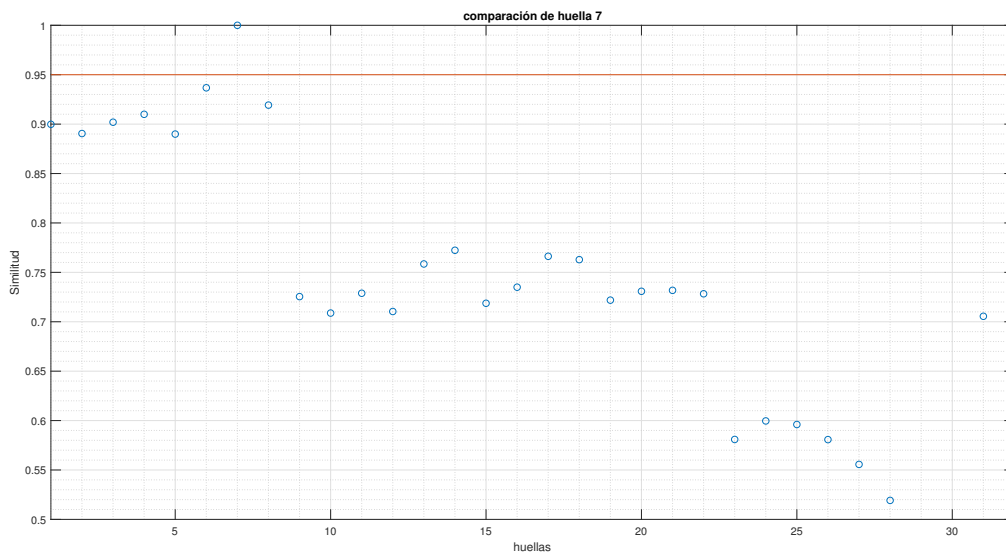


Figura 7.7: comparación de huella 7.



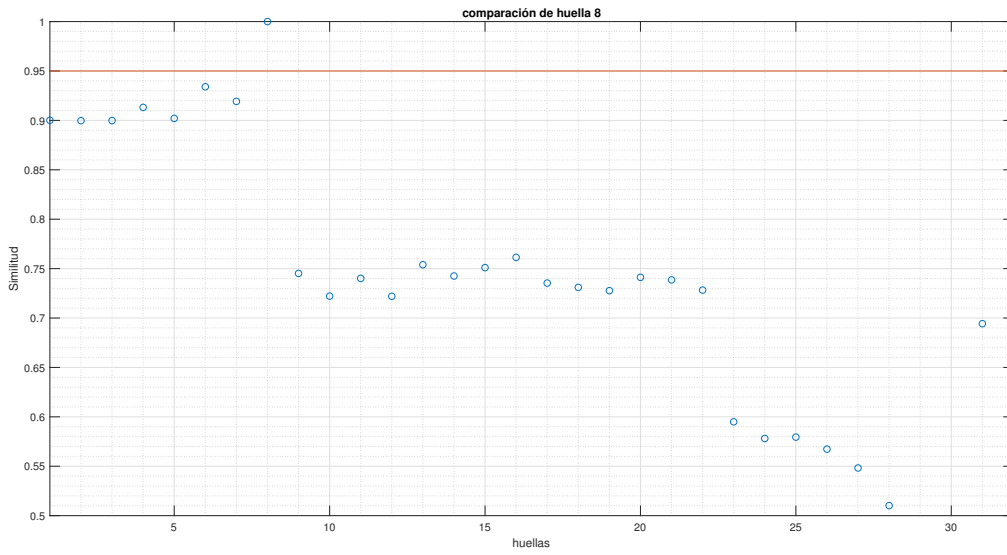


Figura 7.8: comparación de huella 8.

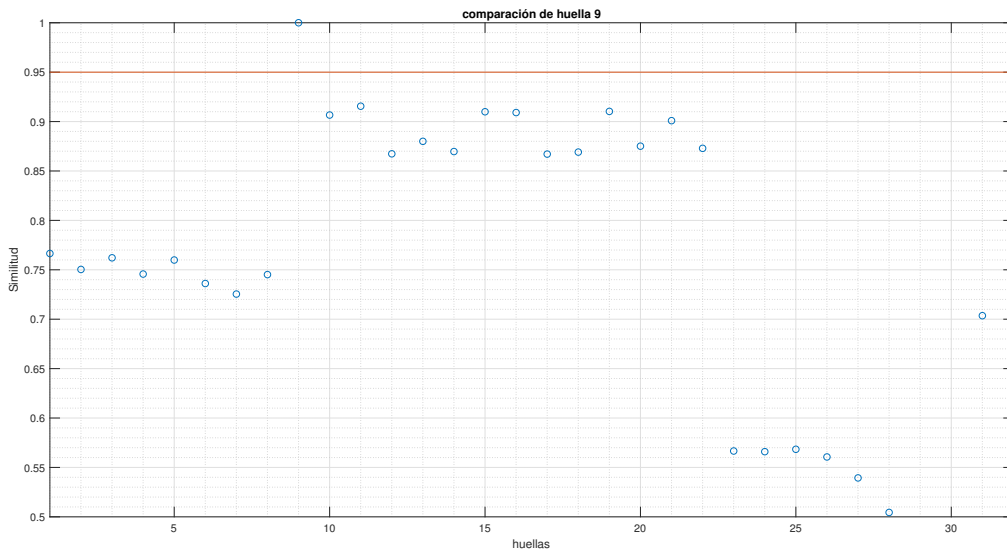


Figura 7.9: comparación de huella 9.

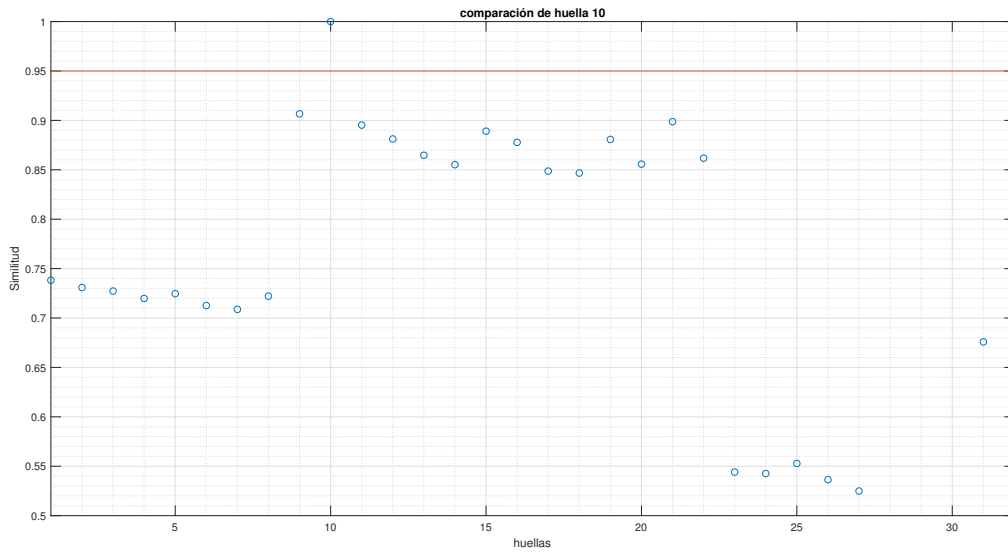


Figura 7.10: comparación de huella 10.

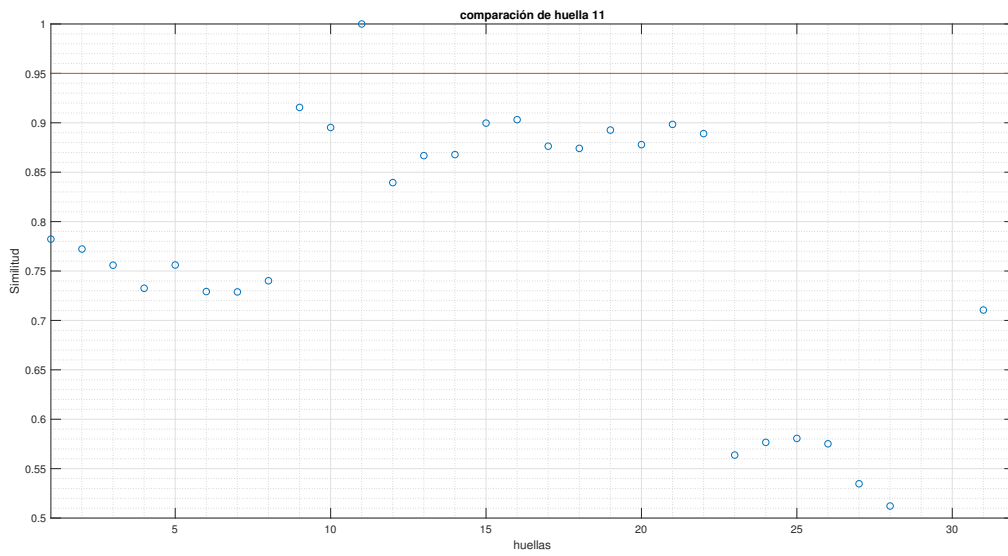


Figura 7.11: comparación de huella 11.

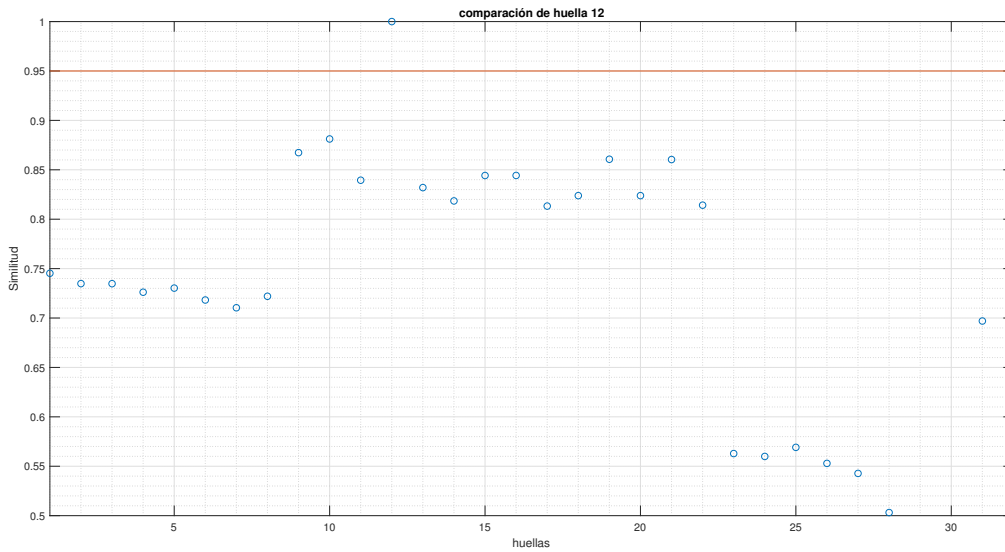


Figura 7.12: comparación de huella 12.

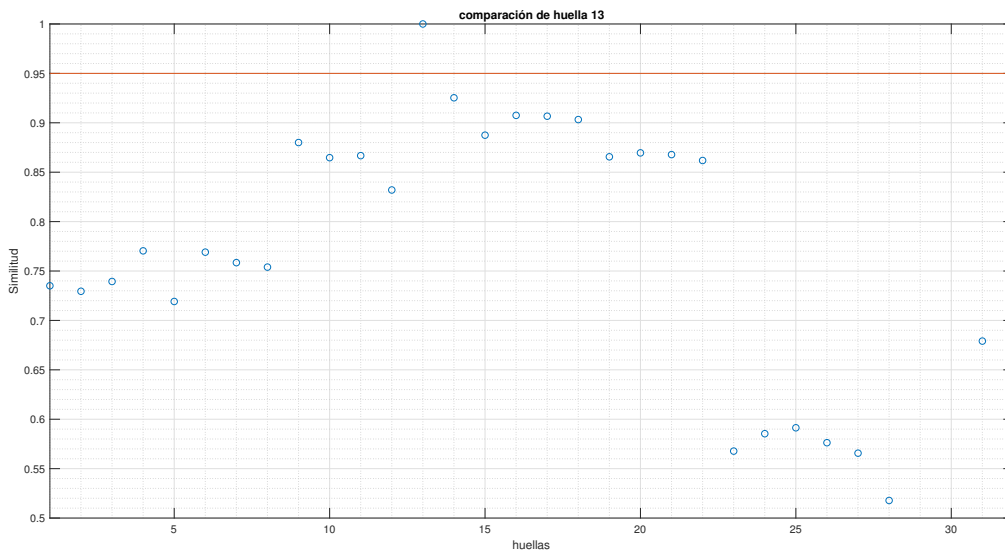


Figura 7.13: comparación de huella 13.

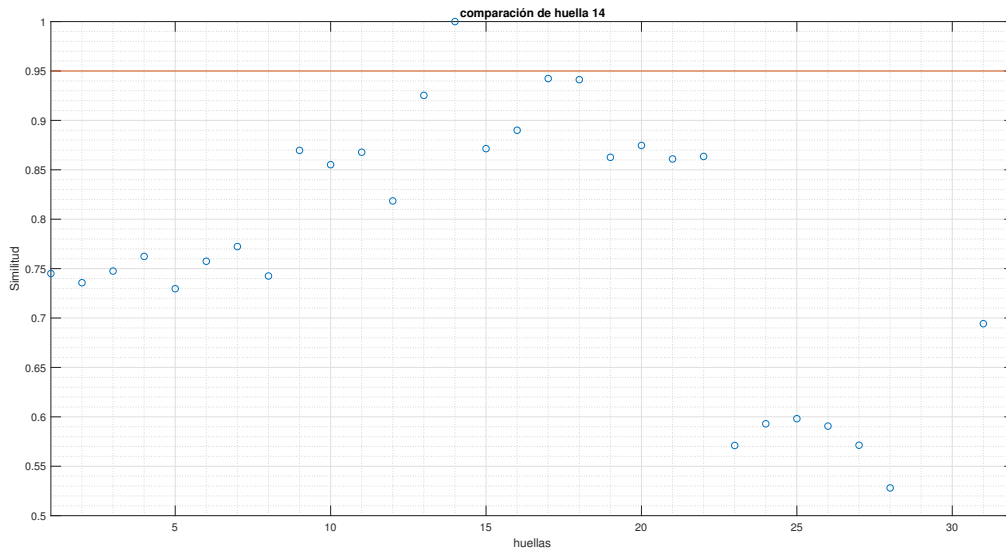


Figura 7.14: comparación de huella 14.

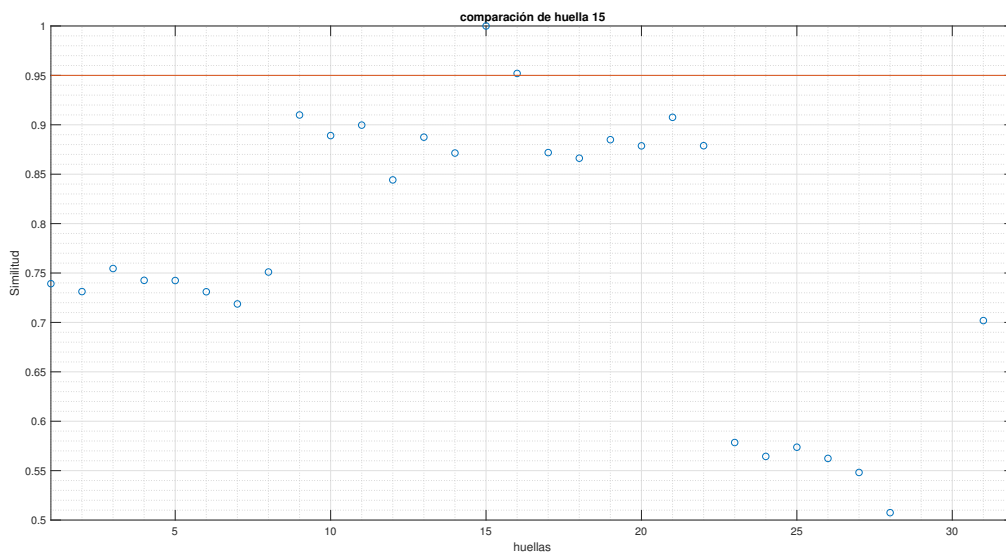


Figura 7.15: comparación de huella 15.

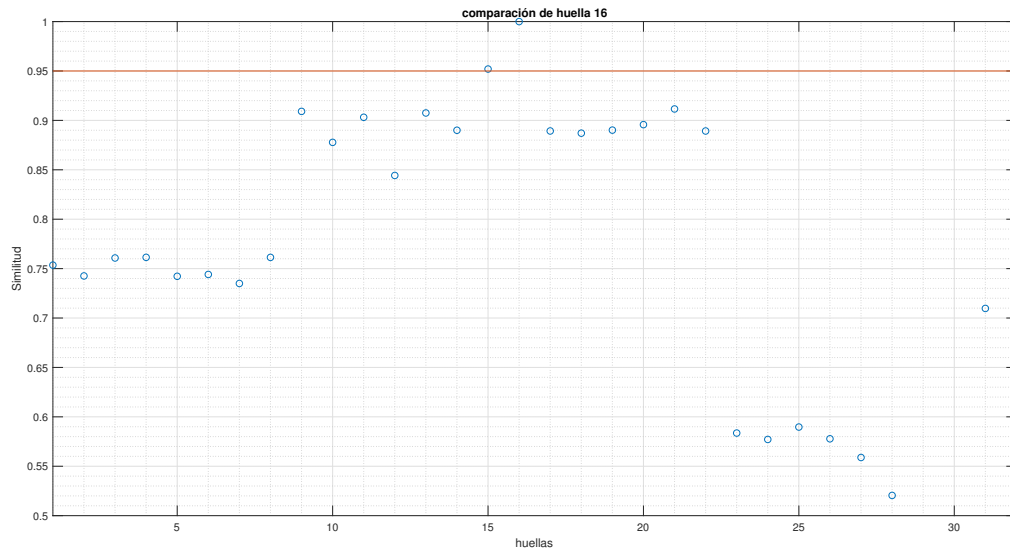


Figura 7.16: comparación de huella 16.

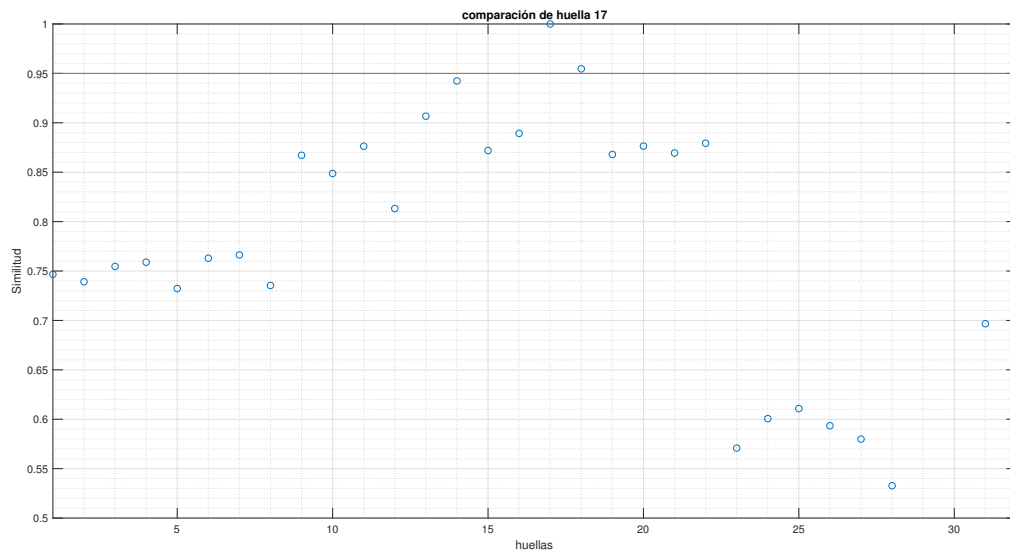


Figura 7.17: comparación de huella 17.

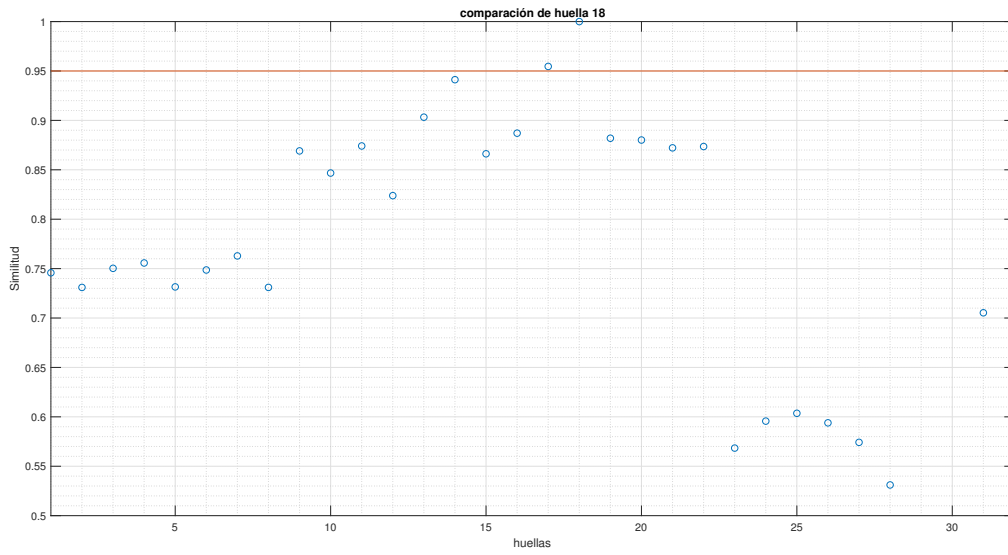


Figura 7.18: comparación de huella 18.

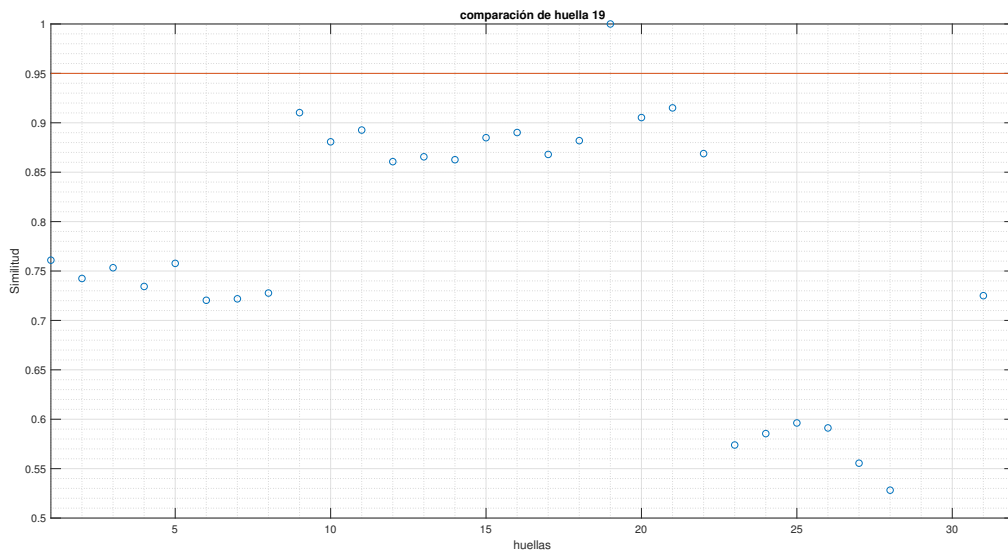


Figura 7.19: comparación de huella 19.

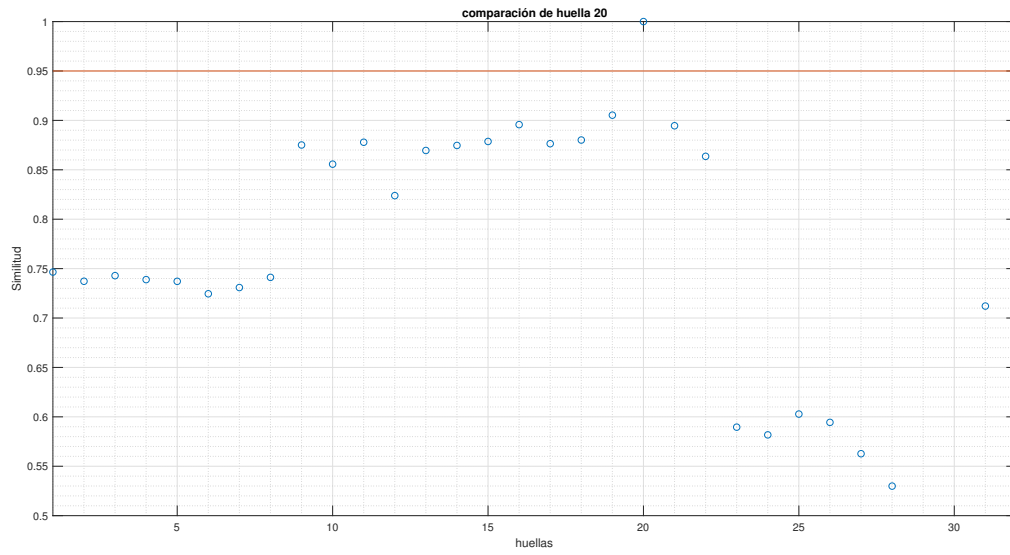


Figura 7.20: comparación de huella 20.

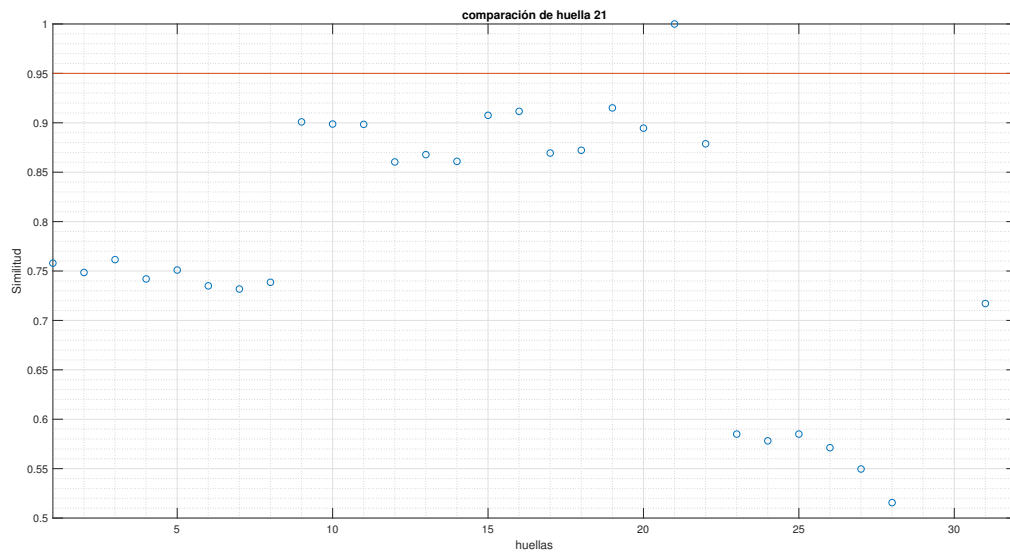


Figura 7.21: comparación de huella 21.

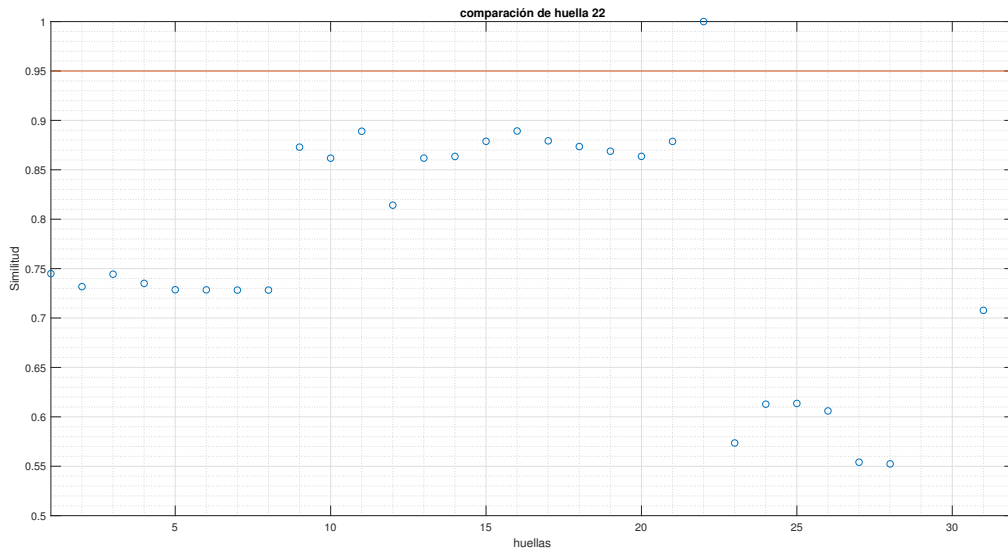


Figura 7.22: comparación de huella 22.

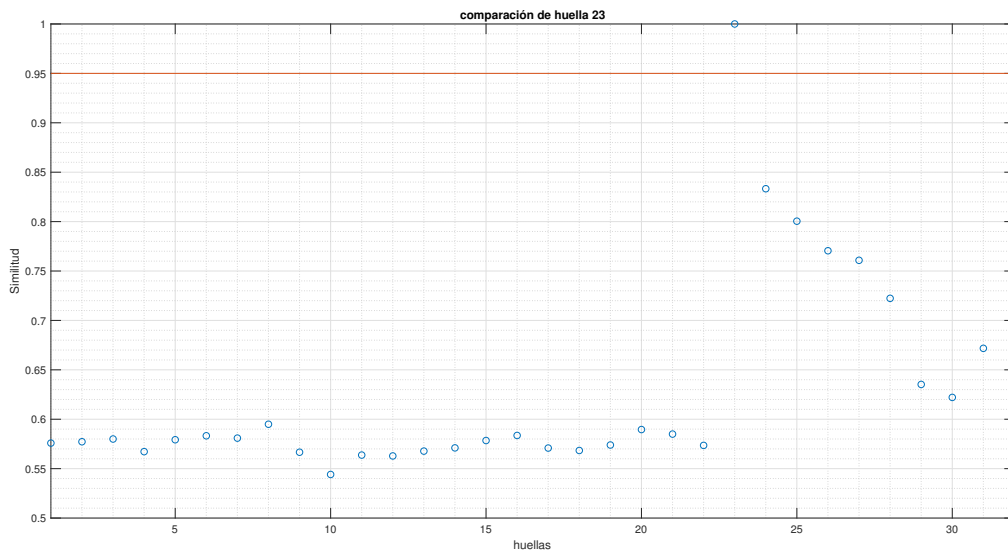


Figura 7.23: comparación de huella 23.



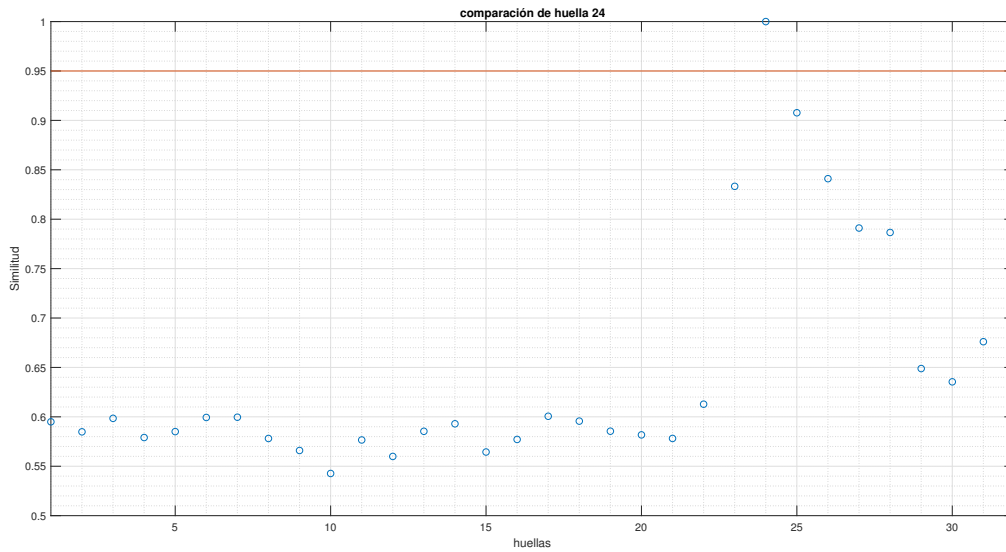


Figura 7.24: comparación de huella 24.

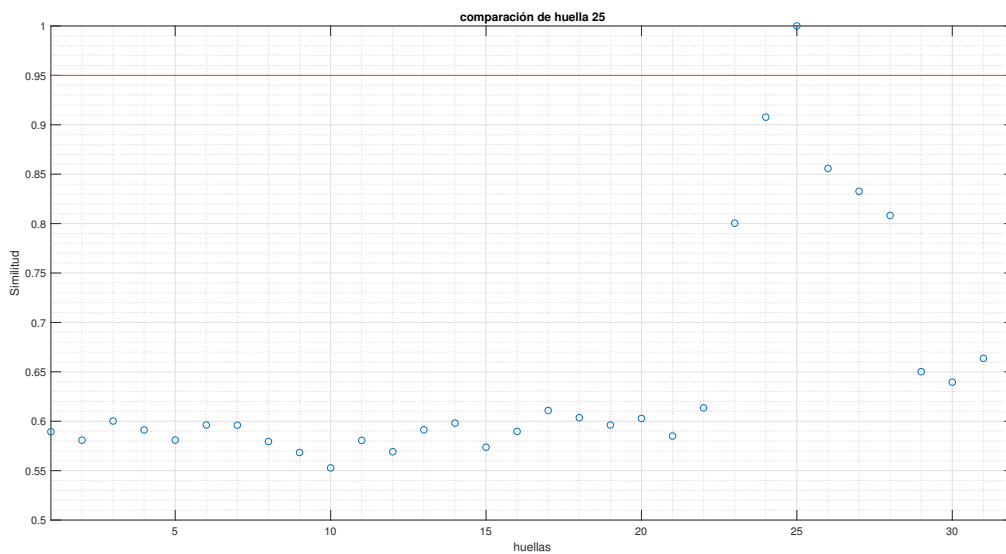


Figura 7.25: comparación de huella 25.

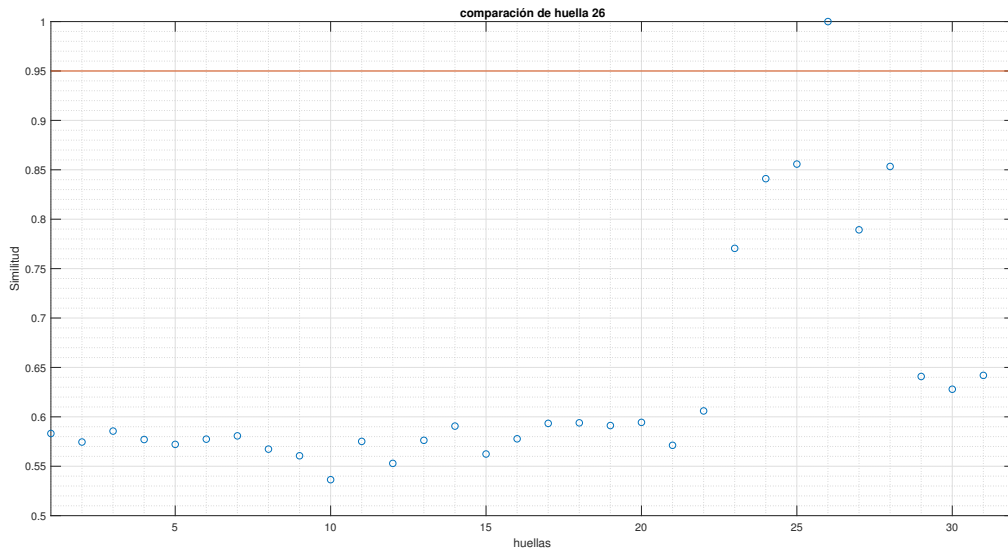


Figura 7.26: comparación de huella 26.

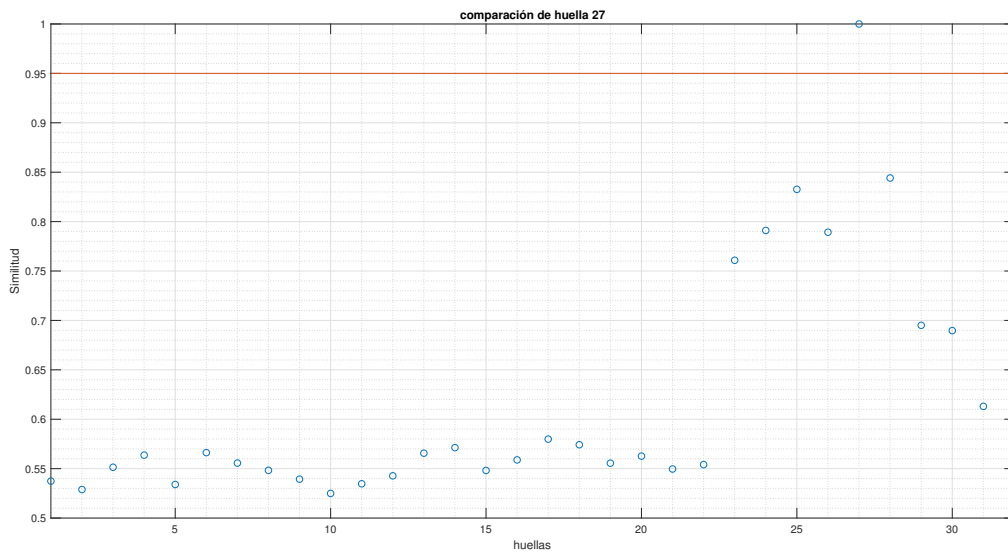


Figura 7.27: comparación de huella 27.

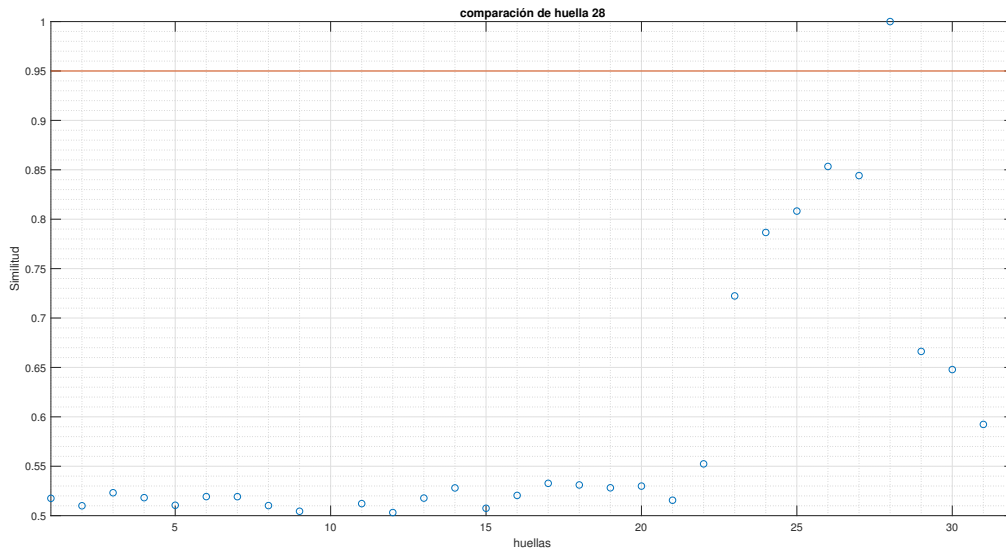


Figura 7.28: comparación de huella 28.

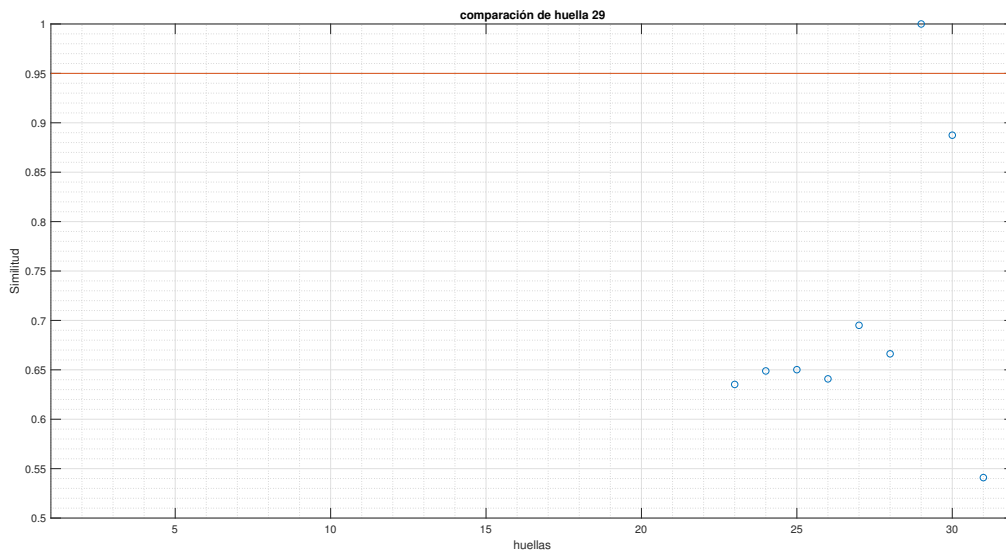


Figura 7.29: comparación de huella 29.

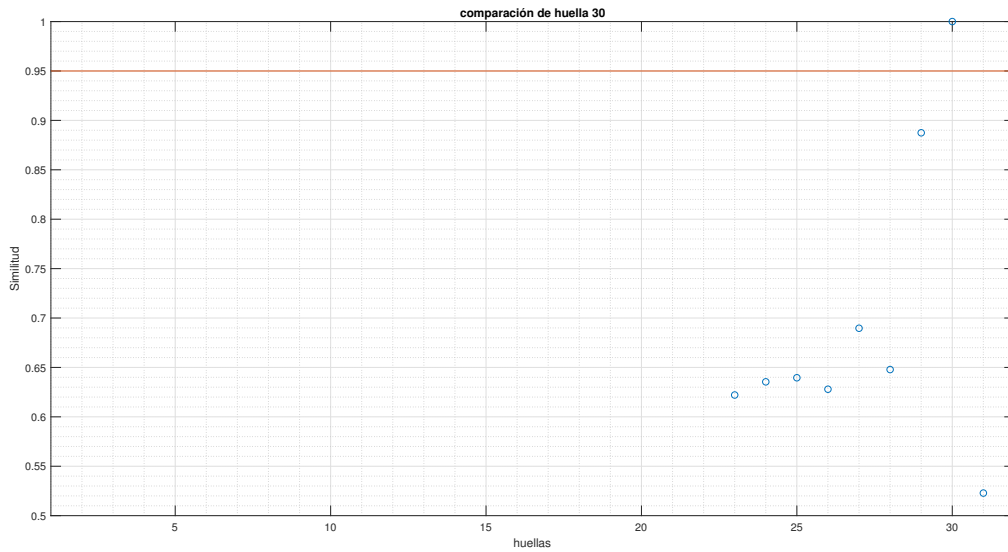


Figura 7.30: comparación de huella 30.

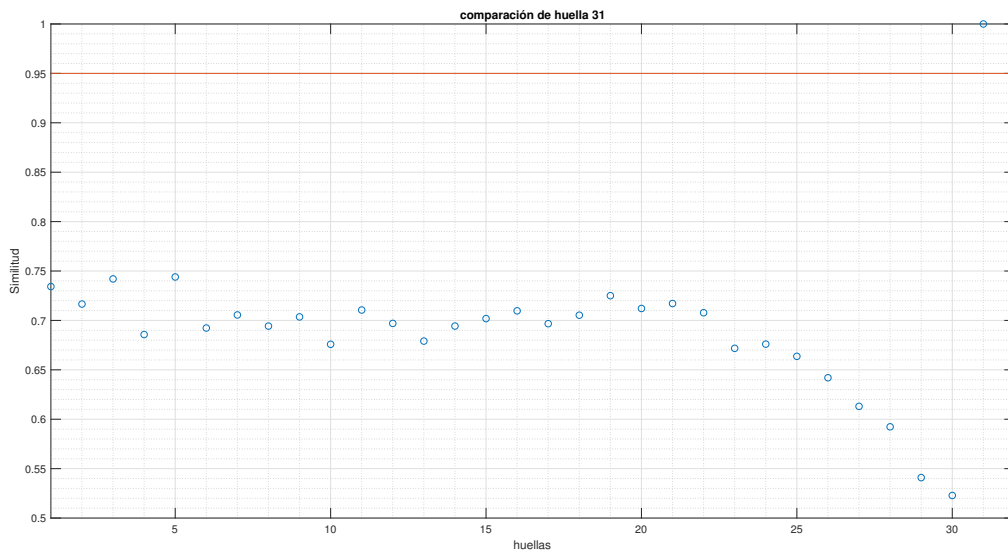


Figura 7.31: comparación de huella 31.

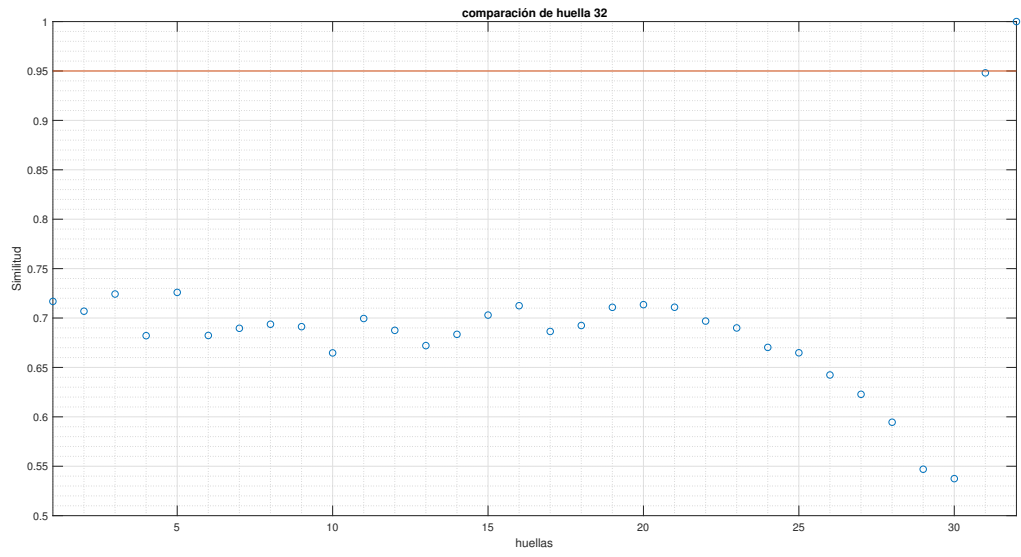


Figura 7.32: comparación de huella 32.

# Bibliografía

- [1] Herbert Gross, W. Singer, and M. Totzek. 1892.
- [2] Jain Arjun, Hong Lin, and Bolle Rudolf. On-line fingerprint verification. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 19:302–314, 05 1997.
- [3] Jain Arjun, Hong Lin, Pankanti S., and Bolle Ruud. An identity-authentication system using fingerprints. *Proceedings of the IEEE*, 85:1365 – 1388, 10 1997.
- [4] Jain Arjun, Prabhakar Salil, Hong Lin, and Pankanti S. Filterbank-based fingerprint matching. *iee trans image process. IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society*, 9:846–59, 02 2000.
- [5] Hong Lin, Wan Yifei, and Jain Arjun. Fingerprint image enhancement: Algorithm and performance evaluation. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 20:777 – 789, 09 1998.
- [6] Andrew Hrechak. Automated fingerprint recognition using structural matching. *Pattern Recognition*, 23:893–904, 12 1990.

- 
- [7] Sherlock Barry, Monro D.M., and Millard K. Fingerprint enhancement by directional fourier filtering. *Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings -*, 141:87 – 94, 05 1994.
- [8] Jannis Priesnitz, Rolf Huesmann, Christian Rathgeb, Nicolas Buchmann, and Christoph Busch. Mobile touchless fingerprint recognition: Implementation, performance and usability aspects, 2021.
- [9] Priyakanth Ramagiri, Katta Babu, and Nyshadam Kumar. *Two-Stage Enhancement of Dry Fingerprint Images Using Intensity Channel Division and Estimation of Local Ridge Orientation and Frequency*, pages 411–422. 01 2018.
- [10] Wilhelm Kirch, editor. *Pearson's Correlation Coefficient*, pages 1090–1091. Springer Netherlands, Dordrecht, 2008.
- [11] Malacara D. *óptica básica*. Ediciones Científicas Universitarias. FCE - Fondo de Cultura Económica.
- [12] Roger Easton. *Basic Principle of Image Science II*. Rochester Institute of Technology, 2005.
- [13] Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. Stanford University, United States of America, McGraw Hill companies INC, 1996.
- [14] Dowski, Edward, Cathey, and Wade. Extended depth of field through wave-front coding. *Applied optics*, 34:1859–66, 04 1995.

- 
- [15] Bradbum, Sara, Cathey, Wade Thomas, Jr., and Edward R. Dowsky. Realizations of focus invariance in optical-digital system with wave-front coding. *Applied Optics*, 36(35):9157–9166, December 1997.
- [16] González Rafael C. and [Woods] Richard E. Prentice Hall, second edition edition, 2002.
- [17] Prasad, Saradh, Torgersen, Todd, Pauca, V.Paul, Plemmons and Robert, and Gracht J. High-resolution imaging using integrated optical systems. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 14:67 – 74, 01 2004.
- [18] Prasad, S., Torgensen, T.C., Pauca, V.P., Plemmons, R.J., van der Gracht, and J. Engineering the pupil phase to improve image quality. volume 5108, pages 1–12, April 2003.
- [19] Castro Albertina and Ojeda-Castaneda Jorge. Asymmetric phase masks for extended depth of field. *Applied optics*, 43:3474–9, 07 2004.
- [20] Ojeda-Castaneda Jorge and Díaz A. High focal depth by quasibifocus. *Applied optics*, 27:4163–5, 10 1988.
- [21] Caron Nicolas and Sheng Yunlong. Polynomial phase masks for extending the depth of field of a microscope. *Applied optics*, 47:E39–43, 09 2008.
- [22] Prasad S., Pauca V. P., Plemmons R. J., Torgersen T. C., and van der Gracht J. Pupil-phase optimization for extended-focus, aberration-corrected imaging system. volume 5559, pages 335–345, 2004.



- 
- [23] Yuan Shuai and Preza Chrysanthe. Point-spread function engineering to reduce the impact of spherical aberration on 3d computational fluorescence microscopy imaging. *Optics express*, 19:23298–314, 11 2011.
- [24] Beckers I.E., Albrecht S., Gierlak M., and Leverenz E. Pupil phase mask optimization for extended depth of field microscopy, March 2013.
- [25] Palillero-Sandoval Omar, Aguilar J. Félix, and Berriel-Valdos L. R. Numerical study of the performance of a cubic phase plate in the microscope using the quasi-point source concept, March 2013.
- [26] Brenner K-H, Lohmann AW, and Ojeda-Castaneda Jorge. The ambiguity function as a polar display of the of. *Optics Communications*, 44:323–326, 01 1983.
- [27] Bastiaans Martin. The wigner distribution junction applied to optical signals and system. *Optics Communications*, 25:26–30, 04 1978.
- [28] Ojeda-Castaneda Jorge, Berriel-Valdos Luís Raúl, and Montes Emma. Ambiguity function as a design tool for high focal depth. *Applied optics*, 27:790–5, 02 1988.
- [29] Weinstein W. Images of incoherently illuminated bright and opaque disks. *Journal of The Optical Society of America*, 45, 12 1955.
- [30] Gross Herbert, Singer W., and Totzek M. 2005.
- [31] Orlando Guerrero I. J., Aguilar J. Félix, Berriel Valdos L. R., and Landgrave J. E. A. Wigner distribution function of the images of quasi-point

- 
- source in the vicinity of the focal plane. volume 992, pages 1106–1110, 2008.
- [32] Mejía-Romero Sergio, Berriel-Valdos L. R., Aguilar J. Félix, Orlando Guerrero I. J., and Landgrave J. E. A. Discrete wigner distribution function applied on image of quasi-point source objects in coherent illumination. volume 8011, pages 801183–1 – 801183–8, November 2011.
- [33] Castelman Kenneth R. Prentice Hall, 1996.
- [34] Huiqing Chen and Gang Dong. Fingerprint image enhancement by diffusion processes. pages 297–300, 10 2006.
- [35] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, and S. Hamid Nawab. *Signals And Systems*. Massachusetts Institute of Technology, Prentice-Hall, Inc., second edition, 1997.
- [36] Eugene Hecht. *Optica*. Adelphy University, Madrid, Addison Wesley Iberoamericana S. A, 2000.
- [37] H. Hopkins. The frequency response of a defocused optical system. *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 231:91–103, 07 1955.
- [38] Olarte Omar, Licea-Rodriguez Jacob, Palero Jonathan, Gualda Emilio, Artigas David, Mayer Jürgen, Swoger Jim, Sharpe James, Rocha-Mendoza Israel, Rangel-Rojo Raul, and Loza-Alvarez Pablo. Image formation by linear and nonlinear digital scanned light-sheet fluorescence microscopy with gaussian and bessel beam profiles. *Biomedical optics express*, 3:1492–505, 07 2012.

- 
- [39] Palillero-Sandoval Omar, Aguilar J, and Berriel-Valdos Luís Raúl. Phase mask coded with the superposition of four zernike polynomials for extending the depth of field in an imaging system. *Applied optics*, 53:4033–4038, 06 2014.
- [40] Peter A. Santi. Light Sheet Microscopy, Review. *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 2(59):129–138, November 2014.
- [41] Huisken Jan and Stainier Didier. Selective plane illumination microscopy techniques in development biology. *Development (Cambridge, England)*, 136:1963–75, 07 2009.
- [42] Krzic Uros, Günther Stefan, Hufnagel Lars, Von Gegerfelt Dag, Karlsson Håkan, Illy Elizabeth, and Hellström Jonas. Light sheet fluorescence microscopy (spim) and laser excitation in orange for imaging of live organisms. *Photonik International*, 2011:41, 11 2011.
- [43] Mino M and Okano Y. Improvement in the otf of a defocused optical system through the use of shaded apertures. *Applied optics*, 10:2219–25, 10 1971.
- [44] Ojeda-Castaneda Jorge, Berriel-Valdos Luís Raúl, and Montes E. Spatial filter for increasing the depth of focus. *Optics letters*, 10:520–2, 12 1985.
- [45] Ojeda-Castaneda Jorge and Berriel-Valdos Luís Raúl. Arbitrarily high focal depth with finite apertures. *Optics letters*, 13:183–5, 04 1988.
- [46] Ojeda-Castaneda Jorge, Tepichin-Rodriguez E., and Diaz A. Arbitrary high focal depth with a quasioptimum real and positive transmittance apodizer. *Applied optics*, 28:2666–70, 07 1989.

- 
- [47] Ojeda-Castaneda Jorge, Andrés Pedro, and Diaz A. Objects that exhibit high focal depth. *Optics letters*, 11:267, 06 1986.
- [48] K. K.Sharma. *Optics, Principles and Applications*. Elsevier Inc., 2006.
- [49] H. H. Hopkins. *Wave theory of Aberrations*. Oxford University press, Oxford, 1950.
- [50] James C. Wyant. *Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology*. Optical Science Center, University of Arizona, 1992.
- [51] Max Born and Emily Wolf. *Principles of Optics**Principles of Optics*. Pergamon Press, 1980.
- [52] James B. Pawley. *HANDBOOK OF BIOLOGICAL CONFOCAL MICROSCOPY*. Springer, 2006.
- [53] Omar Palillero-Sandoval and Omar E.Olarte and Jordi Andilla and David Artigas and L. R.Berriel-Valdos, J. Felix Aguilar and Pablo Loza-Alvarez. Phase masks for extended-depth-of-field light-sheet microscopy, September 2014.
- [54] Omar E. Olarte and Omar Palillero-Sandoval and Jordi Andilla and David Artigas and L. R.Berriel-Valdos, J. Felix Aguilar and Pablo Loza-Alvarez. A wavefront-coding light-sheet microscope for biological imaging, September 2014.
- [55] Omar E. Olarte. Development of novel imaging tools for selected biomedical applications, 2014.

- 
- [56] V. N.Mahajan. *Optical shop testing, Zernike polynomials wavefront fitting*. Wiley, 2007.
- [57] WELFORD W. Use of annular apertures to increase focal depth. *Journal of The Optical Society of America*, 50, 08 1960.
- [58] Courtney-Pratt J and Gregory R. Microscope with enhanced depth of field and 3-d capability. *Applied optics*, 12:2509–19, 10 1973.
- [59] Sheppard Colin, D.K.Hamilton, and I.J. Cox. Optical microscopy with extended depth of field. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and physical sciences*, 387:171–186, 05 1983.
- [60] Edward R.Dowski Jr and W. Thomas Cathey. USA patent no. 7218448 extended depth of field optical system.